

УДК 528.2:629.78

ББК 26.1

Г34

Генике А.А., Побединский Г.Г.

**Г34**      Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Картгеоцентр, 2004. — 355 с.: ил.

ISBN 5-86066-063-4

Рассмотрены основные принципы работы спутниковых систем координатных определений GPS и ГЛОНАСС. Описан комплекс вопросов, связанных с методами измерений и вычислений, характерных для геодезии высокоточных значений координат, а также используемых в спутниковых технологиях систем координат и времени, их преобразование. Проанализированы основные источники ошибок и методы ослабления их влияния. Изложены особенности проектирования геодезических сетей, создаваемых спутниковыми методами, включая редуцирование и уравнивание таких сетей. Повышенное внимание уделено вопросам применения рассматриваемых спутниковых систем при решении широкого круга геодезических задач. Отмечены перспективы дальнейшего развития спутниковых методов.

Книга рассчитана на специалистов, занимающихся вопросами использования спутниковых систем в геодезии, геодинамике и землеустройстве. Она представляет интерес для преподавателей, студентов и аспирантов учебных заведений геодезических и землеустроительных специальностей.

ISBN 5-86066-063-4

© Предисловие. В.П. Савиных, 2004

© А.А. Генике, Г.Г. Побединский, 2004

© Оформление. Картгеоцентр, 2004

## Предисловие ко 2-му изданию

За последнее время неузнаваемо изменились технические средства измерений – спутниковые геодезические и навигационные приемники. В связи с этим появились публикации по вопросам устройства и эксплуатации спутниковых приемников, выпущены отдельные нормативно-технические акты, регламентирующие их использование. Но можно по-прежнему отметить, что нормативно-технической и учебно-методической литературы по вопросам применения спутниковых технологий выпущено недостаточно, и это представляет серьезную проблему для современной геодезии.

Практическое применение приемников GPS различными предприятиями при отсутствии нормативно-технических документов привело, с одной стороны, к неоправданному использованию высокочастотных двухчастотных приемников для создания съемочного обоснования и других низкоточных работ, а с другой стороны, к созданию ответственных геодезических построений, например, городских геодезических сетей по упрощенной технологии. Отсутствие учебно-методической литературы и крайне ограниченные тиражи научных монографий по вопросам геодезического использования современных спутниковых систем затрудняют подготовку специалистов по данному направлению в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) и в других вузах, занимающихся подготовкой специалистов в области геодезии, землеустройства, изысканий для проектирования и строительства сооружений.

Спутниковая геодезия, ориентированная на выполнение точных геодезических измерений на земной поверхности с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ), возникла в конце 50-х годов, непосредственно после запуска первых ИСЗ.

Период до 1970 г. характеризовался развитием основополагающих методов спутниковых наблюдений, в основном фотографирования спутников с помощью специально разработанных камер, а также методов вычисления и анализа спутниковых орбит. Тогда же были предприняты первые попытки построения глобальных геодезических сетей с использованием пассивных ИСЗ. Значительное внимание было уделено при этом изучению глобального гравитационного поля Земли.

Период времени с 1970 по 1980 год отличался разработкой таких новых средств и методов наблюдений, как лазерные методы измерения расстояний до спутников и спутниковая альтиметрия. Большим научным и практическим достижением являются разработанные в то время доплеровские спутниковые системы Цикада (Советский Союз) и Транзит (США). Повышение точности спутниковых измерений открыло возможность более детального изучения скорости вращения Земли, закономерностей движения ее полюсов, деформаций земной коры и других параметров.

С 1980 года идет широкомасштабное практическое использование спутниковых технологий в геодезии, геодинاميке, топографии, землеустройстве и других смежных областях. Это связано прежде всего с дальнейшим совершенствованием радионавигационных систем, выразившимся в использовании более совершенных методов измерения, более удачных параметров орбит, целого ряда других технических решений, а также с общим развитием компьютерных технологий, позволившим создать высокоавтоматизированные полевые геодезические приборы. Созданные на данном этапе многофункциональные радионавигационные системы ГЛОНАСС (Советский Союз) и Навстар (СИТА) позволили реализовать миллиметровый уровень точности при измерении до тысячи и более километров.

Московский государственный университет геодезии и картографии и Верхневолжское аэрогеодезическое предприятие сотрудничают в области использования спутниковых технологий с начала 90-х годов. За последнее время были выполнены большие объемы производственных работ, а также приобретен опыт спутниковых геодезических измерений для различных целей: от создания опорных геодезических сетей до топографических съемок в кинематическом режиме. Более чем десятилетний опыт в создании и реконструкции городских геодезических сетей выявил все преимущества использования спутниковых систем по сравнению с традиционными методами.

В соответствии с «Программой разработки новых и переработки ранее утвержденных нормативно-технических актов и нормативных документов по производству на период 1999–2000 годы», утвержденной руководителем Роскартографии, в 2000–2001 годах ведущими специалистами и учеными МИИГАиК, Верхневолжского и Московского АГП был разработан проект «Инструкции по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS». Проект подготовлен на основе научного и практического опыта построения и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем в городах Моск-

ве, Владимире, Нижнем Новгороде, Туле, Костроме, Саранске, Рузевке, Вязниках, Павлове, Саратове, Тольятти, Сызрани.

В настоящей книге рассмотрены общие принципы функционирования современных радиоэлектронных спутниковых систем определения местоположения. Рассмотрены методы измерений и вычислений для получения координат с высокой точностью (от 10 мм до 1,0 м). Приведено описание используемых в спутниковых технологиях систем координат и времени, их преобразование.

На основе практических работ по метрологической аттестации различных спутниковых приемников проанализированы основные источники ошибок и методы ослабления их влияния. На примере использования спутниковых приемников на производственных объектах рассмотрены процессы проектирования и организации измерений, предварительной и окончательной обработки, включая редуцирование и уравнивание геодезических сетей.

Рассмотрены особенности решения различных геодезических задач на основе использования спутниковых технологий, а также перспективы дальнейшего их развития в геодезии и навигации. При изложении материала учтен опыт прочтения курса лекций «Глобальные спутниковые системы определения местоположения» для студентов МИИГАиКА.

Книга может быть полезна специалистам, занимающимся вопросами использования спутниковых систем в геодезии и землеустройстве, а также студентам и аспирантам геодезических и землеустроительных специальностей.

Ректор Московского государственного университета  
геодезии и картографии, доктор технических наук,  
профессор В.П. Савиных



## Введение

Исторически спутниковая геодезия, ориентированная на выполнение точных геодезических измерений на земной поверхности с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ), возникла в конце 50-х годов, т.е. вскоре после запуска первых ИСЗ. За прошедший более чем 40-летний период эта область геодезии непрерывно совершенствовалась, пройдя различные стадии развития, которые условно можно разделить на следующие три периода [31, 70, 82]:

*1. Период с 1958 по 1970 гг.* Этот период характеризовался развитием основополагающих методов спутниковых наблюдений, включающих в себя методы вычисления и анализа спутниковых орбит. При их реализации использовались, в основном, методы фотографирования спутников с помощью специально разработанных камер. На основе выполненных исследований были предприняты первые попытки построения глобальных геодезических сетей с использованием спутниковых технологий, создания усовершенствованных моделей Земли (модели разработанные Смитсоновской астрофизической обсерваторией и Годдардским центром космических полетов). Значительное внимание было уделено при этом глобальным изучением гравитационного поля Земли.

*2. Период с 1970 по 1980 гг.* Основное внимание в течение данного периода было уделено разработке различных научных проектов. На их основе были созданы такие новые методы наблюдений, как лазерные методы измерения расстояний до спутников и спутниковая альтиметрия. Особого внимания заслуживают разработанные в это время доплеровские спутниковые системы Транзит (США) и Цикада (Советский Союз). За этот период выполнены глобальные определения формы геоида, сопровождающиеся определениями координат многочисленных точек, находящихся на земной поверхности. Проведенные исследования позволили уточнить модельное представление Земли. Повышение уровня точности спутниковых измерений открыло возможность более детального изучения скорости вращения Земли, закономерностей движения ее полюсов, деформаций земной коры и других параметров.

*3. Период с 1980 г. по настоящее время.* Последний период ознаменовался широкомасштабным использованием спутниковых техноло-

гий в геодезии, геодинاميке, топографии и других смежных областях. Отмеченный прогресс связан, прежде всего, с дальнейшим усовершенствованием радионавигационных систем, выразившимся в использовании более совершенных методов измерения величин, на основе которых вычисляются интересующие нас координаты точек на земной поверхности, более удачных параметров орбит, а также целого ряда других технических решений. В результате были созданы такие многофункциональные радионавигационные системы, как Навстар (США) и ГЛОНАСС (Советский Союз). Применительно к геодезии особого внимания заслуживают реализованные в системе Навстар (GPS) методы фазовых измерений, базирующиеся на использовании несущих колебаний, которые позволили реализовать сантиметровой (а в отдельных случаях и миллиметровой) уровень точности при измерении базисных линий длиной от нескольких метров до тысячи и более километров.

При внедрении спутниковых технологий в топографо-геодезическое производство резко изменились не только организационные и технические принципы проведения полевых и камеральных работ, но и многие другие основополагающие принципы, что дает основание говорить о революционных преобразованиях в геодезии, связанных со спутниковыми методами геодезических измерений на земной поверхности. Сущность таких революционных преобразований состоит в следующем:

1. При использовании традиционных наземных геодезических методов неизбежно возникала потребность обеспечения прямой видимости между смежными определяемыми пунктами, что, в свою очередь, приводило к необходимости выбора пунктов на командных высотах местности, доступ к которым был далеко не всегда удобным, а также к строительству дорогостоящих геодезических наружных сигналов. Но даже при выполнении этих требований максимальное удаление между смежными пунктами ограничивалось, в лучшем случае, расстояниями в несколько десятков километров. Единичные измерения отдельных линий порядка 100 км на Камчатском геодинاميческом полигоне были редкими исключениями [13]. Современная спутниковая технология открыла возможность проведения высокоточных геодезических измерений при отсутствии прямой видимости между пунктами, в результате чего отпала необходимость постройки наружных сигналов и выбора пунктов на различного рода возвышениях. При этом длина измеряемых базисных линий столь жестко не лимитируется и может достигать тысячи и более километров.

2. При выполнении большинства геодезических измерений традиционными методами требуется не только прямая, но и оптическая

видимость между пунктами, следствием чего является необходимость выбора хороших условий видимости и соответствующего времени суток, что снижает производительность полевых работ. Спутниковые методы определения местоположения являются, по существу, всепогодными, в результате чего измерения можно производить при любой погоде, в любое время суток и в любое время года. При этом производительность труда полевых бригад резко возрастает.

3. Геодезические измерения, базирующиеся на традиционных методах, приходится производить в высокдинамичных неустойчивых приземных слоях атмосферы. В результате этого внешние условия оказываются, во многих случаях, основным источником ошибок, ограничивающим предельную точность геодезических измерений, сокращая тем самым круг задач, решаемых геодезическими методами. При использовании спутниковых технологий влияние атмосферы удается уменьшить в десятки раз, что позволяет повысить предельную точность измерений на один — два порядка.

4. Подавляющее большинство традиционных геодезических методов приспособлено для выполнения измерений в статике, т.е. между неподвижными пунктами, что негативно сказывается на развитии динамических методов, ориентированных на выполнение геодезических измерений в движении (морская геодезия, аэрофотосъемка и др.).

5. При изучении различного рода деформаций, возникающих в земной коре, крупных инженерных сооружениях и на других объектах, появляется необходимость выполнения достаточно частых (а иногда и непрерывных во времени) измерений. Традиционные геодезические методы плохо приспособлены к организации таких мониторинговых измерений на объектах больших размеров. Что касается спутниковой аппаратуры потребителя, то она без особых затруднений позволяет производить такие измерения.

6. Развиваемые в течение многих лет геодезические методы были ориентированы на раздельное создание плановых и высотных сетей, что обусловлено недостаточной универсальностью традиционных методов, не позволяющих одновременно и с необходимой точностью определять все три координаты пунктов. Спутниковые технологии открывают такую возможность, в результате чего целесообразность раздельного построения плановых и высотных сетей становится, в большинстве случаев, необоснованной.

7. Традиционно используемые методы геодезических измерений характеризуются сравнительно низким уровнем автоматизации, что не только снижает производительность труда, но и приводит, в отдельных случаях, к появлению дополнительных ошибок измерений, обусловленных субъективными факторами. При спутниковых измерениях роль на-

блюдателя резко уменьшается, так как практически весь процесс измерений и последующих вычислений полностью автоматизирован.

Накопленный к настоящему времени зарубежный и отечественный опыт работы с современной спутниковой аппаратурой GPS и ГЛОНАСС свидетельствует о том, что в результате перечисленных выше позитивных сторон спутниковой технологии удается в 10 — 15 раз поднять производительность труда, существенно снизить затраты на выполнение различных видов топографо-геодезических работ и повысить при этом предельную точность основных геодезических измерений. Вместе с тем успешная реализация преимуществ спутниковых методов местоопределения во многом зависит от того, насколько успешно освоен обслуживающим персоналом весь комплекс вопросов, связанных как с особенностями работы используемой при этом аппаратуры, так и с характерной для нее технологией.

Следует заметить, что за последние годы за рубежом спутниковым системам GPS и ГЛОНАСС и методам их геодезического использования посвящено достаточно много публикаций. Вместе с тем в нашей стране ощущается явный недостаток информации по затронутой проблеме. Исходя из этого, в настоящей публикации предпринята попытка систематизированного изложения всей совокупности вопросов, связанных с геодезическим использованием спутниковых методов определения местоположения. При этом основное внимание уделено глобальным спутниковым системам позиционирования GPS и ГЛОНАСС, на базе которых к настоящему времени разработано достаточно большое количество высокоточных геодезических приемно-вычислительных комплексов, получивших название аппаратуры потребителя.

Применительно к этой аппаратуре разработаны различные режимы работы, исследованы основные источники ошибок, а также решены вопросы оптимального планирования и организации геодезических работ, базирующихся на спутниковой технологии. Весь этот перечень проблем и составил основное содержание данной книги, включающей в себя введение, восемь разделов и заключение.

*Раздел 1* посвящен изложению основных принципов действия спутниковых систем определения местоположения GPS и ГЛОНАСС, которые в зарубежной литературе принято называть глобальными спутниковыми системами позиционирования. В дальнейшем по тексту используется как первое, так и второе название. Поскольку системы GPS и ГЛОНАСС создавались, прежде всего, как навигационные, то при рассмотрении принципов их действия неизбежно затрагиваются как геодезические, так и навигационные аспекты особенностей работы таких систем. Следует также отметить, что эффективность использования спутниковых методов определения местоположения зависит

не только от совершенства работы аппаратуры потребителя, но и от всей спутниковой системы в целом. В связи с этим в данном разделе существенное внимание уделено общей структуре GPS и ГЛОНАСС, и, в частности, таким основным частям, как космический сектор, сектор управления и контроля, а также сектор потребителя.

Из всего комплекса аппаратуры, установленной на спутниках и составляющей основу космических секторов GPS и ГЛОНАСС, более подробно рассмотрена особенность работы высокостабильных опорных генераторов и тех узлов, которые участвуют в формировании передаваемых со спутника радиосигналов, на основе которых производится измерение расстояний между спутником и приемником. Сектор управления и контроля описан в достаточно сжатой форме с тем, чтобы подчеркнуть основное назначение этого сектора без раскрытия особенностей его функционирования. При описании сектора потребителя рассмотрены общие принципы построения спутниковых приемников, причем основное внимание уделено работе тех основных компонентов, которые оказывают непосредственное влияние на получаемые результаты измерений.

В разделе 2 предпринята попытка изложить в систематизированном виде характерные для GPS и ГЛОНАСС методы измерений и вычислений, из которых к первостепенным отнесены высокоточные методы, нашедшие наибольшее распространение в геодезии. Исходя из этого, приоритет отдан фазовым измерениям, которые выполняются на основе использования несущих колебаний, и неразрывно связанным с ними дифференциальным методам измерений, включая всевозможные их разновидности. С целью обоснования принципов исключения наиболее ощутимых источников ошибок, а также принципов разрешения неоднозначности, свойственных фазовым методам, в настоящем разделе произведен анализ фазовых соотношений, позволяющих установить взаимосвязь между измеряемыми значениями разностей фаз и искомыми величинами длин линий. Вместе с тем уделено соответствующее внимание псевдодальномерным измерениям расстояний, базирующимся на использовании кодированных сигналов, а также доплеровским методам, удачно дополняющим, во многих случаях, фазовые измерения. Наряду с вышеизложенным в данном разделе описаны специфические особенности статических и кинематических методов определения местоположений, которые применяются при решении различных геодезических задач.

В разделе 3 рассмотрены проблемы координатно-временного обеспечения спутниковых систем. Показаны роль и значение различных координатных систем, используемых при спутниковых измерениях, а также предъявляемые к ним требования. В связи с тем, что при

практической реализации спутниковых геодезических технологий весьма часто возникает необходимость определения местоположения пунктов в местной системе координат, то в этом разделе описаны используемые на практике подходы, позволяющие осуществить переход от одной координатной системы к другой, а также применяемые при этом параметры перехода.

Поскольку при преобразовании высот могут возникать некоторые затруднения, данной проблеме уделено повышенное внимание. Из всех существующих методов такого перехода наиболее подробно рассмотрены подходы, позволяющие осуществить преобразование высот на сантиметровом уровне точности.

Наряду с необходимостью использования в спутниковых системах местоопределения различных координатных систем возникает также потребность в применении различных систем отсчета времени. При этом взаимосвязь между различными шкалами времени на высоком уровне точности оказывается достаточно трудноразрешимой проблемой. В частности, к такой проблеме следует отнести согласование национальных эталонов времени на уровне менее одной наносекунды, а также учет релятивистских эффектов при рассмотрении проблемы совместного использования таких спутниковых систем, как GPS и ГЛОНАСС.

Следует также отметить, что применительно к спутниковым технологиям координатно-временное обеспечение включает в себя целый комплекс вопросов, связанных с особенностями определения орбит спутников, их корректировкой, а также с возможностью получения точных значений эфемерид, используемых на момент измерений в качестве исходных координат опорных точек.

Все эти вопросы также нашли отражение в третьем разделе.

*Раздел 4* посвящен анализу основных источников ошибок спутниковых измерений, а также методам исключения или ослабления их влияния. С целью систематизации все характерные для спутниковых измерений источники ошибок объединены в три основные группы. В первую группу вошли источники, порождающие ошибки в таких используемых исходных данных, как погрешности знания эфемерид спутников. Во вторую группу вошли источники, связанные с влиянием внешней среды. И, наконец, в третью группу включены источники ошибок, обусловленные несовершенством работы аппаратуры и методов обработки результатов измерений.

Свойственная спутниковым методам местоопределения высокая производительность выполнения топографо-геодезических работ обуславливает необходимость четкой организации всего процесса спутниковых измерений, включая и подготовительные работы. Этот комплекс проблем составляет основное содержание *раздела 5*.

Повышенное внимание в данном разделе уделено специфике планирования полевых работ, которое во многом отличается от традиционных методов подготовки к проведению полевых работ. В частности, по иному решаются вопросы, связанные с выбором мест расположения пунктов сети, включая и учет влияния окружающих эти пункты объектов.

Повышенные требования при этом предъявляются к составлению четкого расписания выполнения основных и вспомогательных процедур, которое должно предусматривать не только конкретное время и продолжительность сеансов наблюдений на каждом пункте, но и затраты времени, связанные с переездом с одного пункта на другой. Необходимость введения таких жестких требований связана, прежде всего, с тем, что при реализации наиболее распространенных при решении геодезических задач дифференциальных режимов работы должна быть обеспечена одновременность работы двух или более спутниковых приемников, установленных на разнесенных пунктах, между которыми, зачастую, не удастся организовать радиосвязь с целью уточнения начала и окончания сеансов наблюдения.

В процессе выполнения спутниковых измерений, которые также должны быть четко регламентированы, возникает, как правило, целый ряд непредвиденных обстоятельств, оказывающих влияние на качество получаемых данных. На основе накопленного у нас и за рубежом практического опыта в данном разделе изложены некоторые рекомендации, позволяющие исключить или минимизировать такие влияния.

Важным и весьма ответственным этапом во всем комплексе спутниковых измерений, нашедшим свое отражение в *разделе 6*, является окончательная обработка результатов измерений, в процессе которой обрабатываются данные, получаемые от двух или более одновременно работающих на разнесенных пунктах спутниковых приемников. В современной литературе, посвященной спутниковым методам местопределения, такая процедура получила название "пост-обработки".

Характерная особенность окончательной обработки состоит в том, что она выполняется, как правило, в камеральных условиях после того, как получаемые в процессе наблюдений данные собраны и предварительно обработаны. При этом приходится иметь дело с большим объемом информации, которая, во многих случаях, нуждается в оперативном просмотре, отбраковке некачественных данных и во введении откорректированных установочных параметров. Последующим весьма ответственным этапом является разрешение неоднозначности, свойственной фазовым измерениям. Этот параметр должен быть вычислен с высокой степенью надежности, так как он оказывает существенное влияние на точность окончательных результатов измерений.

В зависимости от прилагаемых к различным типам приемников пакетов обрабатывающих программ оператор, зачастую, на стадии окончательной обработки имеет возможность получить не только координаты и их разности для двух точек, на которых были установлены приемники, но и выполнить вычисления для всей локальной сети, произвести уравнивание результатов измерений и переход к местной координатной системе с получением оценочных характеристик такой сети.

Наряду с окончательной обработкой, в сжатой форме изложены основные особенности обработки результатов измерений в реальном масштабе времени, поскольку такие методы используются не только в навигации, но и при решении различного рода специальных геодезических задач.

*Раздел 7* посвящен рассмотрению особенностей применения спутниковых методов при выполнении различных видов топографо-геодезических работ. При этом предпринята попытка обобщения особенностей построения глобальных, региональных и локальных геодезических сетей на основе спутниковых технологий.

Широкий круг задач, относящихся к геодинاميке, прикладной геодезии, а также и к другим областям, где возникает необходимость определения координат как неподвижных, так и движущихся объектов рассмотрен в *разделе 8*.

В *Заключении* изложены основные направления дальнейшего совершенствования систем GPS и ГЛОНАСС, а также приведена краткая информация о планируемой разработке новой навигационной спутниковой системы "Галилео". Наряду с этим рассмотрены перспективы развития специализированных дифференциальных спутниковых подсистем различного уровня, позволяющих с достаточно высокой точностью определять в динамике координаты как движущихся, так и неподвижных объектов. Повышенное внимание уделено проблемам метрологической аттестации спутниковой приемной аппаратуры (и в частности, проблеме обеспечения единства измерений в области больших длин при использовании спутниковых технологий). На заключительной стадии в сжатой форме рассмотрены вопросы рационального совместного использования различных спутниковых систем, а также их комплексирование с другими техническими средствами, способными решать аналогичные задачи.



## **Раздел I. Основные принципы действия спутниковых систем определения местоположения**

### **1.1. Особенности геодезических измерений спутниковыми методами**

Специфика традиционных геодезических измерений, проводимых на земной поверхности, заключается, прежде всего, в высоких требованиях к точности измерений, проводимых в среде с постоянно меняющимися параметрами, к которой с полным основанием могут быть отнесены приземные слои атмосферы. При этом требования к повышению точности постоянно растут, что обуславливает необходимость постоянного совершенствования технических средств и методов.

Большинство созданных к настоящему времени высокоточных геодезических инструментов (теодолиты, нивелиры, светодальномеры, тахеометры и др.) достигли достаточно высокого совершенства как за счет удачных технических решений, так и за счет хорошо продуманной технологии их использования. Однако многие из перечисленных выше приборов базируются на использовании оптического диапазона электромагнитных волн, что породило целый ряд существенных недостатков, которые были уже перечислены во введении (в частности, необходимость обеспечения прямой и оптической видимости между смежными пунктами, трудности организации круглосуточных измерений и, как следствие, сложность организации мониторингов для отслеживания различного рода деформационных процессов, трудности проведения геодезических измерений в динамике и т. д.).

Другой существенной особенностью традиционных геодезических измерений является весьма широкое распространение угловых измерений, которым во многих случаях отдаются предпочтения перед линейными измерениями (прежде всего, по экономическим соображениям), хотя по своим потенциальным возможностям современные высокоточные светодальномеры обеспечивают более высокий уровень точности.

Наконец, еще одна специфика традиционных наземных геодезических методов состоит в необходимости проведения измерений в высокодинамичных приземных слоях атмосферы, что существенно осложняет процедуру выполнения измерений и снижает потенциальный уровень точности.

Альтернативный подход к выполнению геодезических измерений на принципиально иной основе состоит в использовании пространственных методов измерений с применением в качестве опорных точек мгновенных положений искусственных спутников Земли. Базирующиеся на таких принципах измерительные комплексы получили название глобальных систем позиционирования, первоначальное назначение которых состояло в решении навигационных задач. Однако проведенные исследования показали, что за счет совершенствования аппаратного и программного обеспечения, а также технологии использования таких систем, они могут с полным успехом применяться и для решения широкого круга геодезических задач, резко повышая эффективность проводимых геодезических работ при одновременном значительном повышении потенциального уровня точности. С учетом этого рассмотрим основные характерные особенности современных геодезических спутниковых измерений.

При выборе наиболее подходящего диапазона электромагнитных волн, используемого при выполнении измерений, приходится учитывать тот факт, что создаваемая спутниковая система должна быть всепогодной, т.е. обеспечивать выполнение измерений при любых условиях погоды. Это требование является вполне обоснованным как для навигации, так и для геодезии. Кроме того, для одновременного обслуживания неограниченного числа потребителей, находящихся в пределах всего земного шара, с помощью весьма ограниченного количества спутников необходимо, чтобы диаграмма направленности установленной на спутнике излучающей системы охватывала всю видимую со спутника земную поверхность.

В дополнение к вышеизложенному приходится также учитывать необходимость сведения к минимуму влияния атмосферы (как тропосферы, так и ионосферы). Обобщение многочисленных, проведенных к настоящему времени исследований, свидетельствует о том, что наиболее полно перечисленным выше требованиям отвечает ультракоротковолновый (в частности, дециметровый) диапазон радиоволн.

При анализе различных геодезических спутниковых методов заслуживают внимания такие методы, как глобальная триангуляция, основанная на использовании угловых измерений, и глобальная спутниковая трилатерация, базирующаяся на измерении расстояний до спутников с применением излучений различных участков спектра электромагнитных волн.

При разработке методов всемирной спутниковой триангуляции, которые начали развиваться сразу же после запуска в 1957 г. первого советского искусственного спутника Земли, предпочтение было отдано методам фотографирования спутников на фоне звезд. Были разра-

ботаны специальные метрические фотокамеры в сочетании с соответствующими фотограмметрическими методами, позволяющими получать на основе этих снимков необходимую информацию об ориентирных направлениях, используемых при построении глобальной геодезической сети [7]. Характерная для этого метода аппаратура оказалась тяжелой и дорогостоящей, сами наблюдения были малопродуктивными, так как приходилось выбирать такие периоды времени, когда соблюдались условия чистого неба одновременно как минимум на двух пунктах, разнесенных на большие расстояния. При этом точность измерений оказалась сравнительно невысокой. Из-за перечисленных выше недостатков данный метод достаточно быстро был вытеснен глобальной спутниковой трилатерацией. Последний метод, основанный на использовании спутниковых дальномерных систем, широко применяется в настоящее время для построения глобальных, региональных и локальных геодезических сетей.

В свою очередь, развитие упомянутых спутниковых дальномерных систем происходило по двум основным направлениям. Одно из них было связано с созданием дальномеров, работающих в оптическом диапазоне. В результате были созданы лазерные спутниковые дальномерные системы, с помощью которых был достигнут весьма высокий уровень точности. Однако созданные лазерные комплексы оказались сравнительно дорогими, громоздкими и требующими для работы наличия чистого неба. В связи с этим применение таких систем ограничивается, в большинстве случаев, использованием их на специально оборудованных пунктах, входящих в состав обсерваторий или других исследовательских центров. Причем с помощью таких систем решаются, как правило, различные специализированные задачи (в частности, уточнение элементов орбит спутников, определение длин высокоточных базисов для сравнительной оценки точности других спутниковых систем и др.).

Другое направление базировалось на совершенствовании радиодальномерных систем. При этом был использован накопленный опыт, связанный с созданием наземных радиодальномерных систем (таких, как «Декка», «Хиран» и др.). Одна из специфических особенностей созданных за последние десятилетия спутниковых радиодальномерных систем заключалась в достаточно широком применении метода измерений, основанного на использовании доплеровского эффекта. Созданная в США на такой основе военно-морская навигационная спутниковая система NNSS, известная также, как система «Транзит», получила весьма широкое распространение как в навигации, так и в геодезии, и явилась предшественницей современной глобальной системы позиционирования GPS. Аналогичная система с условным названием «Цикада» была создана и в бывшем Советском Союзе [17, 70].

Накопленный опыт эксплуатации системы «Транзит» показал целесообразность ее коренной модернизации, связанной не только с выбором более высоких орбит для навигационных и геодезических спутников, но и с заменой основополагающих принципов дальномерных измерений. Наибольший прогресс в повышении потенциальной точности дальномерных измерений был достигнут за счет внедрения в такие системы фазового метода, применение которого при спутниковых измерениях обусловило необходимость проведения весьма обширных и тщательно выполняемых исследований.

Еще одна особенность используемых в навигации и геодезии спутниковых дальномерных систем состоит в том, что выбираемый дальномерный принцип должен открывать возможность одновременного выполнения измерения расстояний между спутником и неограниченным количеством станций, находящихся на земной поверхности. При этом для создания массовой портативной, экономичной и сравнительно недорогой аппаратуры потребителя целесообразно исключить двухсторонний обмен информацией со спутником, подразумевающий наличие радиопередающих устройств в составе аппаратуры пользователя. Это требование обусловило целесообразность применения одностороннего метода дальномерных измерений. Обобщение перечисленных выше особенностей, характерных для спутниковых геодезических измерений, свидетельствует о том, что наибольшего внимания заслуживает спутниковый радиодальномерный метод координатных определений с использованием достаточно «высоких» спутников и одностороннего прохождения информационных сигналов от спутника до находящихся на земной поверхности приемника. По мере изложения последующего материала эти особенности будут постоянно иметься в виду, а по мере необходимости они будут развиваться и дополняться.

## 1.2. Двусторонний и односторонний методы дальномерных измерений

При определении длин линий на местности наземными световыми и радиодальномерами широкое распространение получил двусторонний метод измерения расстояний, отличительная особенность которого состоит в том, что используемые при измерениях сигналы, несущие в себе информацию о величине пройденного ими пути, проходят искомое расстояние дважды (в прямом и обратном направлениях). Такая концепция позволяет избавиться от целого ряда ошибок, связанных с несинхронностью работы генераторов, формирующих такие сигналы и участвующих в измерительном процессе.

Применительно к спутниковой геодезии двусторонние методы также находят применение. В частности, на их основе работают лазерные спутниковые дальномерные системы.

Примерами таких систем являются лазерные системы SRS и WLRS. Приемо-передатчики, работающие в оптическом диапазоне, устанавливаются в таких системах на специально оборудованных наземных пунктах. Отражающим объектом при этом является спутник.

Другим примером могут служить спутниковые альтиметры (например, GEOSAT, ERS-1 и др.), характерная особенность которых заключается в том, что измерительная аппаратура располагается на спутнике, в качестве отражающей поверхности используется земная поверхность (и, в частности, поверхность морей и океанов).

Основной измеряемой величиной в упомянутых системах является время, затрачиваемое информационным сигналом на прохождение удвоенного расстояния между земной поверхностью и спутником. Если скорость распространения такого сигнала известна, то без учета релятивистских эффектов интересующее нас расстояние  $\rho$  может быть подсчитано по следующей простой формуле:

$$\rho = \frac{1}{2} \nu \tau, \quad (1.1)$$

где  $\nu$  — скорость распространения информационного сигнала (применительно к спутниковым измерениям эту скорость очень часто отождествляют со скоростью света в вакууме, а влияние атмосферы учитывают посредством введения соответствующей поправки);  $\tau$  — регистрируемое время прохождения сигналом удвоенного расстояния между земной поверхностью и спутником.

Положительным моментом данного метода является тот факт, что интересующее нас время излучения и приема информационного сигнала осуществляется по одним и тем же часам, в результате чего не возникает проблемы синхронизации часов, если в измерительном процессе участвуют различные часы, а кроме того смещения показаний таких часов относительно эталонного времени не играют существенной роли, поскольку при образовании разности  $t_{np} - t_{пер}$  такие смещения исключаются.

Наряду с двусторонними методами измерения расстояния в спутниковых методах определения местоположения находят применение также и односторонние методы дальномерных измерений. Целесообразность использования последних в глобальных спутниковых системах определения местоположения была отмечена во введении.

Основная особенность односторонних методов измерения расстояний между спутником и наземным пунктом состоит в том, что передающее устройство размещается на спутнике, а приемник — на на-

земном пункте. При этом информационный сигнал проходит измеряемое расстояние только в одном направлении, а именно, от спутника до приемника. В основе рассматриваемого метода лежит весьма простая функциональная блок-схема (рис. 1.1).

Непосредственно из приведенной на рис. 1.1 схемы следует, что информационный сигнал проходит искомое расстояние  $r$  только в одном направлении. Если при этом моменты излучения и приема данного сигнала зафиксированы точно синхронизированными часами, которые расположены на спутнике и на наземном пункте и которые реализуются на базе соответствующих высокостабильных опорных генераторов, то интересующее нас расстояние может быть определено по формуле, аналогичной формуле (1.1):

$$r = vt. \quad (1.2)$$

Множитель  $1/2$  в данной формуле отсутствует из-за одностороннего прохождения сигналом определяемого расстояния.

Поскольку электромагнитные излучения за одну наносекунду ( $1 \text{ нс} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ ) проходят расстояние около 30 см, то для обеспечения характерного для геодезии сантиметрового уровня точности необходимо синхронизировать ход часов на спутнике и в приемнике с погрешностью не хуже нескольких сотых долей наносекунды. Современный технический уровень не позволяет создать часы с отмеченной выше длительной стабильностью их показаний, причем в достаточно миниатюрном исполнении.

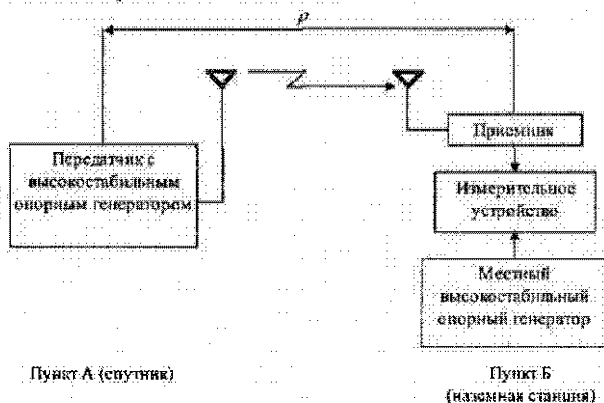


Рис. 1.1. Упрощенная функциональная схема дальномера, работающего на одностороннем принципе.

Если учесть несинхронность работы опорных генераторов, входящих в состав передатчика и приемника и составляющих основу для создания устройств, с помощью которых отсчитывается время на спут-

нике и на наземной станции, то формула (1.2), используемая для вычисления измеряемого расстояния, нуждается в уточнении. С этой целью обозначим уход показаний часов, входящих в состав передающей аппаратуры на спутнике, относительно эталонного времени через  $\delta t_{\text{пер}}$ , а соответствующий уход показаний часов приемника через  $\delta t_{\text{пр}}$ . Регистрируемое при этом время распространения электромагнитного излучения между спутником и приемником может быть описано следующим соотношением:

$$\tau_{\text{изм}} = (t_{\text{пр}} + \delta t_{\text{пр}}) - (t_{\text{пер}} + \delta t_{\text{пер}}) = \tau_{\text{ист}} + \delta \tau, \quad (1.3)$$

где  $\tau_{\text{изм}}$  — регистрируемое время прохождения сигнала по часам передатчика и приемника;  $t_{\text{пер}}$  и  $t_{\text{пр}}$  — моменты времени излучения и приема информационного сигнала по показаниям эталонных часов;  $\tau_{\text{изм}} = t_{\text{пр}} - t_{\text{пер}}$  — истинное время прохождения расстояния сигналом;  $\delta \tau = \delta t_{\text{пр}} - \delta t_{\text{пер}}$  — поправка, обусловленная несинхронностью хода часов на спутнике и на наземном пункте.

При использовании регистрируемого времени  $\tau_{\text{изм}}$  значение вычисляемого расстояния  $R$  определяется как:

$$R = v \tau_{\text{изм}} = v(\tau_{\text{ист}} + \delta \tau) = \rho + v \delta \tau, \quad (1.4)$$

где  $\rho$  — интересующее нас геометрическое (истинное) расстояние между спутником и приемником;  $v \delta \tau$  — поправочный член, обусловленный различием показаний часов на передающем и приемном концах измеряемой линии, т.е. на спутнике и на наземной станции.

Входящая в формулу (1.4) поправка  $v \delta \tau$  зависит от стабильности хода часов на разнесенных в пространстве пунктах и может достигать значительных величин, исчисляемых в пересчете на единицы длины сотнями метров и более. Такое существенное различие между измеряемым и истинным значениями определяемых длин линий, т.е. между  $R$  и  $\rho$ , привело к введению для величины  $R$  названия псевдодальность, подчеркивая тем самым ее отличие от истинного значения измеряемого расстояния  $\rho$ .

Характеризуя в целом рассмотренный выше односторонний метод дальномерных измерений, нельзя не отметить как позитивные, так и негативные стороны этого метода. В частности, к позитивным показателям этого метода может быть отнесена возможность одновременного определения расстояний от одного, установленного на спутнике передающего устройства, до неограниченного количества приемных устройств, составляющих основу аппаратуры потребителя. Исключение из последней каких-либо радиопередатчиков, которые являются, как правило, потребителями значительного количества электроэнер-

гии и которые приводят к существенным усложнениям аппаратуры, также следует отнести к положительным качествам такого метода. Вместе с тем необходимость строгого учета поправок, обусловленных несинхронностью работы опорных генераторов (а следовательно, и часов) на спутнике и в аппаратуре потребителя, несомненно следует отнести к негативным показателям одностороннего метода.

### **1.3. Принципы измерения длин линий, используемые в спутниковой геодезии**

При измерении длин линий наземными свето- и радиодальномерами широкое распространение получили импульсные и фазовые методы, а также их сочетания. Эти же методы составляют основу спутниковых дальномерных измерений. Вместе с тем в спутниковой геодезии получили развитие и методы, основанные на использовании кодированных сигналов, для которых характерны свои специфические особенности.

Импульсные принципы дальномерных измерений применительно к спутниковым методам позиционирования находят применение в упомянутых ранее лазерных дальномерных системах и в спутниковых альтиметрах. К положительным сторонам этого способа определения длин линий может быть отнесена возможность быстрого и однозначного определения измеряемого расстояния, что крайне необходимо при решении навигационных задач. Вместе с тем свойственный импульсным принципам более низкий уровень точности в сравнении с фазовыми методами измерения дальностей следует отнести к наиболее существенному недостатку, ограничивающему широкое его использование в геодезии.

При разработке глобальных спутниковых систем определения местоположения, которая проводилась военными ведомствами в целях навигационного обеспечения судов военно-морского флота, возникла необходимость применения специализированных методов координатных (а следовательно, и дальномерных) определений, которые были бы доступны только санкционированным пользователям. Такая концепция привела к разработке способа дальномерных измерений, основанного на использовании кодированных сигналов. Не останавливаясь здесь на всех особенностях формирования таких сигналов и их использования при определении дальностей, отметим только тот факт, что с точки зрения построения на их основе дальномерных систем упомянутые сигналы представляют собой последовательность посылок единичного и нулевого уровня, которая приводит в конечном счете к формированию сигнала прямоугольной формы, причем кодированию под-



вергается длительность единичных и нулевых посылок. В процессе выполнения измерений с помощью глобальных спутниковых систем на передающем конце измеряемой линии (на спутнике) формируется соответствующий кодированный сигнал, а на приемном конце линии (в аппаратуре потребителя) для определения интересующей нас дальности должен быть сформирован опорный сигнал отклика, представляющий собой аналогичный закодированный сигнал, т. е. потребителю должен быть доступен принцип кодирования сигналов, используемых при определении расстояний между спутником и приемником.

При практическом использовании данного метода для целей измерения дальностей интересующее нас время прохождения определяется за счет введения соответствующей задержки в опорный сигнал отклика, фиксируя при этом максимальное корреляционное совпадение с принимаемым от спутника аналогичным кодированным сигналом.

Рассматриваемый принцип дальномерных измерений, базирующийся на использовании кодированных сигналов, сочетает в себе отдельные характерные особенности свойственные как импульсному, так и фазовому принципу определения дальностей. Так, например, при его применении удается избежать необходимости разрешения неоднозначности, т. е. по данному показателю кодовый метод подобен импульсному методу. В то же время при анализе особенностей определения моментов совпадения опорного и принимаемого сигнала часто вводят понятие смещения по фазе одного кодированного сигнала относительно другого, что характерно для фазовых методов измерения расстояний.

По своим точностным показателям кодовый принцип существенно уступает фазовому, а поэтому при решении геодезических задач ему отводится лишь вспомогательная роль (в частности, приближенное определение координат точки стояния). Вычисление интересующих нас расстояний между приемником и спутником базируется на приведенных в предыдущем подразделе соотношениях, например, на формуле (1.4). Введенное ранее понятие псевдодальности чаще всего ассоциируется с кодовыми методами дальномерных измерений.

Применительно к геодезическому использованию спутниковых систем наибольший интерес представляют фазовые методы, базирующиеся на применении в качестве информационных сигналов несущих гармонических колебаний дециметрового диапазона радиоволн. В обобщенном виде такие колебания описываются аналитическим соотношением следующего вида:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1.5)$$

где  $A$  — амплитуда колебаний;  $\omega$  — угловая частота;  $t$  — текущее время;  $\varphi_0$  — начальная фаза.

Основным параметром, используемым при фазовых дальномерных измерениях, является в уравнении (1.5) выражение, стоящее под знаком тригонометрической функции и получившее название текущей фазы:

$$\Theta(t) = \omega t + \varphi_0. \quad (1.6)$$

Для установления связи данного параметра с величиной определяемой длины линий  $R$  заметим, что после прохождения искомого расстояния колебания запаздывают по фазе относительно опорных колебаний. При использовании двустороннего метода для текущей фазы таких запаздывающих колебаний можно записать:

$$\Theta'(t) = \omega(t - \frac{2R}{v}) + \varphi_0. \quad (1.7)$$

Измеряемая фазометром разность фаз  $\varphi$  оказывается при этом следующей:

$$\varphi = \Theta(t) - \Theta'(t) = \omega \frac{2R}{v}, \quad (1.8)$$

откуда

$$R = \frac{v}{2\omega} \varphi. \quad (1.9)$$

Величина  $\varphi$ , как правило, измеряется в угловых единицах (градусах или радианах). Однако применительно к спутниковым методам фазовых дальномерных измерений, характеризующимся большими массами получаемой информации, для упрощения вычислительных процессов фазу выражают в относительных единицах (в долях фазового цикла). С учетом этого формулы (1.8) и (1.9) принимают вид:

$$\Phi = \frac{\varphi}{2\pi} = f \frac{2R}{v} \quad (1.10)$$

и

$$R = \frac{v}{2f} \Phi. \quad (1.11)$$

где  $f = \omega/2\pi$  — частота колебаний в герцах (или в производных от них единицах — мегагерцах, гигагерцах и т. д.).

Одна из негативных особенностей фазовых измерений состоит в том, что при отсутствии какой-либо предварительной информации о предыдущих измерениях фазометр позволяет определить разность фаз только в пределах одного периода (т.е. одного фазового цикла), в то время как входящая в формулы (1.10) и (1.11) величина  $\Phi$  многократно превышает эту величину. Исходя из этого параметр  $\Phi$  записывают в виде следующего соотношения:

$$\Phi = N + \Delta\Phi, \quad (1.12)$$

где  $N$  — число полных периодов изменения фазы за время прохождения информационным сигналом искомого расстояния;  $\Delta\Phi$  — разность фаз, измеряемая фазометром.

Для нахождения величины  $N$  (этот процесс принято называть разрешением неоднозначности) в наземных фазовых дальномерных системах используют такие вспомогательные методы, как метод измерений на нескольких различных масштабных частотах или метод плавного изменения масштабной частоты, причем при выполнении измерений в статических условиях упомянутая процедура, как правило, не создает существенных затруднений. В спутниковых системах расстояния между установленными на земной поверхности приемниками и наблюдаемыми спутниками непрерывно изменяются, в результате чего изменяется и определяемая величина  $N$ . Кроме того, из-за использования при фазовых измерениях весьма высоких частот, исчисляемых гигагерцами, а также из-за больших значений измеряемых длин, исчисляемых десятками тысяч километров, величина  $N$  достигает сотни миллионов, причем при ее определении нельзя ошибиться даже на единицу, так как это приводит к возникновению грубых ошибок, и такие результаты приходится браковать. С учетом этих обстоятельств проблема разрешения неоднозначности при фазовых спутниковых измерениях превращается в весьма ответственную и сложную процедуру. Более подробная информация о решениях затронутой проблемы будет приведена в одном из последующих разделов, специально посвященном методам разрешения неоднозначностей в спутниковых дальномерных системах.

Еще одна особенность фазовых спутниковых измерений связана с односторонним методом дальномерных измерений, получившим в спутниковых системах позиционирования широкое распространение.

Как уже отмечалось, при односторонних методах приходится учитывать поправки, обусловленные неодинаковыми показаниями часов на спутнике и в приемнике. Применительно к фазовым измерениям возникает, прежде всего, необходимость учета начальных фаз сравниваемых колебаний, которые возбуждаются различными генераторами (в частности, генератором, находящимся на спутнике, и генератором, установленным в приемнике). С учетом начальной фазы  $\Phi_0$  текущая фаза интересующих нас колебаний может быть представлена в следующем виде:

$$\Phi(t) = ft + \Phi_0. \quad (1.13)$$

Следует при этом заметить, что применительно к спутниковым измерениям начальную фазу  $\Phi_0$  принято рассматривать как смещение показаний соответствующих электронных часов, ход которых задают

те же самые колебания, которые используются для выполнения фазовых измерений. С учетом этого

$$\Phi_0 = f\delta t, \quad (1.14)$$

где  $\delta t$  — уход часов относительно эталонного (т. е. синхронного для спутника и приемника) времени на момент выполнения измерений.

В данной интерпретации начальный фазовый сдвиг может превышать величину соответствующую одному периоду. Исходя из этого, упомянутое смещение при спутниковых измерениях рассматривают совместно с величиной  $N$ , которую также трактуют как смещение текущей фазы поступающих от спутника колебаний на вход приемника. С учетом этих замечаний отмеченная текущая фаза может быть записана в следующей аналитической форме:

$$\Phi_{\text{пер}}(t) = f(t - \tau) + f\delta t_{\text{пер}}, \quad (1.15)$$

где  $\Phi_{\text{пер}}(t)$  — текущая фаза поступающих от спутника несущих колебаний на вход приемника;  $f$  — номинальное значение несущей частоты;  $\tau = R/v$  — время прохождения несущими колебаниями искомого расстояния;  $\delta t_{\text{пер}}$  — уход показаний часов установленного на спутнике передатчика, обусловленный нестабильностью его работы, на момент выполнения измерений.

Соответственно для текущей фазы возбуждаемых в приемнике опорных колебаний будем иметь

$$\Phi_{\text{оп}}(t) = ft + f\delta t_{\text{оп}}. \quad (1.16)$$

Разность фаз  $\Phi$ , на основе которой вычисляется интересующее нас расстояние до спутника, определяется при этом соотношением:

$$\Phi = \Phi'_{\text{пер}}(t) - \Phi_{\text{оп}}(t) = -f\tau + f(\delta t_{\text{оп}} - \delta t_{\text{пер}}). \quad (1.17)$$

Знак «-» перед первым членом в правой части данного уравнения обусловлен тем, что в спутниковых системах в качестве стартовых сигналов при цифровых фазовых измерениях чаще всего используют сигналы, поступающие от спутника и имеющие из-за запаздывания отрицательный фазовый сдвиг, а в качестве стоповых — сигналы, формируемые местным опорным генератором. Применительно к такому выбору формула (1.12) принимает вид:

$$\Phi = N - \Delta\Phi, \quad (1.18)$$

На основе комбинации соотношений (1.17) и (1.18) представляется возможным получить следующую формулу:

$$\Delta\Phi = f\tau + N + f\delta\tau, \quad (1.19)$$

где  $\Delta\Phi$  — измеряемое значение разности фаз;  $f$  — номинальное значение масштабной (несущей) частоты;  $N$  — целое число периодов изменения фазы за время прохождения радиосигналом расстояния от спутника до приемника;  $\Delta t = \delta t_{\text{пер}} - \delta t_{\text{пр}}$  — поправка, обусловленная несинхронностью хода часов на спутнике и в приемнике.

С учетом того, что  $t = R/v$ , уравнение, связывающее значение измеряемой разности фаз  $\Delta\Phi$  с величиной определяемого расстояния  $R$ , может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta\Phi = \frac{f}{v} R + N + f\delta t. \quad (1.20)$$

Данная формула является основополагающей для односторонних спутниковых дальномерных систем, в которых реализуется фазовый метод определения длин искомых линий.

Наряду с перечисленными выше кодовыми и фазовыми принципами измерения расстояний между спутником и приемником в современных спутниковых системах позиционирования типа GPS находят также применение вспомогательные методы, базирующиеся на эффекте Доплера. Следует при этом заметить, что в случае применения фазовых принципов измерения расстояния реализации упомянутого доплеровского метода не нуждается в привлечении специализированных аппаратных средств, так как данный метод представляет собой одну из разновидностей фазового метода. Некоторые свойственные доплеровскому методу особенности связаны с методами обработки получаемых результатов. Этот круг вопросов будет рассмотрен в разделе 2 при анализе различных методов вычислений.

#### 1.4. Общие принципы построения глобальных спутниковых систем позиционирования

Приведенная в предыдущих разделах информация свидетельствует о целесообразности построения спутниковых систем позиционирования на основе использования односторонних методов измерения расстояний. При реализации такого метода спутниковая радиодальномерная система распадается на две основные составные части: устанавливаемое на спутнике передающее устройство и находящийся в распоряжении наземного потребителя приемно-вычислительный комплекс. Вместе с тем для поддержания постоянной работоспособности такой спутниковой системы без ухудшения основных ее технических показателей возникает необходимость в использовании служебной подсистемы управления и контроля. С учетом вышеизложенного современные спутниковые системы позиционирования включают в себя три основные составные части (рис. 1.2), получившие название секторов:

- 1) космический сектор;
- 2) сектор управления и контроля;
- 3) сектор потребителя.

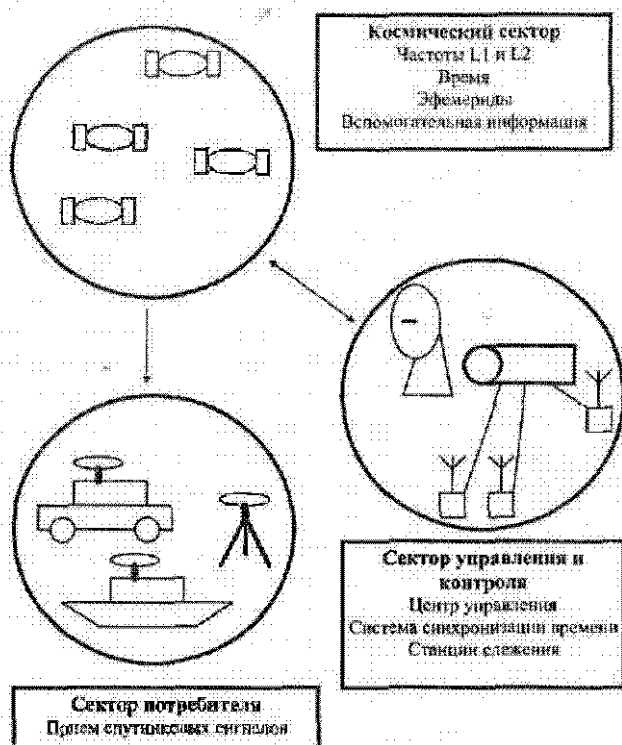


Рис. 1.2. Схема взаимодействия трех основных секторов глобальных систем позиционирования

*Космический сектор* включает в себя набор входящих в систему позиционирования спутников. Такой набор часто называют «созвездием». Установленная на спутниках аппаратура, выполняющая роль передающей части одностороннего радиодальномерного комплекса, осуществляет передачу на Землю как радиосигналов, на основе которых измеряется расстояние между спутником и наземным пунктом наблюдения, так и навигационного сообщения, в котором содержится информация об эфемеридах спутников, о поправках к показаниям его часов, о так называемом альманахе, несущем в себе усеченную информацию о всех входящих в «созвездие» спутниках, а также некоторую другую служебную информацию.

*Сектор управления и контроля* состоит из центральной (ведущей) станции и нескольких разнесенных на большие расстояния станций слежения, причем некоторые из них выполняют роль и загружающих станций. Основная цель этого сектора состоит в осуществлении контроля за работоспособностью спутников, систематическом уточнении эфемерид каждого спутника и параметров принятой модели атмосферы, корректировке показаний часов, установленных на каждом спутнике, периодическом обновлении содержания навигационного сообщения и организации передачи такого сообщения с помощью загружающих станций на каждый из обслуживаемых спутников.

*Сектор потребителя* объединяет в себе всю совокупность широко распространенной аппаратуры пользователей, с помощью которой осуществляется прием радиосигналов от спутников и вычисление на их основе интересующих потребителя конечных результатов, характеризующих, в частности, местоположение пункта наблюдений и характерное для той или иной эпохи точное время, а при установке приемной аппаратуры на движущемся объекте — скорость его перемещения и направление движения. Упомянутая аппаратура позволяет также определить и целый ряд других вспомогательных параметров.

### 1.5. Космический сектор

Особенности построения и функционирования космического сектора неразрывно связаны с общими требованиями, которые предъявляются ко всей спутниковой системе позиционирования. В частности, первоначальное назначение рассматриваемых систем GPS и ГЛОНАСС, которые разрабатывались по заказу министерств обороны США и бывшего Советского Союза [73], состояло в том, чтобы обеспечить получение навигационной информации о местах нахождения самых разнообразных мобильных объектов военного назначения, расположенных в любых точках земного шара, и, прежде всего, находящихся в открытом море судов военно-морского флота. Однако по мере освоения таких систем сфера их применения постоянно расширялась, охватив при этом самые разнообразные области использования таких систем в геодезии, топографии и аэрофотосъемке. Начатое в 1973 г. проектирование системы GPS привело к запуску в 1978 г. первого входящего в эту систему спутника. При проектировании космического сектора наряду с разработкой аппаратуры, устанавливаемой на спутниках, важное значение имеют расчет орбит и определение количества входящих в «созвездие» спутников. В качестве исходных предпосылок были приняты при этом следующие положения:

1. Накопленный опыт эксплуатации более ранних спутниковых навигационных систем показал, что высота орбиты относительно земной поверхности равная примерно 20 000 км является наиболее оптимальной. Характерный для такой высоты 12-часовой период обращения спутников вокруг земного шара создает определенные удобства как при обслуживании спутников, так и при их использовании потребителями.

2. Для обеспечения возможности одновременных наблюдений не менее 4-х спутников в любой точке земного шара необходимо, чтобы общее количество входящих в «созвездие» спутников составляло не менее 24.

3. Для минимизации влияния геометрии расположения наблюдаемых спутников на точность выполняемых измерений количество орбит и места расположения на них спутников должны обеспечивать по возможности равномерное их распределение в поле обозреваемого небосвода. Исходя из этого, было признано целесообразным использование в системе GPS шести близких к круговым орбит, плоскости которых смещены относительно друг друга на 60 градусов. При этом в каждой соседней орбитальной плоскости положение спутников смещается примерно на 40 градусов. Применительно к системе ГЛОНАСС было выбрано три развернутых на 120 градусов орбитальные плоскости, на которых размещаются по 8 спутников, отстоящих друг от друга на 45 градусов.

Перечисленные выше соображения учитывались как в процессе проектирования космического сектора, так и при вводе его в эксплуатацию. В настоящем подразделе при рассмотрении космического сектора основное внимание уделено краткому описанию используемых спутников, достаточно подробному изложению принципиальных особенностей работы установленной на спутнике передающей аппаратуры, представляющей собой составную часть спутниковой радиодальномерной системы, а также принципам формирования сигналов, используемых в процессе проводимых измерений и последующих вычислений.

#### *1.5.1. Краткие сведения о спутниках, входящих в состав систем позиционирования*

Входящие в состав систем позиционирования спутники представляют собой, по существу, платформы, на которых устанавливается вся необходимая аппаратура как для обеспечения работы рассматриваемых систем, так и для нормального функционирования самого спутника как космического объекта с известными координатами, с ко-



торого передается информация, используемая при выполнении тех или иных измерений. Конструкция такого спутника состоит из основного корпуса, внутри которого размещается весь комплекс аппаратуры, и двух достаточно больших по размерам панелей с солнечными источниками питания. Внутри корпуса помимо основной радиотехнической аппаратуры, участвующей в измерительном процессе, имеется реактивный двигатель и достаточное количество топлива к нему с тем, чтобы имелась возможность корректировать орбитальное положение спутника в течение всего запланированного срока службы. Для ориентировки спутника в окружающем пространстве предусмотрена инерциальная система, дополнительно оснащенная сильным магнитным устройством. Бесперебойное электропитание бортовой аппаратуры осуществляется от солнечных источников питания и от работающих в буферном режиме аккумуляторных батарей. В состав вспомогательного оборудования входит также радиоприемное устройство для приема информации, передаваемой с земли сектором управления и контроля.

В системе GPS с момента запуска первого спутника эти спутники подвергались неоднократной модификации. К настоящему времени осуществлены три основные модификации спутников. Они объединены в группы, получившие условные названия Блок-I, Блок-II и Блок-II R. За период с 1978 г. по 1985 г. с базы ВВС «Ванденберг» (Калифорния, США) было запущено 11 спутников, входящих в Блок-I, масса которых на орбите составляла 525 кг [73]. Вывод на орбиту осуществлен ракетой-носителем Atlas F. При этом были использованы орбитальные плоскости с углом наклона к плоскости экватора в 63 градуса. Высота орбит относительно земной поверхности около 20 200 км. Период обращения спутников вокруг Земли — 11 ч 57 мин 58,3 с.

В феврале 1989 г. с помощью системы McDonnell Douglas Delta 2 был выведен на орбиту первый спутник, относящийся к группировке Блок-II. Основные отличительные особенности этого блока следующие:

- наклон орбитальной плоскости выбран равным 55 градусов (вместо 63 градусов для Блока-I);
- расчетный срок активного существования спутника — 5 лет (при этом масса спутника на орбите возросла до 844 кг);
- введена дополнительная защита кодированных посылок от несанкционированных пользователей (в частности, дополнительной кодировке подвергнут P-код).

За период с 1989 г. по 1997 г. на орбиты было выведено 28 спутников, входящих в Блок-II.

С 1998 г. на орбиту стали выводиться спутники, входящие в Блок-II R. Планируется ввести в эксплуатацию 25 спутников этой группы.

Отличительная особенность космических аппаратов, входящих в данную группу, состоит в следующем:

- расчетный срок активного существования повышен до 7,5 лет (при этом предполагается, что реальный срок может составить 10 лет);
- масса спутника на орбите увеличена до 1044 кг;
- спутники могут передавать пользователям качественную информацию без контакта с сектором управления и контроля в течение 14 суток.

На спутниках Блока-II R размещаются средства межспутниковой связи, позволяющие за счет обмена данными и измерения расстояний между спутниками производить автономное уточнение параметров орбит спутников и автономную синхронизацию установленных на спутниках часов.

В спутниках Блок-II F, которые в ближайшей перспективе должны заменить спутники Блок-II R, планируется увеличить срок службы до 14-15 лет, усовершенствовать структуру передаваемых со спутников сигналов и улучшить координатно-временное обеспечение космических аппаратов. При этом предполагается ввести в состав передаваемых сигналов дополнительную частоту L5, равную 1176,45 МГц, что существенно облегчит процесс разрешения неоднозначностей, характерных для фазовых измерений. Снижение систематических ошибок при навигационных определениях за счет повышения точности эфемеридного и временного обеспечения позволит гражданским пользователям повысить точность абсолютных координатных определений до 5 м [73].

Развертывание и совершенствование космического сектора, относящегося к системе ГЛОНАСС, также осуществлялись поэтапно.

Первый спутник системы ГЛОНАСС с условным названием Космос 1413 был запущен 12 октября 1982 г. К концу 1998 г. было запущено 74 спутника, большинство из которых к настоящему времени выведено из эксплуатации [17]. На 10 февраля 2000 г. в обращении осталось 8 спутников.

По проектным данным «созвездие» спутников ГЛОНАСС также должно включать в себя 24 спутника, размещаемых в трех орбитальных плоскостях, наклон которых по отношению к плоскости экватора выбран равным 64,8 градуса. Номинальная высота круговой орбиты над земной поверхностью составляет 19 100 км, а период обращения спутника вокруг Земли — 11 ч 15 мин 44 с. Общая масса спутника равна 1415 кг. Расчетный срок службы — 3,5 года.

Модернизацию спутников системы ГЛОНАСС предполагается выполнить после 2000 г. При этом планируется повысить стабильность частоты опорных генераторов, установленных на спутнике, повысить точность определения эфемерид и их прогноз, а также увеличить срок

службы спутников до 5 лет. Федеральная целевая программа «Глобальная навигационная система» принятая на 2001-2011 годы предусматривает не только укомплектование орбитальной группировки, но также упрощение доступа к информации о ГЛОНАСС для гражданских пользователей. В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 7 марта 1995 года № 237 обеспечение информацией о состоянии системы ГЛОНАСС осуществляет Координационный научно-информационный центр МО РФ. В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 3 августа 1999 года № 896 ежедневно (кроме выходных и праздничных дней) состояние орбитальной группировки ГЛОНАСС публикуется в сетях общего пользования на сайте [http://www.rssi.ru/SFCSIC/SFCSIC\\_main.html](http://www.rssi.ru/SFCSIC/SFCSIC_main.html).

Информацию гражданским потребителям предоставляют по следующим разделам:

1. Информационная группа «Состояние», которая включает информацию о состоянии орбитальной группировки ГЛОНАСС. Все даты даны для московского времени (UTC+0300).

2. Информационная группа «Сводка» включает:

- информацию о спутниках, плоскостях, точках и номерах частот;
- сообщения о будущих и прошедших событиях, влияющих на состояние системы, а также сообщения о событиях, не меняющих состояние системы.

3. Информационная группа «Сообщения» включает сообщения потребителям системы ГЛОНАСС.

### *1.5.2. Назначение и схемная реализация устанавливаемой на спутниках аппаратуры*

В соответствии с рассмотренной в подразделе 1.2 общей идеологией одностороннего спутникового метода измерения расстояний на спутнике размещается передающая часть дальномерного комплекса, с помощью которого формируются и передаются по радиоканалам на Землю все необходимые сигналы, участвующие в процессе проводимых измерений. Как уже отмечалось ранее, на начальной стадии разработки систем GPS и ГЛОНАСС планировалось ее создание как навигационных систем военного назначения. При этом основное внимание было уделено формированию кодовых сигналов, с помощью которых предполагалось реализовать возможность оперативного определения расстояний между спутниками и наземной аппаратурой с точностью, характеризуемой погрешностями в десятки и сотни метров. При проектировании таких систем было признано целесообразным применение двух видов закодированных сигналов. Для системы GPS эти ви-

ды получили название общедоступного грубого кода (С/А-кода) с разрешающей способностью в несколько десятков метров и санкционированного точного кода (Р-кода) с разрешающей способностью примерно в 10 раз более высокой. Применительно к системе ГЛОНАСС такие кодовые посылки получили название узкополосной и широкополосной псевдослучайной последовательности (СТ-код и ВТ-код). Передача со спутника обоих сигналов осуществляется посредством модуляции несущих колебаний дециметрового диапазона.

Наряду с перечисленными выше функциями расположенная на спутнике аппаратура должна также передавать на Землю навигационное сообщение, назначение которого было отмечено в подразделе 1.4.

Все формируемые на борту спутника несущие и кодовые сигналы, а также бинарные сигналы для передачи навигационного сообщения получают на основе использования установленных на спутнике высокостабильных опорных генераторов.

На заключительной стадии сформированные сигналы объединяются и после соответствующего усиления излучаются спутниковой антенной системой в направлении земной поверхности.

Взаимодействие входящих в состав спутниковой аппаратуры электронных узлов проиллюстрировано схемой, приведенной на рис. 1.3.

Основой данной функциональной схемы является высокостабильный опорный генератор, который называют также бортовым эталоном времени и частоты (БВЭЧ). Частота возбуждаемых таким генератором колебаний выбрана равной: для GPS — 10,23 МГц, а для ГЛОНАСС — 5,11 МГц. На базе использования этого генератора формируются не только все передаваемые со спутника сигналы, но и реализуются высокоточные электронные часы, показания которых используются как в процессе выполнения спутниковых измерений, так и для передачи сигналов точного времени.

В системе GPS колебания несущих частот, получивших условные обозначения L1 и L2, формируются посредством умножения частоты задающего опорного генератора соответственно на 154 и на 120. Получаемые при этом частоты  $f_{L1} = 1575,42$  МГц и  $f_{L2} = 1227,60$  МГц соответствуют дециметровому диапазону ( $\lambda_{L1} = 19,0$  см и  $\lambda_{L2} = 24,4$  см).

В системе ГЛОНАСС с помощью соответствующих синтезаторов частот для каждого спутника формируется своя пара несущих частот, одна из которых относится к верхнему (L1), а другая — к нижнему (L2) диапазонам частот. При этом для верхнего и нижнего диапазонов несущие частоты, характерные для конкретного спутника, определяются по формулам:

$$f_{Lk} = f_{L0} + k\Delta f_P$$

$$f_{2,k} = f_{2,0} + k\Delta f_2$$

где  $f_{1,0} = 1602,000$  МГц, а  $\Delta f_1 = 0,5625$  МГц;  $f_{2,0} = 1246,000$  МГц, а  $\Delta f_2 = 0,4375$  МГц;  $k$  – условный порядковый номер пары несущих частот  $f_{1,k}, f_{2,k}$ .

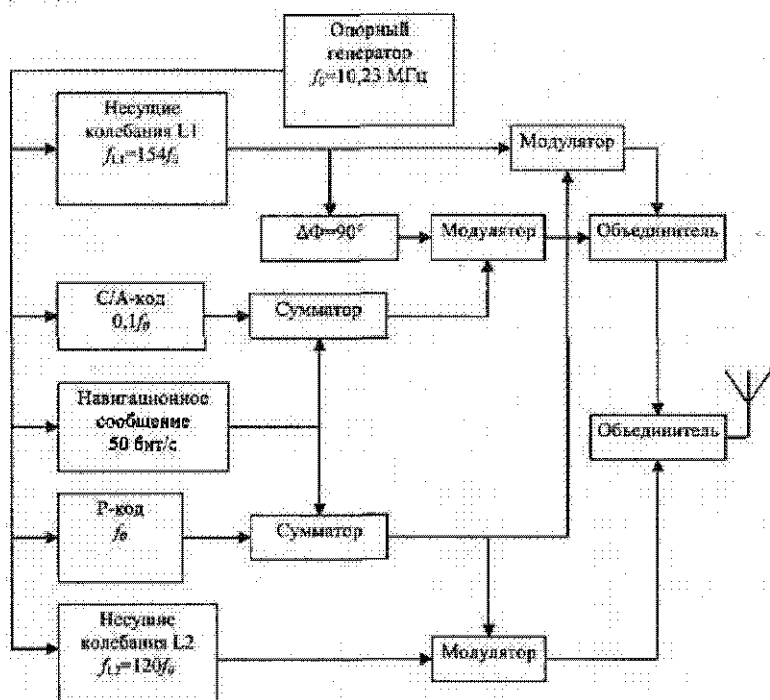


Рис. 1.3. Упрощенная функциональная схема установленной на спутнике аппаратуры для системы GPS

Несущие колебания в рассматриваемых системах используются не только в качестве переносчиков информации со спутников в наземную аппаратуру, но и являются основными сигналами при выполнении фазовых измерений, с помощью которых удастся определять расстояния между спутником и наземным пунктом с характерной для геодезии высокой точностью.

Формируемые на спутнике кодовые сигналы предназначены, прежде всего, для оперативного измерения расстояний на пониженном уровне точности, характерном для решения навигационных задач. Применительно к системе GPS эти сигналы используются для распознавания конкретного номера спутника, захвата собственного ему сигнала и удержания его в течение всего сеанса наблюдений.

Численные значения характерных для кодовых сигналов тактовых частот, получаемых на основе использования частоты опорного генератора, в системе GPS выбраны следующими:

для C/A-кода  $-f_{CA} = f_0/10 = 1,023 \text{ МГц}$ , для P-кода  $-f_P = f_0 = 10,23 \text{ МГц}$ .

В системе ГЛОНАСС тактовые частоты для СТ-кода и ВТ-кода соответственно:

$f_{СТ} = 0,511 \text{ МГц}$  и  $f_{ВТ} = 5,11 \text{ МГц}$ .

Информация, содержащаяся в навигационном сообщении, передается на более низкой частоте ( $F_{НС} = 50 \text{ бит/с}$ ), при формировании которой также используются колебания опорного генератора.

Поступающие с выходов кодирующих устройств кодовые последовательности суммируются с сигналами навигационного сообщения, после чего они поступают в модуляторы (перемножители), где осуществляется фазовая модуляция несущих колебаний L1 и L2. При этом колебания L1 подвергаются модуляции кодовыми сигналами как C/A-кода, так и P-кода, в то время как колебания L2 модулируются только сигналами P-кода с наложенным на них навигационным сообщением.

Для облегчения разделения на приемном конце кодовых сигналов (C/A и P-кода), передаваемых на частоте L1, несущие колебания, используемые для передачи C/A-кода, дополнительно сдвигаются по фазе на 90 градусов, что позволяет реализовать в аппаратуре потребителя так называемый квадратурный принцип разделения принимаемых сигналов.

После формирования на спутнике фазомодулированных сигналов несущей частоты последние объединяются с помощью соответствующих электронных узлов в один комплексный сигнал, который излучается спутниковой антенной системой.

### *1.5.3. Высокостабильные спутниковые опорные генераторы*

Из приведенного в предыдущем подразделе краткого описания установленной на спутнике аппаратуры следует, что наиболее ответственным узлом является высокостабильный опорный генератор, на основе которого формируются несущие колебания с частотами L1 и L2, кодовые сигналы, соответствующие двум упомянутым выше кодам, а также передаваемое со спутника навигационное сообщение. Кроме того, опорный генератор представляет собой основную составную часть установленных на спутнике электронных часов, показания которых используются как в измерительном процессе, так и при формировании сигналов точного времени.

К основным требованиям, предъявляемым к спутниковым опорным генераторам, следует отнести, прежде всего, необходимость ре-

лизации максимально достижимой стабильности работы и обеспечение высокой надежности их функционирования.

Исходя из первого требования, в системах GPS и ГЛОНАСС находят применение наиболее стабильные атомные и молекулярные генераторы. К ним относятся рубидиевые и цезиевые атомные генераторы, а также водородные молекулярные генераторы (мазеры). Для иллюстрации в табл. 1.1 приведены некоторые количественные показатели, характеризующие свойственную этим генераторам относительную нестабильность частоты для различных временных интервалов.

Таблица 1.1

Характеристика	Тип генератора		
	Рубидиевый	Цезиевый	Водородный
Масса, кг	2	10	30
Энергопотреб., Вт	10	20	30
Объем, куб. дм	1	10	30
Относительная нестабильность частоты за:			
1 с	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-13}$
1 мин	$2 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-14}$
1 ч	$1 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-14}$
1 сут	$5 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-14}$
Систематический дрейф	$3 \cdot 10^{-11}$ (за месяц)	$3 \cdot 10^{-12}$ (за год)	Не обнаружен
Причины снижения стабильности	Снижение качества лампы	Шумы в лучевой трубке	Ограниченный запас водорода

Из табл. 1.1 следует, что наибольшая стабильность частоты характерна для водородных мазеров. Что касается двух других типов атомных генераторов, то цезиевые генераторы в сравнении с рубидиевыми генераторами обеспечивают более высокую долговременную стабильность, в то время как для рубидиевых генераторов свойственна более высокая кратковременная стабильность.

Для повышения надежности и стабильности работы на спутниках устанавливают несколько одновременно работающих опорных генераторов. Так, в системе GPS на спутниках Блок-II находятся два цезиевых и два рубидиевых генератора. На спутниках Блок-II R вводятся в действие более стабильные водородные мазеры.

Поскольку находящиеся на спутниках опорные генераторы выполняют роль бортовых эталонов не только частоты, но и времени, то в специализированной литературе такие генераторы часто называют часами.

### 1.5.4. Принципы формирования кодовых последовательностей

Из всех перечисленных выше создаваемых на спутнике сигналов наибольшего внимания заслуживают принципы формирования кодовых сигналов как из-за нестандартных подходов к реализации этих принципов, так и из-за необходимости знания характерных особенностей сформированных кодовых последовательностей, используемых при организации приема спутниковых сигналов и выполнения псевдодаленомерных измерений.

С учетом отмеченных предпосылок рассмотрим вкратце принцип формирования упомянутых сигналов и в частности характерного для системы GPS общедоступного C/A-кода. В соответствии с общей функциональной схемой (см. рис. 1.3) такой кодированный сигнал формируется на основе использования генерируемых задающим генератором колебаний, частота которых подвергается 10-кратному делению. Образованная при этом последовательность остроконечных импульсов с периодом следования около 1 мкс поступает на ленточный сдвиговый регистр с обратными связями. Сдвиговый регистр – это набор соединенных между собой однобитовых ячеек памяти. Когда на вход цепочки из сдвиговых регистров поступает импульсный сигнал, содержимое такой последовательности регистров (т. е. их состояние) сдвигается на один бит в направлении к выходу. Для формирования кодового сигнала в цепочку из сдвиговых регистров вводят определенное количество обратных связей, которые по предписанной закономерности будут дополнительно изменять состояние входной ячейки памяти (рис. 1.4).

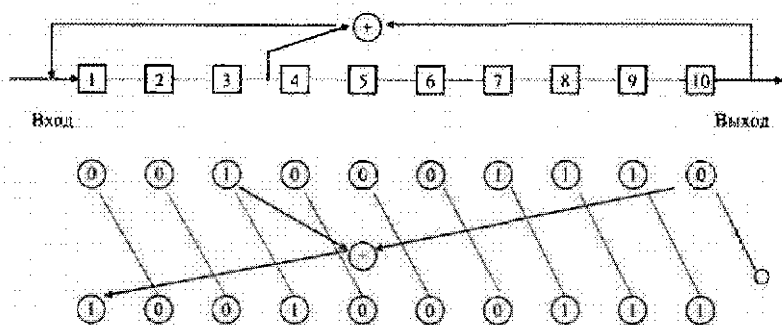


Рис. 1.4. Принцип работы используемых в GPS сдвиговых регистров с обратными связями

Приведенная на рис. 1.4 схема получила название ленточного сдвигового регистра с обратными связями. В частности, на приведенной схеме обратные связи организованы за счет передачи состояний



3-й и 10-й ячейки на бинарный сумматор, с выхода которого сигнал поступает на вход 1-й ячейки. Если ячейки 3 и 10 имеют разные состояния, то в 1-й ячейке из-за воздействия цепи обратной связи установится уровень равный единице, а если одинаковые — то нулевой уровень. В аналитической форме ленточные сдвиговые регистры с обратной связью принято характеризовать полиномами типа  $1 + X^3 + X^{10}$ , где показатель степени соответствует номеру ячейки, участвующей в организации обратной связи.

На GPS-спутниках C/A-код формируется с помощью двух десятибитовых ленточных сдвиговых регистров, один из которых имеет полиномиальное представление в виде  $1 + X^3 + X^{10}$ , а другой  $1 + X^2 + X^3 + X^6 + X^8 + X^9 + X^{10}$ . На рис. 1.5 приведена взаимосвязь таких регистров.

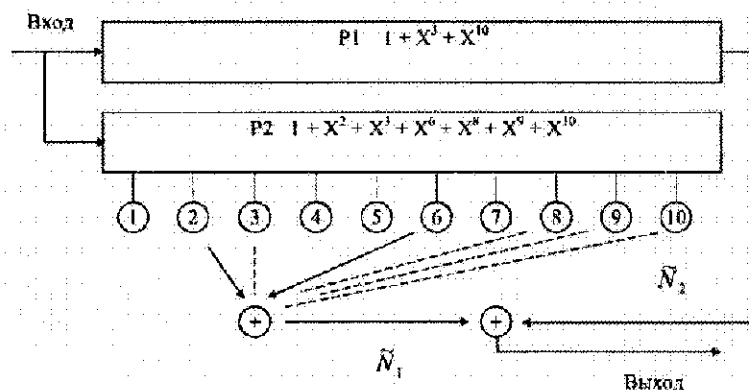


Рис. 1.5. Взаимосвязь двух сдвиговых регистров при формировании C/A-кода

Для каждого GPS-спутника формируется свой C/A-код за счет подачи на сумматор сигналов от различных пар ячеек, входящих в состав регистра P2. Такое семейство кодов получило название кодов Голда, характерная особенность которых состоит в том, что любые две модификации кодов имеют очень слабую перекрестную корреляцию, в результате чего в аппаратуре потребителя облегчается разделение сигналов, которые поступают одновременно от различных спутников.

Полная неповторяющаяся последовательность C/A-кода состоит из 1023 бит, что соответствует длительности равной одной миллисекунде. Форма сигналов, характерная для кодовых последовательностей, приведена на рис. 1.6.

Изображенная на рис. 1.6 форма сигнала свидетельствует о том, что кодированию подвергается длительность посылок единичного и нулевого уровня. Наиболее короткая посылка получила название чипа.

Данная элементарная посылка определяет характерную для С/А-кода тактовую частоту, которая, как уже отмечалось ранее, равна 1,023 МГц.

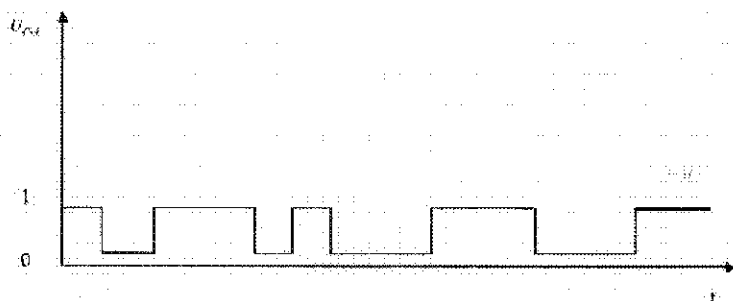


Рис. 1.6. Характерная форма кодовой последовательности

Формирование санкционированного точного Р-кода базируется на аналогичных принципах за исключением того, что вместо двух используются четыре десятичные сдвиговых регистра. Эти регистры объединяются попарно, образуя последовательности, содержащие соответственно 15 345 000 и 15 345 037 элементарных посылок. Две упомянутые последовательности объединяются между собой с введением 37 различных задержек с целью формирования 37 различных однедельных частей Р-кода, каждая из которых характерна только для одного конкретного спутника. В отличие от С/А-кода длительность элементарной посылки равна примерно 0,1 мкс, а период повторения всей кодовой последовательности около 266 суток.

Выбранный принцип формирования Р-кода обеспечивает высокую защищенность от использования его несанкционированными потребителями.

В системе ГЛОНАСС применяется аналогичный метод формирования кодовых сигналов. При этом выбранные коды базируются на использовании М-последовательности, которая применительно к СТ-коду описывается полиномом  $1 + X^5 + X^9$ , т.е. для организации обратной связи в ленточном сдвиговом регистре используются выходы с 5-й и с 9-й ячеек этого регистра. Как уже отмечалось выше, тактовые частоты для СТ- и ВТ-кодов выбраны равными 0,511 МГц и 5,11 МГц. Уменьшение в 2 раза значений этих частот в сравнении с соответствующими тактовыми частотами, применяемыми в GPS, обуславливает снижение потенциальной точности дальномерных измерений, основанных на использовании соответствующих кодовых сигналов.

### 1.5.5. Содержание и формирование на спутнике навигационного сообщения

При работе с рассматриваемыми системами позиционирования наряду с информационными сигналами, непосредственно участвующими в процессе дальномерных измерений, возникает необходимость в передаче со спутника в наземную аппаратуру целого набора разнообразной информации. Эта информация так или иначе используется потребителем как при выполнении всего комплекса вычислений, связанных с определением местоположений интересующих точек стояния, так и с получением сигналов точного времени.

К такой, получившей название навигационной, информации относятся эфемериды спутника, поправки за показания часов конкретного спутника, время, характерное для рассматриваемой системы, поправки за влияние ионосферы, состояние работоспособности спутника, а также некоторая другая вспомогательная и служебная информация. Весь этот комплекс информации формируется в виде строго предписанной последовательности, составляющей содержание навигационного сообщения.

Формат упомянутого сообщения (рис. 1.7) применительно к системе GPS представляет собой кадр, разделенный на пять субкадров, которые часто называют строками. Каждая строка содержит 10 стандартизированных слов, состоящих из 30 бит. Длительность одного бита — 0,02 с, одного слова — 0,6 с, одной строки — 6 с, а всего кадра — 30 с.

Содержание первого, второго и третьего субкадра повторяется каждые 30 с. Что касается четвертого и пятого субкадров, содержащих достаточно большой объем информации об альманахе, включающем в себя краткую информацию о всем «созвездии» спутников, то они состоят из 25 страниц, на передачу которых затрачивается 12,5 мин.

Каждый субкадр начинается с телеметрического слова (TLM), содержащего сигнал синхронизации и некоторую диагностическую информацию. Второе слово в каждом субкадре представляет собой ключ, который в зарубежной литературе часто условно называют словом передачи (HOW), которое используется для распознавания спутника и идентификации поступающей информации, а также для формирования показаний счета времени (Z-счет).

В первом субкадре передаются признаки отождествления и работоспособности спутника, коэффициенты полинома второй степени, моделирующего поправки к показаниям часов наблюдаемого спутника, информацию о календарном отсчете времени и некоторые другие признаки.

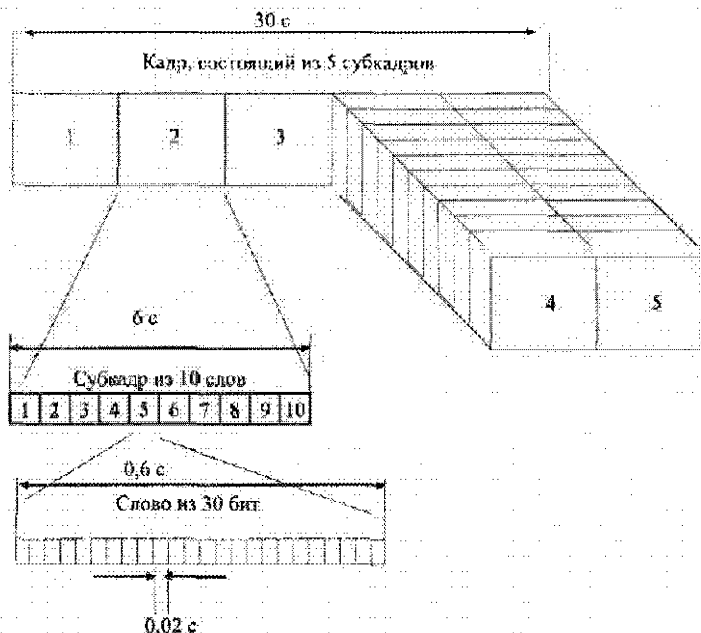


Рис. 1.7. Структура навигационного сообщения системы GPS

Во втором и третьем субкадрах содержится эфемеридный ряд данных с поправками к кеплеровым орбитам, позволяющий потребителю вычислять текущие координаты спутника, относящиеся к тому моменту времени, когда производится измерение расстояния до спутника. Содержание четвертого и пятого субкадров изменяется в каждом последующем кадре, причем информация начинает повторяться через каждые 25 кадров. Таким образом, суммарная информация этих субкадров состоит из 25 страниц, на передачу которых затрачивается 750 с, т. е. 12,5 мин.

Значительное количество страниц в четвертом субкадре резервируется для военного использования. В остальной части содержится информация о поправках за влияние ионосферы, о показаниях времени UTC, а также данные альманаха, т. е. приближенная информация о всех спутниках с номерами, превышающими номинальное «созвездие».

Страницы пятого субкадра посвящены, главным образом, данным альманаха и статусу работоспособности первых 24 спутников, находящихся на орбитах.

Следует заметить, что идентичное содержание страниц четвертого и пятого субкадров передается по радиоканалу каждым спутником. Поэтому при отслеживании только одного спутника можно получить

всю входящую в состав альманаха краткую информацию о всех находящихся на орбитах спутниках. Рассмотренное выше навигационное сообщение передается с каждого спутника в цифровой форме на обеих несущих частотах (см. рис. 1.3).

### *1.5.6. Методы объединения и формы передачи радиосигналов со спутника в аппаратуру потребителя*

Приведенная на рис. 1.3 упрощенная функциональная схема спутниковой аппаратуры свидетельствует о том, что со спутника излучаются радиоволны, объединяющие в себе различные типы сигналов. Рассмотрим вкратце принципы объединения таких сигналов, формы их передачи и требования, которые предъявляются к формированию суммарных радиосигналов.

Непосредственно из рис. 1.3 следует, что на первой стадии возникает необходимость объединения кодовых сигналов с навигационным сообщением, причем такое объединение для Р-кода и для С/А-кода производится отдельно с использованием сумматоров. Основным методом объединения кодовой последовательности с навигационным сообщением является бинарное суммирование, при котором одинаковые уровни чипов кода и сообщения обуславливают появление на выходе сумматора сигнала нулевого уровня, а при разных состояниях (1 и 0) — сигнал единичного уровня.

Для дальнейшей передачи отмеченных выше объединенных сигналов используется метод бинарной парафазной модуляции несущих колебаний дециметрового диапазона. Сущность такого метода состоит в том, что при смене уровней объединенных кодовых сигналов (от 0 к 1 или от -1 к +1 и в обратном направлении) фаза несущих колебаний скачком изменяется на 180 градусов (рис. 1.3).

Если немодулированные несущие колебания представить в следующей аналитической форме:

$$U = U_m \cos(ft), \quad (1.21)$$

где  $U_m$  и  $f$  — амплитуда и частота несущих колебаний;  $t$  — текущее время, то модулированные колебания описываются в GPS системе соотношениями:

а) для частоты L1

$$U_{L1} = U_{m,L1} (P(t)D(t)\cos(f_{L1}t) + C/A(t)D(t)\sin(f_{L1}t)); \quad (1.22)$$

б) для частоты L2

$$U_{L2} = U_{m,L2} P(t)D(t)\cos(f_{L2}t),$$

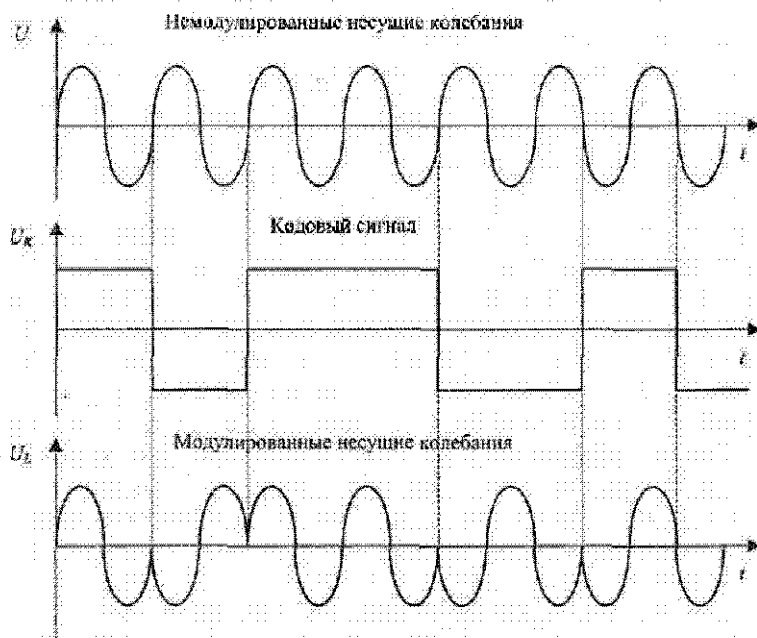


Рис. 1.8. Принцип бинарной фазовой модуляции несущих колебаний

где  $P(t)$ ,  $C/A(t)$  и  $D(t)$  – последовательности бинарных состояний Р-кода, C/A-кода и навигационного сообщения, соответствующие уровням +1 или -1.

Описываемый уравнениями (1.22) объединенный сигнал подается в установленное на спутнике антенное устройство, с помощью которого модулированные радиосигналы дециметрового диапазона излучаются в направлении земной поверхности.

К формируемым на спутниках GPS-сигналам предъявляются следующие основные требования:

1. Все передаваемые со спутника типы сигналов должны быть когерентными, т.е. формироваться с помощью одного и того же бортового опорного генератора. Разность во времени передачи C/A-кода и Р-кода не должна превышать 10 нс.

2. Формирование несущих колебаний должно осуществляться с минимальным уровнем аппаратурных шумов. Флюктуации фазы отмеченных колебаний не должны превышать 5 градусов.

3. Квадратурная реализация двух сдвинутых по фазе на 90 градусов сигналов с частотой L1 должна осуществляться с погрешностью не более 5 градусов.

4. Разность аппаратурных задержек сигналов с частотами L1 и L2 на входе в антенное устройство не должна превышать 15 нс при вариациях не более 3 нс.

Используемая в GPS бинарная парафазная модуляция обуславливает достаточно широкую полосу пропускания (не менее 20 МГц), в связи с чем данную систему позиционирования относят к системе с расширенным спектром. К положительным свойствам таких широкополосных систем могут быть отнесены такие позитивные моменты, как повышенная помехоустойчивость и достаточно высокая разрешающая способность. Вместе с тем при приеме характерных для GPS широкополосных сигналов, который осуществляется одновременно от нескольких спутников, излучающих сигналы на одних и тех же несущих частотах, в аппаратуре потребителя приходится принимать соответствующие меры для разделения упомянутых сигналов и для устранения их взаимного влияния (в частности, сжатие спектра в процессе выполнения гетеродинирования, применение узкополосных фильтров после осуществления демодуляции и другие радиотехнические приемы). Более подробно этот круг вопросов рассмотрен в специализированной литературе.

## 1.6. Сектор управления и контроля

### 1.6.1. Основные функции сектора

Для поддержания постоянной работоспособности всего космического сектора и для систематического обновления передаваемой потребителю информации, которая нуждается в периодической корректировке, в современных глобальных спутниковых системах позиционирования (таких, например, как GPS и ГЛОНАСС) предусматривается специальный постоянно действующий сектор, получивший название сектора управления и контроля (в отечественной литературе этот сектор часто называют также наземным комплексом управления [73]).

Как уже отмечалось в подразделе 1.4, данный сектор призван выполнять следующие функции:

- осуществлять непрерывное отслеживание всей передаваемой спутниками информации;
- производить обобщение и анализ такой информации с целью своевременной корректировки всех используемых при дальнейшей обработке показателей;
- на основе выполняемого анализа предсказывать эфемериды наблюдаемых спутников и передаваемое со спутников потребителям точное время;

— через строго определенные интервалы времени формировать обновленные навигационные сообщения и передавать такие сообщения по радиоканалу на соответствующие спутники;

— выявлять неисправности в работе спутников и принимать меры по их устранению;

— осуществлять корректировку орбит спутников не только за счет введения соответствующих поправок, но и посредством дистанционного управления реактивным двигателем, находящимся на борту спутника.

Среди различных контролируемых и корректируемых параметров повышенное внимание уделяется периодическим уточнениям эфемерид и показаний часов спутников.

Определение уточненных текущих значений эфемерид отдельных спутников, используемых при вычислении соответствующих поправок в предсказанные их значения, осуществляется методом пространственной линейной засечки. При этом производятся одновременные измерения расстояний до конкретного спутника по крайней мере с трех находящихся на земной поверхности пунктов, координаты которых хорошо известны.

Корректировка показаний спутниковых часов осуществляется посредством сравнения принятых по радиоканалу отсчетов времени по этим часам с соответствующими показаниями наземных опорных часов, входящих в состав сектора управления и контроля.

Наряду с отмеченными показателями данным сектором постоянно контролируются и корректируются поправки, обусловленные влиянием атмосферы.

Реализация перечисленных функций рассматриваемого сектора базируется на четком взаимодействии входящих в этот сектор таких станций различного назначения, как станции слежения, ведущая станция и загружающие станции. Ниже приведена краткая информация о специфике работы упомянутых станций и их взаимодействии.

### *1.6.2. Компоненты сектора управления и контроля и их взаимодействие*

Рабочий сектор управления и контроля GPS-системы состоит из одной ведущей станции управления, пяти станций слежения и трех загружающих станций.

Пять станций слежения, которые часто называют мониторинговыми станциями, осуществляют круглосуточные отслеживания спутников. Они равномерно распределены по всему земному шару. В частности, такие станции расположены на островах Вознесения и Гавайи, на атоллах Кваджалейн и Диего-Гарсия. Одна из станций совмещена



по своему местоположению с ведущей станцией, находящейся в Колорадо-Спрингс (США).

Отслеживание спутниковых сигналов осуществляется с помощью двухчастотных специализированных приемников, оборудованных атомными (цезиевыми) часами. Координаты этих станций известны с высокой степенью точности. Рассматриваемые станции слежения работают полностью в автоматическом режиме, а их управление осуществляется с ведущей станцией.

С помощью данных станций производят измерения расстояний до всех находящихся в поле зрения спутников, принимают со спутников навигационные сообщения на частотах L1 и L2, в результате чего имеется возможность определить текущие поправки, обусловленные влиянием ионосферы. Кроме того, регистрируется точность хода спутниковых часов. Наряду с этим в местах расположения станций слежения собирают и ретранслируют на ведущую станцию метеорологические данные, относящиеся к местным условиям. К таким данным относятся температура, давление и влажность воздуха, так что тропосферные задержки передаваемых со спутников сигналов могут быть определены и откорректированы.

Определение расстояний до спутников производится на основе использования кодовых сигналов. При этом псевдодальности на станциях слежения измеряются с точностью около 2,5 м каждые полторы секунды. На основе таких измерений уточняются текущие значения эфемерид спутников и осуществляется их предсказание на ближайшее будущее.

В процессе наблюдений с помощью станций слежения регистрируются радиосигналы от всех находящихся в поле зрения спутников, угол возвышения которых над горизонтом превышает 5°. Однако в обработку принимают только те измерения, которые соответствуют углам возвышения более 15°, так как при малых значениях этих углов существенно возрастают тропосферные задержки, что может приводить к нежелательному понижению точности измерений, которые используются для предсказаний эфемерид спутников.

Ведущая станция управления, находящаяся в Колорадо-Спрингс (США), является рабочим центром всей системы GPS. Операции управления целиком закреплены за этой станцией. Она непрерывно собирает информацию от всех перечисленных выше станций слежения. Упомянутая информация используется для вычисления будущих орбит как функций времени, а также для определения поправок к показаниям часов спутников. Наряду с этим осуществляется формирование навигационного сообщения с параметрами орбиты для индивидуального спутника и с поправками к показаниям его часов, а также аль-

манаха, который включает в себя краткую информацию о всех спутниках. Три раза в сутки навигационное сообщение передается на спутники с помощью загрузающих станций.

Ведущая станция непрерывно оперирует с большим количеством параметров системы, важнейшими из которых являются текущие координаты спутников и сигналы точного времени. Входящие в состав ведущей станции высокоточные часы выполняют роль опорных часов для всей системы GPS. Эти часы устанавливают временной масштаб GPS и непосредственно связаны с национальным стандартом времени США. Все другие часы оцениваются посредством сравнения с опорными часами, в результате чего осуществляется синхронизация всех часов GPS.

Через станции загрузки ведущая станция может корректировать орбиты спутников, как за счет введения соответствующих поправок, так и с помощью управления находящимся на борту спутника реактивным двигателем. Кроме того, данная станция может управлять режимом работы активных резервных спутников, переводя их в необходимых случаях в рабочий режим.

Три наземные загрузающие станции расположены на атоллах Дисго-Гарсиа и Кваджалейн, а также на острове Вознесения. Входящие в их состав антенные устройства представляет собой большие параболические зеркальные антенны диаметром около 10 м. Они используются для передачи навигационных сообщений, а также команд управления на спутники. Передача осуществляется на частоте 1783,74 МГц. Для приема этих сигналов на спутнике в составе спутникового аппаратного комплекса предусмотрено соответствующее приемное устройство, информация с выхода которого поступает в модуль памяти.

Для обеспечения бесперебойной работы сектора управления и контроля все основные составные части системы продублированы.

На рис. 1.9 приведена схема, поясняющая взаимодействие станций, входящих в состав рассматриваемого сектора.

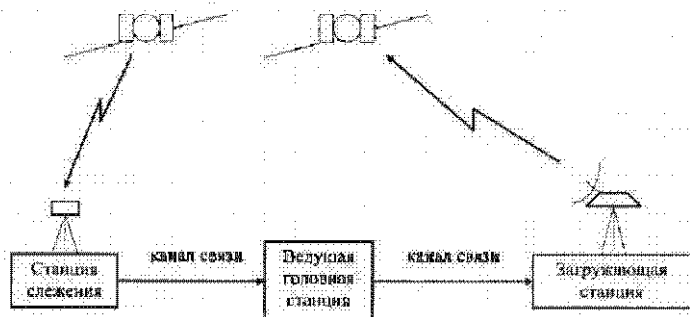


Рис. 1.9. Схема совместной работы станций, входящих в состав сектора управления и контроля

Как уже отмечалось ранее, принимаемая каждой из пяти станций слежения информация от находящихся в поле зрения спутников дополняется местной информацией, а затем передается в «он-лайновом» режиме (т. е. в темпе поступления информации) по специально предусмотренному для этих целей каналу связи на ведущую станцию, представляющую собой достаточно мощный вычислительный центр. Получаемая после соответствующей обработки информация в виде обновленного навигационного сообщения и других служебных команд поступает по каналу связи на загрузающие станции, которые передают упомянутую информацию конкретно на тот спутник, для которого предназначена эта информация. Наряду с описанной выше постоянной циркуляцией потока информации, позволяющей обновлять содержание поступающих потребителю сведений, на головной (ведущей) станции формируется банк данных, содержащий вычисляемые значения эфемерид, точность которых существенно выше точности предсказываемых эфемерид, которые сбрасываются потребителю со спутника в составе навигационного сообщения. По запросу такие уточненные значения эфемерид поставляются потребителям, заинтересованным в получении результатов спутниковых геодезических измерений повышенной точности.

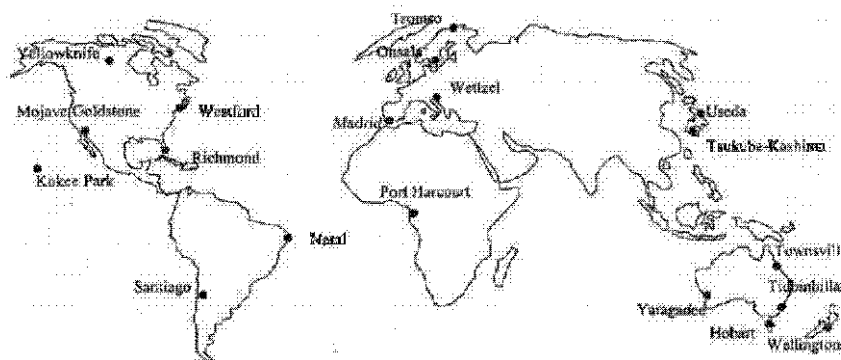


Рис. 1.10. Схема расположения станций CIGNET по состоянию на 1991 г.

Кроме официальной сети слежения существуют другие сети, определяющие эфемериды спутников по факту и момент наблюдения и не принимающие участия в управлении системой. Наиболее обширной из таких сетей является Объединенная международная сеть GPS (CIGNET), контролируемая Национальной геодезической службой США (NGS). К началу 1991 г. существовало около 20 станций этой сети, схема расположения которых показана на рис. 1.10, а перечень приведен в табл. 1.2. Отмеченные в табл. 1.2 звездочками 12 участников CIGNET ежедневно передают данные слежения в головной вы-

числительный центр NGS, расположенный в Роквилле, штат Мериленд. Данные от остальных станций принимаются с задержкой от 2 до 7 суток. Все поступившие от станций слежения данные обрабатываются и в течение суток поступают в обращение по модемной связи.

Таблица 1.2

Название пункта	Страна
Hartebeesthoek	Южная Африка
*Hobart	Австралия
*Kokee Park	Гавайи, США
Madrid	Испания
*Mojave/Goldston	Калифорния, США
Natal	Бразилия
*Onsala	Швеция
Port Harcourt	Нигерия
*Richmond	Флорида, США
Santiago	Чили
Tidbinbilla	Австралия
*Town ville	Австралия
*Tromso	Норвегия
*Tsukuba-Kashima	Япония
Useda	Япония
*Wellington	Новая Зеландия
*Westford	Массачусетс, США
*Wettzell	Германия
Yaragadee	Австралия
*Yellowknife	Канада

Другой крупной сетью слежения является сеть Международной службы GPS для геодинамики (IGS). Схема расположения станций этой сети по состоянию на 1994 г. показана на рис. 1.11. Краткие сведения о некоторых пунктах, входящих в эту сеть, приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Название пункта	Организация	Страна	Долгота	Широта
Algonquin	NRCan/GSC	Канада	-78,07°	45,95°
Arequipa	NASA/JPL-GPFC	Перу	-71,48	-16,45
Bermuda	NOAA/NGS	Великобритания	-64,65	32,35
Casey	AUSLIG	Антарктида	110,53	-66,27
Davis	AUSLIG	Антарктида	77,97	-68,57
Easter Island	NASA/JPL	Чили	-109,38	-26,99

применительно к движущимся объектам — скорость и направление их перемещения.

Специфика работы приемно-вычислительного комплекса существенно зависит от той категории потребителей, на которые принято их подразделять. В частности эксплуатируемые в настоящее время системы GPS и ГЛОНАСС представляют собой системы двойного назначения, т. е. ориентированы на их использование как военными, так и гражданскими пользователями.

Характерная особенность работы аппаратуры, предназначенной для военных пользователей, состоит в том, что эта аппаратура должна работать оперативно и надежно в условиях проведения военных действий, обеспечивая при этом требуемую точность местонахождения не только неподвижных пунктов наблюдения, но и также таких движущихся объектов, как летательные аппараты, различного рода плавсредства и наземный транспорт. Применительно к таким условиям принимаются все меры для того, чтобы использование рассматриваемой системы позиционирования было недоступным для потенциального противника.

Гражданские пользователи упомянутых выше систем подразделяются на две основные подгруппы. Первая из них ориентирована на использование таких систем в навигации, а вторая — в геодезии. В настоящей публикации основное внимание уделено последнему направлению. Поскольку современное состояние системы ГЛОНАСС не позволяет успешно использовать ее для решения широкого круга геодезических задач, то основное внимание в этом разделе уделено описанию геодезических приемно-вычислительных комплексов, входящих в систему GPS.

### *1.7.1. Функции геодезического приемно-вычислительного комплекса*

К основным функциям находящегося в распоряжении потребителя приемно-вычислительного комплекса могут быть отнесены следующие:

- 1) прием радиосигналов от наблюдаемых спутников;
- 2) организация определений регистрируемых величин;
- 3) выполнение предварительной обработки полученных результатов измерений непосредственно на пункте;
- 4) проведение в камеральных условиях так называемой «пост-обработки», позволяющей получить окончательные значения интересующих потребителя величин.

Наряду с перечисленными выше функциями аппаратура потребителя совместно с прилагаемым к ней программным обеспечением

должна решать в полевых условиях и целый ряд вспомогательных задач, к которым относятся:

1) селекция принимаемых радиосигналов от конкретного спутника, т.е. отделение этого сигнала от сигналов всех других спутников, захват упомянутого сигнала и последующее его отслеживание на протяжении всего сеанса наблюдений;

2) демодуляция и декодирование принятых сигналов с целью их подготовки к выполнению измерений интересующих пользователя величин;

3) расшифровка передаваемого со спутника навигационного сообщения;

4) текущее управление всем процессом наблюдений и выполняемых в полевых условиях измерений;

5) предварительная обработка результатов измерений и организация их хранения с использованием тех или иных устройств памяти;

6) контроль за состоянием работоспособности всего приемного комплекса (самодиагностика), включая и контроль источников питания.

Все перечисленные выше функции реализуются на основе использования соответствующей структурной схемы приемной аппаратуры потребителя (рис.1.12) за исключением тех задач, которые решаются при выполнении «пост-обработки». Вопросы, связанные с обработкой материалов спутниковых наблюдений в камеральных условиях, рассмотрены в разделе 6.

### ***1.7.2. Обобщенная структурная схема геодезического спутникового приемника***

Поступающая в обращение от различных фирм-изготовителей геодезическая спутниковая аппаратура потребителя разнообразна, но отличительные особенности таких приемных устройств в большинстве случаев носят непринципиальный характер.

Исходя из этого представляется возможным рассмотреть обобщенную структурную схему GPS-приемника (см. рис. 1.12), которая позволяет обосновать необходимость использования приведенных на схеме основных компонентов такого приемного комплекса, их функций и взаимосвязь.

Из приведенной схемы следует, что входную часть GPS-приемника представляет антенное устройство, обеспечивающее прием радиосигналов от находящихся в поле зрения спутников. Выбранный тип и режим работы антенны оказывают существенное влияние не только на возможность приема сигналов от спутника, но и на точность производимых спутниковых измерений. С учетом этого рассмотрение основных особенностей работы антенного блока вынесено в отдельный подраздел 1.7.3.

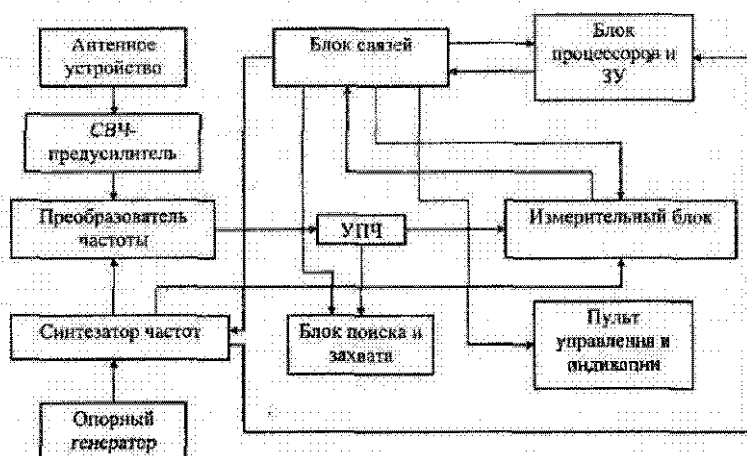


Рис. 1.12. Упрощенная обобщенная структурная схема GPS-приемника

Поскольку радиосигнал от спутника до приемника проходит весьма большое расстояние (около 20 тыс. км), а мощность установленного на спутнике передатчика сравнительно невелика (около 10 Вт), то на выходе антенны сигнал имеет чрезвычайно малую величину. При этом возникает необходимость в его предварительном усилении с помощью СВЧ-предусилителя, который, как правило, располагается в непосредственной близости от антенны. Сравнительно часто антенное устройство вместе с СВЧ-предуслителем оформляется в виде отдельного выносного блока, соединяемого с основным блоком приемника сравнительно длинным коаксиальным кабелем.

Поскольку многократное усиление СВЧ колебаний сопряжено с существенными техническими трудностями, то в спутниковых приемниках применяется супергетеродинный принцип, при реализации которого принимаемые колебания после предварительного усиления подвергаются преобразованиям, в результате которых существенно понижается частота несущих колебаний до нескольких десятков мегагерц. Образующуюся при этом промежуточную частоту часто называют частотой биений.

В качестве местного гетеродина используется высокостабильный опорный генератор, входящий в состав приемника. Необходимая для работы приемника сетка частот формируется с помощью синтезатора частот на основе использования в качестве исходных колебаний сигналов опорного генератора.

Основное усиление принимаемых сигналов осуществляется усилителем промежуточной частоты (УПЧ), подключенным к выходу преобразователя частоты.

Непосредственно с выходом УПЧ связаны блок поиска и захвата, а также измерительный блок. Поиск осуществляется на основе использования кодово-корреляционных методов, которые будут рассмотрены в подразделах 1.7.4 и 1.7.5. После завершения поиска происходит захват сигналов. Упомянутый захват позволяет производить отслеживание соответствующих сигналов на протяжении всего сеанса наблюдений, в котором участвует «захваченный» спутник.

В измерительном блоке производится разделение принимаемых фазомодулированных колебаний на кодовые и чисто гармонические сигналы, от которых отделяются также сигналы, входящие в состав передаваемого со спутника навигационного сообщения. При этом первые два вида сигналов используются в блоке процессоров для вычисления искомых расстояний до спутников, причем на основе полученных значений псевдодальностей производится грубое определение координат, а в случае необходимости и вектор скорости перемещения подвижного объекта, на котором установлен приемник, вычисление различного рода поправок и корректировка измеренных величин. Что касается фазовых измерений, то в приемном устройстве осуществляется только предварительное их сглаживание и группировка с передачей таких «сырых» данных в запоминающее устройство (ЗУ). Как уже отмечалось ранее, окончательная обработка фазовых измерений производится на стадии «пост-обработки» в камеральных условиях. Входящий в состав приемника блок процессоров наряду с предварительными вычислениями осуществляет управление работой приемника в автоматическом режиме на основе заложенного в него программного обеспечения.

Показанный на структурной схеме пульт управления и индикации включает в себя клавиатуру и индикаторное табло, на котором по желанию оператора могут отображаться определяемые с помощью приемника величины, а также другая вспомогательная информация. Клавиатура позволяет оператору вводить необходимую буквенно-цифровую информацию, а также различного рода команды.

### *1.7.3. Антенные устройства спутниковых приемников и предъявляемые к ним требования*

Как уже отмечалось в предыдущих разделах, основное назначение входящих в состав спутниковых приемников антенных устройств состоит в том, чтобы с наибольшей эффективностью производить преобразование распространяющихся в окружающем нас пространстве электромагнитных волн в соответствующие электрические сигналы,



которые можно передавать по электрическим цепям приемника, подвергая их усилению и различного рода преобразованиям.

Оценка качества применяемых в приемниках антенн принято характеризовать такими основными параметрами, как показатель преобразования, которое должно осуществляться с наименьшими энергетическими потерями (коэффициент усиления антенны), и показатель, характеризующий направленные свойства антенны (коэффициент направленного действия). Последний принято представлять в виде полярной диаграммы направленности. Применительно к спутниковым приемникам немаловажными являются и такие специфические для них показатели, как равномерность фазовой диаграммы направленности и стабильность положения фазового центра. Кроме того, спутниковые антенные устройства оцениваются степенью их защиты от влияния побочных, отраженных от окружающих объектов радиосигналов (влияние многопутности).

Для создания одинаковых условий приема для всех сигналов, поступающих от находящихся в поле зрения спутников, антенная система должна иметь диаграмму направленности в виде полусферы. Такая диаграмма направленности может быть сформирована на базе использования различных конструкций антенных систем дециметрового диапазона. К настоящему времени в спутниковых приемниках наибольшее распространение получили микрополосковые антенны (микрополосковые склейки), которые представляют собой своеобразную печатную плату с нанесенными на нее отдельными элементами антенны, при соответствующем соединении и фазировании которых удастся сформировать требуемую диаграмму направленности.

Применительно к спутниковым GPS-приемникам используется понятие амплитудной и фазовой диаграммы направленности. При этом амплитудная диаграмма направленности оценивает в относительных единицах уровень сигнала на выходе антенны в зависимости от направления его прихода, а фазовая диаграмма направленности — временные (или фазовые) задержки этих сигналов при их прохождении через антенное устройство. Идеальной формой фазовой диаграммы направленности также, как и амплитудной, является полусфера, обеспечивающая одинаковую величину задержек сигнала независимо от направления их прихода. При обеспечении такой формы эти задержки удастся исключить в случае использования разностных методов измерений.

На практике реальная форма фазовой диаграммы направленности несколько отличается от идеальной, в результате чего могут возникать ошибки в определении интересующих нас величин. При разработке высокоточных спутниковых приемников геодезического типа

стремятся к тому, чтобы отклонения реальной фазовой характеристики от идеальной не превышали 5-10 градусов, что соответствует ошибкам в определении расстояний на уровне около 3-5 мм.

Если приемник является двухчастотным, то для сигналов обеих частот ( $L_1$  и  $L_2$ ) формы диаграммы направленности должны быть по возможности идентичными.

Наряду с диаграммами направленности важным показателем антенного устройства спутникового приемника является понятие фазового центра, его положение и стабильность этого положения с течением времени. При этом под фазовым центром понимают ту, неподдающуюся геометрическим измерениям точку в антенной системе, от которой отсчитываются все измеряемые до спутников расстояния, а ее положение «привязывается» к положению соответствующей точки относимости на пункте наблюдения.

При использовании в приемнике конструкции антенны, симметричной относительно своей вертикальной оси, положение фазового центра в горизонтальной плоскости совпадает, как правило, с положением упомянутой оси симметрии. Что касается смещения этого центра по вертикали, то такое смещение определяется на основе специальных исследований (чаще всего в процессе настройки и калибровки антенны). В высокоточных приемниках геодезического типа положение фазового центра стремятся определить на миллиметровом уровне точности и принимают все меры к тому, чтобы положение фазового центра не изменялось с течением времени. При таком подходе есть все основания для того, чтобы параметр, характеризующий положение фазового центра, записать в паспорт приемника и пользоваться им всякий раз как константой.

Еще одной специфической для спутниковых приемников характеристикой антенны является показатель невосприимчивости к приему сигналов, отраженных от подстилающей поверхности и других окружающих объектов. С этой целью стремятся к тому, чтобы устранить все лепестки диаграммы направленности, расположенные с нижней «тыльной» стороны антенны. Следует заметить, что попадание на антенну отраженных сигналов, прошедших отличный от прямых сигналов путь, приводит к возникновению ошибок в величине измеряемых расстояний. Наличие отраженных сигналов применительно к спутниковым измерениям получило название многопутности.

Для борьбы с влиянием многопутности очень часто используют ту особенность, что направления попадания на антенну прямых и отраженных радиоволн в большинстве случаев существенно различаются. В связи с этим одна из мер борьбы с влиянием многопутности состоит в том, чтобы сформировать такую диаграмму направленности

антенны, которая обеспечивает чувствительность для прямых сигналов и минимизирует влияние отраженных. В качестве дополнительной меры защиты от помех используются специальные экранирующие металлические диски непосредственно под антенной. Наличие таких дисков позволяет во многих случаях защитить антенну от попадания на нее отраженных сигналов. При этом следует иметь в виду то обстоятельство, что наличие экранирующих дисков существенно влияет на формирование амплитудной и фазовой диаграмм направленности.

#### *1.7.4. Селекция сигналов, поступающих от различных спутников*

Одна из особенностей работы спутниковой GPS-аппаратуры потребителя состоит в том, что в процессе выполнения измерений на вход приемника одновременно поступают радиосигналы от различных спутников, находящихся в поле зрения. При этом одна из функций GPS-приемника заключается в способности разделять эти сигналы. В геодезических GPS-приемниках отмеченная задача решается за счет введения в схему приемника соответствующего количества каналов (обычно по числу принимаемых спутников), причем каждый канал должен обрабатывать информацию только от одного спутника.

Для пояснения принципа образования нескольких каналов на рис. 1.13 приведена упрощенная функциональная схема многоканального GPS-приемника.

При реализации различной многоканальной радиоприемной аппаратуры, в которой каждый канал должен быть приспособлен для выделения интересующего нас сигнала из всей совокупности поступающих на вход приемника сигналов, чаще всего применяют пространственные, временные или частотные методы селекции.

Пространственная селекция предполагает наличие остронаправленных антенн, что для рассматриваемой GPS-системы неприемлемо.

Временная селекция, базирующаяся на разноте времени радиосигналов от различных спутников, также не удовлетворяет предъявляемым требованиям, так как сигналы от различных спутников поступают на вход приемника одновременно.

В отечественной спутниковой системе ГЛОНАСС применен частотный метод селекции, для реализации которого каждый из спутников излучает радиосигналы на несущих частотах, характерных только для вполне конкретного спутника. Такой подход создает существенные затруднения при выполнении высокоточных фазовых измерений с использованием дифференциальных методов, так как строгий учет

временных аппаратных задержек, зависящих от частоты, оказывается при этом достаточно сложной задачей.

Исходя из вышеизложенного, в системе GPS использован несколько иной, нестандартный метод разделения сигналов от различных спутников, получивший в литературе название структурной селекции. При таком способе передача сигналов с различных спутников осуществляется на одной и той же несущей частоте, а для разделения используется их структурное различие, и, в частности, различие в структуре кодовых сигналов. С учетом этого рассматриваемый способ селекции называют также кодовым разделением.

В приведенной схеме (см. рис. 1.13), подразумевающей применение структурной селекции, разделение сигналов, их последующее отслеживание и измерение соответствующих свойственных таким сигналам параметров осуществляется на основе работы блоков автоматической подстройки времени (АПВ), автоматической подстройки частоты (АПЧ) и автоматической подстройки фазы (ФАПЧ), а также на основе использования характерных для каждого спутника и для каждой несущей частоты соответствующих кодовых сигналов (для частоты L1 — C/A-кода, а для частоты L2 — P-кода).

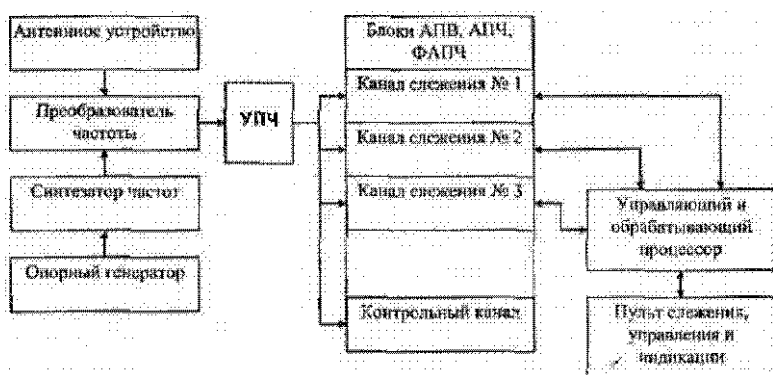


Рис. 1.13. Упрощенная функциональная схема многоканального GPS-приемника

Контрольный канал слежения введен в схему с целью осуществления контроля за постоянством временных задержек сигналов в различных каналах. Управление всеми режимами работы каналов и первичная обработка результатов наблюдения осуществляется с помощью процессора.

При осуществлении структурной селекции широко используется корреляционный принцип сравнения принимаемых от спутника и

формируемых на месте сигналов. При этом характерные для системы GPS кодовые сигналы рассматривают как псевдошумовые, одна из особенностей которых состоит в том, что при корреляционном перемножении двух псевдошумовых сигналов на выходе корреляционного перемножителя резкое возрастание сигнала, свидетельствующее о сильной корреляционной зависимости двух перемножаемых сигналов, происходит только в том случае, если упомянутые кодовые (псевдошумовые) сигналы имеют одинаковую, совпадающую во времени структуру. Исходя из этого, при осуществлении структурной селекции в приемной аппаратуре потребителя должна быть предусмотрена возможность формирования сигнала отклика, структура которого точно соответствует структуре сигнала от интересующего нас спутника.

В дополнение к вышеизложенному для временного совпадения двух сравниваемых сигналов в состав формирователя местного сигнала отклика должна быть введена соответствующая, плавно перестраиваемая линия задержки. Такая система автоматической подстройки времени (АПВ) в сочетании с корреляционным перемножителем позволяет не только отделить сигнал интересующего нас спутника от сигналов, характерных для других спутников, но и произвести измерения псевдодальности между спутником и приемником на основе применения кодовых сигналов.

Наряду с рассмотренным выше кодовым разделением при выполнении фазовых измерений в GPS-приемниках возникает необходимость использования передаваемых со спутника гармонических несущих колебаний, которые в аппаратуре потребителя «очищаются» от модулирующих кодовых сигналов и от навигационного сообщения. Поскольку передача со всех GPS-спутников осуществляется на одних и тех же несущих частотах, то из-за взаимного влияния несущих колебаний, излучаемых различными спутниками, могут возникнуть нежелательные искажения сигналов, используемых при фазовых измерениях. С учетом этого наряду со структурной селекцией в GPS-приемниках предусматривается также дополнительная частотная селекция, применение которой базируется на том факте, что из-за доплеровского эффекта частоты сигналов, поступающие на вход приемника от различных спутников, оказываются различными. Расчетные и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что значения доплеровских сдвигов частоты в системе GPS оцениваются величинами в несколько килогерц. Поэтому использование достаточно узкополосных фильтров, подключаемых после устранения модуляции с полосой пропускания на уровне 100 Гц, позволяет достаточно эффективно решать задачу, связанную с отделением гармонических колебаний, излучаемых интересующим нас спутником.

от аналогичных колебаний, поступающих на вход приемника от других спутников.

### 1.7.5. Методы поиска, захвата и отслеживания сигналов, передаваемых различными спутниками

Используемые в геодезических GPS-приемниках методы наблюдений базируются на возможности оперативного обнаружения передаваемых конкретным спутником сигналов, их захвата и удержания на протяжении всего периода наблюдений. Для реализации такой возможности в приемник вводят устройства поиска, захвата и отслеживания сигналов, поступающих от подлежащего наблюдению спутника.

Принцип действия системы поиска сигналов от нужного нам спутника основан на использовании описанных в подразделе 1.7.4. методов структурной и вспомогательной частотной селекции. При этом для формирования местного сигнала отклика, являющегося точной копией передаваемого с интересующего нас спутника сигнала, с помощью соответствующих автоматически работающих устройств производится последовательный перебор возможных вариантов структурных построений кодовых сигналов, их сдвига во времени, а также значений несущих частот с учетом их доплеровского сдвига. Принцип поиска сигналов, поступающих от конкретного спутника, поясняет упрощенная функциональная схема GPS-приемника (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Упрощенная функциональная схема, поясняющая принцип поиска сигналов в GPS-приемниках

Центральным узлом в данной схеме является блок управления поиском, который выдает команды для работы блоков управления местным кодовым генератором и линией задержки, а также для блока управления сдвигом частоты.

По команде, поступающей от блока управления поиском, блок управления кодовым генератором осуществляет последовательное переключение структур кодовых сигналов, характерных для различных входящих в действующее «созвездие» GPS-спутников. Вместе с тем с помощью блока управления сдвигом частоты осуществляется подбор такой частоты местного генератора, которая согласуется с подверженной доплеровскому влиянию частотой принимаемого сигнала от интересующего нас спутника.

В результате работы отмеченных выше блоков управления удается на выходе фазового модулятора подобрать такой местный сигнал отклика, который характеризуется максимальной корреляционной взаимосвязью с принимаемым сигналом. Такое корреляционное соответствие обуславливает резкое увеличение сигнала на выходе смесителя, который существенно превышает уровень шума, в качестве которого можно рассматривать все поступающие на вход приемника сигналы от других спутников.

После соответствующего усиления, детектирования и фильтрации упомянутый сигнал подается на временной селектор, а с последнего — на пороговое устройство. С помощью временного селектора осуществляется выборка согласованного во времени сигнала от спутника с сигналом, формируемым в приемнике. В пороговом устройстве производится сравнение сигнала выборки с установленным в данной устройстве порогом. При превышении порогового значения в блок управления поиском поступает сигнал, свидетельствующий о захвате интересующего нас сигнала, на основе чего поиск прекращается или осуществляется переход к поиску очередного спутника.

На основе анализа работы системы поиска установлено, что число коммутируемых при поиске переборок возможных комбинаций формирования местного сигнала отклика исчисляется тысячами. В результате этого на поиск сигналов отдельных спутников может затрачиваться время от нескольких десятков секунд до нескольких минут.

Описанный выше принцип поиска сигналов от конкретных спутников решает одновременно и задачи, связанные с захватом и удержанием этих сигналов на протяжении всего периода наблюдений за исключением тех ситуаций, когда в процессе наблюдений из-за различного рода мешающих воздействий (например, из-за экранировки) происходит потеря принимаемых сигналов.

### *1.7.6. Принципы демодуляции принимаемых сигналов*

При выполнении измерений расстояний до спутников, а также в целях получения информации, передаваемой в составе навигационного сообщения, возникает необходимость выделения из состава модулированных колебаний всех интересующих нас сигналов, на основе которых выполняются упомянутые процедуры. К таким сигналам относятся кодовые сигналы, с помощью которых определяют грубые значения расстояний (псевдодалности), гармонические колебания с частотой биений, используемые для получения точных значений расстояний до спутника (фазовые измерения), а также бинарные сигналы, несущие в себе различную измерительную и служебную информацию (см. подраздел 1.5.5).

Все перечисленные сигналы передаются со спутника в составе модулированных по фазе несущих колебаний. Их разделение в приемной аппаратуре потребителя осуществляется на основе процесса, получившего название демодуляции.

Следует заметить, что процедура демодуляции неразрывно связана с рассмотренными выше методами селекции, поиска, захвата и отслеживания сигналов от интересующих нас спутников. При этом наибольшее распространение получил кодово-корреляционный метод реализации отмеченных процедур. Принцип разделения и демодуляции принимаемых GPS-сигналов поясняет функциональная схема (рис. 1.15).

Приведенная на схеме замкнутая петля отслеживания кодовых сигналов используется для автоматического захвата и отслеживания упомянутых сигналов от выбранного спутника (см. подраздел 1.7.4).

Входящий в состав замкнутой цепочки генератор кодовых сигналов с регулируемой линией задержки позволяет сформировать местный кодовый сигнал, совпадающий с принимаемым от селектируемого спутника кодовым сигналом не только по своей структуре, но и согласован с ним во времени с требуемой точностью.

Поскольку принимаемый кодовый сигнал несет в себе информацию о показаниях часов на спутнике, то синхронизированный с ним во времени кодовый сигнал местного генератора может быть использован для регистрации показаний спутниковых часов, а значит и для получения информации для отсчета точного времени. С помощью счетчика регистрируется временное смещение показаний часов на спутнике и в приемнике. По величине этого смещения определяется значение псевдодалности. Временное смещение часто называют фазовым сдвигом кодовых сигналов. Для воспроизведения синфазных гармонических колебаний, не подверженных воздействию кодовых сигналов и сигналов навигационного сообщения, используется другая



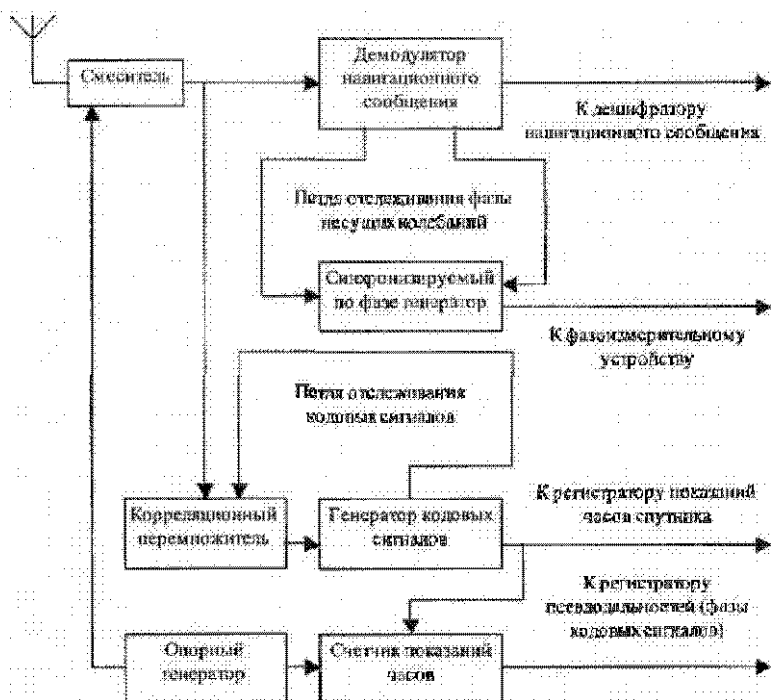


Рис. 1.15. Функциональная схема, поясняющая кодово-корреляционный метод демодуляции принимаемых GPS-сигналов

замкнутая петля отслеживания фазы несущих колебаний (система ФАПЧ), реализуемая на основе управляемого по напряжению и синхронизируемого по фазе местного генератора гармонических колебаний. В схему такой цепочки обратной связи наряду с упомянутым генератором входят также (на схеме не показаны) квадратурный фазовый дискриминатор и блок управления. Первый из них позволяет получить на своем выходе сигнал, величина которого пропорциональна фазовому сдвигу между принимаемыми и местными колебаниями, причем этот сигнал не подвержен влиянию модулирующих кодовых и навигационных сигналов. Что касается схемы управления, то за счет ее воздействия на синхронизируемый генератор величина сигнала на выходе фазового дискриминатора сводится к нулю, обеспечивая тем самым совпадение по фазе принимаемых и местных гармонических колебаний. В результате появляется возможность использовать при фазовых измерениях вместо «зашумленных» принимаемых от спутника гармонических колебаний неподверженные такому влиянию гармонические колебания местного генератора, которые поступают на вход фазоизмерительного устройства.

Для восстановления в GPS-приемнике навигационного сообщения, передаваемого со спутника в бинарной форме, используется отмеченный на схеме демодулятор навигационного сообщения, работа которого базируется на взаимодействии модулированных по фазе принимаемых колебаний с немодулированными гармоническими колебаниями, возбуждаемыми местным синхронизированным генератором. В результате сравнения упомянутых сигналов удается с помощью фильтра низких частот выделить бинарный низкочастотный сигнал навигационного сообщения, который поступает в дешифратор с целью восстановления закодированной информации, содержащейся в передаваемом навигационном сообщении.

Обобщенный анализ схемы (см. рис. 1.15) показывает, что на ее основе удается разделить восстановить все интересующие нас сигналы, передаваемые со спутника в составе модулированных несущих колебаний дециметрового диапазона.

### *1.7.7. Краткие сведения о работе системы управления GPS-приемника*

Описанный выше принцип работы GPS-приемника свидетельствует о том, что в процессе подготовки и проведения спутниковых наблюдений возникает необходимость выполнения многочисленных операций, связанных с оперативным управлением работой различных узлов приемника. Кроме того, непосредственно в приемнике производится предварительная обработка получаемой информации и ее регистрация с помощью тех или иных запоминающих устройств. Для реализации всех этих операций в состав приемника вводится соответствующая специализированная микроЭВМ, включающая в себя процессоры, таймер, различные запоминающие устройства (ОЗУ и ПЗУ), интерфейсные платы для стыковки с пультом управления и индикации, с внешней регистрирующей аппаратурой, а также другие характерные для вычислительной техники узлы. Управление работой такого вычислительного комплекса осуществляется пультом управления и индикации, с помощью вводимой в приемник программы. Не останавливаясь на разнообразных подходах, связанных с процедурой автоматизированного управления работой приемника, рассмотрим в качестве примера одну из блок-схем (рис. 1.16), иллюстрирующую принцип последовательного изменения состояний GPS-приемника, характерных для поиска, захвата и отслеживания спутниковых сигналов.

После установки приемника на пункте и включения питания в нем, как правило, устанавливается режим ожидания принимаемых от спутников сигналов. При поступлении последних на вход приемника

и при наличии в памяти приемника альманаха производится предвычисление местоположения селектируемого спутника. Если в памяти приемника альманаха отсутствует, то включается режим сбора данных альманаха, на что затрачивается дополнительное время (около 12,5 мин). Последующей операцией в работе приемника является синхронизация режима работы входящих в состав приемника генератора кодовых сигналов и синхронизируемого по фазе генератора гармонических колебаний.

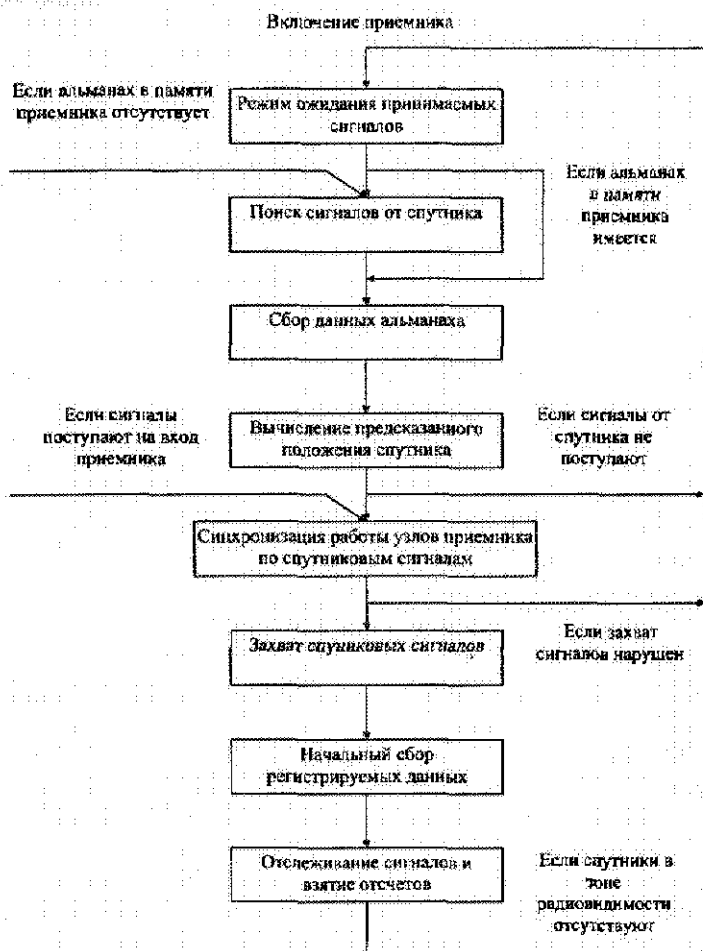


Рис. 1.16. Блок-схема последовательных режимов работы приемника в процессе подготовки и проведения наблюдений

В результате такой синхронизации осуществляется захват сигнала от соответствующего спутника и последующий начальный сбор регистрируемых данных. В дальнейшем в приемнике поддерживается режим отслеживания захваченных сигналов и периодическое взятие отчетов, используемых при вычислении расстояний до спутников и для регистрации показаний точного времени.

В более общем представлении система управления приемником позволяет также управлять потоком получаемой информации, производить предварительную обработку данных, индцировать на табло дисплея интересующую оператора информацию, производить самодиагностику правильности функционирования приемника, контролировать источники питания и выполнять целый ряд других операций. Для иллюстрации на рис. 1.17 приведена упрощенная структурная схема системы управления GPS-приемника, на которой отображены связующий модуль общего управления и соподчиненные модули, выполняющие как управленческие функции, так и функции, связанные с предварительной обработкой данных в приемнике.

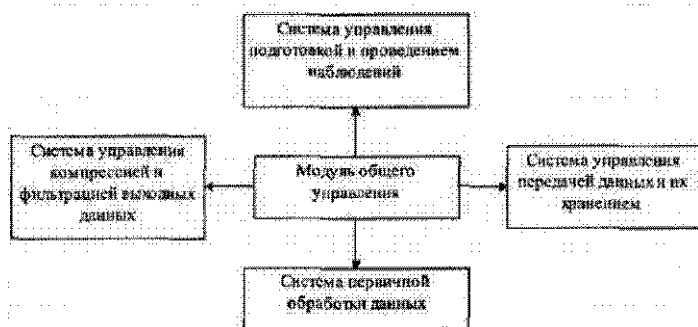


Рис. 1.17. Упрощенная структурная схема управленческих функций приемника

Входящий в состав данной схемы модуль общего управления выполняет распределительные функции, а также целый ряд вспомогательных функций (в частности, выбор различных режимов работы приемника).

Система управления подготовкой приемника к наблюдениям и процессом их проведения осуществляет описанную выше последовательность операций, которые реализуются на стадии подготовки приемника к наблюдениям и в процессе их проведения.

С помощью системы первичной обработки данных осуществляется весь комплекс вычислительных операций, позволяющий оперативно непосредственно в приемнике получать некоторые конечные результаты наблюдений (например, приближенные координаты мес-

тоположения пункта наблюдения), а также представлять в наиболее приемлемой форме данные, которые подлежат дальнейшей обработке в камеральных условиях.

Система управления компрессией и фильтрацией данных позволяет произвести уплотнение, т.е. объединение снимаемых отсчетов в отдельные группы, с тем, чтобы существенно уменьшить объем поступающей в блоки памяти информации с одновременным повышением качества такой информации за счет отбраковки данных, не удовлетворяющих предъявляемым требованиям.

В отдельных типах приемников предусматриваются различные формы и методы хранения запоминаемой информации, а также ее оперативная передача по тем или иным каналам связи в конечные пункты назначения. Эти функции в приемнике выполняет система управления передачей и хранением данных.

Применительно к конкретным типам GPS-приемников перечень управленческих функций может существенно видоизменяться и дополняться. Повышенного внимания при этом заслуживает система первичной обработки данных, производимой непосредственно в приемной аппаратуре.

### *1.7.8. Обработка данных, производимая в приемнике*

Как уже отмечалось ранее, одна из функций GPS-приемника заключается в первичной обработке результатов измерений, базирующихся на использовании временных запаздываний передаваемых со спутника кодовых сигналов и фазовых сдвигов, характерных для поступающих на вход приемника несущих колебаний.

В соответствии с уравнением (1.3) на основе кодовых сигналов в GPS-приемнике определяется время прохождения электромагнитным излучением расстояния между спутником и приемником, которое позволяет определить псевдодальность (см. уравнение (1.4)), включающую в себя истинное расстояние и поправочный член, обусловленный различием показаний часов на спутнике и в приемнике. Одновременное измерение псевдодальностей до четырех спутников и имеющаяся в приемнике информация о координатах этих спутников на момент измерений позволяют вычислительному комплексу приемника на основе пространственной линейной засечки определить координаты пункта наблюдения с учетом упомянутой выше поправки из-за расхождения в показаниях часов спутника и приемника.

Обычно получаемую информацию о местоположении приемника оператор может наблюдать на экране дисплея непосредственно в про-

цессе сеанса наблюдений. После прекращения «искусственного зашумления» в 2000 г. точность такого позиционирования с использованием C/A-кода оценивается погрешностью, заключенной в пределах от 5 до 10 м.

При работе с GPS-приемником геодезического типа наибольший интерес представляет первичная обработка фазовых измерений, на основе которых в процессе дальнейшей «пост-обработки» открывается возможность получения характерной для геодезии высокой точности измерений.

В качестве первичной информации при фазовых измерениях используются регистрируемые с помощью цифрового фазоизмерительного устройства сдвиги фаз между принимаемыми от спутника несущими колебаниями и формируемыми в приемнике опорными колебаниями. Из-за непрерывного изменения расстояния до спутника, что связано с его перемещением, регистрируемые данные подвержены сравнительно быстрому изменению. В связи с этим регистрация отсчетов производится достаточно часто (как правило, через 0,1 с) с выполнением последующей корректировки, обусловленной упомянутыми выше изменениями измеряемых дальностей. Эти данные подвергаются в приемнике уплотнению, в результате чего образуются выборки, интервал между которыми может изменяться по желанию оператора (диапазон таких изменений определяется оператором и лежит в большинстве случаев в пределах от 1 до 60 с).

При уплотнении производится процесс сглаживания значений получаемых данных с использованием соответствующего аппроксимирующего полинома, отображающего закономерность изменения этих данных в пределах осуществляемой выборки (обычно ограничиваются при этом использованием полинома второй степени).

Наряду со сглаживанием во многих типах GPS-приемников предусматривается процедура, получившая название фильтрации Калмана. Сущность такой процедуры, характерной, как правило, для динамических систем, состоит в систематическом сравнении получаемых в результате наблюдений данных с предсказанными их значениями на основе знания закономерности их изменения с течением времени. При отклонении реальных данных от предсказанных величин свыше установленных норм производится их отбраковка.

Следует отметить, что при наблюдениях, осуществляемых с помощью одного приемника, не удается исключить из результатов фазовых измерений целый ряд погрешностей систематического характера

и тем самым надежно разрешить свойственную фазовым измерениям неоднозначность. В связи с этим не предпринимаются попытки вычисления непосредственно в приемнике окончательных значений расстояний до спутников на основе фазовых измерений несущих колебаний. С учетом вышеизложенного уплотненные значения фазовых сдвигов после соответствующих процедур сглаживания и фильтрации передаются в предусмотренные в приемнике устройства памяти с целью их использования в процессе дальнейшей обработки, базирующейся на применении аналогичной информации от других одновременно работающих приемников.

Помимо рассмотренных процедур, связанных с обработкой кодовых и фазовых измерений, в приемно-вычислительных комплексах производится обработка различной информации, как передаваемой со спутника в составе навигационного сообщения, так и поступающей с клавиатуры непосредственно от оператора. Более подробно этот круг вопросов рассматривается, как правило, в технических руководствах к конкретным типам приемников.

## Раздел 2. Методы измерений и вычислений, используемые в спутниковых системах определения местоположения

### 2.1. Абсолютные и относительные методы спутниковых измерений

При выполнении спутниковых координатных измерений основным определяемым параметром является расстояние между спутником и приемником. Одновременное определение значений расстояний до нескольких спутников позволяет при условии знания координат спутников методом пространственной линейной засечки вычислить координаты пункта наблюдений, которые, в свою очередь, могут быть использованы для определения разности координат между пунктами, на которых были установлены одновременно работающие спутниковые приемники, длин базисных линий, азимутальных направлений, а также целого ряда других вспомогательных параметров. Так, например, при установке приемника на подвижном объекте могут быть определены скорость и направление движения этого объекта.

В зависимости от цели решаемых задач различают абсолютные и относительные (дифференциальные) методы координатных определений. При этом в первом случае поставленная задача может быть решена на основе использования одного, отдельно работающего спутникового приемника. Во втором случае, характерном для дифференциальных измерений, предполагается использование двух или более одновременно работающих приемников, расположенных на определяемых, разнесенных на местности пунктах. Основная отличительная особенность этих двух методов состоит в получении существенно отличающихся по точности координат, что объясняется трудностью учета ошибок систематического характера, свойственных абсолютным методам. Для обоснования такого утверждения произведем анализ основополагающих соотношений, используемых при вычислении интегральных и конечных результатов.

Если обозначить в геоцентрической (декартовой) системе координат известные на момент измерений координаты спутника через  $X_c$ ,  $Y_c$  и  $Z_c$ , а неизвестные координаты пункта наблюдений через  $X_{np}$ ,  $Y_{np}$  и  $Z_{np}$ , то геометрическое расстояние между этими двумя точками может



быть определено на основе хорошо известного из аналитической геометрии соотношения:

$$\rho = \sqrt{(X_c - X_{np})^2 + (Y_c - Y_{np})^2 + (Z_c - Z_{np})^2}. \quad (2.1)$$

Подставляя это соотношение в формулу (1.4) и введя вместо усредненного значения скорости распространения электромагнитных волн и скорость этих волн в вакууме  $c$  с соответствующими временными поправками за влияние атмосферы  $\delta t_{атм}$ , может быть получена следующая формула для измеряемого расстояния между спутником и приемником  $R_{изм}$ :

$$R_{изм} = \sqrt{(X_c - X_{np})^2 + (Y_c - Y_{np})^2 + (Z_c - Z_{np})^2} + c(\delta t_{np} - \delta t_c) + c\delta t_{атм}, \quad (2.2)$$

где  $\delta t_{np}$  и  $\delta t_c$  — уклонения показаний часов приемника и спутника относительно эталонного времени;  $\delta t_{атм}$  — временные задержки, обусловленные влиянием атмосферы (ионосферы и тропосферы).

В формуле (2.2) величина  $\delta t_c$  для каждого конкретного спутника определяется с помощью станций слежения, входящих в состав сектора управления и контроля, и передается в составе навигационного сообщения каждому потребителю. С учетом этого при грубых, свойственных абсолютным методам, определениях координат рассматриваемую величину можно считать известной. Значение поправки  $\delta t_{атм}$  предвычисляют на основе моделирования задержек, возникающих при прохождении радиосигнала через ионосферу и тропосферу. В результате формула (2.2) содержит в своем составе четыре неизвестные величины: три координаты точки стояния приемника ( $X_{np}$ ,  $Y_{np}$ ,  $Z_{np}$ ) и поправку за уход часов приемника  $\delta t_{np}$ . Для нахождения этих неизвестных производят одновременные наблюдения не менее четырех спутников, составляют и совместно решают систему уравнений, соответствующих различным значениям расстояний  $R_{изм}$  до различных спутников.

С целью определения потенциальной точности абсолютного метода координатных определений произведем оценку влияния отдельных источников ошибок, свойственных этому методу. Прежде всего, следует заметить, что координаты спутника, т.е. его эфемериды, передаваемые по радиоканалу в составе навигационного сообщения, характеризуются погрешностями на метровом уровне точности.

Корректировка часов того или иного спутника также осуществляется с определенной погрешностью, обусловленной как точностными возможностями применяемых методов, так и смещением во времени момента корректировки относительно момента использования соот-

ветствующих показаний спутниковых часов.

Что касается влияния атмосферы, то методы моделирования такого влияния оказывают существенное влияние на точность определения интересующих нас координат. Наиболее ненадежно моделируется при этом влияние ионосферы. Однако при использовании двухчастотных приемников отмеченное влияние удается существенно минимизировать.

Применительно к GPS количественная оценка всех перечисленных выше влияний характерных для абсолютного метода, базирующегося на использовании общедоступного C/A-кода, приведена в табл. 2.1 [73].

Таблица 2.1

№ п/п	Источник погрешностей	Величина погрешности абсолютных определений, характерная для C/A-кода, м
1.	Ионосфера	7
2.	Тропосфера	0,7
3.	Многопутность	1,2
4.	Шумы приемника	1,5
5.	Погрешности координатно-временного обеспечения спутников	3,6
Суммарная погрешность		8,1

Данные, приведенные в табл. 2.1, свидетельствуют о том, что результирующая точность для абсолютных методов измерений с использованием C/A-кода оценивается погрешностью на уровне около 8 м. При этом пороговая чувствительность метода, свойственная использованию C/A-кода, соответствует погрешности около 3 м, т. е. из-за влияния перечисленных выше ошибок не удастся реализовать потенциальную точность общедоступных кодовых измерений в случае использования абсолютного метода.

Из-за наличия таких значительных по своей величине источников ошибок не представляется возможным даже предпринимать попыток определения расстояний до спутников на основе измерения фазы несущих колебаний, так как применительно к GPS для разрешения неоднозначности необходимо обеспечить потенциальную точность на уровне не ниже 0,1 м.

Применительно к системе ГЛОНАСС уровень суммарных погрешностей для абсолютного метода, базирующегося на использовании кодовых измерений, лежит в пределах от 6,2 до 6,6 м для околоземных спутников и от 7,7 до 9,6 м для пригоризонтных спутников [73].

Накопленный опыт использования глобальных спутниковых систем позиционирования свидетельствует о том, что наиболее эф-

фективно проблема повышения точности решается за счет применения дифференциальных методов спутниковых измерений. К настоящему времени разработано значительное количество различных вариантов дифференциальных измерений, обобщающей характерной особенностью которых является использование на завершающей стадии обработки результатов измерений не абсолютных значений регистрируемых с помощью приемника величин, а тех или иных разностей, при образовании которых исключаются общие члены свойственные сравниваемым величинам. Такой подход обеспечил широкое распространение дифференциальных спутниковых измерений, которые с успехом используются при координатных определениях как неподвижных, так и движущихся объектов, причем конечные результаты могут быть получены не только в процессе «пост-обработки», но и в реальном масштабе времени. При этом уровень точности, характерный для наиболее отработанных дифференциальных методов, удастся повысить более, чем в 100 раз в сравнении с абсолютным методом.

С учетом вышеизложенного применительно к решению большинства геодезических задач основная роль отводится дифференциальным методам, а абсолютные определения тех или иных искомых величин выполняют лишь вспомогательные функции. Поэтому в последующих подразделах настоящего раздела основное внимание уделено анализу различных вариантов дифференциальных методов спутниковых измерений.

## 2.2. Основные разновидности дифференциальных методов

При выполнении одновременных спутниковых измерений, в которых участвуют несколько спутников и несколько приемников, возможна организация различных вариантов разностных отсчетов. К таким вариантам могут быть отнесены:

- 1) разности результатов, получаемых на различных точках стояния спутниковых приемников при одновременных наблюдениях одного и того же спутника;
- 2) разности результатов, получаемые с помощью одного приемника при одновременных наблюдениях двух или более спутников;
- 3) разности результатов, получаемых при использовании одного приемника и при наблюдениях одного спутника, относящихся к различным моментам времени (эпохам);
- 4) комбинирование результатов, получаемых при использовании различных видов измерений (например, измерений, выполняемых на основе кодовых методов и определений фазы несущих колебаний).

Возможны также и другие комбинации образования разности отсчетов (в частности, разности результатов, полученных на двух различных несущих частотах  $L_1$  и  $L_2$ ).

Рассмотрим вкратце целесообразность организации тех или иных разностей, т.е. те преимущества, которые возникают при их использовании.

При реализации первого варианта открывается возможность исключить те смещения в значениях регистрируемых величин, которые связаны с несовершенством работы спутниковой аппаратуры. К ним могут быть отнесены погрешности показаний спутниковых часов на момент выполнения измерений (аналитическое обоснование такого утверждения будет приведено в подразделе 2.6). Кроме того, существенно ослабляются требования к точности знания эфемерид спутника. Это положение проиллюстрировано схематически на рис. 2.1.

Если предположить, что расстояния от спутника  $S$  до двух точек на земной поверхности  $P_1$  и  $P_2$  приблизительно равны друг другу ( $R_1 \approx R_2 \approx R$ ), а угол, под которым наблюдается базис  $D$ , остается постоянным при небольших отклонениях спутника от своей расчетной траектории, то непосредственно из рис. 2.1 следует, что:

$$\varphi \approx \frac{D}{R}, \quad (2.3)$$

или с учетом того, что  $\varphi \approx \text{const}$ , имеем:

$$\left| \frac{\delta D}{D} \right| \approx \left| \frac{\delta R}{R} \right| \quad (2.4)$$

Погрешность знания передаваемых по радиоканалу эфемерид, а следовательно, и возникающих при этом погрешностей в значении измеряемых расстояний  $\delta R$  оценивается в первом приближении величиной около 20 м. Поскольку для систем GPS и ГЛОНАСС  $R \approx 20\,000$  км, то  $\frac{\delta R}{R} \approx 10^{-6}$ . С учетом этого при использовании дифференциального метода представляется возможным получать как длины базисных линий, так и разности координат между двумя пунктами на уровне одной миллионной, не прибегая к принятию специальных мер по уточнению имеющихся в распоряжении потребителя значений эфемерид спутника.

В дополнение к вышеизложенному отметим, что применение дифференциального метода позволяет резко уменьшить влияние атмосферы на разностные результаты, так как в данном случае необходимо учитывать не абсолютные значения задержек радиосигналов при их прохождении через атмосферу, а только разности этих задержек, ко-

торые при сравнительно небольших разносах станций характеризуются сравнительно малыми величинами.

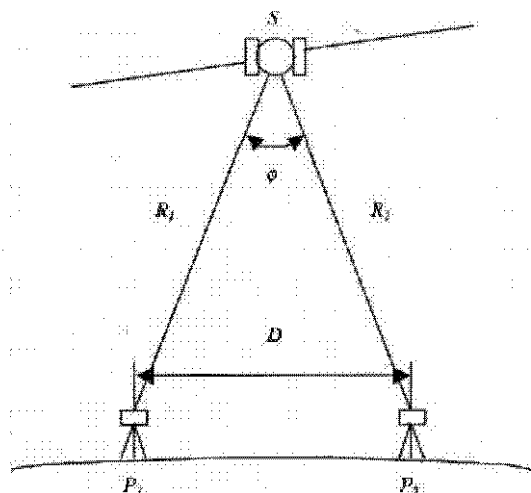


Рис. 2.1. К обоснованию влияния точности положения спутника на точность определения базисной линии  $D$

Основной недостаток рассмотренного дифференциального метода заключается в возможности определения только разностей координат между пунктами, а не их абсолютных значений. При таком подходе исходные (абсолютные) значения координат одной из точек, которую часто называют референционной, получают или на основе использования режима работы «по умолчанию», т. е. сравнительно грубого режима абсолютных измерений, или каких-либо других независимых методов.

Характерная особенность второго варианта, подразумевающего вычисление конечных результатов при использовании разностей измерений до двух спутников, состоит в том, что эта разность позволяет исключить поправки, обусловленные неточностью показаний часов приемника, а также минимизировать связанные с работой приемника отдельные инструментальные погрешности (в частности, влияние временных задержек принимаемых сигналов при их прохождении по электрическим цепям приемника за счет использования разности этих задержек вместо их абсолютных значений).

Третий вариант дифференциальных методов, при котором образуют разности измерений, соответствующие нахождению наблюдаемого спутника в двух различных (достаточно близких) точках на орбите, существенно облегчит проблему разрешения неоднозначности при

выполнении фазовых измерений, так как в данном случае при образовании разности удается исключить в начальной точке наблюдений величину  $N$ , соответствующую числу целых длин волн, укладывающихся в измеряемом расстоянии между спутником и приемником. Более подробно этот круг вопросов будет рассмотрен в подразделе 2.6.

Наконец, четвертый вариант разновидности дифференциальных методов, сводящийся к объединению комбинаций различных видов измерений, ориентирован на поиск рациональных методов получения однозначных результатов при выполнении фазовых измерений, на ослабление влияния ионосферы при работе с одночастотными приемниками, а также на отработку методов высокоточных спутниковых измерений при работе в динамических условиях (в частности, с использованием судов, самолетов и других транспортных средств).

Приведенный выше краткий обзор совершенствования спутниковых измерений за счет использования дифференциальных методов является далеко не полным. Однако уже и такая достаточно обобщенная информация позволяет сделать выводы о перспективности дифференциальных методов при выполнении характерных для геодезии высокоточных координатных определений.

### 2.3. Специфика проведения псевдодальномерных и фазовых измерений

При выполнении спутниковых измерений используются в основном кодовые и фазовые методы. При этом из-за наличия в значениях измеряемых расстояний до спутников существенных по величине систематических ошибок определяемые длины линий получили название псевдодальностей. Исходя из основополагающих принципов кодовых и фазовых методов, отмеченные значения псевдодальностей, регистрируемые непосредственно на точке стояния приемника, могут быть зафиксированы только в режиме кодовых измерений. С учетом этого на практике псевдодальномерные измерения чаще всего отождествляют с измерениями, выполняемыми на основе кодовых методов.

Что касается фазовых измерений, относящихся к несущим колебаниям, то полное значение определяемого до спутника расстояния реализуется только после разрешения неоднозначности (т.е. нахождения целого числа длин волн, укладывающихся в измеряемом расстоянии), которое удастся произвести только после того, как в результаты измерений внесут практически все значительные по величине поправки. При такой процедуре значения подверженных различным влияниям псевдодальностей, базирующихся на фазовых методах, как правило, не фиксируются. С учетом этого в дальнейшем под псевдодально-

мерными измерениями будем подразумевать измерения, выполняемые на основе использования кодовых сигналов.

При работе геодезических спутниковых приемников применяются как псевдодальномерные, так и фазовые методы. Рассмотрим вкратце их специфические особенности. К таким особенностям могут быть отнесены способы регистрации определяемых величин, а также специфика их дальнейшей обработки.

К одной из характерных особенностей псевдодальномерных (кодовых) измерений следует отнести тот факт, что при их выполнении непосредственно в приемнике удастся зафиксировать время распространения радиосигнала на основе знания момента излучения и определения момента приема этого сигнала (более подробно эта процедура будет изложена в следующем подразделе). При умножении упомянутой величины на скорость распространения сигнала получают искомое однозначное значение псевдодальности. Для получения интересующей потребителя величины геометрического расстояния между спутником и приемником в регистрируемое значение псевдодальности вносят соответствующие поправки. Поскольку кодовые сигналы передаются со спутника посредством модуляции несущих колебаний, то для них характерна групповая скорость распространения, что приходится учитывать при определении временных задержек радиосигналов при их прохождении через такую диспергирующую среду, как ионосфера.

Отличительная особенность фазовых измерений заключается в том, что при их выполнении фиксируется фаза колебаний промежуточной частоты, которая однозначно связана с фазой несущих колебаний, причем непосредственно время излучения и приема отмеченных колебаний при снятии отсчетов в приемнике в расчет не принимается. В результате выполнения таких измерений удастся зафиксировать только последние цифры в значении измеряемого до спутника расстояния в пределах одной длины волны несущих колебаний. Предыдущие цифры определяют в процессе разрешения неоднозначности, который базируется на использовании дифференциальных методов и выполняется на базе полевой партии. При учете влияния ионосферы используется фазовая скорость распространения радиосигналов, причем методы определения таких поправок в большинстве случаев основываются на применении различных несущих частот.

Большинство характерных для фазовых измерений поправок стремятся исключить за счет применения соответствующих дифференциальных методов. Математическое обоснование минимизации влияния различных источников ошибок при фазовых измерениях будет изложено в подразделах 2.5 и 2.6.

## 2.4. Принцип измерения псевдодальностей и практическое использование данного метода

Основным показателем псевдодальномерных измерений является разность между моментом передачи кодовой посылки (при отсчете времени по часам, установленным на спутнике) и моментом приема упомянутой посылки (при отсчете времени по часам приемника). Применительно к введенному определению под псевдодальностью будем понимать измеряемое значение расстояния между спутником и приемником на момент передачи и приема радиосигналов с применением псевдослучайных кодовых посылок, генерируемых на спутнике и в приемнике. При этом первые из них формируются с помощью спутниковых часов, а вторые — на основе показаний часов приемника.

Показания часов на спутнике и в приемнике, как правило, расходятся, что приводит к возникновению соответствующих погрешностей в величине измеряемого расстояния. Кроме того, дополнительные отличия между определяемым и истинным значениями искомой длины линии обусловлены задержками на трассе прохождения радиосигналов через атмосферу (ионосферу и тропосферу).

С учетом сделанных замечаний основополагающее уравнение для псевдодальномерных измерений имеет вид:

$$[(t_{np} + \delta t_{np}) - (t_c + \delta t_c)]c = \rho + \delta R, \quad (2.5)$$

где  $t_{np}$  и  $t_c$  — показания часов приемника и спутника, регистрируемые в момент измерения псевдодальностей;  $\delta t_{np}$  и  $\delta t_c$  — уход показаний часов относительно эталонного времени на момент взятия отсчетов;  $c$  — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме;  $\rho$  — топосцентрическое (геометрическое) расстояние между спутником и приемником на момент измерения псевдодальности;  $\delta R = c\delta t_{атм}$  — поправка к величине измеряемого расстояния, обусловленная влиянием атмосферы.

Непосредственно на основе уравнения (2.5) может быть получена рабочая формула для псевдодальномерных измерений, аналогичная ранее приведенной формуле (2.2):

$$R = (t_{np} - t_c)c = \rho + c(\delta t_{np} - \delta t_c) + \delta R. \quad (2.6)$$

Для определения интересующего нас значения геометрического расстояния  $\rho$  измеренную величину  $R$  корректируют за счет введения поправок  $\delta t_c$  и  $\delta R$  (поправка  $\delta t_{np}$  при этом заранее не определяется, а входит в число неизвестных параметров).

Одна из особенностей определения времени прохождения радиосигналом расстояния между спутником и приемником на базе исполь-



зования кодовых посылок состоит в том, что из-за периодичности повторения отмеченных посылок регистрирующее устройство приемника позволяет определить временное смещение между принимаемыми от спутника и формируемыми на месте кодовыми сигналами только в пределах периода их повторения. Для используемого в системе GPS общедоступного C/A-кода такая периодичность равна одной миллисекунде, что соответствует прохождению радиосигналом расстояния равного около 300 км. Поскольку расстояние до спутника составляет величину около 20 000 км, то без принятия соответствующих мер может возникнуть проблема разрешения неоднозначности применительно к кодовым сигналам.

Наиболее эффективно отмеченная проблема решается за счет использования информации о полном значении времени GPS и поправок к показаниям часов конкретного спутника, которая передается со спутника в составе навигационного сообщения и которая позволяет отождествить соответствующую кодовую посылку, на основе которой определяется псевдодальность.

При практическом использовании псевдодальномерных измерений с целью определения координат точки стояния приемника абсолютным методом совместно решают следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R'_1 &= \sqrt{(X_{c1} - X_{np})^2 + (Y_{c1} - Y_{np})^2 + (Z_{c1} - Z_{np})^2} + \Delta R \\ R'_2 &= \sqrt{(X_{c2} - X_{np})^2 + (Y_{c2} - Y_{np})^2 + (Z_{c2} - Z_{np})^2} + \Delta R \\ R'_3 &= \sqrt{(X_{c3} - X_{np})^2 + (Y_{c3} - Y_{np})^2 + (Z_{c3} - Z_{np})^2} + \Delta R \\ R'_4 &= \sqrt{(X_{c4} - X_{np})^2 + (Y_{c4} - Y_{np})^2 + (Z_{c4} - Z_{np})^2} + \Delta R \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

где  $R'_{1...4} = R_{1...4} + c\delta t_c - \Delta R$  — откорректированное значение, псевдодальности до соответствующего спутника;  $X_{c1...c4}$ ,  $Y_{c1...c4}$ ,  $Z_{c1...c4}$  — текущие координаты четырех одновременно наблюдаемых спутников;  $X_{np}$ ,  $Y_{np}$ ,  $Z_{np}$  — определяемые координаты точки стояния;  $\Delta R = c\delta t_{np}$  — определяемая поправка, обусловленная неточностью хода часов приемника.

При решении системы уравнений (2.7) производится линеаризация этих уравнений. Точность таких координатных определений оценивается погрешностями на уровне нескольких метров. С учетом этого данный метод находит преимущественное использование при решении навигационных задач.

Применительно к геодезии псевдодальномерный метод определения координат выполняет в большинстве случаев вспомогательные функции. В частности, такой метод весьма часто применяют для определения абсолютных значений координат опорных (референчных) точек.

В тех случаях, когда требуемая точность определения координат оценивается на уровне около одного метра (как, например, на отдельных видах работ в морской геодезии), прибегают к применению дифференциальных псевдодальномерных методов.

Сущность практического использования таких дифференциальных методов состоит в том, что наряду с устанавливаемым на плавсредстве мобильным спутниковым приемником, на берегу (или каком-либо другом неподвижном объекте) в точке с известными координатами устанавливается другой (опорный) приемник, работающий одновременно с первым. Между двумя приемниками организуется канал радиосвязи для передачи информации с опорного приемника на мобильный. Отмеченная информация содержит в своем составе поправки, которые получают на опорном пункте за счет использования как измеряемых значений псевдодальномерностей, так и расстояний до спутников, вычисляемых на основе применения известных координат этого пункта. Учет упомянутых поправок в мобильном приемнике позволяет минимизировать влияние поправок, входящих в рабочую формулу (2.6).

## 2.5. Упрощенный анализ фазовых соотношений при спутниковых дальномерных измерениях

При выполнении фазовых измерений несущих колебаний спутниковыми приемниками определяемой величиной является фаза принимаемых от спутника несущих колебаний, которая сравнивается с фазой соответствующих колебаний, генерируемых в приемнике. Из-за высокой частоты несущих колебаний и связанной с ней высокой чувствительностью используемых фазоизмерительных устройств потенциальные возможности этих методов оказываются чрезвычайно высокими и соответствуют миллиметровому уровню точности. В связи с этим фазовые методы являются основными при решении с помощью рассматриваемых спутниковых систем разнообразных геодезических задач, предусматривающих, как правило, обеспечение высокой точности измерений. Вместе с тем при выполнении фазовых измерений возникают специфические для них осложнения (в частности, проблема разрешения неоднозначности), для преодоления которых приходится разрабатывать соответствующие методы.

Рассмотрим в сжатой форме математическое обоснование используемых фазовых методов, характерных для спутниковой системы GPS.

В соответствии с формулой (1.15) представим текущую фазу несущих колебаний, поступающих от спутника на вход приемника, в виде:

$$\Phi_c(t) = f_c(t - \tau) + f_c \delta_c, \quad (2.8)$$

где  $f_c$  — частота несущих колебаний, возбуждаемых в спутниковой аппаратуре, относящаяся к времени выполнения измерений;  $\tau$  — время прохождения несущими колебаниями искомого расстояния между спутником и приемником;  $\delta t_c$  — уход показаний часов на спутнике.

Для текущей фазы возбуждаемых в приемнике опорных несущих колебаний соответственно имеем:

$$\Phi_{np}(t) = f_{np}t + f_{np}\delta t_{np}, \quad (2.9)$$

где  $f_{np}$  — частота возбуждаемых в приемнике несущих колебаний, отнесенная к моменту выполнения измерений;  $\delta t_{np}$  — уход показаний часов приемника.

Подлежащий определению полный фазовый сдвиг между отмеченными выше колебаниями описывается при этом соотношением:

$$\Phi = \Phi_c(t) - \Phi_{np}(t) = -f_c\tau + f_c\delta t_c - f_{np}\delta t_{np} + (f_c - f_{np})t. \quad (2.10)$$

Поскольку при фазовых измерениях удается измерить фазовый сдвиг только в пределах одного периода, то в соответствии с формулой (1.18) имеем:

$$\Phi = N - \Delta\Phi, \quad (2.11)$$

где  $N$  — целое число фазовых циклов, укладывающихся в измеряемом расстоянии;  $\Delta\Phi$  — измеряемое в приемнике значение разности фаз.

В соответствии с проведенными исследованиями [82] отклонение несущих частот  $f_c$  и  $f_{np}$  от номинального значения на небольших временных интервалах (с учетом проводимых корректировок) оценивается дробными долями герца. Исходя из этого, можно принять:  $f_c \approx f_{np} \approx f$ . В результате представляется возможным пренебречь последним членом в формуле (2.10) и записать ее в следующем виде:

$$\Delta\Phi = f\tau + N + f(\delta t_{np} - \delta t_c). \quad (2.12)$$

Величина  $\tau$  представляет собой время запаздывания принимаемого сигнала, а поэтому во многих случаях условно считают это время отрицательной величиной. Если также, как в формуле (2.2), ввести значение скорости света в вакууме  $c$  и соответствующую поправку за влияние атмосферы  $\delta\alpha_{атм}$ , то формула (2.12) может быть представлена как:

$$\Delta\Phi = -f\frac{\rho}{c} + N + f(\delta t_{np} - \delta t_c) + f\delta\alpha_{атм}, \quad (2.13)$$

откуда:

$$\rho = \lambda(N - \Delta\Phi) + c(\delta t_{np} - \delta t_c) + c\delta\alpha_{атм}, \quad (2.14)$$

где  $\lambda = c/f$  — длина волны несущих колебаний.

Знак перед  $\Delta\Phi$  зависит от режима работы фазометра и может быть как положительным, так и отрицательным. В отдельных публикациях (например, [82]) в формулу (2.14) вводят еще член, учитывающий влияние случайных ошибок (так называемую «шумовую» компоненту). При характерном для спутниковых измерений методе в

процессе проведения сеанса наблюдений накапливается большой объем измерений. В результате при вычислении средних значений влиянием данной компоненты на завершающей стадии, как правило, пренебрегают.

Из анализа формулы (2.14) следует, что для определения точного значения интересующей нас величины  $\rho$  на сантиметровом (или даже на миллиметровом) уровне точности необходимо не только с высокой точностью определять все входящие в данную формулу поправки, но и располагать надежными методами нахождения неизвестной величины  $N$ , соответствующей целому числу длин волн несущих колебаний, укладывающихся в измеряемом расстоянии между спутником и приемником.

Из приведенных в табл. 2.1 данных следует, что точность определения поправки  $\delta t_c$  на основе использования содержащейся в навигационном сообщении информации оценивается на уровне 1 м.

Поправка  $\delta t_{np}$ , вычисляемая в результате совместного решения системы уравнений (2.7), характеризуется еще более низкой точностью (на уровне около ста наносекунд или в расстоянии — порядка нескольких десятков метров).

Что касается метеопоправки  $\delta t_{атм}$ , то даже при использовании двухчастотных приемников ее погрешность в линейной мере соответствует нескольким метрам (см. табл. 2.1).

Исходя из наличия таких значительных по величине погрешностей не представляется возможным на основе уравнения (2.14) разработать эффективные методы нахождения величины  $N$ , а следовательно, и искомого расстояния на основе фазовых методов, так как для надежного разрешения неоднозначности интересующее нас расстояние должно быть определено с погрешностью не хуже  $0,5\lambda$ , что для основной несущей частоты L1 составляет величину около 10 см.

С учетом вышеизложенного были предприняты попытки изыскания способов многократного повышения точности определения перечисленных выше поправок. В результате наиболее эффективными оказались дифференциальные методы, базирующиеся на определении разности снимаемых отсчетов, а не их абсолютных значений. Математический анализ таких методов свидетельствует о возможности резкого повышения точности определения интересующих нас поправок или полного их исключения за счет образования тех или иных разностей.

## 2.6. Первые, вторые и третьи разности, базирующиеся на фазовых измерениях несущих колебаний

### 2.6.1. Первые разности

Рассмотрим вначале метод одновременных наблюдений одного спутника с использованием двух приемников, установленных на разнесенных пунктах наблюдения А и В (рис. 2.2).

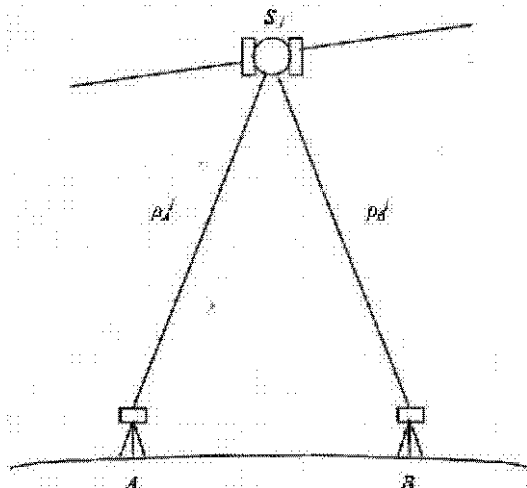


Рис. 2.2. К принципу дифференциальных фазовых измерений на основе образования первых разностей между станциями

Такой вид наблюдений получил название метода образования разности фазовых измерений между станциями, который относится к так называемым первым разностям. Основная характерная особенность данного метода состоит в том, что обработка результатов измерений производится на основе использования фазовых сдвигов, получаемых одновременно на двух разнесенных станциях. Интересующая нас разность фаз описывается при этом соотношением:

$$\Delta\Phi_{AB}^j = \Delta\Phi_B^j - \Delta\Phi_A^j, \quad (2.15)$$

где индекс  $j$  относится к спутнику  $S_j$ , а индексы  $A$  и  $B$  — к двум пунктам наблюдения  $A$  и  $B$ .

Используя уравнения (2.13) и (2.15), будем иметь:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{AB}^j = & \frac{1}{\lambda}(\rho_A^j - \rho_B^j) + (N_A^j - N_B^j) + f(\delta\alpha_A - \delta\alpha_B) + \\ & + f(\delta\alpha_{\text{ант.А}}^j - \delta\alpha_{\text{ант.В}}^j), \end{aligned} \quad (2.16)$$

где  $\rho_A^j$  и  $\rho_B^j$  — геометрические расстояния между спутником и приемниками, установленными соответственно точках  $A$  и  $B$ ;  $N_A^j$  и  $N_B^j$  — целые числа фазовых циклов, укладывающиеся в измеряемых расстояниях от спутника  $S_j$  до точек  $A$  и  $B$ ;  $f$  и  $\lambda$  — частота и длина волны несущих колебаний, используемых при фазовых измерениях;  $\delta_A^j$ ,  $\delta_B^j$  — отклонения показаний часов приемников, установленных в точках  $A$  и  $B$ , относительно времени системы;  $\delta t_{A\text{атм}}^j$ ,  $\delta t_{B\text{атм}}^j$  — атмосферные временные задержки при прохождении радиосигналов от спутника  $S_j$  соответственно до приемников, установленных в точках  $A$  и  $B$ .

Анализ соотношения свидетельствует о том, что при образовании первой разности удастся целиком исключить погрешность, связанную с уходом показаний часов на спутнике. Вместе с тем существенно ослабляется влияние атмосферы, так как в данном случае возникает необходимость учета не абсолютных значений задержек радиосигналов в атмосфере, а их разностей.

Наряду с перечисленными положительными качествами следует отметить также и негативные стороны такого метода. В частности, возникает необходимость применения не менее двух приемников, что не только повышает стоимость используемого потребителем оборудования, но и усложняет во многих случаях процедуру проводимых наблюдений. Следует заметить, что этот недостаток свойственен всем дифференциальным методам спутниковых измерений. Применительно к рассматриваемому методу остаются также неучтенными поправки, связанные с неточностью взаимных показаний часов двух приемников, которые по своим точностным показателям существенно уступают часам, установленным на спутнике (в спутниковых приемниках в подавляющем большинстве случаев вместо высокостабильных атомных опорных генераторов используются более дешевые, но менее стабильные кварцевые генераторы). Для преодоления последнего недостатка проанализируем другой принцип организации первой разности, который получил название разности фазовых измерений между спутниками (рис. 2.3). При реализации данного принципа с помощью приемника, установленного в точке  $A$ , одновременно наблюдается не менее двух спутников  $S_1$  и  $S_2$ .

Характерная особенность этого метода заключается в образовании разности результатов фазовых измерений при одновременных наблюдениях одним приемником двух спутников. При этом образующаяся разность фаз может быть описана следующим соотношением:

$$\begin{aligned} \delta\Phi_A^* &= \Delta\Phi_A^* - \Delta\Phi_A^j = \frac{1}{\lambda}(\rho_A^i - \rho_A^j) + (N_A^i - N_A^j) + \\ &+ f(\delta_A^i - \delta_A^j) + f(\delta_{A\text{атм}}^i - \delta_{A\text{атм}}^j). \end{aligned} \quad (2.17)$$

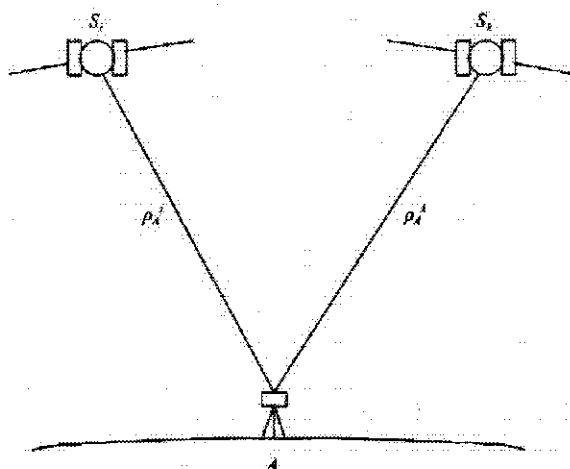


Рис. 2.3. К принципу дифференциальных фазовых измерений на основе образования первых разностей между спутниками

Используемые в данной формуле величины имеют тот же физический смысл, что и в формуле (2.16), с тем отличием, что вместо расстояний от одного спутника до двух приемников использованы расстояния от двух спутников до одного приемника.

Отличительная особенность этого метода состоит в том, что удается исключить поправки, обусловленные неточностью показаний часов приемника, но не исключенными при этом оказываются погрешности показаний часов на спутнике.

На основе совместного рассмотрения этих двух разновидностей первых разностей был предложен вариант дифференциальных измерений, получивший название метода вторых разностей.

### 2.6.2. Вторые разности

Этот метод нашел наиболее широкое практическое распространение при выполнении высокоточных геодезических измерений. Сущность данного метода состоит в том, что измерения производятся не менее, чем двумя приемниками, с помощью которых наблюдаются не менее двух спутников (рис. 2.4).

Получаемые при этом результаты измерений образуются на основе использования так называемых вторых разностей, описываемых соотношением:

$$\delta\Phi_{AB}^k = \delta\Phi_{AB}^j - \delta\Phi_{AB}^i = \frac{1}{\lambda} \delta\rho_{AB}^k + N_{AB}^k + f\delta t_{AB\text{ком}}^k, \quad (2.18)$$

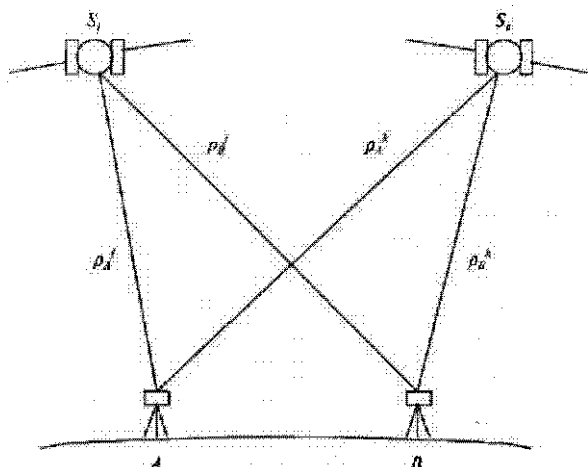


Рис. 2.4. К принципу дифференциальных фазовых измерений на основе образования вторых разностей

где

$$\begin{aligned} \delta\rho_{AB}^{jk} &= \rho_A^j - \rho_B^j - \rho_A^k + \rho_B^k; \\ \delta\epsilon_{АВатм}^{jk} &= \delta\epsilon_{Ватм}^j - \delta\epsilon_{Аатм}^j - \delta\epsilon_{Ватм}^k + \delta\epsilon_{Аатм}^k; \\ N_{AB}^{jk} &= N_B^j - N_A^j - N_B^k + N_A^k. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Анализ формулы (2.18) свидетельствует о том, что при образовании вторых разностей из результатов измерений исключаются нестабильности хода часов как на спутниках, так и в приемниках. При этом дополнительно ослабляется влияние атмосферы. Однако нерешенной остается проблема раскрытия неоднозначностей измеряемых расстояний, т. е. нахождение числа целых циклов  $N$ . Вместе с тем при определении разности координат между пунктами, на которых установлены одновременно работающие приемники, приходится учитывать неточность знания текущих координат спутников, что является следствием соотношения (2.1), связывающего между собой измеряемые расстояния и искомые координаты интересующих нас точек. Возможность устранения с помощью вторых разностей основного недостатка одностороннего принципа дальномерных измерений, заключающегося в необходимости учета несинхронности работы опорных генераторов на передающем и приемном концах измеряемой линии, обусловила тот факт, что данный метод стал основным вариантом дифференциальных измерений при высокоточных спутниковых определениях.

Дальнейший поиск путей разрешения свойственных фазовым измерениям неоднозначностей привел к целесообразности использования не только вторых, но и третьих разностей.



### 2.6.3. Третьи разности

При выполнении спутниковых измерений под третьими разностями принято понимать формируемые разности вторых разностей, относящихся к одним и тем же сочетаниям участвующих в измерениях приемников и наблюдаемых спутников, но к различным эпохам, т. е. моментам измерений, при движении спутников по своим орбитам. На рис. 2.5 приведена схема, поясняющая последовательное расположение спутников и участвующих в наблюдениях приемников, которые позволяют получить необходимую информацию для реализации метода третьих разностей.

В соответствии с формулой (2.18) характерные для моментов времени  $t_1$  и  $t_2$  вторые разности описываются соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \delta\Phi_{AB}^k(t_1) &= \frac{1}{\lambda} \delta\rho_{AB}^k(t_1) + N_{AB}^k(t_1) + f\delta\chi_{AB}^k(t_1) \\ \delta\Phi_{AB}^k(t_2) &= \frac{1}{\lambda} \delta\rho_{AB}^k(t_2) + N_{AB}^k(t_2) + f\delta\chi_{AB}^k(t_2) \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

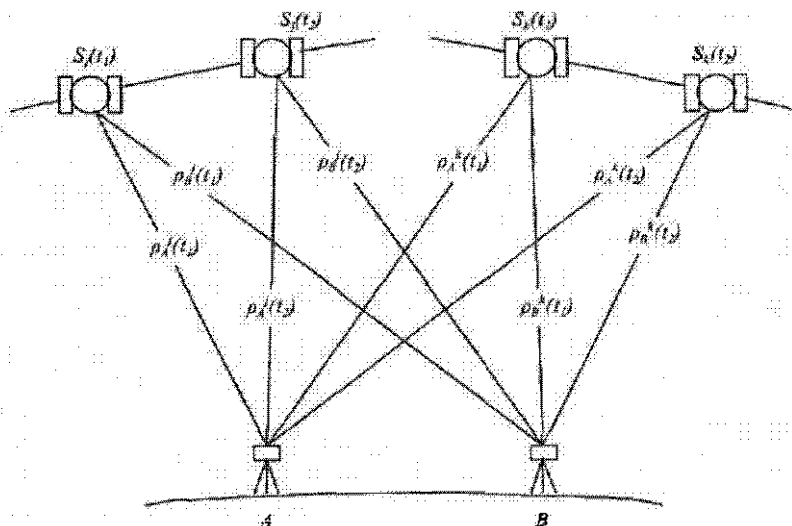


Рис. 2.5. К принципу дифференциальных фазовых измерений на основе образования третьих разностей

Третьи разности представляют собой разность этих соотношений:

$$\delta\Phi_{AB}^k(t_{2-1}) = \frac{1}{\lambda} \delta\rho_{AB}^k(t_{2-1}) + N_{AB}^k(t_{2-1}) - f\delta\chi_{AB}^k(t_{2-1}). \quad (2.21)$$

где

$$\begin{aligned}\delta\rho_{AB}^{jk}(t_{2-1}) &= \left[ \rho_A^j(t_2) - \rho_B^j(t_2) - \rho_A^k(t_2) + \rho_B^k(t_2) \right] - \\ &\quad - \left[ \rho_A^j(t_1) - \rho_B^j(t_1) - \rho_A^k(t_1) + \rho_B^k(t_1) \right] \\ N_{AB}^{jk}(t_{2-1}) &= \left[ N_B^j(t_2) - N_A^j(t_2) - N_B^k(t_2) + N_A^k(t_2) \right] - \\ &\quad - \left[ N_B^j(t_1) - N_A^j(t_1) - N_B^k(t_1) + N_A^k(t_1) \right] = \\ &= \Delta N_A^j(t_{2-1}) - \Delta N_B^j(t_{2-1}) - \Delta N_A^k(t_{2-1}) + \Delta N_B^k(t_{2-1}). \\ \delta f_{AB\text{ант}}^{jk}(t_{2-1}) &= \delta f_{AB\text{ант}}^{jk}(t_2) - \delta f_{AB\text{ант}}^{jk}(t_1).\end{aligned}$$

Формула (2.21) свидетельствует о том, что при образовании третьих разностей фиксируются не абсолютные значения расстояний от приемников до спутников, а их приращения при перемещении последних по своей орбите за время  $\Delta t = t_2 - t_1$ . При этом вместо полных значений фазовых циклов  $N$ , которые соответствуют прохождению радиосигналов расстояния от спутника до приемника и представляют собой неизвестные величины, регистрируются их приращения, обусловленные изменениями расстояний до спутников за время  $\Delta t$ . Такие приращения  $\Delta N$  могут быть определены по показаниям фазоизмерительного устройства при условии непрерывного отслеживания принимаемых от спутника радиосигналов, в результате чего они становятся известными величинами.

На основе вышеизложенного может быть сделан вывод о том, что третьи разности открывают перспективу разрешения неоднозначностей, свойственных фазовым измерениям, за счет нахождения полных значений  $N$  по их приращениям  $\Delta N$ . Однако количественный анализ получаемых с помощью третьих разностей результатов свидетельствует о том, что такая процедура, предусматривающая нахождение полных значений искомых величин по их разностям, неизбежно связана с существенным понижением точности. Это утверждение является следствием того, что при образовании разности в результате сохраняются те же достоверные разряды единиц, что и в сравниваемых величинах, но обратный переход от разностных значений к исходным величинам связан с умножением разности на соответствующий множитель, в результате чего умножается и свойственная разностному значению погрешность. Поэтому описанный выше подход оказывается во многих случаях недостаточно эффективным и используется, как правило, только в качестве вспомогательного метода, а для отработки более надежных подходов к разрешению неоднозначностей приходится изыскивать другие методы. Более подробно этот круг затронутых вопросов рассмотрен в подразделе 2.8.

## 2.7. Интегральный доплеровский счет

Наряду с кодовыми и фазовыми измерениями в спутниковых системах GPS и ГЛОНАСС находит также применение метод, основанный на эффекте Доплера, который являлся основным методом измерений в предшествующих GPS и ГЛОНАСС системах «Транзит» (США) и «Цикада» (Советский Союз). Как известно, доплеровский эффект проявляется в тех случаях, когда излучатель и приемник тех или иных колебаний перемещаются относительно друг друга. Отмеченная ситуация характерна и для систем GPS и ГЛОНАСС, поскольку спутник, являющийся источником излучения радиосигналов, непрерывно изменяет свое местоположение относительно установленного на земной поверхности приемника.

Наблюдатель воспринимает эффект Доплера через изменение частоты принимаемых колебаний, которое обусловлено взаимным перемещением спутника и приемника. В общем случае применительно к спутниковым измерениям характерное для доплеровского эффекта расхождение между передаваемой и принимаемой частотами описывается следующим соотношением:

$$\frac{f_{\text{пр}}}{f_{\text{пер}}} = \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \Theta}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (2.22)$$

где  $f_{\text{пер}}$  и  $f_{\text{пр}}$  — частоты передаваемых и принимаемых колебаний;  $v$  — орбитальная скорость движения спутника;  $c$  — скорость распространения электромагнитных волн;  $\Theta$  — угол между направлением движения спутника и радиальным направлением, ориентированным на точку стояния приемника.

Величина  $v \cos \Theta$  в формуле (2.22) представляет собой скорость перемещения спутника в радиальном направлении, т. е. в направлении на приемник. Применительно к спутниковым дальномерным измерениям  $v \cos \Theta = dp/dt$ . Поскольку  $v \ll c$ , то формула (2.22) с достаточной степенью приближения может быть записана в следующем виде

$$f_{\text{пр}} = f_{\text{пер}} \left( 1 - \frac{1}{c} \frac{dp}{dt} \right) \quad (2.23)$$

или

$$\frac{dp}{dt} = \lambda_c \Delta f, \quad (2.24)$$

где  $\lambda_c = c/f_{\text{пер}}$  — длина волны излучаемых спутником колебаний;  $\Delta f = f_{\text{пер}} - f_{\text{пр}}$  — доплеровский сдвиг частоты.

При переходе к конечным приращениям  $\Delta\rho$  и  $\Delta t$  имеем:

$$\Delta\rho = \lambda_c \Delta N \quad (2.25)$$

Величина  $\Delta N$  представляет собой фазовый сдвиг  $\Delta\Phi$ , относящийся к доплеровскому эффекту. С учетом этого формула (2.25) принимает следующий окончательный вид:

$$\Delta\rho = \lambda_c \Delta\Phi \quad (2.26)$$

Выполненный выше анализ свидетельствует о том, что эффект Доплера может быть использован для оценки скорости изменения измеряемого до спутника расстояния  $\rho$ . При такой оценке в приемном устройстве производится измерение доплеровского сдвига частоты  $\Delta f$ . Наряду с этим в спутниковых приемниках, приспособленных для выполнения фазовых измерений несущих колебаний, посредством фиксации обусловленного эффектом Доплера фазового сдвига  $\Delta\Phi$  представляется возможным фиксировать последовательные изменения расстояния до спутника  $\Delta\rho$ . Применительно к системе GPS такой дифференциальный метод получил название метода образования разности фазовых измерений между эпохами.

Существует несколько вариантов фиксации фазовых сдвигов несущих колебаний по мере орбитального движения спутника. При этом наибольшее распространение получил метод регистрации целого числа фазовых циклов  $\Delta\Phi = \Delta N_{12}$  при переходе спутника  $S$  из точки, соответствующей моменту времени  $t_1$ , в точку характерную для момента времени  $t_2$  (рис. 2.6). Обычно такие измерения выполняют на достаточно протяженном участке орбиты. При этом величину  $\Delta N_{12}$  называют интегральным доплеровским счетом (или сокращенно интегральным доплером).

При использовании фазовых измерений применительно к эффекту Доплера следует иметь в виду, что для оценки фазовых сдвигов  $\Delta\Phi$ , наряду с принимаемыми от спутника сигналами в измерениях участвуют и местные опорные колебания, частота которых, как правило, несколько отличается от частоты излучаемых спутником колебаний.

Рассмотрим, как отражается это неравенство на результатах выполняемых доплеровских измерений.

Предположим, что за интересующий нас интервал времени  $\Delta t = t_2 - t_1$  по часам спутника зарегистрировано  $n$ -е число циклов, излучаемых спутником несущих колебаний (см. рис. 2.6).

По истечении времени, необходимого для прохождения радиосигналом расстояния между спутником и приемником, это же количество циклов будет зарегистрировано и приемной аппаратурой, но по

часам последней, в результате чего упомянутый выше интервал времени будет соответствовать  $\Delta t = t'_2 - t'_1$ . Различие во времени прохождения между началом данного пуга  $t_1$  и его окончанием  $t_2$  объясняется тем, что за время  $t_2 - t_1$  расстояние между спутником и приемником изменилось.

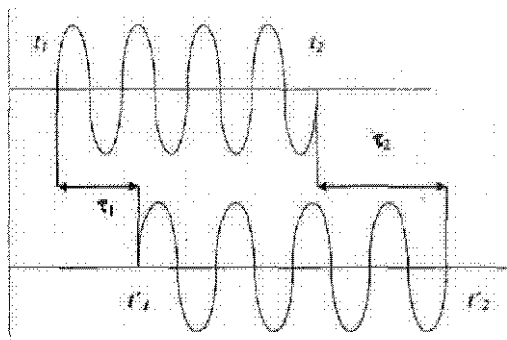


Рис. 2.6. Графики, поясняющие особенности доплеровских измерений, характерных для системы GPS

Из рис. 2.6 следует:

$$t'_1 = t_1 + \tau_1; \quad t'_2 = t_2 + \tau_2$$

откуда

$$t_2 - t_1 = (t'_2 - t'_1) - (\tau_2 - \tau_1).$$

Так как в общем случае частота представляет собой скорость изменения фазы, т. е.

$$f(t) = \frac{d\Phi}{dt}$$

или

$$\Phi = \int f(t) dt,$$

то для величины  $\Delta N_{12}$  в интегральной форме можно записать:

$$\Delta N_{12} = \int_{t_1 + \tau_1}^{t_2 + \tau_2} (f_{\text{при}} - f'_c(t)) dt = f_{\text{при}} [(t_2 - t_1) - (\tau_2 - \tau_1)] - \int_{t_1 + \tau_1}^{t_2 + \tau_2} f'_c(t) dt, \quad (2.27)$$

где  $f_{\text{при}}$  — частота опорных колебаний, генерируемых в приемнике,  $f'_c(t)$  — частота поступающих от спутника несущих колебаний, подверженная доплеровскому сдвигу.

Из равенства излучаемого и принимаемого количества циклов (см. рис. 2.6) имеем:

$$\int_{t_1 + \tau_1}^{t_2 + \tau_2} f'_c(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} f_c dt = f_c (t_2 - t_1), \quad (2.28)$$

где  $f_c$  — частота несущих колебаний, генерируемых на спутнике.

Подстановка соотношения (2.28) в соотношение (2.27) дает:

$$\Delta N_{12} = (f_{\text{при}} - f_c)(t_2 - t_1) - f_{\text{при}}(\tau_2 - \tau_1), \quad (2.29)$$

откуда

$$\tau_2 - \tau_1 = \frac{1}{f_{\text{при}}} [(f_{\text{при}} - f_c)(t_2 - t_1) - \Delta N_{12}] \quad (2.30)$$

или, переходя к приращениям расстояний

$$\Delta \rho = (\tau_2 - \tau_1)c = \lambda_{\text{при}} [(f_{\text{при}} - f_c)(t_2 - t_1) - \Delta N_{12}], \quad (2.31)$$

где  $\lambda_{\text{при}}$  — длина волны характерных для приемника опорных колебаний.

Первое слагаемое в квадратных скобках формулы (2.31) не связано с доплеровским эффектом и обусловлено неравенством частот несущих колебаний, генерируемых в приемнике и на спутнике. Для устранения влияния такого смещения необходимо или иметь информацию о точных значениях упомянутых частот (или показаний соответствующих часов) на спутнике и в приемнике, или использовать дифференциальный метод вторых разностей.

Второе слагаемое  $\Delta N_{12}$  отображает регистрируемые фазовые циклы, рассматриваемые как следствие эффекта Доплера. Оно позволяет определить интересующую нас величину  $\Delta \rho$  (после соответствующей корректировки, связанной с расхождением частот несущих колебаний на спутнике и в приемнике).

Позитивной стороной доплеровских измерений является то, что при их использовании не возникает необходимость разрешения неоднозначностей (в этом отношении данный метод имеет много общего с методом третьих разностей). Поскольку в системе GPS длина волны несущих колебаний равна примерно 20 см, то целочисленный счет таких длин волн обеспечивает дециметровый уровень точности, т. е. доплеровский метод по своей точности занимает промежуточное положение между фазовыми и кодовыми измерениями.

Рассматриваемый метод используется на геодезических работах пониженной точности или в качестве вспомогательного для определений приближенных значений расстояний при решении проблемы неоднозначности фазовых измерений.

## 2.8. Принципы разрешения неоднозначностей при фазовых измерениях

Как уже отмечалось ранее, при определении расстояний до спутников фазовыми методами возникает достаточно сложная проблема разрешения неоднозначности, т. е. нахождения целого числа длин волн  $N$ , укладывающихся в измеряемом расстоянии от спутника до приемника. Эта сложность обусловлена, прежде всего, тем, что определяемые дальности оцениваются величинами около 20 000 км, в то

время как длина волны несущих колебаний в системе GPS составляет всего 0,2 м. При таких исходных предпосылках параметр  $N$  характеризуется числами порядка  $10^8$ . Следовательно, для того, чтобы не вносить грубых ошибок в результаты измерений, т.е. уверенно определять величину  $N$  с точностью до одной целой единицы, необходимо обеспечить надежное нахождение этой величины с относительной погрешностью менее, чем  $1 \cdot 10^{-8}$ . При этом приходится учитывать и такие факторы, как непрерывное изменение величины  $N$  из-за орбитального движения спутника, а также необходимость нахождения серии таких величин для нескольких одновременно наблюдаемых спутников, поскольку для каждого конкретного спутника величина  $N$  имеет свое индивидуальное значение.

При отработке подходов к выбору эффективных методов разрешения неоднозначности наблюдается стремление выполнить следующие основные предпосылки:

1) перед процедурой, связанной с определением параметра  $N$ , целесообразно исключить все основные источники систематических ошибок, которые обуславливают смещение результатов измерений и искажают истинное значение  $N$ , не позволяя рассматривать ее как целочисленную величину;

2) для исключения необходимости многократного определения величины  $N$  для каждого спутника по мере его орбитального движения целесообразно ограничиться нахождением этой величины только в начальной точке наблюдения конкретного спутника, а затем отслеживать ее изменения по показаниям фазоизмерительного устройства;

3) выбираемые методы должны обеспечивать точность предварительных определений значений измеряемых расстояний, связанных с процедурой разрешения неоднозначности, не хуже половинного значения длины волны несущих колебаний, т.е. применительно к GPS на уровне около 10 см;

4) желательно, чтобы предлагаемые методы были достаточно универсальными с тем, чтобы можно было их использовать при работе как с двухчастотными, так и с одночастотными приемниками, в которых исключается возможность использования двух несущих частот с целью разрешения неоднозначности.

При выполнении перечисленных выше предпосылок открывается возможность ограничиться нахождением величины  $N$  только в начальной точке отслеживаемой траектории наблюдаемого спутника, т.е. осуществить разрешение так называемой начальной неоднозначности. Применительно к такой постановке задачи рассмотрим несколько наиболее распространенных методов разрешения неоднозначностей, характерных для спутниковых GPS измерений. К ним относятся:

- геометрический метод;
- метод, базирующийся на комбинации кодовых и фазовых измерений;
- метод поиска наиболее вероятных значений величины  $N$ ;
- нетривиальные методы разрешения неоднозначности.

### 2.8.1. Геометрический метод

Сущность данного метода состоит в том, что после захвата радиосигнала и начала фазовых измерений непрерывно отслеживаются целочисленные изменения фазы, т. е. циклы. Незвестная начальная величина  $N$  считается при этом неизменной при выполнении измерений во всех последующих точках траектории движения наблюдаемого спутника. Измерения моделируются на основе использования уравнения (2.13):

$$\Delta\Phi = -f \frac{P}{c} + N + \Delta N + f(\delta\alpha_{\text{изм}} - \delta\alpha_{\text{иск}}) + f\delta\alpha_{\text{иск}} \quad (2.32)$$

где  $\Delta N$  — отсчитываемые с помощью фазометра целочисленные изменения фазовых циклов, обусловленные движением спутника по орбите. Пояснения обозначений остальных входящих в данную формулу величин было дано ранее.

Интересующее нас значение  $N$  включается в число неизвестных. Оно определяется в процессе решения системы уравнений, относящихся к отсчетам при нахождении спутника в различных точках траектории. При этом используются первые и вторые разности дифференциальных измерений, а также доплеровские решения.

Надежность нахождения величины  $N$  зависит от длительности наблюдения спутника (чем больше эта длительность, тем надежнее определяется величина  $N$ ). При этом не допускается пропуск отсчитываемых фазовых циклов, который может возникать в случае временных пропаданий радиосигналов от наблюдаемого спутника (например, из-за экранировки этих сигналов окружающими объектами).

К положительным сторонам данного метода следует отнести простоту и четкость постановки задачи при моделировании такой процедуры, возможность его применения при работе на одной несущей частоте, а также сравнительно быстрое достижение поставленной цели.

Негативными сторонами рассматриваемой процедуры разрешения неоднозначности являются такие факторы, как рекомендации, связанные с увеличением длительности сеанса наблюдений, влияние недостаточно полно исключенных систематических погрешностей, обусловленных атмосферой (в частности, ионосферой), положением спутника на орбите и другими факторами, а также необходимость предварительного выявления и последующего устранения пропуска фазовых циклов.



## 2.8.2. Метод комбинированного использования кодовых и фазовых измерений

Реализация данного метода базируется, как правило, на совместном применении двухчастотных фазовых и кодовых измерений. С учетом этого рассмотрим основные особенности двухчастотных фазовых измерений применительно к решению проблемы неоднозначности.

При выполнении фазовых измерений на двух передаваемых со спутника несущих частотах  $L1$  и  $L2$  представляется возможным образовывать различные комбинации этих измерений и, в частности, их разность:

$$\Delta\Phi_{\Delta L} = \Delta\Phi_{L1} - \Delta\Phi_{L2}, \quad (2.33)$$

где  $\Delta\Phi_{L1}$  и  $\Delta\Phi_{L2}$  — измеряемые GPS-приемником фазовые сдвиги, относящиеся к несущим колебаниям с частотами  $L1$  и  $L2$ .

Получаемая при этом разность  $\Delta\Phi_{\Delta L}$  эквивалентна фазовому сдвигу, характерному для разностной частоты  $\Delta L$ , номинальное значение которой равно:

$$f_{\Delta L} L = f_{L1} - f_{L2} = 1575,42 - 1227,6 = 347,82 \text{ МГц.}$$

Длина волны таких разностных колебаний равна 86,2 см. Это значение существенно превышает длины волн основных несущих колебаний, которые соответственно равны 19,0 и 24,4 см.

Отмеченный метод перехода к более низкочастотным колебаниям получил название метода широкой дорожки, при использовании которого существенно облегчается нахождение целочисленных значений  $N$  на ранней стадии их вычислений.

Для решения поставленной задачи установим взаимосвязь между значениями  $N$ , характерными как для основных несущих частот  $L1$  и  $L2$ , так и для их разностей.

В соответствии с формулой (2.13) имеем:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\Phi_{\Delta L} &= -f_{L1} \frac{R}{c} + N_{\Delta L} + f_{L1} (\alpha_{sp} - \alpha_c) + f_{L1} \alpha_{\text{атм} \Delta L} \\ \Delta\Phi_{L2} &= -f_{L2} \frac{R}{c} + N_{L2} + f_{L2} (\alpha_{sp} - \alpha_c) + f_{L2} \alpha_{\text{атм} L2} \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

В этих формулах атмосферные задержки обусловлены, главным образом, влиянием ионосферы. Модельное представление такого влияния описывается следующим приближенным соотношением:

$$\alpha_{\text{атм}} = -\frac{k}{f^2}, \quad (2.35)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от концентрации электронов в ионосфере, от длины пути прохождения радиосигнала через ионизированную среду и от скорости электромагнитных волн в вакууме;  $f$  — частота несущих колебаний.

Знак «минус» в формуле (2.35) свидетельствует о том, что отдельные спектральные составляющие излучаемых колебаний при прохождении через ионосферу с фазовой скоростью испытывают не торможение, а, наоборот, ускорение.

С учетом приведенных выше предпосылок формулы (2.34) приобретают вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\Phi_{L1} &= -f_{L1} \frac{\rho}{c} + N_{L1} + f_{L1}(\alpha_{np} - \alpha_c) - \frac{k}{f_{L1}}, \\ \Delta\Phi_{L2} &= -f_{L2} \frac{\rho}{c} + N_{L2} + f_{L2}(\alpha_{np} - \alpha_c) - \frac{k}{f_{L2}} \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

причем для разности величин  $\Delta\Phi_{L1}$  и  $\Delta\Phi_{L2}$  можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_M &= \Delta\Phi_{L1} - \Delta\Phi_{L2} = \\ &= -f_M \frac{\rho}{c} + N_M + f_M(\alpha_{np} - \alpha_c) - k\left(\frac{1}{f_{L1}} - \frac{1}{f_{L2}}\right), \end{aligned} \quad (2.37)$$

где  $N_M = N_{L1} - N_{L2}$ .

Из совместного решения первого уравнения в системе (2.36) и уравнения (2.37) может быть получено следующее соотношение:

$$N_{L1} = \Delta\Phi_{L1} - (N_M - \Delta\Phi_M) \frac{f_{L1}}{f_M} + k \frac{f_{L1} + f_{L2}}{f_{L1} \cdot f_{L2}}. \quad (2.38)$$

Соотношение (2.38) позволяет по найденному для разностной частоты  $f_{\Delta L}$  целому количеству фазовых циклов  $N_{\Delta L}$  вычислить интересующее нас значение  $N_{L1}$ , а следовательно, и  $N_{L2}$ .

Как уже отмечалось ранее, из-за увеличения длины волны для колебаний разностной частоты существенно упрощается процедура разрешения неоднозначности, т.е. нахождения величины  $N_{\Delta L}$ .

В частности, эта проблема может быть решена на основе знания приближенного значения определяемого расстояния до спутника, получаемого с использованием кодовых сигналов, третьих разностей или доплеровских методов.

С целью нахождения значения  $N_{\Delta L}$  на базе совместного применения кодовых и фазовых методов представим формулу (2.37) в следующем виде:

$$N_M = \frac{f_M}{c} \rho' + \Delta\Phi_M - f_M(\alpha_{np} - \alpha_c) + k\left(\frac{1}{f_{L1}} - \frac{1}{f_{L2}}\right). \quad (2.39)$$

В формуле (2.39) основной неизвестной величиной является приближенное расстояние до спутника  $\rho'$ , которое может быть определено с помощью кодовых (псевдодальномерных) измерений на основе использования формулы (2.6):

$$\rho' = R - (\alpha_{np} - \alpha_c)c - \alpha_{om}c. \quad (2.40)$$

Входящие в формулы (2.39) и (2.40) поправки за уход часов на спутнике и в приемнике, а также за влияние атмосферы могут быть исключены за счет использования рассмотренных ранее дифференциальных методов измерений на двух несущих частотах, а также совместного решения системы уравнений, включающих в себя кодовые и фазовые измерения. Величины упомянутых выше поправок принимаются при этом как смещения, сохраняющие свои величины на интересующем нас интервале времени.

Что касается определения величины  $R$  кодовыми методами, то для надежного нахождения значения  $N_{\Delta L}$  необходимо обеспечить определение  $R$ , а следовательно, и  $\rho_{\text{прием}}$  с погрешностью не хуже  $1/2\lambda_{\Delta L} \approx 43$  см, т. е. на дециметровом уровне точности.

Такая точность может быть обеспечена только на основе применения санкционированного P-кода в малошумящих GPS-приемниках. Отмеченная причина является основным фактором, ограничивающим широкое применение рассмотренного метода разрешения неоднозначности, базирующегося на совместном использовании фазовых и кодовых измерений.

К положительным сторонам данного метода могут быть отнесены такие факторы, как независимость полученных результатов от геометрии расположения спутников, возможность его использования в кинематическом режиме с применением широкой дорожки, а также возможность разрешения неоднозначностей для базисных линий различной протяженности (в том числе и очень длинных).

К недостаткам следует отнести необходимость использования двухчастотных приемников, имеющих доступ к P-коду, чувствительность к отдельным, не учитываемым в процессе наблюдений, источникам ошибок (в частности, к влиянию отраженных от окружающих объектов принимаемых от спутника радиосигналов), а также недостаточно высокую надежность определения значений  $N_{L1}$  и  $N_{L2}$  на основных несущих частотах.

### *2.8.3. Метод поиска наиболее вероятных значений целого числа циклов*

Основная идея этого метода базируется на тех предпосылках, что при выполнении спутниковых наблюдений с двух расположенных на земной поверхности неподвижных пунктов расстояние между этими пунктами в процессе проведения сеанса наблюдений остается неизменным, а следовательно, и число длин волн, укладывающихся на этом расстоянии, также является постоянным. Поскольку при проведении сеанса наблюдений накапливается достаточно большой объем информации, то имеется возможность многократного нахождения

дальностей до наблюдаемых спутников, которые, в свою очередь, могут быть использованы для многократных определений длин базисной линии, соединяющей пункты, на которых установлены спутниковые приемники.

При этом, если значения целых циклов  $N$  в измеряемых до спутников расстояниях определены правильно, то разброс вычисляемых значений базисной линии будет минимальным, причем группировка отдельных результатов происходит вокруг верного значения количества целых циклов, укладывающихся в длину базисной линии.

Следовательно, используя наиболее подходящие значения фазовых циклов, соответствующих начальным дальностям до спутников (при условии последующих отслеживаний изменений этих значений), появляется возможность методом последовательного подбора упомянутых выше значений разрешить неоднозначность, характерную для фазовых измерений расстояний до спутников, а также и для длины базисной линии на местности.

В обобщенном виде процедура реализации метода поиска сводится к следующему:

1. На основе использования одного из методов, позволяющих с повышенной точностью определять однозначные величины измеряемых дальностей (например, за счет применения метода третьих разностей), находят местоположения пунктов наблюдения, на которых установлены спутниковые приемники.

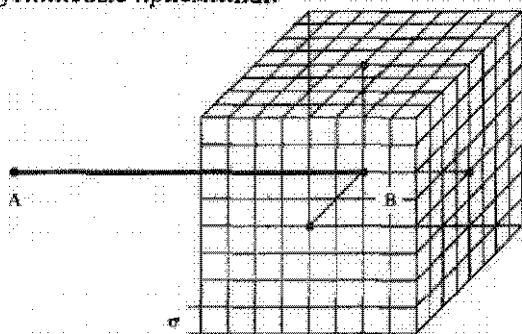


Рис. 2.7. Пояснение к принципу разрешения неоднозначности на основе использования метода поиска

2. Найденные координаты одного из пунктов (например, пункта А на рис. 2.7) принимают за исходные, а вокруг второго пункта (пункт В) строят куб с выбранными размерами сторон, которые обычно кратны величине средней квадратической ошибки  $\sigma$  (например,  $8\sigma \times 8\sigma \times 8\sigma$ , т. е.  $\pm 4\sigma$  в каждом направлении и для каждой координаты). Этот куб расчлениают на регулярную сетку. Центральная точка этого куба (точка В) со-

ответствует решению, полученному, например, на основе использования третьих разностей.

3. Каждая из точек кубической решетки рассматривается как вариант верного разрешения неоднозначности и ее значение подставляются в решаемые системы уравнений, которые содержат в себе результаты многократных наблюдений.

4. Для полученных значений оценивается величина ср. кв. ошибки  $\sigma$  с удержанием тех результатов, которые находятся в пределах выбранной кубической решетки, после чего процедура повторяется с подстановкой соседних целочисленных значений  $N$  в определяемые до спутника дальности.

5. За окончательное решение принимают те значения  $N$ , которые обеспечивают минимальную величину  $\sigma$  с концентрацией полученных значений вокруг одной из точек выбранной кубической решетки.

Без принятия специальных мер количество итераций оказывается чрезвычайно большим. Так, по результатам исследований, приведенным в работе [82], количество всевозможных комбинаций может достигать  $7,5 \cdot 10^{34}$ . Вполне очевидно, что такое количество решений явно неприемлемо даже при использовании наиболее совершенной вычислительной техники. С учетом этого для поочередного выбора решений отработывается определенная стратегия, причем проведенные в данной области исследования оказались весьма успешными. В частности, на их основе разработаны методы быстрого разрешения неоднозначностей, которые послужили основой для разработки метода наблюдений, получившего название «Быстрая статика». Этот метод получил весьма широкое практическое распространение при измерении базисных линий небольшой протяженности.

Наряду с этим метод поиска широко применяется и на линиях повышенной протяженности. К его позитивным сторонам следует отнести:

1) достаточно высокую надежность разрешения неоднозначностей, характерных для фазовых измерений несущих колебаний;

2) сравнительно быстрое решение поставленной задачи (например, при использовании метода «Быстрая статика»);

3) возможность его использования при точных кинематических применениях систем спутникового позиционирования;

4) универсальность, позволяющая производить разрешение неоднозначности при работе, как с двухчастотными, так и с одночастотными спутниковыми приемниками.

В то же время для метода поиска характерны следующие недостатки:

1) чувствительность к наличию неисключенных систематических ошибок (в частности, отмечаются случаи неверного разрешения неоднозначности при наличии отражений радиосигналов от окружающих объектов);

2) желательность использования при наблюдениях максимального количества спутников, что повышает эффективность применения данного метода;

3) недостаточно высокая надежность критериев, по которым оценивается правильность разрешения неоднозначности.

#### *2.8.4. Нетривиальные методы разрешения неоднозначности*

Поскольку разрешение неоднозначности является ключевой проблемой при выполнении фазовых измерений спутниковыми приемниками, то иногда для повышения надежности нахождения целого числа фазовых циклов, укладывающихся в измеряемых расстояниях, прибегают к применениям нетривиальных методов разрешения неоднозначности, причем не ограничиваются использованием одного метода, а подстраховывают его за счет применения вспомогательных методов, базирующихся на несколько иных принципах. Наряду с этим объединение различных методов позволяет в отдельных случаях не только продублировать процесс разрешения неоднозначности, но и удачно дополнить друг друга.

В частности, к нетривиальным методам разрешения неоднозначности может быть отнесен так называемый метод «реокупации», при котором наблюдения на выбранных пунктах производится дважды с некоторым разносом во времени (как правило, не менее 1-2 часов). При обработке такие данные объединяются, что позволяет не просто получить повышенный объем информации, но и использовать суммарное количество спутников с отличающейся геометрией их расположения.

Дальнейшее развитие описанного выше метода поиска привело к разработке нетривиального метода неоднозначных функций, который базируется на решении системы уравнений на комплексной плоскости. Этот метод, достаточно подробно описанный в работе [82], позволяет придать методу поиска вполне обоснованную математическую трактовку.

При использовании двухчастотных методов фазовых измерений прибегают к применению не только разности отсчетов на частотах  $L1$  и  $L2$ , но и к всевозможным комбинациям этих отсчетов. При этом предпринимаются попытки получения данных, относящихся к более низким разностным частотам, для которых существенно расширяется диапазон между циклами, что облегчает нахождение искомым значений  $N$ .

В тех случаях, когда продолжительность наблюдений оказывается достаточно большой (например, несколько часов или даже несколько суток), появляется возможность выбора наиболее благоприятных интервалов времени, для которых неоднозначность разрешается наиболее надежно.

При обработке спутниковых измерений, ориентированных на получение максимальной точности, рекомендуется, чтобы такие работы выполнялись достаточно опытным и высококвалифицированным персоналом, который может в процессе обработки найти наиболее эффективные подходы к надежному разрешению неоднозначностей.

## 2.9. Выявление пропусков фазовых циклов

Используемые при спутниковых измерениях общие подходы к разрешению неоднозначностей, характерных для фазовых методов спутниковых наблюдений, ориентированы на определение неизвестной величины  $N$  только в начальной точке траектории отслеживаемого спутника, а все последующие изменения этой величины, обусловленные орбитальным движением спутника, оцениваются на основе показаний фазоизмерительного устройства приемника. При этом неперенным условием является непрерывность приема радиосигналов от наблюдаемого спутника, так как нарушения такого приема, при которых теряется захват фазы, сопровождается потерей счета целого числа фазовых циклов, в результате чего реализация принятой стратегии разрешения неоднозначности сильно затрудняется и иногда вообще становится неприемлемой. В связи с этим перед выполнением процедуры разрешения неоднозначностей принимают все меры для того, чтобы выявить пропуски фазовых циклов и устранить их влияние.

При работе со спутниковыми приемниками отмечают следующие причины пропуска фазовых циклов:

- 1) экранировка принимаемых от спутника радиосигналов различного рода окружающими объектами (деревьями, строениями, конструкциями наружных геодезических сигналов, горным рельефом и др.);
- 2) недопустимое ослабление поступающих на вход антенны сигналов из-за влияния различного рода отражений, обуславливающих появление многопутности и последующую интерференцию таких попадающих в приемник сигналов;
- 3) сильные мерцания сигналов из-за влияния возбужденной ионосферы;
- 4) сильное затухание упомянутых сигналов при их прохождении через атмосферу от спутников, находящихся низко над горизонтом;

5) недостаточно качественная работа спутниковых приемников (в частности, неудовлетворительное разделение сигналов, поступающих от различных спутников, что может приводить к дополнительным ослаблениям принимаемых сигналов);

6) нарушения, возникающие в процессе обработки сигналов из-за появления различного рода отклонений от штатной ситуации.

Если в процессе проведения сеанса наблюдений были допущены пропуски фазовых циклов, то они должны быть, прежде всего, выявлены и количественно оценены, после чего необходимо принять меры к их устранению. Желательно, чтобы все эти процедуры были выполнены на стадии предварительной обработки. В противном случае должны быть предприняты попытки разрешения неоднозначности после каждой неустраненной потери сигнала с применением той же методики, что и для нахождения начального значения  $N$ . Невозможность выполнения упомянутых условий может привести к необходимости исключения таких прерывающихся наблюдений отдельных спутников из процесса обработки результатов измерений.

В зависимости от особенностей выполняемых первичных измерений, наличия дополнительной исходной информации и стадии вычислений, на которой выявляются пропуски циклов, применяются следующие методы анализа полученного набора данных:

1) анализ закономерности изменений во времени результатов фазовых измерений;

2) анализ измерений на двух несущих частотах ( $L1$  и  $L2$ ) и получаемых в результате вычислений остатков, обусловленных влиянием ионосферы;

3) анализ комбинации кодовых и фазовых измерений;

4) анализ результатов, полученных при формировании разностных отсчетов.

*Первый метод* базируется на предположении плавного изменения во времени регистрируемых значений фазы. При этом в используемом спутниковом приемнике осуществляется регистрация моментов потери сигнала ( $t_n$ ) и повторного его захвата ( $t_s$ ). Специфика применения такого метода проиллюстрирована в графической форме на рис. 2.8.

На приведенном графике через  $t_0$  и  $\Phi_0(t)$  обозначены время начала сеанса наблюдений и соответствующая ему фаза несущих колебаний. Если в момент времени  $t_n$  произошла потеря сигнала, а в момент времени  $t_s$  — его повторный захват, то на основе знания скорости изменения регистрируемых значений фазы на участке  $t_0-t_n$  и времени  $t_s-t_n$  может быть вычислена ориентировочная величина изменения фазы



$\Delta\Phi_{z-n}$  за время отсутствия сигнала, а также незарегистрированное количество целых фазовых циклов  $N_{z-n}$  за отмеченное время.

Данный метод подразумевает возможность точной регистрации интервала времени, для которого определяется пропуск фазовых циклов. Используемая при этом экстраполяция скорости изменения фазы оказывается эффективной при сравнительно коротких пропаданиях сигналов.

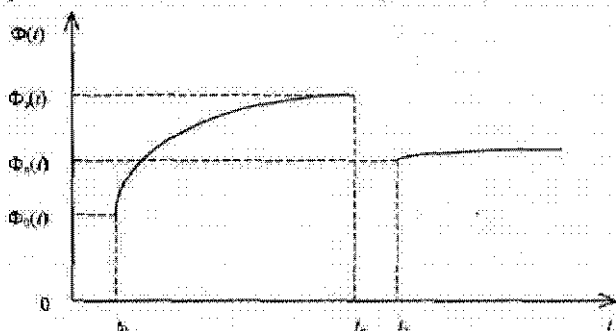


Рис. 2.8. График, иллюстрирующий принцип коррекции результатов измерений, связанной с пропуском циклов

*Второй метод* выявления пропуска циклов характерен для использования двухчастотных спутниковых приемников. Он основан на анализе разности регистрируемых фазовых сдвигов на частотах L1 и L2. В качестве тестовой величины применяется параметр  $\delta\Phi(t)$ , определяемый на основе совместного решения уравнений (2.36) и описываемый следующим соотношением:

$$\delta\Phi(t) = \Delta\Phi_{L1}(t) - \frac{f_{L1}}{f_{L2}} \Delta\Phi_{L2}(t). \quad (2.41)$$

Этот параметр часто называют ионосферным остатком. Если пропуски фазовых циклов отсутствуют, то параметр  $\delta\Phi(t)$  при измерении базисных линий небольшой протяженности характеризуется сравнительно малой величиной, а его временные вариации, связанные с изменениями состояния ионосферы, оказываются медленно меняющимися. При наличии пропусков циклов на одной из несущих частот наблюдаются внезапные скачки во временной последовательности определяемых величин  $N$ , которые рассматриваются как своеобразный индикатор.

Такой метод может быть применен при наблюдении отдельного спутника одним приемником. Его основной недостаток состоит в том, что он перестает работать в тех случаях, когда пропуски циклов наблюдаются одновременно на обеих несущих частотах (L1 и L2).

*Третий метод*, предусматривающий анализ комбинаций кодовых и фазовых измерений, ориентирован на использование высококачественных малошумящих приемников, имеющих доступ к Р-коду. Он базируется на анализе разности определяемых расстояний до спутника на основе фазовых и кодовых измерений. Поскольку последние не подвержены влиянию неоднозначности, то любые непредвиденные отклонения целочисленных значений  $N$  могут быть выявлены и устранены немедленно. К основному недостатку метода следует отнести чрезмерно жесткие требования к точности выполнения кодовых измерений (на дециметровом уровне). Его преимуществами является простота моделирования и возможность использования как при статических, так и при кинематических применениях спутниковых наблюдений.

*Четвертый метод* основан на анализе первых, вторых и третьих разностей дифференциальных методов измерений. Он требует знания приближенных координат как спутника, так и точки стояния приемника. Значения дальностей, вычисляемых на основе упомянутых приближенных координат, сравниваются с полученными в результате применения разностных отсчетов. При этом чаще всего используются вторые разности. Данный метод подвержен остаточному влиянию ионосферы, которое должно быть смоделировано. Другим недостатком метода является необходимость знания приближенных координат и использования двух одновременно работающих приемников. К его позитивным показателям может быть отнесен тот факт, что он применим при работе с одночастотными приемниками.

В современных наиболее совершенных спутниковых приемниках принимают все меры к тому, чтобы за счет использования вводимых и приемник пакетов программ выявление и устранение пропуска фазовых циклов осуществлялось автоматически в процессе проведения сеанса наблюдений.

## 2.10. Общая схема обработки наблюдаемых данных

На основе изложенных выше различных методов измерений и последующих вычислений представляется возможным составить упрощенную обобщенную схему обработки спутниковых данных.

Как уже отмечалось ранее, при геодезическом использовании спутниковой системы позиционирования весь процесс обработки разбивают на две основные части:

- 1) предварительная, производимая в приемнике обработка;
- 2) заключительная стадия обработки («пост-обработка»), производимая в камеральных условиях (на базе полевой партии или в вычислительных центрах).

Особенности обработки, производимой непосредственно в спутниковых приемниках, были описаны в подразделе 1.7.8. Рассмотрим схему обработки спутниковых данных на заключительной стадии, т. е. в процессе «пост-обработки».

Следует заметить, что характерная для спутниковых измерений завершающая стадия обработки является многовариантной и зависит, прежде всего, от конечной цели поставленной задачи. В частности, на практике весьма часто используются следующие стратегии вычислительных процессов:

- 1) определение отдельных базисных линий и последующее их объединение в сети;

- 2) вычисление односеансных результатов, полученных одновременно для многих станций;

- 3) совместная обработка данных, характерных для нескольких сеансов наблюдений.

Специфика подходов к решению поставленных задач будет показана в разделе 6, посвященном окончательной обработке спутниковых измерений. В настоящем разделе изложены лишь общие представления, касающиеся принципов составления схемы обработки.

Анализ прилагаемых к конкретным типам спутниковых приемников пакетов программ свидетельствует о том, что содержание и форма представления разрабатываемых различными фирмами-изготовителями так называемых коммерческих вычислительных программ могут существенно различаться. В результате этого возникла необходимость создания унифицированного формата представления данных, который не зависит от типа применяемого приемника. Такой формат получил условное обозначение RINEX. Наряду с этим, коммерческим программам свойственен и тот недостаток, что они, как правило, не позволяют получить максимально возможную точность, характерную для спутниковых систем, и производить обработку обширных геодезических сетей. Это обусловлено тем, что они ориентированы на массовое их использование персоналом средней квалификации и на упрощение процедуры вычислений. Для устранения отмеченного недостатка разработаны универсальные профессиональные программы, позволяющие производить поэтапную обработку данных с промежуточным анализом получаемых результатов. Такие программы базируются на более строгом модельном представлении и рассчитаны на то, что работа с ними осуществляется высококвалифицированным персоналом.

Такие программы позволяют решать разнообразнейшие задачи, включая и нетривиальные, имеющие научно-производственный характер и содержащие требования получения максимальной точности.

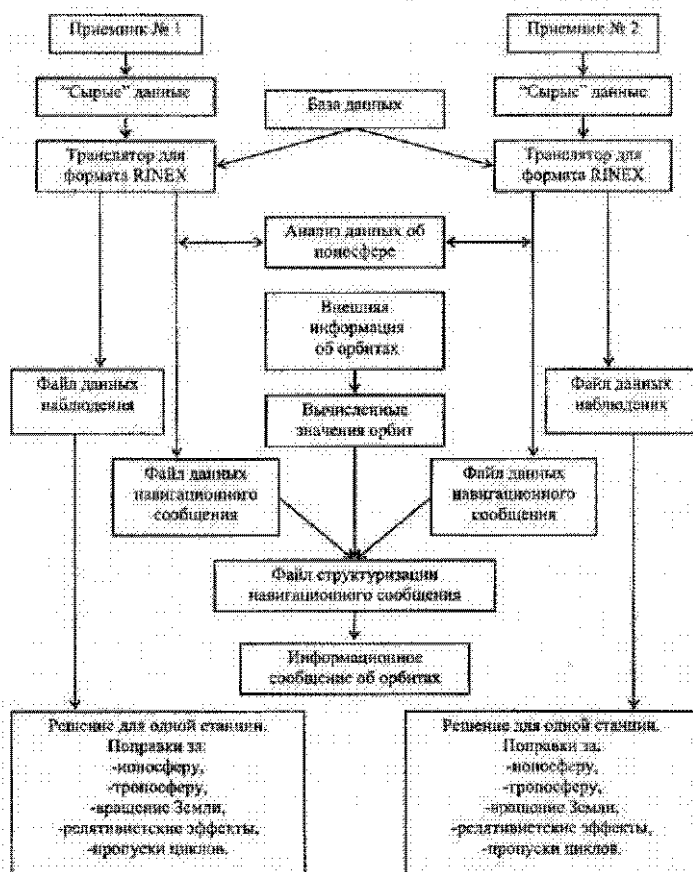


Рис. 2.9. Обобщенная блок-схема программы обработки GPS-данных для каждой из двух станций

Общие принципы построения профессиональных программ освещаются в специализированной литературе. Для иллюстрации на рис. 2.9 приведена упрощенная, обобщенная схема, характерная для дифференциальных методов обработки данных фазовых измерений, которые получили преимущественное применение при решении геодезических задач.

В качестве исходной информации при выполнении обработки используются поступающие с выходов спутниковых приемников «сырые» данные, относящиеся, как правило, к одному сеансу наблюдений.

После сбора «сырых» данных они переводятся в удобно читаемый формат, например, в формат RINEX, и проверяются на наличие грубых ошибок. Информация, содержащаяся в передаваемых со спутника на-

вигационных сообщениях, обычно отделяется от результатов наблюдений. В случае необходимости, в нее может быть введена внешняя информация, содержащая уточненные данные об орбитах спутников.

После выполнения подготовительных операций производится решение, характерные для каждой станции. В результате такого решения в получаемую информацию вводятся поправки за влияние перечисленных на схеме источников погрешностей (см. рис. 2.9).



Рис. 2.10. Обобщенная блок-схема программы обработки спутниковых данных на завершающей стадии

На следующем этапе вводится в действие основная программа обработки (рис. 2.10), базирующаяся на совместном использовании откорректированных результатов отдельных станций. При этом, как правило, применяется метод вторых разностей. При этом выявляются и устраняются необнаруженные ранее пропуски фазовых циклов, а также разрешаются неоднозначности.

Главная задача основной программы обработки состоит в вычислении искомых значений координат точек стояния, длин базисных линий и других, интересующих потребителя, геодезических данных с оценкой точности их определения. Такая обработка может быть осуществлена как для одного, так и для нескольких сеансов наблюдений.

На заключительной стадии может быть произведено уравнивание полученных результатов и осуществлен (в случае необходимости) переход к местной системе координат.

### **Раздел 3. Системы координат и времени, используемые в спутниковых измерениях**

Системы координат и времени, используемые в астрономии и космической геодезии достаточно подробно рассмотрены в основополагающих работах [4, 49, 37, 48, 49, и др.]. Мы рассмотрим эти вопросы обзорно, уделив внимание особенностям использования систем координат и времени при спутниковых измерениях.

#### **3.1. Роль и значение координатно-временного обеспечения для спутниковых методов определения местоположения**

Выполнение высокоточных измерений с помощью спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС и др.) тесно связано со строгими определениями координатных систем, относительно которых выполняются измерения. Измеряемые навигационные параметры спутников глобальной системы позиционирования и определяемые координаты спутниковых приемников отсчитываются в различных системах координат. В частности, для описания движения спутников используются звездная (инерциальная) референцная система (CJS), фиксируемая по положению специально выбираемых для этих целей звезд или галактических радиоисточников (квазаров), а для определения положения пунктов, находящихся на земной поверхности, — общеземная референцная система (CTS), реализуемая через набор фундаментальных пунктов, входящих в состав глобальной геодезической сети. Проведенные в этой области исследования свидетельствуют о том, что взаимное положение этих двух координатных систем не остается постоянным с течением времени, а поэтому их взаимосвязь приходится учитывать в каждом сеансе спутниковых измерений с достаточно высокой точностью.

##### **3.1.1. Общие сведения о системах координат**

Поскольку при спутниковых измерениях используются две системы координат, то для определения местоположения пункта в общеземной координатной системе на основе применения спутниковой технологии необходимо знать положение спутников в упомянутой

земной системе координат. Ориентация координат задается в инерциальных звездных или геодезических системах.

При спутниковых измерениях используются, как правило, две системы координат, одна из которых жестко связана с Землей (земная или геодезическая), а другая — с окружающим пространством (небесная или звездная). Для того, чтобы определить положение объекта в земной координатной системе при помощи спутниковой технологии, мы должны знать положение спутников в земной системе. Однако эфемериды спутников обычно определяют в небесных координатах, так как уравнения движения спутников формулируются и решаются в небесной системе координат, поскольку это более строго соответствует инерциальной отсчетной системе. Поэтому формулы преобразования между земной и небесной координатными системами должны быть известны с высокой точностью. Важной проблемой является также тот факт, что спутниковые данные являются по своей природе общеземными, тогда как наземные геодезические сети, создаваемые на основе спутниковых технологий, могут охватывать как весь земной шар, так и ограниченные регионы земной поверхности. Поэтому правильность установления соотношения между глобальной спутниковой сетью и локальными геодезическими сетями имеет крайне важное значение.

Соотношения между некоторыми основными системами координат приведены ниже. Связь между прямоугольной и сферической системами определяется следующими соотношениями (рис. 3.1):

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; & x &= R \cos \varphi \cos \lambda; \\ \sin \varphi &= \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}; & y &= R \cos \varphi \sin \lambda; \\ \operatorname{tg} \lambda &= \frac{y}{x}; & z &= R \sin \varphi. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Связь между прямоугольной и эллипсоидальной системами определяется соотношениями (рис. 3.2):

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; & x &= N \cos B \cos L; \\ \operatorname{tg} L &= \frac{y}{x}; & y &= N \cos B \sin L; \\ z &= \frac{b^2}{a^2} N \sin B. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Радиус кривизны первого вертикала

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}}.$$

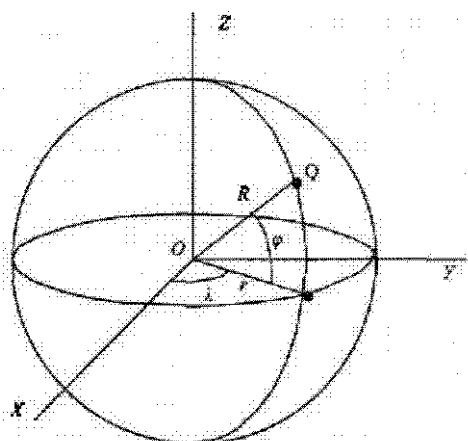


Рис. 3.1. Прямоугольные и сферические системы координат

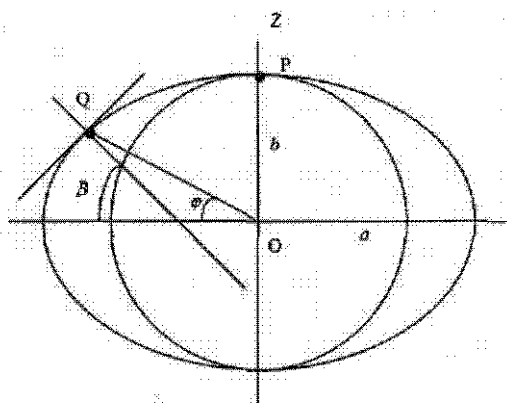


Рис. 3.2. Прямоугольные и эллипсоидальные системы координат

Эллипсоидальная широта  $B$  определяется приближениями.

Преобразования координат, связанные с переносом начала и разворотом осей рассмотрим для системы прямоугольных координат. Если начало новой системы координат относительно старой имеет координаты  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ , а направление осей совпадает, то координаты любой точки в новой системе  $X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$  относительно старой определяют соотношениями:

$$\begin{aligned} X_1 &= X + \Delta X; \\ Y_1 &= Y + \Delta Y; \\ Z_1 &= Z + \Delta Z. \end{aligned} \quad (3.3)$$



Или в векторном виде

$$\bar{X}_i = \bar{X} - \Delta\bar{X}$$

Если же начала двух систем координат совпадают, а оси новой и старой систем расположены под некоторыми углами друг к другу, так что направляющие косинусы осей новой системы по отношению к осям старой будут

$$l_x, m_x, n_x; l_y, m_y, n_y; l_z, m_z, n_z,$$

то формулы преобразования координат примут следующий вид:

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_x & m_x & n_x \\ l_y & m_y & n_y \\ l_z & m_z & n_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

В высшей геодезии принято [48] преобразование координат представлять в виде трех последовательных поворотов (рис. 3.3):

1) поворот на угол  $\omega_z$  вокруг оси  $OZ$ , при этом ось  $X$  перемещается в положение  $X'$ , а  $Y$  — в  $Y'$ ;

2) поворот на угол  $\omega_x$  вокруг оси  $OX'$ , при этом ось  $Y$  перемещается в положение  $Y_1$ , а  $Z$  — в  $Z'$ ;

3) поворот на угол  $\omega_y$  вокруг оси  $OY_1$ , при этом ось  $Z$  перемещается в положение  $Z_1$ , а  $X'$  — в  $X_1$ .

Матрица поворота  $R$  при этом принимает следующий вид:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \omega_y \cos \omega_z - \sin \omega_y \cos \omega_x + \sin \omega_y \cos \omega_z & \sin \omega_y \cos \omega_x & \sin \omega_y \cos \omega_z \\ -\sin \omega_x \sin \omega_y \sin \omega_z + \sin \omega_x \sin \omega_y \cos \omega_z & \cos \omega_x \cos \omega_z & \sin \omega_x \\ -\sin \omega_z \cos \omega_x & \cos \omega_x \cos \omega_z & \sin \omega_x \\ \cos \omega_z \sin \omega_y + \sin \omega_z \sin \omega_x & \sin \omega_z \sin \omega_y - \sin \omega_x \cos \omega_z & \cos \omega_y \cos \omega_x \\ + \sin \omega_x \cos \omega_y \sin \omega_z & -\sin \omega_x \cos \omega_y \cos \omega_z & \cos \omega_y \cos \omega_x \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Учитывая то, что углы поворота  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  и  $\omega_z$  являются малыми, так что их вторыми степенями можно пренебречь, выражение (3.5) можно представить в следующем виде:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

При одновременном изменении начала отсчета и ориентирования системы координат преобразования принимают вид:

$$\bar{X}_i = \bar{X} + \Delta\bar{X} + R\bar{X},$$

или в развернутом виде:

$$\begin{aligned} X_i &= X + \Delta X + \omega_z Y - \omega_y Z, \\ Y_i &= Y + \Delta Y - \omega_z X + \omega_x Z, \\ Z_i &= Z + \Delta Z + \omega_y X - \omega_x Y. \end{aligned} \quad (3.7)$$

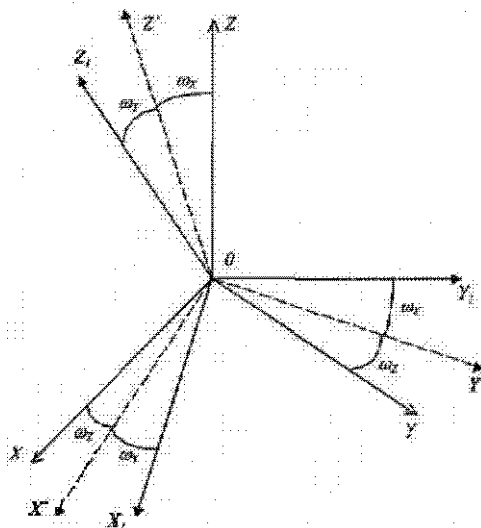


Рис. 3.3. Разворот осей координатных систем

В формулах (3.7) принято, что при переходе от одной системы координат к другой масштабы одинаковы. При изменении масштаба следует в формулу преобразований ввести соответствующий коэффициент. Матрица масштабных преобразований в этом случае имеет вид:

$$T = \begin{pmatrix} \chi_x & 0 & 0 \\ 0 & \chi_y & 0 \\ 0 & 0 & \chi_z \end{pmatrix}, \quad (3.8)$$

а общее преобразование:

$$\bar{X}_1 = \bar{X} + \Delta\bar{X} + T R \bar{X}.$$

Обычно используют единственное значение масштабного коэффициента  $\chi$ , а общее преобразование в этом случае имеет следующий вид:

$$\bar{X}_1 = \bar{X} + \Delta\bar{X} + \chi R \bar{X}. \quad (3.9)$$

### 3.1.2. Краткие сведения о системах отсчета времени, используемых в GPS и ГЛОНАСС

Для перехода от звездной системы координат к системе координат, жестко связанной с Землей, необходимо знание точного времени измерений. В связи с этим приведем краткую характеристику систем измерения времени, употребляемых как в астрономии так и в космической и спутниковой геодезии. При спутниковых измерениях используются три различных системы времени: звездное время, динамическое время и атомное время.

Динамическое время — это универсальный масштаб времени, в соответствии с которым происходит движение тел в гравитационном поле, т.е. это независимый аргумент в уравнениях движения тела, которые базируются на некоторой гравитационной теории (такой например, как ньютоновская механика или общая теория относительности). Динамическое время используется при определении эфемерид спутников.

Согласно рекомендациям Международного астрономического союза в настоящее время вместо ранее употреблявшегося «эфемеридного времени» *ET* в качестве аргумента геоцентрических эфемерид используется «земное динамическое время» *TDT*. Шкала «эфемеридное время», имевшая смысл шкалы равномерного времени ньютоновой динамики и определявшая аргумент дифференциальных уравнений всех гравитационных теорий движения тел Солнечной системы в ньютоновом приближении, заменена теперь шкалой «барицентрическое динамическое время» *TDB*.

Атомное время — это время, которое поддерживается с помощью атомных часов. Оно является основой единообразного масштаба времени на Земле. Масштаб времени задается через период (или обратную ему величину — частоту) основных колебаний элемента, задающего частоту, которая измеряется и является первоисточником масштаба времени, который согласуется в соответствии с международными конвенциями.

Звездное время определяется через период вращения Земли вокруг своей оси. Несмотря на то, что звездное время использовалось для измерения времени на основе астрономических наблюдений, оно является весьма нерегулярным в сравнении с современными стандартами, а поэтому его нельзя рассматривать в общем случае как измерительное время. Оно скорее является мерой измерения углового положения того или иного пункта на земной поверхности относительно пространственной (звездной) отсчетной системы.

В качестве эталонов для измерения времени используют периодические процессы, период которых с большой точностью постоянен. В течение многих столетий таким эталоном было вращение Земли с соответствующими единицами измерения — сутками и  $1/86\,400$  частью суток — секундой. Однако в последние десятилетия был выявлен целый ряд сезонных, вековых и нерегулярных неравномерностей в движении нашей планеты, поэтому сейчас в Международной системе СИ принята единица измерения времени, основанная на резонансной частоте квантовых переходов атомов цезия. Определенная таким образом секунда очень близка к  $1/86\,400$  части суток и называется «атомной секундой», а определяемая этой единицей шкала времени называется «атомным временем» (АТ).

В настоящее время различают следующие системы всемирного времени  $UT$  (Universal Time):

$UT0$  — всемирное время, непосредственно получаемое из астрономических наблюдений суточных движений звезд, т. е. время на мгновенном гринвичском меридиане, положение которого определено мгновенными положениями полюсов Земли;

$UT1$  — всемирное время среднего гринвичского меридиана, определяемого средними положениями полюсов Земли, оно получается исправлением значений  $UT0$  при помощи поправки  $\Delta\lambda$  за движение полюсов Земли:

$$UT1 = UT0 + \Delta\lambda. \quad (3.10)$$

Поправка  $\Delta\lambda$  зависит от координат мгновенного полюса  $x_p, y_p$ , отсчитываемых относительно общепринятого Международного условного начала ( $CIO$ ), и определяется по формуле:

$$\Delta\lambda = -(x_p \sin \lambda + y_p \cos \lambda) \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.11)$$

где  $\varphi, \lambda$  — координаты места наблюдений;

$UT2$  — всемирное время среднего гринвичского меридиана, освобожденное от влияния части сезонных периодических вариаций угловой скорости вращения Земли прибавлением к значениям  $UT1$  соответствующей поправки  $\Delta T_s$ :

$$UT2 = UT1 + \Delta T_s = UT0 + \Delta\lambda + \Delta T_s. \quad (3.12)$$

Координаты мгновенного полюса  $x_p, y_p$  публикуются в бюллетене, рассылаемом Международной службой вращения Земли IERS (International Earth Rotation Service). Значения сезонной поправки  $\Delta T_s$  определяют по формуле с переменными коэффициентами.

Система всемирного согласованного (координированного) времени  $UTC$  связана не с суточным (осевым) вращением Земли, а с системой атомного времени  $AT$ .

За единицу времени в системе  $AT$  — за атомную секунду — решением XIII Генеральной конференции мер и весов в 1967 г. принята продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующих резонансной частоте квантового перехода между двумя уровнями ( $F=4, M=0$ ) и ( $F=3, M=0$ ) сверхтонкой структуры основного состояния изотопа цезия с массовым числом 133 при нулевом магнитном поле. Атомная секунда принята как единица времени в Международной системе единиц СИ. Путем осреднения шкал атомного времени, формируемых на основе эталонов частоты ряда учреждений и лабораторий (служб времени) мира. Международное бюро времени (МБВ) — Bureau International de l'Heure (BIH) строит шкалу Международного атомного времени  $TAI$ .

Близость шкал всемирного времени  $UT$  и всемирного координированного времени  $UTC$  достигается изменением показаний часов, функционирующих в системе  $UTC$ , на  $\pm 1$  с для того, чтобы разности  $UT - UTC$  не превосходили  $\pm 0,90$  с. Это изменение осуществляется в зависимости от знака разности либо путем прибавления (положительной) секунды, либо путем пропуска (отрицательной) секунды. Положительная или отрицательная секунда в случае необходимости должна быть последней секундой месяца в системе  $UTC$ , преимущественно 31 декабря и (или) 30 июня, так что положительная секунда начинается в  $23^h59^m60^s$  и кончается в  $0^h0^m0^s$  первых суток следующего месяца, а в случае отрицательной секунды после момента  $23^h59^m58^s$  через одну секунду следует момент  $0^h0^m0^s$  первых суток следующего месяца.

Система всемирного времени  $UT$  составляет основу измерения времени в повседневной жизни, так как с ней связана система всемирного координированного времени  $UTC$ , сигналы которого передаются по радиовещательным сетям. Однако в целях практического удобства на земном шаре введена система поясного времени  $ZT$ , реализованная путем условного разделения земной поверхности на 24 часовых пояса так, что их основные (центральные) меридианы отстоят друг от друга по долготе ровно на  $15^\circ (1^h)$ . В качестве начала системы  $ZT$  выбран меридиан Гринвича, который одновременно является основным меридианом соответствующего часового пояса. Система  $ZT$  связана с системой  $UTC$  соотношением:

$$ZT = UTC + \Delta Z, \quad (3.13)$$

где величина  $\Delta Z$ , называемая поясной поправкой, определяется долготой пояса, в котором расположен данный географический пункт, относительно меридиана Гринвича. Часовой пояс Гринвича обозначается буквой  $Z$  (zero — нуль-пункт). Часовые пояса, идущие на восток от Гринвича, обозначены буквами  $A, B, \dots, M$  (исключая  $J$ ), и поправка  $\Delta Z$  принимает для них значения  $+1^h, +2^h, \dots, +12^h$ . Пояса к западу от Гринвича обозначены буквами  $N, O, \dots, Y$ , и им соответствуют значения  $\Delta Z$  от  $-1^h$  до  $-12^h$ . Часовые пояса  $M$  и  $Y$  разделены линией перемены даты.

В ряде государств существуют также гражданские системы измерения времени (чаще всего это летнее время, встречаются региональное, общегосударственное и другие), определяемые законодательным путем. Так, например, с 16 июня 1930 г. на всех часовых поясах территории СССР было введено декретное время, отличающееся на  $+1^h$  от поясного времени. Кроме того, ежегодно вводится летнее (сезонное) время, которое на  $+1^h$  отличается от декретного времени. Декретное (летнее) время второго часового пояса, в котором расположена Москва, называется московским временем и используется в России на большей части третьего часового пояса.

Поскольку системы глобального позиционирования функционируют в собственном системном времени, то все процессы измерений фиксируются в этой временной шкале. Необходимость взаимной синхронизации бортовых шкал спутников с высокой точностью связана с особенностями способа навигационных измерений — пассивного дальномера (псевдодальномера). Поскольку приемником одновременно выполняются измерения до нескольких спутников, необходимо чтобы временные шкалы используемых спутников были согласованы между собой. Это достигается независимой привязкой каждой из шкал спутников к системному времени.

Системная шкала времени задается сектором управления и контроля, где она поддерживается с точностью более высокой, чем бортовые шкалы спутников. Системное время любой системы глобального позиционирования, которое также является «атомным» временем, может расходиться со всемирным временем. Поправки к системному времени регистрируются с высокой точностью и передаются в виде постоянной величины в навигационном сообщении, а также публикуются в специальных бюллетенях.

Время GPS — GPS Time (GPST) — это время, сходное с TAI. Оно непрерывно и не подвергается как UTC секундным скачкам. Время системы задается цезиевыми стандартами Главной станции управления и контроля GPS — GPS Master Control Station, расположенной в Объединенном космическом центре — Consolidated Space Operations Center (CSOS) Колорадо Спрингс, штат Колорадо США. Время GPS (GPST) было установлено по UTC в 0 часов 6 января 1980 г. С тех пор оно периодически синхронизируется (но не корректируется) с UTC. В ноябре 1985 г. GPST=UTC+4 с. В июне 1993 г. GPST отличалось от UTC на 9 с, в июле 1994 г. — на 10 с, GPST и TAI связаны соотношением  $GPST = TAI - 19$  с.

В системе GPS время передается в форме номера недели и поправки времени для каждой GPS-недели. Номера недель исчисляются от 0 до 1023. Неделя с номером 0 была начата 6 января 1980 г. Неделя с номером 1023 закончилась 21 августа 1999 г. После этого номер недели был переведен на 0 и счет начался с начала. В периоды смены номеров недели в приемниках возможны ошибки из-за неправильного вычисления даты.

Параметры хода часов спутника относительно GPST определяют из обработки результатов наблюдений этого спутника станциями слежения системы. Эти параметры закладывают в память бортового компьютера и транслируют в составе навигационного сообщения. Кроме поправок часов определяют их ход и разности более высокого порядка. В совокупности поправку и эти разности называют параметрами синхронизации часов.

Системное время ГЛОНАСС корректируется одновременно с UTC (SU) — Государственным эталоном частоты и времени Российской Федерации. Их расхождение поддерживается в пределах 1 мкс, поэтому в ГЛОНАСС нет сдвига в целое число секунд, но есть постоянный, обусловленный условиями функционирования по Московскому времени сдвиг на 3 часа. В навигационном сообщении передается поправка для перехода от времени ГЛОНАСС к времени UTC (SU). Пользователь может определить время UTC (SU) со средней квадратической погрешностью в 1 мкс. Существуют технические возможности определения этого времени с точностью 20–30 нс.

В момент коррекции времени нарушается целостность навигационного сообщения ГЛОНАСС, поэтому в модернизированном варианте системы ГЛОНАСС-М предполагается уведомлять пользователей за 8 недель о предстоящей секундной коррекции.

В системе ГЛОНАСС нет проблем со счетом недель — время считается от нуля часов, минут и секунд с 1 января последнего високосного года.

В приемниках пользователей атомные стандарты частоты не устанавливаются из-за их высокой стоимости, поэтому сдвиг шкалы времени в спутниковом приемнике может быть на несколько порядков больше чем на спутнике. Поправку часов приемника относительно системного времени на момент измерений включают наряду с координатами пунктов в число определяемых параметров и получают ее из обработки результатов наблюдений.

### 3.2. Координатные системы, характерные для GPS и ГЛОНАСС

#### 3.2.1. Звездные системы координат

При описании движения спутников используется звездная система координат, которая может быть как сферической, так и декартовой. Применительно к изучению движения небесных тел преимущественное распространение получила сферическая система координат. В связи с тем, что суточный параллакс всех звезд практически равен нулю, начало этих систем можно поместить в любой точке как внутри (в том числе и в центре масс), так и на поверхности Земли, отчего сферические координаты, характеризующие направление на звезду, изменяются несущественно. Координатными поверхностями этих систем являются сфера единичного радиуса ( $R=1$ ); конические поверхности ( $\delta = \text{const}$ ) с вершиной в начале координат и осью, параллельной некоторому положению оси вращения Земли; полуплоскости, ограниченные осью конических поверхностей.

### *Вторая экваториальная система координат*

Если начальная полуплоскость проходит через точку весеннего равноденствия, то система координат не участвует в суточном вращении Земли и в этом смысле неподвижна. Такая система координат обычно используется в практической астрономии и называется второй экваториальной. Направления на звезды в этой системе задаются прямым восхождением  $\alpha$  и склонением  $\delta$  (рис. 3.4).

Исходя из того, к какому положению экватора и к какому равноденствию отнесена система координат, различают:

- мгновенную систему, определяемую мгновенным экватором и истинной точкой весеннего равноденствия;
- среднюю систему на эпоху  $T$ , в которой используются средний экватор и точка весеннего равноденствия на эту эпоху.

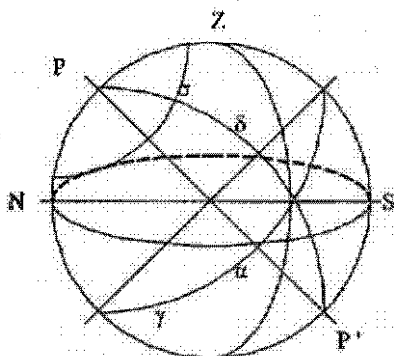


Рис. 3.4. Вторая экваториальная система координат

Система на определенную эпоху  $T_0$  закрепляется координатами звезд в каталоге. Изменение их со временем вызывается только собственным движением звезд. Мгновенная звездная система не является инерциальной. Вследствие того, что на каждый момент она фиксируется в пространстве направлением оси вращения Земли, которое изменяется под влиянием прецессии и нутации, координаты звезд в этой системе непрерывно изменяются (смещение звезд по положению за год может достигать  $20''$ ).

### *Первая экваториальная гринвичская система координат*

При рассмотрении вопросов космической геодезии приходится использовать звездную систему координат, которая отличается от мгновенной тем, что ее начальная полуплоскость не проходит через точку весеннего равноденствия, а располагается параллельно мгновенной плоскости меридиана Гринвича. Такая система участвует в суточном вращении Земли и в этом смысле является вращающейся. Эта система соответствует первой экваториальной гринвичской системе



координат, используемой в астрономии. Направления в этой системе координат задаются гринвичским часовым углом  $t$ , или противоположным ему по знаку углом  $\gamma$ , и склонением  $\delta$  (рис. 3.5).

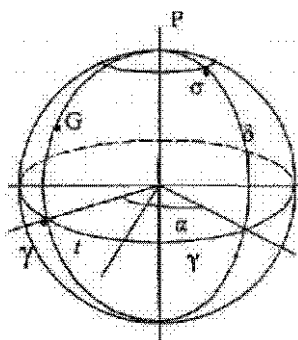


Рис. 3.5. Первая экваториальная гринвичская система координат.

Наряду с экваториальными используется система координат, в которой отсчетными плоскостями являются плоскости горизонта и меридиана пункта. Такая система координат называется горизонтальной. Направление в этой системе определяется зенитным расстоянием  $Z$  и азимутом  $A$ .

Если оси системы направлены так, как это имеет место в первой экваториальной системе координат, т. е. система координат жестко связана с Землей, то вращение Земли не изменяет координат пунктов. Если же координатные оси направлены так же, как во второй экваториальной системе, имеет место непрерывное изменение координат  $x$  и  $y$  вследствие вращения Земли:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos S & -\sin S & 0 \\ \sin S & \cos S & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (3.14)$$

где  $S$  — гринвичское звездное время.

#### *Орбитальная система координат, эфемериды спутника*

Спутники вращаются вокруг Земли по эллиптическим орбитам. Если бы Земля представляла собой однородную сферу, а спутник представлял бы собой материальную точку, на которую не действуют никакие силы кроме притяжения Земли, то в соответствии с законами Кеплера орбита спутника была бы плоским неизменным эллипсом, один из фокусов которого совпадал бы с центром масс Земли. Реальный спутник подвержен воздействию возмущающих ускорений, поэтому форма орбитального эллипса и его ориентация в пространстве меня-

ются со временем. Для точного определения местоположения реального спутника используется орбитальная система координат (рис. 3.6).

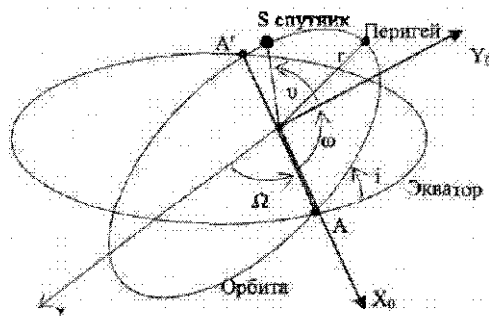


Рис. 3.6. Орбитальная система координат

Начало орбитальной системы координат совпадает с центром масс Земли. Большая полуось  $a$  и малая полуось  $b$  характеризуют ее размеры и форму. Практически для характеристики орбиты используют большую полуось  $a$  и эксцентриситет  $e$ .

Плоскость орбиты пересекается с плоскостью экватора по линии  $AA'$ , которую называют линией узлов. Точка  $A$ , в которой спутник пересекает плоскость экватора, переходя из южного полушария в северное, называется восходящим узлом орбиты. Противоположная ей точка  $A'$  называется нисходящим узлом. Помимо большой полуоси  $a$  и эксцентриситета  $e$  элементами орбиты являются  $\Omega$  — долгота восходящего узла орбиты (отсчитывается в плоскости экватора на восток от направления на точку весеннего равноденствия),  $\omega$  — аргумент перигея (угол в плоскости орбиты между направлениями на восходящий узел и перигей),  $i$  — угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора. Положение спутника на орбите характеризуют истинной аномалией  $u$ . Сумма аргумента перигея и истинной аномалии называется аргументом широты  $u$ . Поскольку движение реального спутника подвержено влиянию возмущающих ускорений, то элементы орбиты должны быть известны в конкретный момент времени. Элементы, характеризующие орбитальное движение спутника на исходную эпоху в совокупности с параметрами, определяющими изменения этих элементов с течением времени, составляют эфемериды спутника. Каждый спутник транслирует свои эфемериды в составе навигационного сообщения.

### 3.2.2. Геодезические системы координат и их преобразования

В геодезической системе координат положение точки определяется высотой  $H$  над принятым референц-эллипсоидом, широтой  $B$  и долготой  $L$ .

Геодезическая широта определяется как угол, образованный нормалью к поверхности эллипсоида с плоскостью его экватора. Геодезическая долгота — это двугранный угол между плоскостями начального меридиана и меридиана данной точки.

Такая эллипсоидальная система координат применяется при обработке наземных геодезических измерений. В космической геодезии при создании спутниковых геодезических сетей, которые являются пространственными и физически не связаны с какой-либо отсчетной поверхностью, более удобна система пространственных прямоугольных координат  $X, Y, Z$ . Преобразование эллипсоидальных геодезических координат в прямоугольные осуществляется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L; \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L; \\ Z &= \left(\frac{b^2}{a^2} N + H\right) \sin B, \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

где  $N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}}$ ;  $a$  и  $b$  — соответственно большая и малая полуоси референц-эллипсоида (см. рис. 3.2).

Зависимость между геодезической широтой  $B$  и геоцентрической широтой  $\phi$  определяется формулой:

$$\operatorname{tg} \phi = (1 - e^2) \operatorname{tg} B.$$

Переход от  $X, Y$  и  $H$  к  $B, L$  и  $H$  неизбежно связан с итерациями при вычислении широты  $B$  и высоты  $H$ . Удобные для вычисления на ЭВМ формулы можно получить из выражения (3.15):

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} L &= \frac{Y}{X}; \\ \operatorname{tg} B &= \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} + \frac{Ne^2}{N + H} \operatorname{tg} B = c + d \operatorname{tg} B, \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Формулы (3.16) позволяют организовать цикл приближений. Для первого приближения принимается

$$\operatorname{tg} B = c.$$

Для второго и последующих приближений по значению  $B$  из предыдущего приближения вычисляют значения

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \sec B - N;$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}},$$

после чего повторяют вычисления по формуле (3.16). Процесс приближений заканчивается при пренебрежимо малом расхождении  $\Delta B$  из двух последних приближений. Практически для достижения расхождения  $\Delta B = 0.03''$  во всех случаях достаточно трех приближений.

И эллипсоидальная, и пространственная прямоугольная системы координат являются геодезическими по определению, несмотря на различия между ними.

При обработке континентальных и региональных геодезических сетей используются различные геодезические координатные системы. Сведения о некоторых геодезических системах приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Референц-эллипсоид	Год вычисления	Большая полуось $a$ , м	Сжатие $\alpha$	Страны, использующие референц-эллипсоид
Бесселя	1841	6 377 397	1:299,2	Европы, Азии
Эйри	1849	6 377 563	1:299,3	Великобритания, Ирландия
Дедамбра	1810	6 376 428	1:311,5	Бельгия
Датский	—	6 377 104	1:300,0	Дания, Исландия
Плессиса	—	6 376 523	1:308,6	Франция
Струве	—	6 378 298	1:294,7	Испания
Хейфорда	1909	6 378 388	1:297,0	Европы, Азии, Южной Америки, Антарктида
Эвереста	1830	6 377 276	1:300,8	Индия, Пакистан, Непал, Шри Ланка
Кларка	1858	6 378 293	1:294,3	Австралия, Ирландия
Кларка	1866	6 378 206	1:295,0	Северной и Центральной Америки
Кларка	1880	6 378 249	1:293,5	Африки, Барбадос, Ямайка, Израиль, Иордания, Иран
Красовского (СК-42)	1940	6 378 245	1:293,8	Страны Восточной Европы и Средней Азии, Антарктида
Австралийский GR 80	1984	6 378 160	1:298,2	Австралия, Папуа-Новая Гвинея
	1980	—	—	США

Продолжение табл. 3.1

Референц-эллипсоид	Год вычисления	Большая полуось $a$ , м	Сжатие $\alpha$	Страны, использующие референц-эллипсоид
WGS-72	1972	6 378 135	1:298,3	США
WGS-84	1984	6 378 137	1:298,3	США
ПЗ-90	1990	6 378 136	1:298,3	СНГ

Каждая из референционных систем имеет свой исходный пункт, на котором осуществлено «внешнее» ориентирование «своего» референц-эллипсоида. Сведения о исходных пунктах основных эллипсоидов приведены в табл. 3.2 [6, 74].

Таблица 3.2

Страна	Эллипсоид, начальный пункт	Широта	Долгота
Австралия	Австралийский, Джонстон Оригон	-25°56'54,6"	+133°12'30,1"
Алжир, Тунис	Кларка 1880, Карфаген	+36°51'06,5"	+10°19'20,6"
Великобритания	Эйри, Гринвич	+51°28'39,7"	0°00'00,0"
Египет	Хейфорда, Гельмерга, Транзит-оф-Винес	+30°01'42,9"	+31°16'37,0"
Индия, Бирма, Пакистан	Эвереста, Калианпур	+24°07'11,3"	+77°39'17,6"
Италия	Хейфорда, Рим, Монте-Марио	+41°55'25,5"	+12°27'08,4"
Канада, США, Мексика	Кларка 1866, Мидс-Рэнч, штат Канзас	+39°13'26,7"	-98°32'30,5"
КНР	Бесселя, Нанкин	+32°03'26,4"	+118°46'56,0"
Польша	Бесселя, Борова Гура	+52°28'32,8"	+21°02'12,1"
Бывший СССР	Красовского, Пулково	+59°46'18,5"	+30°19'38,6"
Франция	Кларка 1880, Париж	+48°50'46,5"	+2°20'48,6"
Чехословакия, Югославия, Австрия	Бесселя, Германскогль	+48°16'15,3"	+16°17'56,0"
Швеция	Бесселя, Стокгольм	+59°20'32,7"	+18°03'29,6"
Страны Европы	Хейфорда, Потсдам	+52°22'51,4"	+13°03'58,9"

При таком ориентировании совмещается отвесная линия на исходном пункте с нормалью к референц-эллипсоиду, а плоскость мери-

диана исходного пункта устанавливается параллельно оси вращения Земли по астрономическому азимуту. При этом отвесную линию и азимут на исходном пункте определяют по астрономическим наблюдениям. Неучет уклонений отвесных линий на исходном пункте, так же как и отличие формы и размеров принятого референц-эллипсоида от общеземного, приводит к сдвигу начала системы координат (центра референц-эллипсоида) относительно центра масс Земли, не нарушая параллельности малой оси референц-эллипсоида с осью вращения Земли [6]. Поэтому для каждого исходного пункта будет своя геодезическая система координат. Если на исходном пункте азимут был определен с ошибкой  $dA$  и имеются уклонения отвеса, отличные от нуля

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_s - B \\ (\lambda_s - L) \cos \varphi \\ H_s - H \end{pmatrix}, \quad (3.17)$$

то будет иметь место не только сдвиг начала системы координат на  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ , но и перекося координатных осей. Направляющие косинусы новых осей относительно старых в этом случае имеют вид [6]:

$$\begin{pmatrix} 1 & (dA \sin B - \eta \cos B) & - (dA \cos B \sin L + \xi \cos L + \eta \sin B \sin L) \\ - (dA \sin B - \eta \cos B) & 1 & - \xi \sin L + (dA \cos B \sin L - \eta \sin B \cos L) \\ (dA \cos B \sin L + \xi \cos L + \eta \sin B \sin L) & - (dA \cos B \sin L - \xi \cos L + \eta \sin B \cos L) & 1 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

#### *Общеземная система координат*

Как и всякая другая геодезическая система, общеземная система координат определяется параметрами земного эллипсоида, гравитационным полем Земли и координатами пунктов на физической поверхности Земли. Начало системы координат располагается в центре масс Земли. Направления ее осей были зафиксированы на XIV Генеральной ассамблее Международной ассоциации геодезии (МАГ) в 1967 г. [18, 48]. Малая ось общего земного эллипсоида совмещена со средней осью вращения Земли. Пространственное направление средней оси вращения Земли закреплено относительно звезд координатами среднего полюса на среднюю эпоху 1900 — 1905 гг. — Международное условное начало (МУН) — Conventional International Origin (CIO). После введения поправок за нутацию эта точка в соответствии с рекомендациями Международной службы вращения Земли IERS (International Earth Rotation Service) известна как условный земной по-

люс СТР (Conventional Terrestrial Pole). Его перемещение относительно мгновенного полюса вначале определялось Международной службой полюса по наблюдениям на шести широтных станциях, расположенных на разных долготах примерно на параллели 39° северной широты. Координаты широтных станций приведены в табл. 3.3 [7].

Таблица 3.3

Страна	Название станции	Широта	Долгота
Сардиния	Карлсфорте	+39°08'08,9"	+08°18'43,5"
Узбекистан	Китаб	+39°08'01,7"	+66°52'55,5"
Япония	Мудзусава	+39°08'03,4"	+141°07'51,9"
США	Юкайа	+39°08'12,0"	-125°12'34,5"
США	Цинциннати	+39°08'19,8"	-84°25'21,0"
США	Гейтерсберг	+39°08'13,2"	-77°11'57,0"

В настоящее время положение полюса относительно МУН (координаты  $x_p$ ,  $y_p$ ) определяют с ошибкой в несколько сантиметров из регулярных наблюдений выполняемых методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) — Very Long Baseline Interferometry (VLBI).

Плоскость начального меридиана устанавливается определением начала отсчета долгот как результат обработки долготных наблюдений национальных служб времени, сотрудничающих в рамках Международного бюро времени (МБВ) — Bureau International de l'Heure (BIH). Начало отсчета долгот задается принятыми долготами национальных служб после учета поправок за движение полюса и соответствует точке на среднем экваторе в период 1900-1905 гг. вблизи Гринвичского меридиана [18, 69].

По форме общеземная система координат может быть эллиптической ( $B$ ,  $L$ ,  $H$ ) и пространственной прямоугольной ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). Переход между ними осуществляется по формулам (3.15) и (3.16). В космической геодезии более удобно использовать пространственную прямоугольную систему.

Составной частью общеземной системы координат являются координаты пунктов, закрепленных на физической поверхности Земли и объединенных в геодезические сети. Различия общеземных координатных систем связаны с особенностями построения и обработки геодезических сетей.

Наиболее известной из современных является общеземная геоцентрическая координатная система ITRS (IERS Terrestrial Reference System), которая поддерживается Международной службой вращения

Земли IERS. Ежегодно, начиная с 1989 г., новейшими методами космической геодезии и измерениями с использованием спутниковых приемников формируется сеть пунктов ITRF (IERS Terrestrial Reference Frame). Сеть ITRF с высокой точностью закрепляет начало координат в центре масс Земли и ориентирует координатные оси. Точность положения пунктов оценивается погрешностью до 10 см. Со временем геоцентрические координаты пунктов сети ITRF вследствие непрерывного совершенствования сети и геодинамических процессов изменяются. Поэтому каталоги координат обновляют и указывают их эпоху, например, ITRF-89, ITRF-94 и т.д. Сеть 1994 г. содержала около 150 пунктов, расположенных на всех материках и на островах всех океанов.

#### *Топоцентрическая система координат*

Иногда наряду с геоцентрической геодезической системой координат удобно использовать топоцентрическую систему. В этой системе (рис. 3.7) определяется взаимное положение пунктов. Прямоугольные координаты  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  в этой системе будут равны разности геоцентрических координат пункта и начала координат топоцентрической системы:

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

Сферические координаты в топоцентрической системе могут быть определены длиной стороны  $D_{12}$  и углами  $\Lambda$  и  $\Phi$  аналогичными углам  $\gamma$  и  $\delta$  в звездной системе координат. Если за основную плоскость  $XOY$  принята плоскость, параллельная экватору, то в этой плоскости угол  $\Lambda_{12}$  отсчитывается от меридиана Гринвича до проекции линии  $i_{12}$ , а угол  $\Phi_{12}$  характеризует наклон линии  $i_{12}$  к экватору. Углы  $\Lambda$  и  $\Phi$  в экваториальной топоцентрической системе иногда называют ориентирующими углами хорды  $D_{12}$ .

Из рис. 3.7 очевидно:

$$\left. \begin{aligned} \Lambda &= \arctg \frac{\Delta Y}{\Delta X}; \\ \Phi &= \arctg \frac{\Delta Z}{\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}}; \\ D &= \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Обратный переход выполняется по формулам:

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} \cos \Phi \cos \Lambda \\ \cos \Phi \sin \Lambda \\ \sin \Phi \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

Если же за основную плоскость взять плоскость горизонта пункта  $P_0$ , то сферические координаты будут определены углом  $h$  наклона



линии  $I_{1/2}$  к плоскости горизонта (дополнением до  $90^\circ$  зенитного расстояния  $z$ ) и азимутом  $A$ , отсчитанным в плоскости горизонта от направления на север до проекции линии  $I_{1/2}$ . Переход от углов  $A$  и  $h$  к углам  $A$  и  $\Phi$  осуществляется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} A &= \frac{\sin A}{\operatorname{th} \cos B + \sin B \cos A} \\ \sin \Phi &= \sin B \sin h - \cos B \cosh \cos A \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

где  $B$  — широта пункта  $i$ ,

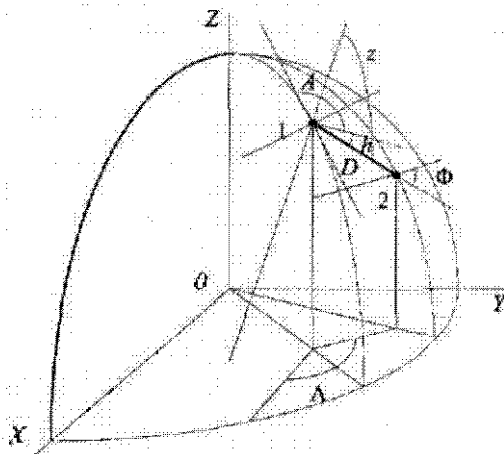


Рис. 3.7. Топоцентрическая система координат

В топоцентрической горизонтальной системе, ось  $Z$  которой направлена по нормали к эллипсоиду, длина и направление хорды (азимут и зенитное расстояние) могут быть выражены через геодезические координаты пунктов — концов хорды [39]:

$$D_{12}^2 = (N + H)_{12}^2 + (N + H)_{11}^2 - 2(N + H)_{11}(N + H)_{12} \cos \psi - \\ - \mu(N_2 \sin B_2 - N_1 \sin B_1)^2 - 2e^2(N_1 \sin B_1 - N_2 \sin B_2) \times \\ \times (H_2 \sin B_2 - H_1 \sin B_1),$$

the  $\cos \psi = \sin B_1 \sin B_2 + \cos B_1 \cos B_2 \cos(L_2 - L_1)$ ;

$$\mu = \frac{a^4 - b^4}{a^4}$$

$$\operatorname{ctg} A_{12} = \operatorname{ctg} a_{12} - e \frac{(N_2 \sin B_2 - N_1 \sin B_1) \cos B_1}{(N + H) \cos B_1 \sin(L_2 - L_1)},$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{ctg} A_{12} &= \frac{\sin B_2 \cos B_1 - \cos B_2 \sin B_1 \cos(L_2 - L_1)}{\cos B_2 \sin(L_2 - L_1)} \\ \cos Z_{12} &= \frac{1}{D_{12}} [(N+H)_1 \cos \psi - (N+H)_2 - \\ &- e^2 (N_2 \sin B_2 - N_1 \sin B_1) \sin B_1] \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Для значений азимута  $A_{21}$  и зенитного расстояния  $z_{21}$  в пункте 2 в формулах (3.23) следует поменять индексы 1 и 2.

Связь азимута и зенитного расстояния хорды с экваториальными топоцентрическими координатами может быть представлена следующими выражениями [31]:

— для прямоугольных координат

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{ctg} A_{12} &= \frac{\Delta Z \cos B_1 - (\Delta X \cos L_1 + \Delta Y \sin L_1) \sin B_1}{\Delta Y \cos L_1 + \Delta X \sin L_1} \\ \cos Z_{12} &= \frac{\cos B_1 \cos L_1 + \cos B_1 \sin L_1 + \sin B_1}{D_{12}} \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

— для полярных координат

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} A_{12} &= \\ &= \frac{\sin \Phi_{12} \cos B_1 - (\cos A_{12} \cos L_1 + \sin A_{12} \sin L_1) \cos \Phi_{12} \sin B_1}{\cos \Phi_{12} (\cos A_{12} \cos L_1 + \sin A_{12} \sin L_1)} \end{aligned}$$

Обратное соотношение будет:

$$\left( \begin{array}{c} \cos \Phi \cos A \\ \cos \Phi \sin A \\ \sin \Phi \end{array} \right)_{12} = \left( \begin{array}{c} \cos L_1 (\cos B_1 \cos Z_{12} - \sin B_1 \sin Z_{12} \cos A_{12}) - \\ - \sin L_1 \sin Z_{12} \sin A_{12} \\ \sin L_1 (\cos B_1 \cos Z_{12} - \sin B_1 \sin Z_{12} \cos A_{12}) + \\ + \cos L_1 \sin Z_{12} \sin A_{12} \\ \sin B_1 \cos Z_{12} + \cos B_1 \sin Z_{12} \cos A_{12} \end{array} \right) \quad (3.25)$$

### 3.2.3. Переход к общеземной системе координат

Построение космических геодезических сетей позволяет установить и контролировать единую общеземную систему координат, начало которой определяется центром масс Земли, а ориентация осей — принятыми системами единого времени и полюса. Масштаб единой сети задается принятым значением скорости света с посредством ли-

нейных измерений. Следует отметить, что последнее определение значения скорости света в вакууме выполнено с относительной ошибкой  $10^{-9}$ , реальная скорость электромагнитных волн с учетом факторов, влияющих на скорость распространения сигнала может быть определена с относительной ошибкой  $10^{-7}$ . Вопрос о приведении всех геодезических систем в единую общеземную с началом координат в центре масс Земли до недавнего времени рассматривался более в теоретической, чем в практической постановке. Это объясняется трудностями выполнения на земной поверхности (особенно поверхности океана) необходимых достаточно точных и обширных гравиметрических и геодезических измерений. Геодезическое использование спутников в сочетании с методами гравиметрии позволяет уже в настоящее время определить общую земную систему координат. Все системы координат  $X_i$ , в которых построены региональные геодезические сети, могут быть переведены в единую геодезическую систему координат  $X$  путем переноса начала региональной системы координат на вектор:

$$\overline{\Delta X} = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T \quad (3.26)$$

и поворота координатных осей, задаваемого матрицей:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & -\omega_x & \omega_y \\ \omega_x & 1 & -\omega_z \\ -\omega_y & \omega_z & 1 \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

Малые углы  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  связаны с углами Эйлера  $\alpha, \beta, \gamma$  соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \omega_x &= \sin(\alpha + \beta); \\ \omega_y &= \gamma \sin \alpha; \\ \omega_z &= \gamma \cos \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

Обратный переход задается выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \arctg \frac{\omega_y}{\omega_z}; \\ \beta &= \omega_x - \alpha; \\ \gamma &= \arcsin \sqrt{\omega_x^2 + \omega_z^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

Углы Эйлера позволяют определить долготный ( $\delta L$ ) и широтный ( $\delta B$ ) развороты каждой региональной сети:

$$\left. \begin{aligned} \delta L &= \alpha + \beta; \\ \delta B &= \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

Масштабное преобразование представляет собой линейное изменение региональной сети по отношению к общеземной системе на некоторый коэффициент  $\chi$ . Таким образом, общее преобразование координат пунктов из региональных геодезических систем в общеземную определяется выражением:

$$\bar{X} = \bar{X}_i + \overline{\Delta X} + \chi R \bar{X}_i \quad (3.31)$$

Если для каждой геодезической системы установлено преобразование такого рода, то по разностям параметров преобразований можно определить взаимное смещение их начал и тем самым полностью решить задачу о связи геодезических систем координат. Координаты центров основных референц-эллипсоидов приведены в табл. 3.4 [48]:

Таблица 3.4

Геодезическая система, референц-эллипсоид	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
Европейская, Хейфорда	-83	-111	-126
Токийская, Бесселя	-143	+514	+675
Австралийская, Австралийский	-123	-43	+137
Индийская, Эвереста	+293	+699	+229
Африканская, Кларка 1880	-128	-146	-348
NAD 27 Североамериканская, Кларка 1866	-21	+158	+176
Южноамериканская, Хейфорда	-78	+2	-43
СК-42, Красовского	+24	-127	-78

В некоторых случаях, учитывая малость возможных углов разворотов геодезических систем, ими можно пренебрегать, за исключением отдельных специально оговоренных случаев.

В работе [1] приведены параметры связи общеземной системы и референционной, полученные из уравнивания государственной геодезической сети ГГС, включающего совместное уравнивание пунктов астрономо-геодезической сети 1 и 2 классов (АГС), космической (КГС) и доплеровской (ДГС) геодезических сетей, и предложены параметры новой референционной системы, отвечающей условиям параллельности осей и равенства расстояний в референционной системе относительно общеземной, а также условию неизменности координат начального пункта Пулково. Указанные параметры приведены в табл. 3.5

Таблица 3.5

Название параметров	Параметры преобразования	
	из уравнивания	предлагаемые
$\Delta X$ , м	-22,736	-25,90
$\Delta Y$ , м	+128,884	-130,94
$\Delta Z$ , м	+83,807	+81,76
$M \cdot 10^{-7}$	-4,24	0
$\omega'_x$	-0,108"	0"
$\omega'_y$	-0,073"	0"
$\omega'_z$	-0,019"	0"

### 3.2.4. Геоцентрическая координатная система ПЗ-90

Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля за № 568 «Об установлении единых государственных систем координат» установлены следующие единые государственные системы координат:

система геодезических координат 1995 года (СК-95) для использования при осуществлении геодезических и картографических работ с 1 июля 2002 года;

геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90) — для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач.

#### *Система координат 1942 года (СК-42)*

Система координат 1942 года была создана в Советском Союзе с участием известных ученых Ф. Н. Красовского, М. С. Молоденского, А. А. Изотова. СК-42 была введена постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г. № 760 и применялась на территории страны почти 60 лет. Она опиралась на астрономо-геодезическую, гравиметрическую и нивелирную сети страны. С использованием их получены параметры референц-эллипсоида Красовского, высоты геоида над ним. Средние квадратические ошибки положения любого пункта относительно начального — Пулково ( $B = +59^{\circ}46'18,5''$ ;  $L = +30^{\circ}19'38,6''$ ) характеризуются величинами от единиц метров на западе страны до 15 м на востоке.

СК-42 на момент ее введения в качестве государственной в 1946 г. была реализована на территории страны системой уравнившихся 87 полигонов триангуляции 1 класса. Эти 87 полигонов покрывали территорию европейской части страны и далее на восток распространялись в виде узкой цепочки полигонов по территории Средней Азии и юга Сибири.

В дальнейшем, по мере развития сетей триангуляции и полигонометрии Государственная геодезическая сеть (ГГС) уравнивалась отдельными блоками. На границе блоков результаты предыдущего уравнивания принимались за абсолютно точные. По этой же схеме уравнивались участки сплошной сети триангуляции 2 класса, которые вставлялись в «жесткий каркас» полигонов 1 класса. Таким образом, система координат 1942 года от первоначальной ее реализации 87-ю полигонами на территории нашей страны распространялась в виде системы нанизанных друг на друга отдельно уравнившихся блоков. Такой путь развития системы координат СК-42 был экономически оправдан и технически единственно возможным в то время.

### *Система координат 1995 года (СК-95)*

Только к началу 80-х годов, к моменту завершения работ по развитию геодезической сети на всей территории страны, стало возможным решение задачи уравнивания всей ГГС как единого геодезического построения. Следует отметить, что только к этому времени Геодезическая служба страны имела на вооружении вычислительную технику, с помощью которой это стало возможным. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР (ныне Роскартография) совместно с Военно-топографическим управлением Генерального штаба (ВТУ) в 1981 г. приступили к подготовке уравнивания ГГС. Задача уравнивания всей ГГС как единого геодезического построения была решена в 1991 г. общим уравниванием Астрономо-геодезической сети (АГС) в количестве более 164 тыс. пунктов [36]. Результаты этого уравнивания подтвердили наличие значительных деформаций ГГС в системе координат 1942 года. Общие региональные деформации на севере и востоке страны достигали 20-30 м. Локальные же деформации на границе блоков, а так же рядов 1 класса и сплошных сетей 2 класса по исследованиям ЦНИИГАиК в отдельных случаях достигали 10 и более метров.

Поэтому для повышения достоверности результатов общего уравнивания АГС 1991 г. и повышения точности взаимного положения пунктов ГГС на больших расстояниях было принято решение об уравнивании АГС совместно с имеющимися на тот момент высокоточными спутниковыми данными. Такими данными в то время на территории бывшего СССР были 26 пунктов Космической геодезической сети (КГС) ВТУ (являющихся основой геоцентрической системы координат ПЗ-90) и 134 пункта специально созданной Роскартографией к 1995 г. для этой цели Доплеровской геодезической сети (ДГС). Именно результаты этого уравнивания 1995 г. легли в основу системы геодезических координат 1995 года (СК-95) [18, 72].

Координаты пунктов ГГС в системе координат СК-95 имеют одинаковую точность для всей сети. Точность взаимного положения смежных пунктов АГС составляет 3-5 см, средняя квадратическая ошибка взаимного положения пунктов АГС, удаленных на 200-300 км, составляет 20-30 см, а для 500 км и более — 0,5-0,8 м.

По результатам совместного уравнивания 1995 г. и заключительного уравнивания 1996 г. система координат СК-95 была реализована координатами 164 тыс. пунктов. В 2001-2002 гг. в аэрогеодезических предприятиях Роскартографии выполнены работы по переводу в систему координат СК-95 порядка 150 тыс. пунктов ГГС 3 и 4 классов и формированию каталогов координат пунктов ГГС.

Таким образом, с 1 июля 2002 г. электронные каталоги координат в системе СК-95 содержат порядка 300 тыс. пунктов ГГС при среднем расстоянии между пунктами 3–5 км.

#### *Система координат ПЗ-90*

По определению система координат ПЗ-90 является геоцентрической прямоугольной пространственной системой с началом в центре масс Земли. Ось  $Z$  направлена к условному земному полюсу, как определено рекомендациями Международной службы вращения Земли (IERS), а ось  $X$  — в точку пересечения плоскости экватора и нулевого меридиана, установленного Международным бюро времени (Bureau International l'Heure), ось  $Y$  дополняет систему до правой. Реализация системы координат ПЗ-90 осуществляется через координаты пунктов Космической геодезической сети (КГС). Пункты наземного комплекса управления (НКУ) навигационной системой ГЛОНАСС совмещены с пунктами КГС.

Как и аналогичные системы США, мировая геодезическая система (реализованная в виде параметров ПЗ-90 и КГС) и навигационная система ГЛОНАСС начали создаваться Министерством обороны РФ по Государственному оборонному заказу в 70-х годах и были засекречены. В 1995 г. Российская Федерация объявила о предоставлении системы ГЛОНАСС для гражданского использования, а геодезическая система ПЗ-90 была объявлена как геодезическая основа системы ГЛОНАСС. В 1998 г. Министерством обороны РФ (Военно-космическими силами и Военно-топографическим управлением) был опубликован сборник параметров Земли ПЗ-90 [72], содержащий схему Космической геодезической сети (26 пунктов на территории стран СНГ и 7 пунктов в Антарктиде). Указанные 26 пунктов КГС в 1996 г. были включены Роскартографией в совместное уравнивание пунктов астрономо-геодезической сети (АГС) и Доплеровской геодезической сети (ДГС) Российской Федерации и составили основу новой системы координат СК-95. В начале 1999 г. в Российской Федерации были приняты государственные решения об обязательном использовании системы ГЛОНАСС на территории Российской Федерации и о придании системе ГЛОНАСС статуса системы двойного назначения [19, 72].

Принятие вышеуказанных государственных решений направлено прежде всего на обеспечение сохранения системы ГЛОНАСС, орбитальная группировка которой из-за отсутствия необходимого финансирования в последние годы находится в неполном составе.

С помощью отечественных геодезических спутников Гео-ИК последовательно в 1977, 1985, 1990 годах [4, 18, 49] определялись геодезические параметры Земли (ПЗ), которые включают:

— основные астрономические и геодезические постоянные;

— характеристики координатной основы для земной системы координат, в том числе параметры земного эллипсоида, координаты пунктов космической геодезической сети (КГС), закрепляющие земную систему координат, элементы связи референцных систем с общеземной системой координат;

— планетарные модели нормальных и аномальных гравитационных полей Земли, локальные характеристики гравитационного поля (высоты геоида и аномалии силы тяжести).

Параметры Земли 1990 г. (ПЗ-90) получены с помощью спутника Гео-ИК, оснащенного радиовысотомером с ошибкой определения высоты над морской поверхностью менее 1 м, доплеровским передатчиком, обеспечивающим измерение на пунктах радиальной скорости с ошибкой 1 см/с, угловыми отражателями, запросной радиодальномерной системой с ошибкой измерения расстояний от пункта до спутника 1–2 м, системой импульсной световой сигнализации, обеспечивающей измерение направления с пункта на спутник с ошибкой 1" [18, 44].

При выводе ПЗ-90 использовались следующие фундаментальные постоянные:

$c = 299\,792\,458$  м/с — скорость света;

$\mu = 39\,860\,044 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/с<sup>2</sup> — геоцентрическая гравитационная постоянная;

$\omega = 7\,292\,115 \cdot 10^{-11}$  рад/с — угловая скорость вращения Земли.

Геоцентрическая система координат ПЗ-90 создана без интеграции с зарубежными геодезическими сетями. Она закреплена координатами 33 опорных пунктов на территории стран СНГ и Антарктиды, полученными динамическим методом спутниковой геодезии. Координаты опорных пунктов (широта, долгота, высота) получены непосредственно по наблюдениям спутника Гео-ИК с точностью 1–2 м.

Основные параметры общеземного эллипсоида, полученные по 30 млн спутниковых измерений на суше и в мировом океане имеют следующие значения:

$a = 6\,378\,136$  м — большая полуось земного эллипсоида;

$f = 298,257\,839\,303$  — знаменатель сжатия земного эллипсоида;

$U_0 = 62\,636\,861,074$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> — нормальный потенциал Земли;

$C_{20} = -484\,164,953 \cdot 10^{-9}$  — второй гармонический коэффициент.

Нужно отметить, что референц-эллипсоид Красовского и система координат 1942 года устанавливались в основном по наземной измерительной информации, собранной на территории СССР. Для того времени точность приближения к общеземной системе координат можно признать хорошей. Это подтверждают и полученные связи двух систем координат: системы 1942 года и системы координат ПЗ-90. Они выражаются в координатах центра референц-эллипсоида



да Красовского относительно общеземного эллипсоида ( $\Delta X = 25$  м,  $\Delta Y = -141$  м,  $\Delta Z = -80$  м), развороте осей одного эллипсоида относительно другого ( $\omega_X = 0''$ ;  $\omega_Y = 0,35''$ ;  $\omega_Z = 0,66''$ ) и изменении масштаба ( $\Delta m = 0$ ).

#### *Перспективы развития систем координат*

Учитывая постоянно возрастающие требования к точности и оперативности методов координатных определений, в Роскартографии разработаны Концепция и Программа перевода системы геодезического обеспечения на современные спутниковые технологии на основе ГЛОНАСС/GPS-измерений. Эта Программа вошла в качестве подпрограммы в Федеральную целевую программу «Глобальная навигационная система», утвержденную постановлением Правительства Российской Федерации в 2001 году, в которой наряду с Росавиакосмосом, Минобороны России, Минтрансом России и РАСУ государственным заказчиком является Роскартография. Основываясь на принципах, принятых в Программе и проекте Основных положений о ГГС, разработанных в Роскартографии при участии специалистов ВТУ, МИИГАиКа и Российской Академии наук, Роскартография приступила к созданию геодезической сети нового поколения и качественно нового уровня точности. К настоящему времени такая сеть уже создана на территории европейской части России и идут работы по ее дальнейшему развитию для территории Дальнего Востока и юга Сибири. Схема созданной сети приведена в разделе 7. Следует отметить, что в процессе создания такой же сети для своей территории одновременно принимали участие и белорусские геодезисты.

Всего на территории европейской части России построена сеть в количестве 72 пунктов Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) и Высокоточной геодезической сети (ВГС). Каждый пункт ФАГС и ВГС представляет собой систему из пяти пунктов: 2 пункта существующей сети АГС, 2 пункта Главной высотной основы (ГВО), т.е. пункты нивелирования I или II класса, и рабочий центр для ГЛОНАСС/GPS-наблюдений, снабженный устройством принудительного центрирования. Связь с пунктами мировой сети для целей геодинамики обеспечивает надежную связь системы координат СК-95 с общемировой геоцентрической системой координат и дает возможность дальнейшей модернизации системы координат СК-95. Связь спутниковой сети с Главной высотной основой обеспечивает в перспективе эффективное применение оперативных спутниковых методов в развитии системы высотного обеспечения и дальнейшем уточнении системы нормальных высот. Создание специальных рабочих центров, располагаемых в легкодоступных для автомобильного

транспорта местах, обеспечивает эффективное дальнейшее использование этих пунктов всеми министерствами и ведомствами, выполняющими геодезические работы.

### 3.2.5. Геоцентрическая координатная система WGS-84

Система координат NAD 27 была создана в США в 1927 г. с использованием данных астрономо-геодезических, гравиметрических и нивелирных сетей Северной и Центральной Америки. Система основана на эллипсоиде Кларка 1866 с параметрами  $a = 6\,378\,206$  м;  $f = -1:295,0$ . Начальный пункт расположен в Мидс-Рэнч, штат Канзас ( $B = +39^\circ 13' 26,7''$ ;  $L = -98^\circ 32' 30,5''$ ). Эта координатная основа прослужила почти 60 лет и в 1983 г. была заменена на систему координат NAD 83. Геоцентрическая координатная система WGS-84 получена первоначально только с помощью спутников, без связи с данными сверхдлинобазисной интерферометрии, и представлена на земной поверхности в виде однородной глобальной сети с точностью координат пунктов 1–2 м. Система координат неоднократно уточнялась и с 1994 г. используется версия WGS-84 (G730), отличающаяся глобальной согласованностью порядка 10 см [75, 82].

При определении параметров общеземной системы координат WGS-84 использовались те же фундаментальные постоянные:

- скорость света;
- геоцентрическая гравитационная постоянная;
- угловая скорость вращения Земли.

Основные параметры общеземного эллипсоида WGS-84, полученные по спутниковым измерениям на суше и в мировом океане, имеют следующие значения:

- $a = 6\,378\,137$  м – большая полуось земного эллипсоида;
- $f = 298,257\,223\,563$  – знаменатель сжатия земного эллипсоида.

Помимо глобальной системы координат WGS-84, существуют региональные и национальные геоцентрические системы координат. Наиболее известной из них является европейская, закрепленная на земной поверхности сетью EUREF.

### 3.3. Методы преобразования координатных систем для спутниковой GPS-технологии и параметры перехода

Различают два типа преобразования координат при переходе из одной системы в другую:

- преобразование пространственных прямоугольных или эллипсоидальных координат одной координатной системы в другую коор-

динатную систему того же типа с использованием точно определенных параметров перехода;

— преобразование одной координатной системы в другую координатную систему того же типа с использованием пунктов, координаты которых известны в двух системах.

При этом различают трехмерные, двухмерные и одномерные методы преобразования (трансформирования).

Преобразование пространственных прямоугольных или эллипсоидальных координат одной координатной системы в другую координатную систему того же типа по достаточно строгим формулам с использованием точно определенных параметров перехода является достаточно простой задачей для трехмерных координатных систем ПЗ-90 и СК-42 и связанных с ними двухмерных топоцентрических систем (Государственная система координат, местные системы координат), а также для трехмерных систем WGS-72 и WGS-84 и связанных с ними двухмерных топоцентрических систем (NAD-87 и других). Предварительные параметры связи некоторых координатных систем приведены в табл. 3.6 [44].

Таблица 3.6

Предварительные параметры преобразования	Системы координат			
	СК-42 ПЗ-90	WGS-72 WGS-84	СК-42* WGS-84	ПЗ-90* WGS-84
$\Delta X, \text{ м}$	+25	0	+25	0
$\Delta Y, \text{ м}$	-141	0	-141	0
$\Delta Z, \text{ м}$	-80	+4,5	-78,5	+1,5
$m \cdot 10^{-6}$	0	+0,227	0	0
$\omega_x$	0"	0"	0"	0"
$\omega_y$	-0,35"	0"	-0,35"	0"
$\omega_z$	-0,66"	-0,554"	-0,736"	-0,076"

\* данные приближенные

Следует отметить, что до недавнего времени окончательных значений параметров связи систем координат ПЗ-90 и WGS-84 не существовало. В работах [21, 72] приведены по-прежнему приближенные значения (см. табл. 3.6). Причиной этого является то, что параметры каждой системы координат постоянно уточняются. В настоящее время система координат ПЗ-90 имеет разворот относительно системы WGS-84 вокруг оси  $Z$  на величину порядка 0,2", что соответствует сдвигу в долготном направлении на территории России на 3-6 м. Такой разворот значительно превышает декларируемую точность систем ко-

ординат ПЗ-90 и WGS-84. Выходом из создавшегося положения может быть принятие единой геоцентрической системы координат для существующих и перспективных международных и национальных спутниковых систем позиционирования. В качестве такой системы может быть рассмотрена некоторая усредненная реализация ITRF. Во всем мире для наиболее точных задач, например для задач геодинамики, уже используется система, реализованная в ITRF, создаваемой и поддерживаемой Международной службой вращения Земли (IERS) в соответствии с резолюцией № 2 Международного союза геодезии и геофизики, принятой в 1991 г. в Вене.

Поскольку международное сотрудничество идет по линии использования навигационных систем независимо от национальной принадлежности, нужна точная связь между двумя координатными системами, чтобы в полной мере воспользоваться их возможностями.

Принятый в августе 2001 г. государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 51794-2001 «Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек» [19] устанавливает следующие параметры связи систем координат (табл. 3.7).

Таблица 3.7

Параметры преобразования	Системы координат		
	СК-42 в ПЗ-90	СК-95 в ПЗ-90	ПЗ-90 в WGS-84
$\Delta X, \text{ м}$	$+25 \pm 2$	$+25,90$	$-1,08 \pm 0,2$
$\Delta Y, \text{ м}$	$-141 \pm 2$	$-130,94$	$-0,27 \pm 0,2$
$\Delta Z, \text{ м}$	$-80 \pm 3$	$-81,76$	$-0,90 \pm 0,3$
$m \cdot 10^{-6}$	$0,00 \pm 0,25$	-	$-0,12 \pm 0,06$
$\omega_X$	$0,00 \pm 0,1$	-	0
$\omega_Y$	$-0,35 \pm 0,1$	-	0
$\omega_Z$	$-0,66 \pm 0,1$	-	$-0,16 \pm 0,01$

В настоящее время в России и за рубежом ведутся разработки навигационных и геодезических приемников, работающих по сигналам спутников ГЛОНАСС и GPS. Известно, что для решения координатной задачи и для учета влияния ухода часов спутниковых приемников минимальное число спутников должно быть равным четырем. Реально потребитель вынужден вести прием сигналов четырех спутников ГЛОНАСС и четырех спутников GPS, получая два не связанных между собой результата. В случае отсутствия четырех спутников в любой из систем получается всего одно решение, а три спутника другой системы не могут использоваться даже для уточнения определений. Таким образом, полно-

стью интегрированная система на базе спутников ГЛОНАСС и GPS в ближайшее время вряд ли будет создана.

Преобразование одной координатной системы в другую координатную систему того же типа с использованием пунктов, координаты которых известны в двух системах, на основе теории подобия является сегодня наиболее распространенным на практике способом преобразования координат.

Рассмотрим более подробно трехмерное трансформирование. Параметры трансформирования могут быть определены из решения системы уравнений (3.31), которая может быть представлена в следующем виде:

$$\bar{X}' = \bar{X} + \bar{\Delta X}' + m \bar{R} \bar{X}. \quad (3.32)$$

Так как каждая точка заданная в системах координат  $X$  и  $X'$  позволяет получить три уравнения, то три точки, координаты которых известны в обеих системах, позволяют получить семь параметров перехода  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, m$ . Используя для обозначения приближенных значений параметров перехода

$$\bar{\Delta X}_0, \bar{m}_0, \bar{R}_0$$

можно представить окончательные значения параметров в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{\Delta X} &= \bar{\Delta X}_0 + d\bar{\Delta X}; \\ m &= \bar{m}_0 + dm; \\ \bar{R} &= \bar{R}_0 + d\bar{R}. \end{aligned} \quad (3.33)$$

При этом линеаризованная модель преобразования координат для одной точки может быть представлена в следующем виде:

$$\bar{X} = \bar{X}_0 + \bar{A}_i d\bar{P}, \quad (3.34)$$

где

$$\bar{X}_{0i} = \bar{m}_0 \bar{R}_0 \bar{X}_i + \bar{\Delta X}_0. \quad (3.35)$$

Матрица проектирования  $\bar{A}_i$  и параметрический вектор  $d\bar{P}$  определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \bar{A}_i &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{0i} - \Delta X_0 & 0 & -Z_{0i} - \Delta Z_0 & Y_{0i} - \Delta Y_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{0i} - \Delta Y_0 & Z_{0i} - \Delta Z_0 & 0 & -X_{0i} - \Delta X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{0i} - \Delta Z_0 & -Y_{0i} - \Delta Y_0 & X_{0i} - \Delta X_0 & 0 \end{pmatrix}; \\ d\bar{P} &= (dX \ dY \ dZ \ d\omega_x \ d\omega_y \ d\omega_z \ dm)^T. \end{aligned} \quad (3.36)$$

При подстановке в уравнение (3.34) значений из уравнений (3.35) и (3.36) получаем систему линейных уравнений для одной точки  $i$ . Для  $n$  точек матрица проектирования будет иметь вид:

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} \bar{A}_1 \\ \bar{A}_2 \\ \vdots \\ \bar{A}_n \end{pmatrix} \quad (3.37)$$

Для трех точек, координаты которых известны в обеих системах, матрица проектирования может быть представлена следующим выражением:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{01} - \Delta X_0 & 0 & -Z_{01} - \Delta Z_0 & Y_{01} - \Delta Y_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{01} - \Delta Y_0 & Z_{01} - \Delta Z_0 & 0 & -X_{01} - \Delta X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{01} - \Delta Z_0 & -Y_{01} - \Delta Y_0 & X_{01} - \Delta X_0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & X_{02} - \Delta X_0 & 0 & -Z_{02} - \Delta Z_0 & Y_{02} - \Delta Y_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{02} - \Delta Y_0 & Z_{02} - \Delta Z_0 & 0 & -X_{02} - \Delta X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{02} - \Delta Z_0 & -Y_{02} - \Delta Y_0 & X_{02} - \Delta X_0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & X_{03} - \Delta X_0 & 0 & -Z_{03} - \Delta Z_0 & Y_{03} - \Delta Y_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{03} - \Delta Y_0 & Z_{03} - \Delta Z_0 & 0 & -X_{03} - \Delta X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{03} - \Delta Z_0 & -Y_{03} - \Delta Y_0 & X_{03} - \Delta X_0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

Двухмерное трансформирование (преобразование одной плоской координатной системы в другую подобную координатную систему) с использованием пунктов, координаты которых известны в двух системах, на основе теории подобия является частным случаем трехмерного трансформирования, но одновременно с этим наиболее массовой геодезической задачей как в классической, так и в спутниковой геодезии. Преобразование координат в данном случае представляется в виде поворота и переноса начала координат (рис. 3.8).

Общее уравнение преобразования имеет вид:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_0 + m X_0 \cos \alpha - m Y_0 \sin \alpha; \\ Y_1 &= Y_0 + m X_0 \sin \alpha + m Y_0 \cos \alpha. \end{aligned} \quad (3.39)$$

При этом используются четыре параметра преобразования  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $\alpha$ ,  $m$ . Для определения этих четырех параметров достаточно иметь две точки, координаты которых известны в двух системах. Используя вспомогательные параметры  $P$  и  $Q$  равные:

$$\begin{aligned} P &= m \cos \alpha; \\ Q &= m \sin \alpha, \end{aligned} \quad (3.40)$$

уравнения (3.39) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_0 + PX - QY; \\ Y_1 &= Y_0 + QX + PY. \end{aligned} \quad (3.41)$$

При наличии двух точек система уравнений решается по методу наименьших квадратов для определения параметров  $X_0$  и  $Y_0$ , а также вспомогательных параметров  $P$  и  $Q$ . Затем вычисляются параметры преобразования  $\alpha$  и  $m$  по формулам:

$$\begin{aligned} m &= \sqrt{P^2 + Q^2}; \\ \operatorname{tg} \alpha &= \frac{Q}{P}. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Комбинированное трансформирование (преобразование пространственной координатной системы в другую плоскую координатную систему) с использованием пунктов, координаты которых известны в двух системах, на основе теории подобия также является частным случаем трехмерного трансформирования и также наиболее массовой геодезической задачей в спутниковой геодезии.

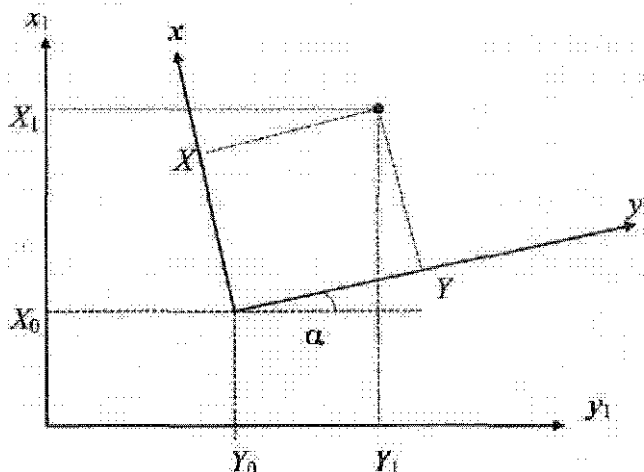


Рис. 3.8. Двухмерное преобразование координатных систем

Наиболее критичным и одновременно наиболее спорным параметром в двухмерном и комбинированном трансформировании является масштабный коэффициент  $m$ . С одной стороны, спутниковые системы GPS и ГЛОНАСС являются высокоточными дальномерными системами, и введение любого масштабного коэффициента в результаты их измерений требует серьезного обоснования. С другой стороны, классические геодезические построения выполнены, как правило, с высокой метрологической точностью, которая обеспечивалась и обеспечивается в настоящее время достаточно надежной системой технологических приемов и контролей, что также делает весьма проблематичным использование любых масштабных коэффициентов. И, наконец, с третьей стороны, формальное трансформирование на основе теории подобия прямоугольной системы координат (пространственной или плоской) в другую прямоугольную систему, созданную на основе одной из классических проекций (UTM, Гаусса-Крюгера или др.) для линейных объектов длиной порядка десятков километров или площадных объектов таких же размеров, особенно протяженных вдоль параллели, могут привести к методическим погрешностям трансформирования, превосходящим и точность спутниковых измерений, и точность ранее созданных классических геодезических построений (рис. 3.9).

Одномерное трансформирование (преобразование одной координаты в другую подобную координату) с использованием пунктов, координаты которых известны в двух системах, на основе теории подобия является частным случаем трех- и двухмерного трансформирования и достаточно распространенной геодезической задачей как в классической, так и в спутниковой геодезии. Преобразование в данном случае представляется в виде трансформирования высот и трансформирования базисных линий. Трансформирование высот будет рассмотрено в следующем подразделе. Задача трансформирования базисных линий может быть решена достаточно строго на основе знания точного значения длины базисной линии, измеренной спутниковой системой на физической поверхности Земли, точных параметров системы координат, в которую трансформируется базисная линия, и приближенных координат концов линии в этой системе координат, определенных одним из выше рассмотренных методов.

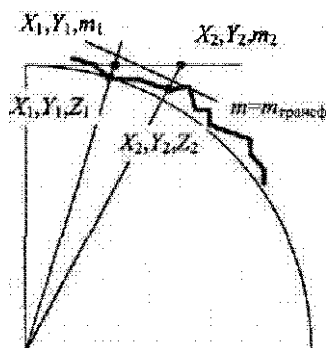


Рис. 3.9. Искажения из-за методических некорректностей трансформирования

Так, например, при одномерном трансформировании линий, измеренных системой GPS, в систему координат СК-42 решается классическая редуционная задача высшей геодезии (рис. 3.10) [48].

При этом переход от длины линии  $MN$ , измеренной на физической поверхности Земли, к длине линии  $M_1N_1$ , редуцированной в систему координат СК-42, осуществляется тремя преобразованиями:

- 1) введение поправок за наклон линии, например, по формуле

$$\Delta D_\lambda = -\frac{h^2}{2D} - \frac{h^4}{8D^3},$$

где  $h = H_M - H_N$ ;  $D$  – длина линии между точками  $M$  и  $N$ ;

- 2) редуцирование на поверхность референц-эллипсоида, например, по формуле



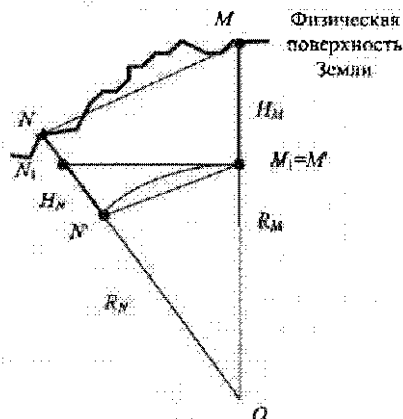


Рис. 3.10. Одномерное трансформирование базисных линий

$$\Delta D_x = -\frac{H_m}{R} D + \frac{H_m^2}{R^2} D + \frac{D^3}{24R^2},$$

где  $H_m = (H_M - H_N)/2$ ;  $R$  - радиус кривизны нормального сечения между точками  $M$  и  $N$ ;

3) редуцирование с поверхности референц-эллипсоида на плоскость СК-42 по формуле

$$\Delta D_{\text{э}} = \frac{y_m^2}{2R_x} D + \frac{y_m^3}{24R_x^2} D + \frac{\Delta y^2}{24R_x^2},$$

где  $y_m = (y_M + y_N)/2$ ;  $y = y_M - y_N$ .

### 3.4. Особенности определения высот с помощью спутниковых систем

Традиционным способом развития высотной сети является геометрическое нивелирование, которое, несмотря на автоматизацию отдельных процессов, до сих пор является одним из самых трудоемких процессов топографо-геодезического производства. В результате геометрического нивелирования определяются нормальные или ортометрические высоты, необходимые для решения большинства практических задач.

Нормальная высота определяется от поверхности геоида или квазигеоида. Геоид (квазигеоид) является одной из семейства эквипотенциальных или уровенных поверхностей гравитационного поля Земли. Гравитационный вектор или направление вертикали в любой точке перпендикулярен к геопотенциальной поверхности, проходящей через эту точку (рис. 3.11).

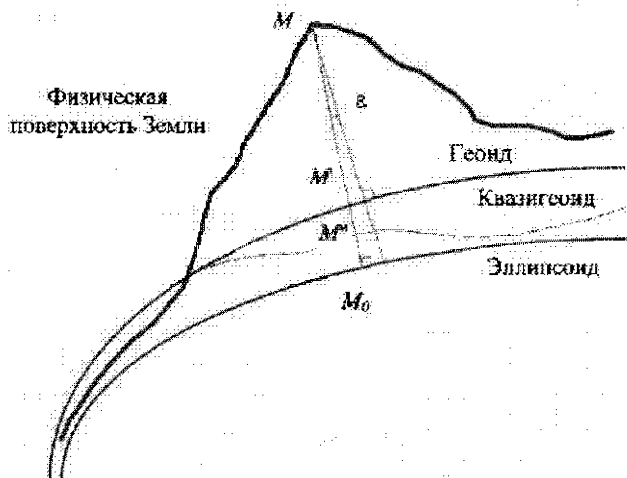


Рис. 3.11. К определению высоты

Нормальная высота имеет более распространенное физическое значение, чем эллипсоидальная или геодезическая высота, отсчитываемая от поверхности эллипсоида.

Информация об ортометрической высоте необходима при выполнении высокоточных инженерных работ, таких как строительство дамб, трубопроводов, тоннелей и других сооружений, связанных с жидкостями и их течениями. Аналоги физической интерпретации эллипсоидальных высот отсутствуют.

Соотношение между геодезической (эллипсоидальной) и нормальной (ортометрической) высотами определяется следующей формулой:

$$H^* = H + \zeta, \quad (3.43)$$

где  $H$  — геодезическая высота,  $H^*$  — нормальная высота;  $\zeta$  — высота геоида (квазигеоида).

Эта формула является достаточно точной для всех практических приложений (см. рис. 3.11).

Угол  $\epsilon$  характеризует отклонение между линией отвеса и нормалью к поверхности эллипсоида. Для большинства регионов этот угол не превышает  $30''$ .

Таким образом, для получения нормальных высот с помощью спутниковых измерений необходимо с высокой точностью знать высоты геоида и квазигеоида в каждой определяемой точке.

Поскольку спутниковые координатные определения, выполняемые с геодезической точностью, являются относительными, то и определение нормальных и геодезических высот следует рассматривать как

относительные определения. В этом случае основное уравнение связи высот будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta H^N = \Delta H + \Delta \zeta, \quad (3.44)$$

где  $\Delta H$  — разность геодезических высот;  $\Delta H^N$  — разность нормальных высот;  $\Delta \zeta$  — разность высот геоида (квазигеоида).

Использование метода относительных определений для передачи нормальных высот без учета разностей высот геоида (квазигеоида) может привести к значительным погрешностям. По данным [42] средние квадратические погрешности неучета разности высот геоида составляют до 1 м на расстоянии до 50 км и до 5 м на расстоянии до 200 км.

Наиболее массовым способом передачи высот при использовании спутниковых координатных определений является одномерное трансформирование высот с использованием нормальных высот опорных точек. Так, знание нормальных высот опорных точек в начале и в конце трассы линейного сооружения позволяет выполнить высотную съемку этой трассы, а знание нормальных высот трех опорных точек позволяет определить методом интерполяции разности высот геоида на площадном объекте, ограниченном опорными точками.

Как и двухмерное трансформирование с использованием опорных точек трансформирование высот имеет свои методические ограничения, связанные с необходимой точностью определения нормальных высот, с точностью опорных точек, с размером объекта и равномерностью в пределах объекта поверхности квазигеоида. Формальное трансформирование высот на основе теории подобия для линейных объектов длиной порядка десятков километров или площадных объектов таких же размеров, особенно протяженных вдоль параллели, могут привести к методическим погрешностям трансформирования, превосходящим и точность спутниковых измерений и точность используемых опорных высотных точек.

## **Раздел 4. Основные источники ошибок спутниковых измерений и методы ослабления их влияния**

### **4.1. Классификация источников ошибок, характерных для спутниковых измерений**

При отработке методов высокоточных спутниковых измерений возникает необходимость тщательного исследования влияний всех возможных источников ошибок выполняемых измерений, особенностей их проявления и обоснования методов их учета. В зависимости от характера воздействия отмеченных источников возникающие при этом ошибки подразделяются на две основные группы: систематические погрешности, которые применительно к спутниковым измерениям получили название смещений, и погрешности случайного характера, которые часто отождествляют с понятием «шум».

Для погрешностей первой группы разрабатываются специальные методы их учета. Влияние второй группы удается, в большинстве случаев, минимизировать за счет использования большого массива отдельных измерений. В настоящем разделе основное внимание уделено рассмотрению ошибок систематического характера, обуславливающих появление смещений результатов измерений. При их исследовании и создании методов ослабления их влияния широкое распространение получил метод моделирования, для разработки которого приходится тщательно изучать механизм воздействия таких источников ошибок на результаты измерений с тем, чтобы на основе такого изучения разработать эффективные методы минимизации отмеченного влияния.

Исходя из анализа измерительного процесса, характерного для систем GPS и ГЛОНАСС, все основные источники ошибок можно условно разбить на три основные группы:

- 1) ошибки, связанные с неточностью знания исходных данных, из которых определяющая роль принадлежит погрешностям знания эфемерид спутников, значения которых должны быть известны на момент измерений;

- 2) ошибки, обусловленные влиянием внешней среды, среди которых выделяют такие источники, как воздействие атмосферы (ионосферы и тропосферы) на результаты спутниковых измерений, а также отраженных от окружающих объектов радиосигналов (многопутность);

3) инструментальные источники ошибок, к которым, как правило, относят неточность знания положения фазового центра антенны приемника, неучтенные временные задержки при прохождении информационных сигналов через аппаратуру, а также погрешности, связанные с работой регистрирующих устройств спутниковых приемников.

Наряду с перечисленными выше группами ошибок приходится учитывать и отдельные факторы, обуславливающие появление ошибок, которые не характерны ни для одной из перечисленных выше групп. В частности, к таким ошибкам могут быть отнесены погрешности, возникающие вследствие неоптимального взаимного расположения наблюдаемых спутников (геометрический фактор). Кроме того, целый ряд ошибок может возникать в процессе перехода от одной координатной системы к другой. Например, от собственной системе GPS глобальной координатной системы WGS-84 к местной, интересующей потребителя координатной системе.

В следующих подразделах в обобщенном виде проанализированы особенности влияния основных источников ошибок.

#### **4.2. Источники ошибок, связанные с неточным знанием эфемерид спутников, и методы ослабления их влияния**

При нахождении интересующих потребителя координат точек на земной поверхности спутниковыми методами необходимо наряду с измерением расстояний до спутника знать также его эфемериды, которые определяют местоположение спутника на момент выполнения измерений. Как уже отмечалось в подразделе 2.1, неточность знания эфемерид обуславливает соответствующие погрешности определения как абсолютных значений координат определяемых точек, так и их разностей между пунктами наблюдений. Механизм неточного знания эфемерид связан, прежде всего, с наблюдаемыми на практике расхождениями между предсказываемой (невозмущенной) и реальной (подверженной влиянию возмущающих сил) орбитами. К возмущающим силам относят различные факторы как гравитационного, так и негравитационного происхождения. Влияние различных факторов на движение спутников типа GPS и ГЛОНАСС приведено в табл. 4.1 [70, 73].

Первые из них, обусловленные притяжением спутника со стороны Земли, Луны и Солнца, поддаются достаточно эффективному моделированию. В то же время такие возмущающие факторы негравитационного происхождения, как, например, солнечное радиационное давление, плохо поддаются моделированию из-за непредсказуемости отдельных компонент, от которых зависит результирующее воздействие на спутник отмеченного давления.

Таблица 4.1

Возмущающие факторы	Максимальное возмущающее ускорение, $\text{м/с}^2$	Максимальное возмущение за 1 час, м
Центральное поле Земли	$5,65 \cdot 10^{-1}$	-
Вторая зональная гармоника	$5,3 \cdot 10^{-5}$	300
Гравитация Луны	$5,5 \cdot 10^{-6}$	40
Гравитация Солнца	$3 \cdot 10^{-6}$	20
Четвертая зональная гармоника	$10^{-7}$	0,6
Солнечная радиация	$10^{-7}$	0,6
Гравитационные аномалии	$10^{-8}$	0,06
Другие факторы	$10^{-8}$	0,06

Проведенные к настоящему времени исследования по количественной оценке отдельных факторов на эфемериды спутника свидетельствуют о том, что наибольшее воздействие на отклонения реальной орбиты от расчетной оказывает гравитационное поле Земли. В частности, из-за влияния второго гармонического коэффициента  $C_{20}$  такие отклонения для трехчасовых дуг орбит достигают 2 км, а для более протяженных двухсуточных дуг до 14 км. С такими значительными отклонениями нельзя не считаться при любых видах спутниковых измерений.

Суммарное гравитационное влияние масс Луны и Солнца хотя и оказывается существенно меньшим (для трехчасовых дуг отклонения от невозмущенной орбиты оцениваются величинами на уровне от 50 до 150 м), но, тем не менее, при прогнозировании значений эфемерид данное влияние также следует учитывать.

Непосредственно с гравитацией связаны также наблюдаемые на земной поверхности различного рода приливные явления, которые из-за перераспределения масс приводят к изменениям в предрасчитываемом гравитационном поле Земли, а следовательно, и к влияниям на орбитальное движение спутника. Проведенная оценка такого влияния свидетельствует о том, что отклонения спутника от расчетной орбиты из-за воздействия данного фактора даже для двухсуточных дуг лежат в пределах от 0,5 до 2 м, и этим влиянием применительно к рассматриваемым спутникам можно пренебречь.

Переходя к оценке влияния факторов негравитационного происхождения, следует заметить, что наиболее существенное влияние на неточность знания эфемерид спутников, входящих в состав систем

GPS и ГЛОНАСС, оказывает солнечное радиационное давление. Как показывают предрасчеты, отклонения спутников от расчетной траектории из-за воздействия прямого солнечного радиационного давления лежат в пределах от 5-6 м (для трехчасовых дуг) до 100-800 м (для двухсуточных дуг). Отмеченные предрасчеты характеризуются невысокой надежностью по следующим причинам:

1) интенсивность солнечного излучения не остается постоянной с течением времени;

2) модель влияния данного фактора существенно изменяется при переходе спутника в зону тени и полутени;

3) эффективная поверхность спутника плохо поддается предрасчету как из-за сложной конфигурации такой поверхности, так и из-за вариаций положения спутника в пространстве.

Дополнительную неопределенность в предрасчет влияния радиационного давления вносит отраженная от земной поверхности солнечная радиация, зависящая от атмосферных условий и отражающих свойств облучаемых Солнцем участков земной поверхности.

Другим возмущающим фактором негравитационного происхождения является атмосферное торможение. При оценке влияния этого фактора следует иметь в виду, что на характерной для рассматриваемых спутников высоте около 20 тыс. км атмосфера оказывается чрезвычайно разреженной, и ее влиянием при предрасчетах орбит спутников, как правило, пренебрегают.

Обобщая оценку суммарного влияния всех перечисленных выше возмущающих факторов, заметим, что эти данные используются только для первоначального приближенного предвычисления реальных орбит спутников. Что касается получения необходимых для наземных наблюдателей значений эфемерид спутников, то на практике применяют более эффективные экспериментальные методы, базирующиеся на использовании опорных станций, установленных на пунктах с известными координатами и выполняющих непрерывные высокоточные наблюдения спутников в автоматическом режиме. За счет использования таких станций слежения решается обратная задача, состоящая в том, что с помощью одновременных измерений с нескольких (не менее трех) станций производится периодическое последовательное определение эфемерид всех наблюдаемых спутников. После соответствующей обработки на центральной станции вычисляются поправки к ранее определенным значениям эфемерид, которые с помощью передающих загружающих станций систематически (три раза в сутки, а последнее время один раз в сутки) передаются на соответствующие спутники, где вводятся в состав навигационного сообщения. Последнее, как уже отмечалось ранее, сбрасывается со спутника потребителю

вместе с радиосигналами, с помощью которых определяются интересные нас расстояния до спутников. Значения эфемерид на спутнике корректируются каждый час и остаются действительными, по крайней мере, еще в течение получаса после окончания каждого контрольного часа.

Ранее уже отмечалось, что точность передаваемых по радиоканалу значений эфемерид характеризуется погрешностью на уровне около 20 м, что обеспечивает точность геодезических спутниковых дифференциальных измерений на уровне около  $1 \cdot 10^{-6}$ , которая удовлетворяет требованиям большинства выполняемых геодезических работ. Однако в связи с широким развитием глобальных высокоточных сетей, предназначенных как для изучения движения земной коры, так и создания референсного каркаса, отмеченный уровень оказывается недостаточным. В таких случаях прибегают к использованию апостериорного метода определения эфемерид, сущность которого состоит в том, что при окончательной обработке спутниковых измерений используют не те значения эфемерид, которые сбрасываются со спутника по радиоканалу, а от специально организуемых служб, которые накапливают реальные (а не прогнозируемые) значения эфемерид в банке данных на основе использования результатов измерений, или входящими в сектор управления и контроля станциями слежения, или специальными службами, в которые поступает информация от специально созданных для этих целей наземных спутниковых станций, входящих в состав соответствующей высокоточной глобальной сети. В частности, в настоящее время в США такой банк функционирует при национальной геодезической службе (NGS).

При апостериорных методах удается повысить точность определения эфемерид почти на порядок, т.е. довести эту точность до нескольких единиц метров. При таком подходе погрешность знания эфемерид перестает оказывать существенное влияние на результирующую точность спутниковых измерений при решении практически любых геодезических задач.

#### 4.3. Учет влияния внешней среды на результаты спутниковых измерений

Влияние внешней среды на результаты спутниковых измерений проявляется как через изменения времени прохождения радиосигналов от спутника до приемника, так и через возникновение многопутности, обусловленной отражениями упомянутых радиосигналов от тех или иных отражающих поверхностей, расположенных в непосредственной близости от приемника.



В свою очередь изменения во времени распространения радиосигналов связаны со скоростью распространения электромагнитных волн, которая в такой среде, как атмосфера, отличается от скорости света в вакууме, причем изменения скорости на пути распространения сигнала становятся причиной дополнительных временных задержек, следствием которых являются ошибки в значениях измеряемых расстояний, пренебрегать которыми нельзя.

Применительно к системам GPS и ГЛОНАСС радиосигнал большую часть своего пути проходит в вакууме, где не проявляются отмеченные выше влияния. Но на высотах от нескольких сотен до нескольких десятков километров от земной поверхности находится область ионизированной разреженной атмосферы, получившая название ионосферы, характерная особенность которой состоит не только в том, что она вносит весьма существенные задержки в то время, которое затрачивает сигнал на прохождение через такую среду, но и обуславливает зависимость таких задержек от частоты упомянутого сигнала.

На высотах менее 40 км от земной поверхности простирается привычная нам газообразная атмосфера, получившая название тропосферы. В этой среде практически отсутствует зависимость скорости радиоволн от частоты, но начинает проявляться ее зависимость от метеорологических факторов (температуры, давления и влажности), которые в приземных слоях атмосферы могут изменяться с течением времени в широких пределах.

Наряду с атмосферными влияниями результаты спутниковых измерений подвержены также такому влиянию внешней среды, как многопутность, которая приводит к попаданию на вход приемника нескольких идентичных радиосигналов, прошедших различный путь. В результате их взаимодействия возникает результирующий сигнал, который несет в себе несколько искаженную информацию о величине измеряемого расстояния.

Поскольку механизм влияния для перечисленных выше трех различных источников ошибок существенно различен, то проанализируем отдельно особенности таких влияний.

#### *4.3.1. Влияние ионосферы*

Ионосфера, являющаяся наиболее удаленной от земной поверхности частью атмосферы, подвержена сильному воздействию различных космических излучений, и прежде всего, влиянию ультрафиолетовой радиации Солнца. В результате такого облучения электрически

нейтральные молекулы и атомы воздуха ионизируются, т.е. распадаются на свободные электроны и электрически заряженные ионы.

Поскольку энергия отдельных квантов электромагнитного ионизирующего излучения зависит от частоты такого излучения, то степень ионизации также зависит от частоты упомянутых излучений, причем чем выше частота, тем интенсивнее происходит ионизация. Для каждого вида молекул или атомов существует определенный пороговый уровень энергии, при котором происходит расщепление электрически нейтральных частиц воздуха. Как свидетельствуют проведенные исследования, интенсивная ионизация частиц воздуха происходит только при их облучении электромагнитными излучениями с длиной волны короче 0,13 мкм, т.е. колебаниями ультрафиолетового диапазона. Поэтому основным ионизирующим фактором в солнечном излучении является ультрафиолетовая радиация, энергия которой почти полностью затрачивается на ионизацию верхних слоев атмосферы, предохраняя тем самым земную поверхность от вредных воздействий такой радиации.

Электрические свойства ионизированных слоев атмосферы оказывают большое влияние на прохождение через них радиосигналов различных частотных диапазонов. Применительно к рассматриваемой нами проблеме спутниковых измерений находящиеся в ионосфере свободные электроны под воздействием проходящих через ионосферу электромагнитных волн от спутника сами становятся источниками вторичных волн, которые при взаимодействии с первичными приводят к появлению результирующих волн с несколько отличной скоростью распространения, значение которой может быть как ниже, так и выше скорости света в вакууме.

Поскольку ионосфера является диспергирующей средой, в которой скорость распространения электромагнитных волн зависит от частоты, то приходится вводить понятие фазовой и групповой скорости (по аналогии с колебаниями оптического диапазона, распространяющимися в приземных слоях атмосферы). При этом для определения фазовой скорости, которая характерна для распространения гармонических несущих колебаний, вводят понятие фазового показателя преломления  $n_\phi$ , устанавливающего соотношение между фазовой скоростью  $v_\phi$  и скоростью света в вакууме  $c$ :

$$v_\phi = \frac{c}{n_\phi} \quad (4.1)$$

Применительно к ионизированному газу фазовый показатель преломления может быть подсчитан по следующей приближенной формуле:

$$n_\phi \approx 1 - 40,3 \frac{N_e}{f^2} \quad (4.2)$$

где  $N_e$  — концентрация электронов, выражаемая через число свободных электронов в единице объема;  $f$  — частота проходящего через ионосферу радиосигнала.

В связи с тем, что со спутника наряду с несущими гармоническими колебаниями передаются также и кодовые сигналы с использованием процесса модуляции, при реализации которого формируется группа волн, то для нее используется понятие групповой скорости  $v_{gp}$ , а также связанного с ней группового показателя преломления  $n_{gp}$ . Соотношение между фазовым и групповым показателями преломления устанавливается на основе модифицированной формулы Рэлея:

$$n_{gp} = n_\phi + f \frac{dn_\phi}{df}. \quad (4.3)$$

С учетом этого:

$$v_{gp} = \frac{c}{n_{gp}} \approx c(1 + 40,3 \frac{N_e}{f^2}). \quad (4.4)$$

Из совместного рассмотрения (4.3) и (4.4) следует, что

$$v_{gp} v_\phi \approx c^2. \quad (4.5)$$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в ионизированном газе фазовый показатель преломления  $n_\phi$  всегда меньше единицы, т.е. фазовая скорость в такой среде больше скорости света в вакууме, а следовательно, гармонические несущие колебания проходят через ионосферу не с замедлением, а с ускорением. Что касается групповой скорости, то она точно на такую же величину отличается от скорости света в вакууме, но в другую сторону, т.е. в сторону занижения. При этом данная скорость характерна для кодовых сигналов, на основе которых производят измерения псевдодальностей.

Величина интересующих нас ионосферных задержек определяется величиной уклонения соответствующего показателя преломления от единицы. С учетом приведенных выше закономерностей изменения показателей преломления ионосферная задержка описывается соотношением вида:

$$|\delta_{ион}| = \frac{40,3}{f^2} \int_h N_e(h) dh = \frac{k}{f^2}, \quad (4.6)$$

где  $h$  — длина пути, проходимого радиосигналом в ионосфере;  $k$  — коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от концентрации электронов и от длины пути в ионосфере, что, в свою очередь, приводит к зависимости от широты точки стояния, времени суток, сезона года и даты в пределах 11-летнего цикла солнечной активности.

Ионосферные задержки обычно пересчитываются в поправки к псевдодальностям. Их значения оцениваются величинами, лежащими в пределах от 5 до 50 м.

Для предрасчета ионосферных задержек радиосигналов применительно к спутниковым измерениям предпринимались неоднократные попытки создания соответствующих моделей, позволяющих произвести оценку величины таких задержек на момент измерений для конкретных условий наблюдений. Среди различных моделей такого типа наибольшее распространение получила модель, разработанная Дж. А. Клобушаром. Исходными предпосылками в данной модели были приняты предположения о том, что в ночное время уровень ионизации, а следовательно, и временные задержки в ионосфере остаются неизменными по своей величине, а в дневное время эти задержки описываются косинусоидальной функцией, для которой нужно знать амплитуду, период и начальную фазу. Формулы, на основе которых подсчитываются поправки за влияние ионосферы, имеют при этом следующий вид:

для дневных наблюдений:

$$\delta_{\text{ион}} = A_1 + A_2 \cos \left[ \frac{2\pi(t_{\text{м}} - A_3)}{A_4} \right] \quad (4.7)$$

для наблюдений в ночных условиях:

$$\delta_{\text{ион}} = A_1, \quad (4.8)$$

где  $A_1$  — величина ионосферной задержки в ночное время, которая для используемого в GPS частотного диапазона принимается равной  $5 \cdot 10^{-9}$  с;  $A_3$  — фаза используемой косинусоидальной функции, отнесенная к 14 часам местного времени;  $t_{\text{м}}$  — местное время;  $A_2$  — амплитуда косинусоидальной функции, для нахождения которой используется полином:

$$\alpha_1 + \alpha_2 \Phi_{\text{м}} + \alpha_3 \Phi_{\text{м}}^2 + \alpha_4 \Phi_{\text{м}}^3;$$

$A_4$  — период косинусоидальной функции, определяемый на основе использования полинома:

$$\beta_1 + \beta_2 \Phi_{\text{м}} + \beta_3 \Phi_{\text{м}}^2 + \beta_4 \Phi_{\text{м}}^3;$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  — константы, которые определяются ежедневно с помощью станций слежения, входящих в сектор управления и контроля, и через загружающие станции в составе навигационного сообщения передаются на спутники, которые затем сбрасываются по радиоканалу потребителям;  $\Phi_{\text{м}}$  — геомагнитная широта «ионосферной точки».

На рис. 4.1 в графическом виде представлена описываемая уравнением (4.7) модель Клобушара. Интересующие потребителя ионосферные поправки вычисляются при этом в такой последовательности:

1. Зная приближенные значения широты и долготы точки стояния, а также положение спутника в пространстве, представляется возможным вычислить угол возвышения и азимут линии визирования, ориентированной на спутник.

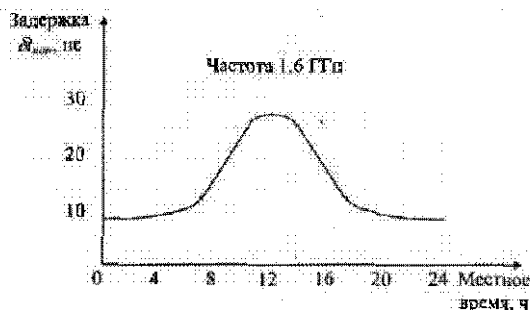


Рис. 4.1. Модельное представление изменений ионосферной задержки в течение суток

2. Принимая среднюю высоту ионосферы равной 350 км, вычисляется широта и долгота точки пересечения упомянутой выше линии визирования с ионосферой ("ионосферная точка").

3. Задаваясь географическими значениями широты и долготы «ионосферной точки», определяют угол между этой точкой и геомагнитным северным полюсом Земли. Вычитая полученное значение угла из  $90^\circ$ , находят интересующее значение геомагнитной широты  $\Phi_m$ , на основе которого могут быть вычислены амплитуда  $A_2$  и половинное значение периода  $A_4$  косинусоидальной функции. Оба эти параметра представляют собой полиномы третьего порядка от геомагнитной широты «ионосферной точки», причем в состав этих двух полиномов входят 8 коэффициентов, значения которых сбрасываются по радиоканалу в составе навигационного сообщения.

4. Используя упомянутую выше информацию, с помощью уравнения (4.7) может быть вычислена ионосферная задержка в зенитном направлении. На заключительной стадии эта задержка увеличивается за счет введения соответствующего масштабирующего коэффициента, учитывающего наклонное падение радиолуча на ионосферу. Этот коэффициент является функцией угла возвышения линии визирования, ориентированной на спутник. При его расчете приходится принимать во внимание высоту «ионосферной» точки над земной поверхностью, которая определяется недостаточно надежно.

Передаваемые со спутника 8 коэффициентов ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ ) отбираются из 370 наборов, включающих отмеченные 8 параметров и используемых для этих целей. Данные параметры функционально связаны с сезонными влияниями и с уровнем солнечного радиационного излучения. Для каждого сезона в расчет принимаются 37 десятидневных групп, а в пределах каждой такой группы имеется 10 наборов параметров, каждый из которых связан с величиной солнеч-

ного радиационного потока. Входящая в сектор управления и контроля ведущая станция осуществляет выбор соответствующей серии для того или иного спутника и через загрузающую станцию передает эту информацию на требуемый спутник. По результатам проведенных исследований, касающихся моделирования ионосферных задержек, установлено, что для случая двумерных навигационных определений (т.е. без высотной отметки) остаточное влияние ионосферы приводит к появлению ошибок на уровне от 0,5 до 2,7 м, в то время как ошибка в вертикальном направлении оказывается примерно в 6 раз больше (от 4 до 16 м).

Описанный выше метод учета влияния ионосферы считается недостаточно надежным и не обеспечивает высокую точность измерений. В связи с этим он применяется преимущественно в навигации при абсолютных методах координатных определений.

При геодезическом использовании спутниковых измерений наибольшее распространение получил метод учета влияния ионосферы, базирующийся на применении двух несущих частот  $L_1$  и  $L_2$ . Поскольку данный метод заслуживает повышенного внимания при высокоточных геодезических спутниковых измерениях, то изложим вкратце обоснование двухчастотного принципа исключения ионосферных задержек применительно к фазовым измерениям.

Для упрощения математических выкладок пренебрежем на данной стадии (также, как и в подразделе 2.8) влиянием тропосферы, т.е. предположим, что влияние атмосферы сводится только к воздействию ионосферы на результаты спутниковых фазовых измерений. При этом приведенные в разделе 2 формулы (2.36) могут быть представлены в следующем, несколько модернизированном виде:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{L_1} &= N_{L_1} - \Delta\Phi_{L_1} = f_{L_1} \tau'_{geom} + \frac{k}{f_{L_1}} \\ \Phi_{L_2} &= N_{L_2} - \Delta\Phi_{L_2} = f_{L_2} \tau'_{geom} + \frac{k}{f_{L_2}} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

где  $\tau'_{geom} = \rho/c + (\delta t_c - \delta t_{up})$  — время прохождения радиосигналом геометрического расстояния между спутником и приемником, включающее в себя и временные поправки, обусловленные уходом часов на спутнике и в приемнике;  $k/f_{L_1, L_2}$  — поправка, учитывающая влияние ионосферы.

Из совместного решения уравнений (4.9) имеем:

$$\Phi_{L_2} = N_{L_1} - \frac{f_{L_2}}{f_{L_1}} \Delta\Phi_{L_1} = \frac{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2}{f_{L_1}} \tau'_{geom} \quad (4.10)$$

Характерная особенность введенного значения фазового сдвига, относящегося к комбинационной частоте  $f_{L_3} = (f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2)/f_{L_1}$ , состоит в том, что оно оказывается свободным от влияния ионосферы.

При практических расчетах во многих случаях вводят понятие фактора  $R=f_{L2}/f_{LP}$ , который для системы GPS имеет следующее числовое значение:

$$R=1227,6/1575,42=0,779.$$

С учетом фактора  $R$  может быть получена формула для величины  $\tau'_{\text{ион}}$  входящей в соотношение (4.10):

$$\tau'_{\text{ион}} = \frac{1}{f_{L2}} \frac{\Phi_{L1} - R\Phi_{L2}}{1 - R^2}. \quad (4.11)$$

Если отнести эту величину к основной несущей частоте  $f_{LP}$ , то выражение для свободного от ионосферного влияния фазового сдвига принимает вид:

$$\Phi_{L1} = f_{L1} \tau'_{\text{ион}} = \frac{\Phi_{L1} - R\Phi_{L2}}{1 - R^2}. \quad (4.12)$$

Величина ионосферной поправки может быть при этом подсчитана по формуле:

$$\Delta\Phi_{L1}^{\text{ион}} = \Phi_{L1} - \Phi_{L1} = \frac{R(\Phi_{L2} - R\Phi_{L1})}{1 - R^2}. \quad (4.13)$$

Аналогичные соотношения могут быть получены и для второй несущей частоты  $L2$ .

Приведенные выше математические выкладки свидетельствуют о том, что на основе выполнения измерений на двух несущих частотах представляется возможным не только вычислить практически свободную от влияния ионосферы величину измеряемого до спутника расстояния, но и определить значение ионосферной поправки. Остаточное ее воздействие на результаты измерений обусловлено, главным образом, недостаточно строгим модельным представлением зависимости ионосферной поправки от частоты (см. формулу (2.35)).

Дополнительное ослабление влияния ионосферы удастся достичь за счет использования дифференциальных методов измерений, одна из особенностей которых проявляется в том, что при окончательных расчетах используются не абсолютные значения ионосферных задержек, а их разности, характерные для траекторий радиолучей, соединяющих спутник с двумя разнесенными на местности станциями. Кроме того, наиболее точные работы рекомендуют выполнять в ночное время, когда влияние ионосферы существенно уменьшается.

Из анализа приведенных выше различных подходов, ориентированных на ослабление влияния ионосферы, следует, что наиболее эффективными мерами борьбы с влиянием ионосферы являются методы, базирующиеся на двухчастотных дифференциальных фазовых измерениях, которые открывают возможность измерения на местности

линий различной протяженности на сантиметровом (и даже на миллиметровом) уровне точности.

### 4.3.2. Влияние тропосферы

При выполнении спутниковых измерений наряду с ионосферой приходится учитывать также влияние тропосферы, которая представляет собой ближайшую к земной поверхности часть атмосферы, простирающуюся до высот 40–50 км.

Отличительная особенность тропосферы состоит в том, что эта часть атмосферы является нейтральной (т.е. неионизированной) средой. Поэтому для частот радиодиапазона менее 15 ГГц она может рассматриваться как среда, не подверженная дисперсии, вследствие чего скорость распространения радиоволн в ней не зависит от частоты. При этом фазовая и групповая скорости оказываются одинаковыми, а поэтому нет необходимости раздельно изучать влияние тропосферы на фазовые и кодовые измерения. При разработке методов учета такого влияния не представляется возможным использовать описанные выше принципы измерений на двух различных несущих частотах, вследствие чего доминирующее положение занимают методы моделирования.

К настоящему времени для учета влияния тропосферы предложено значительное количество различных моделей, позволяющих оценить величину тропосферных задержек при прохождении сигналов от космических объектов до расположенных на земной поверхности пунктов. Применительно к спутниковым системам позиционирования типа GPS наибольшее распространение получила модель Хопфилда. При разработке такой модели была обоснована целесообразность разделения преломляющих свойств тропосферы на «сухой» и «влажный» компоненты. При этом для показателя преломления  $n$  (а точнее для индекса показателя преломления  $N_{\text{троп}} = (n-1) \cdot 10^6$ ) была применена следующая форма представления:

$$N_{\text{троп}} = N_s + N_w, \quad (4.14)$$

где  $N_s$  и  $N_w$  — индексы показателя преломления воздуха соответственно для «сухого» и «влажного» компонентов.

С учетом данного соотношения тропосферные задержки, выраженные в линейной мере, могут быть оценены на основе использования следующей формулы:

$$\Delta S_{\text{троп}} = \Delta S_s + \Delta S_w = 10^{-6} \int_h^h N_s ds + 10^{-6} \int_h^h N_w ds, \quad (4.15)$$

где  $\Delta S_s$  и  $\Delta S_w$  — поправки к величинам измеряемых расстояний, обусловленные упомянутыми выше компонентами;  $h$  — высота точки сто-



ления наблюдателя над уровнем моря;  $h_c$  и  $h_{a0}$  — высота политропного слоя тропосферы, т. е. слоя, в пределах которого температура линейно связана с высотой, для «сухого» и «влажного» компонентов.

В модели Хопфилда обоснована следующая эмпирическая зависимость рассматриваемых компонентов индекса показателя преломления от высоты:

$$\left. \begin{aligned} N_c(h) &= N_{c0} \left( \frac{h_c - h}{h_c} \right)^4 \\ N_a(h) &= N_{a0} \left( \frac{h_{a0} - h}{h_{a0}} \right)^4 \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

где  $N_{c0}$  и  $N_{a0}$  — индексы показателя преломления воздуха в точке стояния наблюдателя.

Для радиодиапазона значения компонентов  $N_{c0}$  и  $N_{a0}$  могут быть определены через температуру  $T$ , давление  $P$  и влажность  $e$  воздуха по хорошо известным формулам:

$$N_{c0} = c_1 P/T; \quad N_{a0} = c_2 e/T + c_3 e/T^2, \quad (4.17)$$

где  $c_1, c_2, c_3$  — вспомогательные эмпирически определяемые коэффициенты численно равные:

$$c_1 = 77,64 \text{ К/мБ}; \quad c_2 = -12,96 \text{ К/мБ}; \quad c_3 = 3,718 \cdot 10^5 \text{ К}^2/\text{мБ}.$$

Входящие в формулы (4.17) значения  $T$ ,  $P$  и  $e$  могут быть или измерены в точке стояния наблюдателя, или приняты равными величинам, характерным для стандартной атмосферы.

Входящие в формулы (4.16) параметры  $h_c$  и  $h_{a0}$  зависят от местоположения наблюдателя и от температуры воздуха. В качестве приближенных величин могут быть приняты значения:

$$h_c \approx 40 \text{ км}; \quad h_{a0} \approx 11 \text{ км}.$$

На основе использования соотношений (4.15) и (4.16) может быть получена следующая формула для подсчета суммарной тропосферной задержки в зенитном направлении:

$$\Delta S_{\text{троп}} = \frac{1}{5} \cdot 10^{-6} [N_{c0} h_c + N_{a0} h_{a0}] \quad (4.18)$$

Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что «сухой» компонент обуславливает около 90 % от полной тропосферной задержки, а вклад «влажного» компонента составляет всего около 10%. Приведенные выше формулы позволяют произвести количественную оценку суммарной тропосферной задержки, которая для зенитного направления составляет около 2,3 м. Однако по мере приближения спутника к горизонту это значение существенно возрастает и на высоте около  $10^\circ$  над горизонтом достигает значений около 20 м.

Для оценки рассматриваемого влияния при наклонном прохождении сигналов через тропосферу формулу (4.18) представляют в следующем развернутом виде:

$$\Delta S_{\text{проп}}(E) = \frac{1}{5} \cdot 10^{-6} \left[ \frac{N_{\text{сух}} h_e}{\sin \sqrt{(E^2 + 6,25)}} + \frac{N_{\text{влаж}} h_{\text{влаж}}}{\sin \sqrt{(E^2 + 2,25)}} \right] \quad (4.19)$$

где  $E$  — угол возвышения спутника над горизонтом.

С целью более полной адаптации к специфике спутниковых GPS-измерений модель Хопфилда была подвергнута модификации. В частности, вместо высот, отсчитываемых от уровня моря, в рассмотренные выше формулы были введены соответствующие расстояния от центра масс Земли, которые могут быть получены непосредственно в процессе выполнения спутниковых измерений. При этом формулы (4.16) для оценки «сухого» и «влажного» компонентов индекса показателя преломления для такой модифицированной модели принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} N_e &= N_{e0} \left( \frac{r_e - r_0}{r_e - R_s} \right)^4; \\ N_{\text{влаж}} &= N_{\text{влаж}0} \left( \frac{r_{\text{влаж}} - r_0}{r_{\text{влаж}} - R_s} \right)^4 \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

где  $r_0$  — расстояние от точки стояния наблюдателя до центра масс Земли;  $r_e$  и  $r_{\text{влаж}}$  — аналогичные расстояния от верхней отметки упомянутого ранее политропного слоя тропосферы для «сухого» и «влажного» компонентов;  $R_s$  — радиус Земли.

Введенные величины  $r_e$  и  $r_{\text{влаж}}$  связаны с ранее используемыми величинами  $h_e$  и  $h_{\text{влаж}}$  соотношениями:

$$r_e = R_s + h_e, \quad r_{\text{влаж}} = R_s + h_{\text{влаж}} \quad (4.21)$$

При наклонном прохождении радиосигналов через тропосферу значения задержек, выраженных в линейной мере и обусловленных влиянием «сухого» и «влажного» компонентов, могут быть применительно к модернизированной модели оценены на основе следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_e &= \frac{10^{-6} N_{e0}}{(r_e - R_s)^4} \int_{r_0}^{r_{\text{влаж}}} \frac{r(r_e - r)^4}{\sqrt{r^2 - R_s^2 \sin^2 \zeta_0}} dr; \\ \Delta S_{\text{влаж}} &= \frac{10^{-6} N_{\text{влаж}0}}{(r_{\text{влаж}} - R_s)^4} \int_{r_0}^{r_{\text{влаж}}} \frac{r(r_{\text{влаж}} - r)^4}{\sqrt{r^2 - R_s^2 \sin^2 \zeta_0}} dr \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

где  $\zeta_0 = 90^\circ - E$  — зенитный угол в направлении на спутники с пункта наблюдения.

Практически подсчет интересующих потребителя задержек осуществляется посредством полиномиального представления входящих в формулы (4.22) интегральных выражений.

Поскольку требуемая информация для оценки тропосферных задержек может быть получена непосредственно на пункте наблюдения, то необходимости в использовании для этих целей передаваемых со спутника соответствующих поправок в составе навигационного сообщения не возникает.

Как уже отмечалось выше, для подсчета параметров  $N_{\text{св}}$  и  $N_{\text{св0}}$  по формулам (4.17) могут быть использованы значения температуры, давления и влажности воздуха, характерные для принятой стандартной модели атмосферы. Однако при проведении наиболее точных работ рекомендуется измерять эти параметры непосредственно на пункте наблюдения с помощью соответствующих метеоприборов.

Наряду с тропосферной моделью Хопфилд в отдельных типах спутниковых приемников используется модель Саастамойнена, которая описывается следующим эмпирическим выражением:

$$\Delta S_{\text{мод}} = \frac{0,002277}{\cos z} \left[ P + \left( \frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - 10^{-3} z \right], \quad (4.23)$$

где  $z$  — зенитный угол в направлении на спутник;  $P$ ,  $T$  и  $e$  — давление, температура и влажность воздуха, определяемые на пункте наблюдения, при этом величина  $T$  измеряется в градусах Кельвина, а  $P$  и  $e$  — в миллибарах.

Тропосферные модели других авторов применяются на практике сравнительно редко.

Следует заметить, что влияние тропосферы на результаты спутниковых измерений существенно ослабляется за счет использования дифференциальных методов наблюдений, при которых на конечные результаты оказывают влияние не абсолютные значения тропосферных задержек, а их разности. Вместе с тем накопленный к настоящему времени опыт спутниковых координатных определений свидетельствует о том, что при использовании метода тропосферного моделирования этот источник ошибок оказывается одним из основных при проведении высокоточных измерений. Существенные затруднения возникают при этом в процессе моделирования влияния влажности воздуха. Для их преодоления в отдельных случаях, когда требуется реализовать предельно высокую точность спутниковых измерений, применяют специальные приборы, получившие название радиометров водяных паров, с помощью которых представляется возможным определить интегральное значение влажности воздуха на пути прохождения радиосигналов от спутника до приемника. К сожалению, такой метод

существенно усложняет методику спутниковых измерений и сопряжен с большими материальными затратами. В этой связи повышенного внимания заслуживает другой подход, основанный на вычислении тропосферных задержек в процессе обработки спутниковых измерений, объявляя неизвестной величиной этот параметр в процессе совместного решения системы уравнений. Такой метод оказался достаточно эффективным при проведении измерений в условиях повышенной влажности воздуха. В этой связи он рекомендован международными организациями не только для коррекции результатов спутниковых измерений, но и для применения в метеорологии с целью составления тропосферных карт, на которых отображается пространственное распределение содержания водяных паров в атмосфере.

### 4.3.3. Многопутность

Применительно к спутниковым измерениям под многопутностью принято понимать такое распространение радиосигналов, при котором упомянутые сигналы достигают антенны спутникового приемника не только по прямому пути, соединяющему спутник с пунктом наблюдения, но и по ломаному пути, образуемому за счет отражений от различного рода объектов, окружающих приемник (земная и водная поверхность, строения и сооружения, наружные геодезические сигналы др.). Такая ситуация, обуславливающая возникновение многопутности, схематически изображена на рис. 4.2.

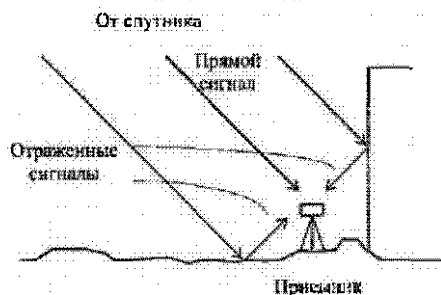


Рис. 4.2. К пояснению влияния многопутности сигналов, попадающих на вход приемника

При наличии отраженных радиосигналов, прошедших несколько иной путь повышенной протяженности, в результате радиодальномерных измерений вносится дополнительная погрешность, оказывающая влияние на конечную точность спутниковых измерений. Более того, многопутность может служить причиной существенного ослабления поступающих на вход приемника сигналов, а в отдель-

ных случаях приводить к полному нарушению нормальной работы приемника.

Особенности влияния отраженных радиосигналов на результаты дальномерных измерений достаточно подробно изучены в процессе разработки и исследования наземных радиодальномерных устройств. При этом было установлено существенное различие в механизме влияния отражений на несущие и модулирующие колебания. В связи с тем, что при спутниковых измерениях используются оба типа отмеченных колебаний, оценим это влияние применительно как к фазовым измерениям, базирующимся на использовании несущих колебаний, так и к кодовым измерениям, основанным на применении модулирующих сигналов.

Поскольку процесс влияния многопутности непосредственно на несущие колебания описывается намного проще и нагляднее, то рассмотрим механизм такого влияния на характерные для спутниковых измерений фазовые измерения, отнесенные к несущим колебаниям.

Предположим, что отраженный от того или иного объекта радиосигнал проходит избыточный путь  $\Delta\rho$  в результате чего он приобретает в сравнении с прямым сигналом дополнительный фазовый сдвиг  $\Delta\Psi$ , который в долях фазового цикла может быть оценен на основе следующего очевидного соотношения:

$$\Delta\Psi = f \frac{\Delta\rho}{v}, \quad (4.24)$$

где  $f$  — частота несущих колебаний;  $v$  — скорость распространения электромагнитных волн.

При наличии отражений на антенное устройство спутникового приемника одновременно поступают как прямой, так и отраженный радиосигналы, характеризуемые векторами  $E_{пр}$  и  $E_{отр}$  (рис. 4.3).

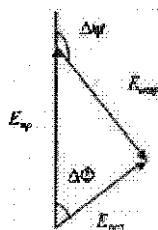


Рис. 4.3. Векторное сложение прямого и отраженного сигналов

При взаимодействии изображенных на рис. 4.3 сигналов формируется результирующий сигнал, который оказывается сдвинутым по фазе относительно прямого сигнала на величину  $\Delta\Phi$ , оцениваемую соотношением:

$$\lg(\Delta\Phi) = \frac{k \sin(\Delta\Psi)}{1 + k \cos(\Delta\Psi)}, \quad (4.25)$$

где  $k = E_{\text{отр}}/E_{\text{пр}}$  — коэффициент ослабления отраженного сигнала приближенно равный коэффициенту отражения отражающей поверхности.

Анализ формулы (4.25) свидетельствует о том, что максимальная ошибка из-за многопутности при условии, что  $E_{\text{отр}} \leq E_{\text{пр}}$ , наблюдается при противофазности этих сигналов, причем рассматриваемое взаимодействие сопровождается не только возникновением ошибки в результатах спутниковых измерений, но и ослаблением амплитуды результирующего сигнала, что может приводить к невозможности фиксации таких сигналов из-за их малой величины и, как следствие, к пропуску фазовых циклов при взятии последовательных отсчетов в процессе орбитального движения спутника.

Что касается количественной оценки фазовых искажений, то с учетом того, что в системах GPS и ГЛОНАСС длины волн несущих колебаний близки к 20 см, максимальная ошибка фазовых измерений может достигать значений около 5 см. В тех редких случаях, когда отраженный сигнал превышает прямой (например, при наличии дополнительного затухания на пути прохождения прямого сигнала), эта ошибка может приближаться к 10 см.

При выполнении псевдодальномерных (кодовых) измерений механизм расчета ошибок из-за многопутности существенно усложняется. Не прибегая к громоздкому математическому анализу, заметим: при подсчете интересующих нас погрешностей в результатах кодовых измерений происходит переход рассмотренных выше фазовых сдвигов, характерных для несущих колебаний, в фазовые сдвиги, которые приобретают модулирующие (т. е. кодовые) сигналы. При этом разность хода в несколько сантиметров, характерная для несущих колебаний, трансформируется в разность пройденных путей для модулирующих колебаний, оцениваемую десятками метров. Так, например, фазовый сдвиг на уровне около  $90^\circ$ , который приобретают сигналы, несущие в себе информацию об общедоступном C/A-коде и имеющие длину волны около 300 м, обуславливает ошибку, оцениваемую величиной около 75 м.

С учетом вышеизложенного повышенного внимания заслуживают меры по ослаблению влияния многопутности, прежде всего, на результаты кодовых измерений. При этом следует заметить, что за счет использования дифференциальных методов измерений не удастся ослабить рассматриваемое влияние, так как обстановка, порождающая возникновение многопутности, характерна для каждого конкретного пункта наблюдений.

На основе проведения как теоретических, так и экспериментальных исследований разработаны следующие рекомендации по ослаблению влияния источников ошибок, обусловленных многопутностью:

1) места расположения пунктов наблюдения следует выбирать с таким расчетом, чтобы исключить наличие отражающих объектов вблизи от антенной системы спутникового приемника;

2) при разработке антенных систем для спутниковых приемников следует обращать внимание на необходимость установки дополнительных экранирующих приспособлений, препятствующих попаданию отраженных радиосигналов на вход антенны (например, установка экранов под антенной, что позволяет устранить влияние сигналов, отраженных от подстилающей поверхности);

3) на пунктах, подверженных влиянию отражений, следует предусматривать сеансы наблюдений повышенной протяженности, с тем, чтобы получить циклическую кривую изменения ошибок из-за отражений; последующее усреднение позволяет существенно ослабить рассматриваемое влияние;

4) при обработке результатов наблюдений можно ограничиться принятием в расчет только тех результатов, которые соответствуют таким положениям спутников, при которых отражающие поверхности оказывают наименьшее влияние.

Совокупность перечисленных выше мер позволяет минимизировать влияние многопутности до уровня, при котором этот источник ошибок не препятствует выполнению высокоточных спутниковых измерений.

#### 4.4. Инструментальные источники ошибок

При оценке результирующей точности спутниковых измерений наряду с ошибками, обусловленными истинным знанием местоположения спутников на момент измерений, их взаимным положением и влиянием внешней среды, приходится учитывать также и инструментальные источники ошибок, связанные с несовершенством работы тех или иных узлов, входящих в состав аппаратуры, расположенной на спутнике, и аппаратуры, находящейся в распоряжении пользователя. Проведенные к настоящему времени исследования в этой области свидетельствуют о том, что основные источники инструментальных ошибок связаны с погрешностью хода часов на спутнике и в приемнике, с особенностями работы передающей и приемной антенн, с учетом временных задержек в аппаратуре передатчика и приемника, а также с несовершенством работы отсчетных устройств, с помощью которых определяется время (или фазовый сдвиг), соответствующее прохождению радиосигнала от спутника до приемника.

Рассмотрим вкратце характерные особенности каждого из перечисленных выше инструментальных источников ошибок, его влияние на результирующую точность спутниковых измерений и методы минимизации такого влияния.

#### *4.4.1. Ошибки, обусловленные нестабильностью хода часов на спутнике и в приемнике*

Ошибки, связанные с нестабильностью хода часов, при использовании одностороннего метода дальномерных измерений являются определяющими во всем комплексе ошибок характерных для спутниковых измерений.

Роль часов на спутнике и в приемнике выполняют высокостабильные опорные генераторы, которые служат базовой основой для времени и частоты при реализации шкалы, известной в литературе как время GPS. Из-за высоких требований к стабильности хода таких часов на спутниках используют наиболее стабильные атомные генераторы, которые были описаны в подразделе 1.5.3. В приемных устройствах, находящихся в распоряжении потребителей, ограничиваются применением более дешевых и экономичных кварцевых генераторов.

Несмотря на все меры, направленные на повышение стабильности работы отмеченных генераторов, они по своим показателям не отвечают предъявляемым требованиям, а поэтому во избежание существенного понижения точности выполняемых измерений приходится принимать меры, предусматривающие периодическую корректировку показаний часов (в частности, часов, находящихся на спутниках), а также специальные методические приемы, позволяющие учесть или исключить ошибки, обусловленные неточностью показаний часов на спутниках и в приемниках.

Для обоснования упомянутых мер представим показания часов на спутнике в виде следующего соотношения:

$$t = t_{GPS} + \delta t_c \quad (4.26)$$

где  $t_{GPS}$  — текущее точное время GPS, которое задается ведущей станцией сектора управления и контроля на основе использования национального стандарта времени и частоты;  $\delta t_c$  — уход показаний часов на спутнике на момент выполнения их корректировки.

Величина  $\delta t_c$  моделируется полиномом второй степени на основе изучения закономерности наблюдающихся изменений показаний часов с течением времени:

$$\delta t_c = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2, \quad (4.27)$$



где  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  — экспериментально определяемые коэффициенты полинома, характерные для конкретных спутниковых часов;  $t_0$  — начальный опорный момент времени, который во многих случаях относят к среднему моменту времени в сеансе наблюдений.

Значения отмеченных коэффициентов вводят в состав навигационного сообщения, которое формируют на ведущей станции сектора управления и контроля и которое передают на соответствующий спутник с помощью загружающих станций. В результате эта информация поступает по радиоканалу потребителю и используется для получения откорректированных показаний часов интересующего нас спутника.

Для учета погрешности показаний часов спутниковых приемников применяется принцип измерения псевдодальностей (см. подраздел 2.4), базирующийся на наблюдениях четырех спутников (см. уравнения (2.7)). При наличии избыточного спутника появляется возможность определить поправку  $\delta t_{\text{пр}}$ , обусловленную неточностью хода часов приемника, на основе совместного решения уравнений (2.7).

Рассмотренный выше метод учета ухода показаний часов на спутнике и в приемнике получил наибольшее распространение при наблюдениях, выполняемых одной станцией, т.е. при определении абсолютных значений координат точки стояния приемника. При решении геодезических задач, предусматривающих использование дифференциальных методов, влияние рассматриваемого источника ошибок удается практически нацело исключить за счет применения метода вторых разностей (см. подраздел 2.6.2).

Наряду с самопроизвольными уходами показаний часов на спутнике в них приходится вводить также поправку за релятивистский эффект.

#### *4.4.2. Ошибки, обусловленные неточностью знания точки относимости*

При измерении расстояний от спутников до расположенных на земной поверхности приемников с высокой степенью точности весьма важным фактором является знание положения той точки относимости, от которой отсчитываются интересующие нас расстояния. Применительно к спутниковым системам позиционирования такими точками принято считать фазовые центры антенн как на спутнике, так и в приемнике. Положения упомянутых центров с высокой степенью точности не удается установить на основе каких-либо геометрических измерений, а поэтому эти параметры стремятся определять на основе специальных измерений в заводских условиях с применением соответствующих приспособлений.

Следует при этом отметить, что требования к точности определения фазовых центров на спутнике и в приемнике существенно различны. Погрешность определения центра для установленной на спутнике антенной системы воспринимается как неточность знания эфемерид, которые определяются на метровом уровне точности. Что касается фазового центра антенны приемника, то с этим параметром непосредственно связано определение разности координат между пунктами на сантиметровом (и даже на миллиметровом) уровне точности.

С учетом вышеизложенного потребители основное внимание уделяют проблеме установления положения фазового центра спутникового приемника. Поскольку в современных спутниковых приемниках преимущественное распространение получили микрополосковые антенны, имеющие симметричную конструкцию относительно оси вращения антенного устройства, то местоположение фазового центра в горизонтальной плоскости, как правило, совмещают с упомянутой осью вращения. Что касается фиксации фазового центра в направлении вертикальной оси, то эта величина, определяемая в большинстве случаев фирмой-изготовителем приемной аппаратуры, вносится в паспорт приемника, причем разработчики стремятся к тому, чтобы упомянутая величина была одинаковой для всех приемников одного типа. Фирмы-изготовители геодезических спутниковых приемников гарантируют при этом точность нахождения и стабильность положения фазового центра на уровне единиц миллиметров.

В литературе имеются сведения об исследованиях вариаций положения фазового центра, которые для спутниковых приемников более ранних конструкций оцениваются величинами от 1 до 2 см. Применительно к современным приемникам с микрополосковыми антеннами отмеченные вариации, как правило, не превышают нескольких миллиметров.

#### ***4.4.3. Ошибки, связанные с влиянием нестабильности аппаратурных временных задержек и внутренних шумов приемника***

Наряду с рассмотренными выше источниками ошибок возникает также необходимость учета погрешности измерений, обусловленной изменениями во времени прохождения электрических сигналов в аппаратуре потребителя. Влияниям такого рода подвержены, в частности, получившие в последние годы наибольшее распространение многоканальные GPS и ГЛОНАСС-приемники, в которых для прохождения сигналов от различных спутников представляется отдельный, реально существующий канал. Временные задержки в упомянутых каналах могут заметно различаться, что может приводить к появлению дополнительных ошибок в результатах измерений.

Для борьбы с отмеченным влиянием фирмы-изготовители принимают меры по калибровке и компенсации задержек в трактах приемной аппаратуры потребителя. С этой целью в некоторых типах приемников вводится специальный контрольный канал, позволяющий оперативно оценивать расхождения в задержках, возникающих в различных рабочих каналах. Весь комплекс предпринимаемых мер позволяет свести остаточное влияние, обусловленное такого рода источниками ошибок, до величины, исчисляемой несколькими миллиметрами. В дополнение к вышеизложенному следует заметить, что при использовании дифференциальных методов измерений отмеченное влияние может быть исключено практически полностью.

При прохождении сигналов по электрическим цепям приемника наблюдается не только их задержка во времени, но и воздействие на них внутренних шумов приемника. Последний фактор имеет важное практическое значение, так как уровень внутренних шумов определяет разрешающую способность используемых методов измерений. В частности, применительно к GPS-измерениям из-за влияния отмеченного фактора потенциальная точность ограничивается величиной равной около 1 % от используемой длины волны, что для C/A-кода соответствует 3 м, для P-кода — 30 см, а для фазовых измерений, относящихся к несущим колебаниям, — около 2 мм. Наиболее эффективная мера ослабления такого рода влияний подразумевает использование новой малозумящей элементной базы. В создаваемых в настоящее время приемниках нового поколения, использующих такую малозумящую элементную базу, удастся повысить разрешающую способность примерно на порядок.

#### 4.5. Геометрический фактор

Одна из характерных для спутниковых систем особенностей определения местоположения интересующих нас точек на основе использования пространственной линейной засечки состоит в том, что результирующая точность координатных определений зависит не только от точности выполняемых дальномерных измерений, но и от геометрии расположения наблюдаемых спутников. Для иллюстрации механизма понижения точности из-за геометрии расположения участвующих в изменениях спутников рассмотрим приведенный на рис. 4.4 и рис. 4.5 пример двухмерного определения местоположения интересующего нас пункта  $P$  при различных удалениях спутников друг от друга.

Если измеряемые до спутников  $S_1$  и  $S_2$  расстояния  $p_1$  и  $p_2$  измеряются с погрешностью  $m_1$  и  $m_2$ , то при использовании метода линейной засечки местоположение определяемого пункта  $P$  будет находить-

ся в пределах показанной на рис. 4.4 области, получившей название эллипса ошибок. В случае взаимно перпендикулярных направлений на наблюдаемые спутники упомянутый эллипс деформируется в окружность (см. рис. 4.5).

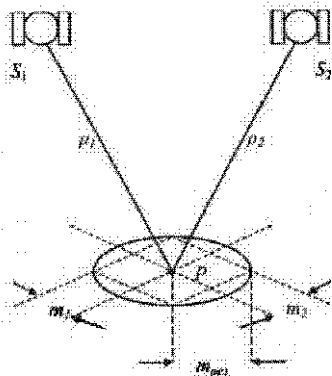


Рис. 4.4. Геометрическая интерпретация эллипса ошибок

В этом случае достигается минимальное влияние геометрии расположения спутников на точность производимых определений. Если же угол между направлениями приближается к  $0^\circ$  или к  $180^\circ$ , то данный эллипс становится весьма вытянутым. Погрешность определения координат определяемого пункта существенно возрастает.

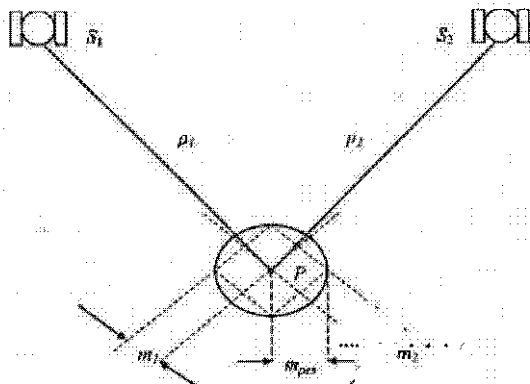


Рис. 4.5. Деформация эллипса ошибок из-за взаимного положения спутников

Применительно к характерным для спутниковых систем трехмерным измерениям эллипс ошибок переходит в двухосный эллипсоид.

Параметр, оценивающий возрастание погрешности измерений из-за геометрии расположения спутников, получил название геометрического фактора, который в современных публикациях принято

обозначать аббревиатурой DOP (Delution of Precision — понижение точности). Этот параметр используется как связующее звено между результирующей точностью позиционирования и точностью измерений расстояний до спутников:

$$m_{\text{рез}} = \text{DOP} m_0 \quad (4.28)$$

где  $m_{\text{рез}}$  — ср. кв. ошибка определения местоположения пункта;  $m_0$  — ср. кв. ошибка дальномерных измерений.

В зависимости от того, какие параметры должны быть определены при решении поставленной задачи, используют различные модифицированные понятия DOP. Наиболее универсальным показателем при этом является параметр GDOP (геометрический фактор понижения точности с учетом погрешности определения времени), характеризующий точность трехмерного позиционирования и времени:

$$\text{GDOP} = \frac{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2 + m_t^2}}{m} \quad (4.29)$$

где  $m_x, m_y, m_z$  — ср. кв. ошибки определения координат по направлениям на север, на восток и по высоте;  $m_t$  — ср. кв. ошибка определения времени;  $c$  — скорость электромагнитных волн.

Наряду с GDOP используются и такие показатели, как PDOP (фактор, учитывающий понижение точности трехмерного позиционирования без учета погрешности определения времени), HDOP (аналогичный фактор, но только для двухмерного позиционирования в горизонтальной плоскости), VDOP (фактор, характеризующий понижение точности в вертикальном направлении) и др.

Величину геометрического фактора часто увязывают с объемом многогранной фигуры, вершины которой совмещают с местоположениями спутников и пункта наблюдения. При этом установлено, чем больше объем этой фигуры, тем слабее проявляется влияние геометрии расположения спутников на результирующую точность позиционирования. По мере взаимного сближения спутников этот объем уменьшается, а влияние геометрического фактора возрастает.

Предрасчет используемого значения геометрического фактора может быть произведен перед началом полевых спутниковых измерений на основе содержащейся в альманахе информации о расположении спутников на соответствующий момент времени и приближенного знания координат пункта наблюдения. На основе такой информации с помощью ЭВМ может быть построен график изменения того или иного геометрического фактора с течением времени, который характерен для интересующего нас пункта наблюдений. На рис. 4.6 приведен пример построения такого графика.

Москва 56°00'N ЗГОПР 150m Time: GMT+D3.00  
 Date: 10/07/95 Window: UUUU ~ 24.00 Cut-off angle: 15° Almanac from: 05/13/96

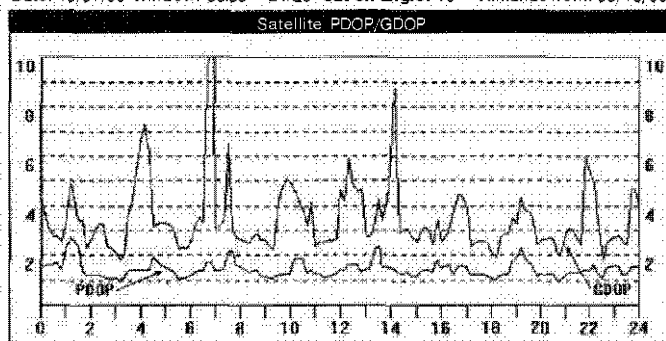


Рис. 4.6. Графики суточных изменений GDOP и PDOP на 10.07.95 для пункта, расположенного в г. Москве (по альманаху от 19.05.96 г.; угол ограничения по высоте спутника над горизонтом  $\sim 15^\circ$ )

Закономерности изменения приведенных на рис. 4.6 графиков свидетельствуют о том, что фактор GDOP в сравнении с PDOP более чувствителен к изменениям точности GPS-измерений от геометрии расположения спутников. С учетом этого величина GDOP чаще всего используется как критерий возможности получения высокой точности GPS-измерений в зависимости от геометрии расположения спутников. В качестве примера заметим, что фирма Leica (Швейцария) не рекомендует проводить высокоточные спутниковые геодезические измерения при значениях GDOP более 8. Такие неблагоприятные периоды GPS-наблюдений на графиках (см. рис. 4.6) соответствуют для выбранного пункта и даты измерений интервалам времени суток между 6 и 7 часами утром, а также около 14 часов днем. Если же в отмеченные неблагоприятные периоды при GDOP больше 8 наблюдения все же производились, то на стадии обработки они не будут приниматься в расчет используемыми при этом обрабатывающими программами.

На основе обобщения приведенной выше информации может быть сделано заключение о том, что наиболее эффективным методом ослабления влияния геометрического фактора на точность GPS позиционирования является выбор наиболее благоприятных периодов наблюдений, который производится при составлении расписаний GPS-измерений на стадии планирования спутниковых наблюдений.

#### 4.6. Причины и методы искусственного занижения точности GPS-измерений

Разработанная по заказу Министерства обороны США система GPS в своем первоначальном предназначении была ориентирована на удовлетворение запросов военных потребителей. При этом предполагалось, что доступ к использованию всех потенциальных возможностей рассматриваемой системы со стороны других несанкционированных (прежде всего, гражданских) потребителей будет ограниченным. С учетом этого были созданы две различные службы сервисного обслуживания: служба точного позиционирования (PPS) для санкционированных (главным образом, военных) пользователей и служба стандартного позиционирования (SPS), ориентированная на обслуживание потребителей, не имеющих официального допуска к системе GPS. Отмеченное разделение подразумевает, прежде всего, возможность реализации различных уровней точности при работе приемной GPS-аппаратуры в навигационном режиме (т.е. в режиме использования одиночно работающих приемников). Осуществление двух различных уровней точности производится за счет введения двух способов ограничений. Первый из них — это избирательный доступ (SA), а второй — дополнительная зашифровка P-кода, получившая название «антимистификация» (A-S).

Избирательный доступ (SA) включает в себя две формы воздействия на результаты спутниковых измерений:

- добавление псевдослучайного сигнала к показаниям спутниковых часов или их систематическая дестабилизация по известной для санкционированных потребителей закономерности;

- загробление передаваемых со спутника значений эфемерид, т.е. его текущих местоположений.

Перечисленные меры «искусственного зашумления», обусловленные действием SA, существенно влияют на точность определения мгновенных значений псевдодалностей. По имеющимся в литературе данным за счет воздействия SA погрешность определения псевдодалностей на основе использования C/A-кода возрастает с 40 до 100 м. Что касается характерных для геодезических спутниковых измерений дифференциальных методов, то влияние SA на точность получаемых результатов оказывается весьма слабым. Это обусловлено тем, что вводимые в показания спутниковых часов искажения практически полностью исключаются за счет использования при обработке вторых разностей. Загробления значений эфемерид воспринимаются как повышенная погрешность их знания на момент выполнения спутниковых измерений, причем при дифферен-

специальных методах это влияние оценивается относительной ошибкой (см. подраздел 2.2), которая даже при погрешности знания эфемерид в 100 м приводит к погрешности определения базисных линий на земной поверхности на уровне 5 мм/км. Если в процессе обработки использовать апостериорные методы получения эфемерид (см. подраздел 4.2), то сравнительно легко устраняется и такая небольшая погрешность. Ко всему вышеизложенному следует добавить, что начиная с 2000 г. «искусственное зашумление» исключено из режима работы системы GPS.

Второй способ (A-S), базирующийся на дополнительной зашифровке P-кода (т. е. на использовании защищенного P-кода) приводит не только к невозможности выполнения несанкционированными потребителями псевдодалномерных измерений с применением P-кода, но и вызывает существенные затруднения, связанные с захватом радиосигналов от соответствующего спутника на частоте L2. В результате этого возникают дополнительные затруднения при разрешении характерных для фазовых измерений неоднозначностей, а также при учете влияния ионосферы за счет использования двух несущих частот.

Для преодоления отмеченных трудностей, связанных с селекцией сигналов от наблюдаемых спутников на частоте L2, в современных приемниках применяют так называемый метод квадратирувания, базирующийся на применении для упомянутого выше захвата очищенных от модуляции несущих колебаний. Однако захват сигналов оказывается при этом не таким надежным, как при использовании P-кода. Продолжающийся поиск решения такой задачи привел к разработке специального метода захвата сигнала на частоте L2, который не требует расшифровки в приемной аппаратуре потребителя P-кода. Он основан на том, что при захвате с помощью P-кода сигнала на частоте L1 от наблюдаемого спутника удастся выделить нерасшифрованный сигнал P-кода (а точнее Y-кода), который может быть применен в качестве опорного при захвате сигнала на второй несущей частоте L2. Наряду с описанными выше приемами устранение проблемы зашифровки P-кода решается отдельными фирмами-изготовителями на легитимной основе посредством получения у Министерства обороны США права доступа к P-коду. При этом такие операции, как захват радиосигналов на частоте L2 и проведение псевдодалномерных измерений с применением P-кода, полностью отпадают.

- На основе вышеизложенного представляется возможным сделать вывод о том, что предпринимаемые Министерством обороны США меры ограничения в использовании GPS несанкционирован-



ными потребителями затрагивают, прежде всего, интересы того круга потребителей, которые применяют спутниковую GPS-аппаратуру в навигационных целях, а также при разработке достаточно точных кинематических методов. Что касается статических методов, широко используемых при решении геодезических задач, то рассмотренные выше способы искусственного занижения точности GPS-измерений преодолеваются достаточно эффективно без существенных потерь в точности.

## Раздел 5. Проектирование, организация и предварительная обработка спутниковых измерений

Вопросы практического использования спутниковых геодезических приемников с целью решения различных геодезических задач представляют наибольший интерес для геодезистов-производственников. При этом особое внимание уделяется таким вопросам, как точность и надежность определения координат при отсутствии взаимной видимости между пунктами; влияние внешних условий (наружных знаков, растительности, зданий); редуцирование полученных координат в принятые у нас в стране координатные системы; производительность и экономическая эффективность новых технических средств. Повышение эффективности современных спутниковых технологий неразрывно связано с рациональной организацией всего комплекса спутниковых измерений, от планирования до получения каталогов координат и баз данных.

Поскольку методы организации спутниковых измерений существенно отличаются от традиционных геодезических методов на всех этапах их проведения, то в настоящем разделе изложены основные специфические особенности проектирования, организации и проведения полевых работ, базирующихся на использовании спутниковых технологий.

В процессе проектирования возникает необходимость обоснования принципов построения геодезических сетей на заданные регионы на основе применений спутниковых технологий, что вызывает необходимость их краткого описания. При этом нестандартные требования предъявляются к выбору мест расположения пунктов, на которых, прежде всего, должны обеспечиваться благоприятные условия наблюдения спутников. В то же время обеспечение взаимной видимости между пунктами не имеет существенного значения. С учетом того, что спутниковые измерения позволяют получать как плановые, так и высотные координаты, специфические требования предъявляются к конструкции центров геодезических пунктов, которые должны обеспечивать необходимую устойчивость по всем трем координатным направлениям, их закреплению и внешнему оформлению на местности. Вместе с тем при проектировании приходится учитывать и целый ряд других специфических особенностей, которые могут приводить к нарушению нормального приема радиосигналов от спутников.

При организации и проведении спутниковых наблюдений на пунктах одним из основных требований является обеспечение одновременности работы всех приемников, участвующих в одном сеансе наблюдений. Накопленный опыт работы со спутниковой аппаратурой свидетельствует также о том, что к немаловажным факторам следует отнести легкость доступа к пункту наблюдений, удобство расположения аппаратуры на пункте, обеспечение необходимой точности центрирования антенного блока и надежности его закрепления, обеспечение непрерывности электропитания, ведение полевого журнала.

В процессе проведения наблюдений спутниковый геодезический приемник не только осуществляет регистрацию измеряемых величин и другой вспомогательной информации, но и производит целый комплекс вычислений. Такие вычисления выполняются в автоматическом режиме по заранее введенной в приемник программе, в результате чего оператор, как правило, не может активно воздействовать на ход таких вычислений. Тем не менее, обслуживающий персонал должен иметь четкое представление о сущности таких вычислений, а также об информации, которая накапливается в устройствах памяти на выходе приемника, с тем, чтобы иметь хотя бы общее представление о качестве такой информации.

### **5.1. Специфика проектирования и организации спутниковых измерений**

Исходным моментом при проектировании геодезических сетей, создаваемых спутниковыми методами, является разработка общей стратегии наблюдений. Основные положения стратегии обычно излагаются в соответствующих концепциях, предшествующих разработке технического проекта. К таким положениям могут быть отнесены:

- 1) общие принципы построения сети, базирующейся на спутниковых измерениях;
- 2) обоснование выбора того или иного метода спутниковых наблюдений и последующих вычислений;
- 3) формулировка предпосылок, связанных с выбором всего комплекса технических средств и условий наблюдений;
- 4) технико-экономическое обоснование выбранных спутниковых технологий.

Создаваемые на основе спутниковых измерений геодезические сети принято классифицировать по размерам охватываемой ими территории. Исходя из этого, различают глобальные, континентальные, региональные и локальные сети. Примером наиболее крупных сетей, к которым могут быть отнесены глобальные и континентальные сети, следует назвать сети типа IGS (Международная геодинамическая сеть, охваты-

вающая весь земной шар) и EUREF (Европейский референсный каркас). В нашей стране за последние годы разработана концепция перевода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых определений [32], в соответствии с которой предусмотрено построение государственных геодезических сетей различного класса точности, охватывающих всю территорию России. Применительно к таким крупным сетям разрабатываются индивидуальные подходы, учитывающие предъявляемые к ним специфические требования.

Из приведенного выше перечня наиболее массовое распространение получили региональные и локальные сети, для которых разработаны рациональные методы их построения. С учетом этого представляет интерес анализ основных концептуальных подходов, используемых при разработке технических проектов для региональных и локальных сетей.

Прежде всего, следует отметить, что широко используемые в геодезии спутниковые координатные определения базируются на применении дифференциальных методов. Такие методы позволяют определять не абсолютные значения координат, а только их разности между интересующими нас пунктами. Вместе с тем конечными результатами создаваемой сети должны быть не только приращения, но и полные значения координат всех пунктов в той или иной координатной системе. Исходя из этого, возникает необходимость иметь в составе сети хотя бы один опорный пункт с заранее известными полными значениями всех трех координат. Такой пункт принято называть референсным. Оптимальным вариантом является наличие в составе сети трех референсных пунктов.

При использовании современных спутниковых систем местопределения предпочтение отдают представлению координат референсного пункта в геоцентрической декартовой системе координат  $(X, Y, Z)$ . От точности знания этих координат зависит положение всей создаваемой сети в более общей координатной системе. Точность координат референсного пункта может оказывать влияние на масштаб геометрических построений в создаваемой сети.

Весьма простые математические расчеты свидетельствуют о том, что относительная погрешность базисных линий, вычисляемых на основе спутниковых измерений, связана с погрешностью определения измеряемых расстояний до спутников следующим приближенным соотношением:

$$\frac{\delta p}{p} \sim \frac{\delta D}{D} \quad (5.1)$$

где  $p$  и  $\delta p$  - расстояние от приемника до спутника и погрешность его определения;  $D$  и  $\delta D$  — длина базисной линии между двумя пункта-

ми наблюдений на земной поверхности и соответствующая ей погрешность.

Как уже отмечалось ранее (см. подраздел 2.1), погрешность определения расстояний до спутников на основе использования общедоступного C/A-кода может достигать 100 м, что соответствует отношению  $S_p/p = 2 \cdot 10^{-6}$ .

При наличии двух и более референдных пунктов такая же погрешность будет свойственна и масштабу создаваемой сети, что, во многих случаях, оказывается недопустимым. С учетом этого абсолютные значения координат референдного пункта стремятся получать не на основе навигационного режима работы приемника, установленного на референдном пункте, а на базе совместных дифференциальных измерений до пунктов, входящих в современные глобальные или континентальные опорные сети (такие, как IGS или EUREF). При этом может быть обеспечена точность абсолютных значений координат референдного пункта на дециметровом уровне.

Существуют следующие режимы работ спутниковых геодезических приемников:

- статический режим (Static);
- ускоренный статический режим (Rapid Static);
- режим измерений с возвращением (Reoccupation);
- режим измерений «стою-иду» (Stop & go);
- кинематический режим измерений (Kinematic);
- кинематический режим измерений в полете (Kinematic 2);
- навигационный режим.

Статический режим (Static) подразумевает выполнение дифференциальных спутниковых наблюдений, по крайней мере, между двумя неподвижными приемниками. Используя программное обеспечение фирмы-изготовителя, можно произвести обработку как псевдодальностей, так и результатов фазовых измерений несущих колебаний. Статический режим является идеальным видом измерений на больших расстояниях при наблюдениях четырех и более спутников. Для реализации этого режима требуется порядка одного часа наблюдений.

При определенных условиях наблюдений показатели статического режима могут быть значительно улучшены. На коротких линиях и при наблюдениях, по крайней мере, четырех или пяти спутников с хорошим геометрическим фактором можно получить результаты на сантиметровом уровне точности при продолжительности наблюдений всего в течение нескольких минут. Скорость измерений и увеличение производительности зависят от применяемых алгоритмов обработки, реализованных в программном обеспечении SKI. Эти возможности реализуются при использовании ускоренного статического режима (Rapid Static).

Режим измерений с возвращением (Reoccupation) также является статическим, но при своей реализации требует, чтобы измерения на пункте выполнялись более, чем один сеанс. Все данные, которые собираются на таком пункте в один и тот же день или в разные дни, могут быть объединены вместе для получения одного решения при камеральной обработке. Режим измерений с возвращением является идеальным режимом работы в тех случаях, когда наблюдается небольшое количество спутников. Оператор может наблюдать на точке стояния в течение от 5 до 10 минут, скажем, три спутника, а затем вернуться на ту же точку позже в тот же или в другой день в другое время и отнаблюдать еще три спутника. Все данные, которые собираются, будут объединены и обработаны как данные, полученные в этой точке от шести спутников. Режим «реокупация» оказывается полезным также в случаях, когда не удастся разрешить неоднозначность с данными, собранными при первом сеансе наблюдений на пункте. Оператору необходимо только повторить измерения на пункте, а затем объединить все данные.

Режимы измерений «стою-иду» (Stop & go) и кинематический (Kinematic) позволяют быстро отнаблюдать большое количество точек, но требуют, чтобы приемник удерживал захват спутников в течение всего времени перемещения между точками. На первой точке необходимо находиться до тех пор, пока не будет собрано достаточное количество измерений, чтобы разрешить неоднозначность (это называется периодом инициализации). После инициализации приемник может перемещаться между точками до тех пор, пока поддерживается захват наблюдаемых спутников. Если захват спутников нарушен, то оператор должен снова оставаться в стационарном положении до тех пор, пока снова не будет собрано достаточного для разрешения неоднозначности количества данных.

Режим измерений «стою-иду» (Stop & go) является идеальным для малых площадей, на которых точки наблюдений располагаются рядом друг с другом и на которых отсутствуют препятствия для прохождения радиосигналов от спутников.

Кинематический режим измерений (Kinematic) используется при определении траектории движущегося приемника относительно другого неподвижного сенсора. Местоположения точек вычисляются с заранее установленными интервалами времени. Кинематический режим является идеальным при отслеживании траектории движущихся транспортных средств (например, при профилировании дорог), движущихся судов, при определении местоположений вынесенных в открытое море платформ и при позиционировании летящих самолетов.

Геодезические спутниковые приемники могут использоваться также при навигационном позиционировании. Как правило, индичи-

руемое местоположение точки в координатной системе WGS-84 определяется с точностью около 40 м. Если используются поправки, передаваемые по каналу связи с помощью RTSM, то тогда навигационная точность может быть улучшена до 2-5 м.

При создании и реконструкции геодезических сетей с использованием спутниковых приемников в большинстве публикаций рекомендованы следующие методы измерений:

- лучевой метод — определяемые пункты сети координируются с одного из опорных пунктов;

- сетевой метод — измерения производятся на каждой линии или на каждом пункте сети.

К недостаткам лучевого метода построения сети следует отнести недостаточную надежность критериев оценки точности определяемых координат. В этой связи заметим, что на практике иногда применительно к таким построениям применяют оценки, базирующиеся на анализе замкнутых геометрических построений. Такие оценки не всегда оказываются корректными. Так, например, в треугольнике, образованном пунктами, на которых производились одновременные спутниковые наблюдения, невязки разностей координат между пунктами, по определению, независимо от потенциальных точностных возможностей применяемых спутниковых методов должны быть равными нулю. Если же в отдельных случаях при вычислениях и наблюдаются невязки, отличающиеся от нулевых, то эти отличия обусловлены, как правило, неблагоприятными условиями наблюдений спутников и несовершенством методов обработки результатов наблюдений. Такие критерии недостаточно объективно отражают реальную точность координат определяемых пунктов.

Реальным контролем при лучевом методе является независимый контроль измерений на определяемых пунктах, например, другими средствами измерений, от других исходных пунктов, между определяемыми пунктами и др. Примером использования такого метода является реконструкция сети полигонометрии 2 разряда в г. Нижнем Новгороде, когда каждый определяемый пункт хода непосредственно был связан с предыдущим и последующим пунктами аналогично трехштанговой системе в полигонометрии.

Критерии точности и надежности проектируемой сети повышаются в случае организации сетевых измерений по первому или второму способу — выполнения измерений на каждой линии или на каждом пункте сети. Однако использование одного независимого референсного пункта обуславливает необходимость дополнительных контролей независимыми методами, которые по точности могут оказаться недостаточными.

Существенно повышаются критерии точности и надежности проектируемой сети в случае организации сетевых или повторных измерений и при использовании в сети не одного, а нескольких референсных пунктов. Однако непосредственное включение в сеть нескольких независимых референсных пунктов обуславливает необходимость того, чтобы разность координат между такими референсными пунктами была по своей точности выше той, которая характерна для разности координат определяемых пунктов, что равносильно требованию, чтобы базисные линии, соединяющие референсные пункты, были более точными, чем входящие в состав сети определяемые линии между рядовыми пунктами. Сама постановка такого требования является вполне правомерной, но реализовать его на практике чрезвычайно сложно.

Для преодоления отмеченных трудностей найдено компромиссное решение, сводящееся к построению двухранговой (а в общем случае и многогранговой) сети. При этом на первом этапе выбирается только один исходный референсный пункт, вокруг которого по усиленной программе наблюдений создается несколько взаимосвязанных между собой вторичных референсных пунктов (так называемая каркасная сеть). На втором и последующих этапах построения такой сети определяются все остальные пункты, причем в каждом сеансе наблюдений спутниковые приемники устанавливаются как на нескольких рядовых пунктах сети (их количество зависит от числа имеющихся в распоряжении приемников), так и не менее чем на двух взаимосвязанных референсных пунктах.

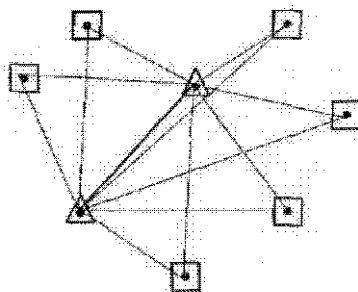
Рекомендуемые схемы геодезических сетей для каждого метода измерений приведены на рис. 5.1, 5.2, 5.3 и 5.4. Следует отметить, что максимальная точность геодезических построений достигается только при сетевом методе измерений. В зависимости от требуемой точности создаваемой сети применяют один из следующих режимов измерений:

- статический режим (Static);
- ускоренный статический режим (Rapid Static);
- режим измерений с возвращением (Reoccupation).

Режимы измерений «стою-иду» (Stop & go) и кинематический (Kinematic) для измерений в геодезических сетях не рекомендуются и могут применяться только при топографической съемке.

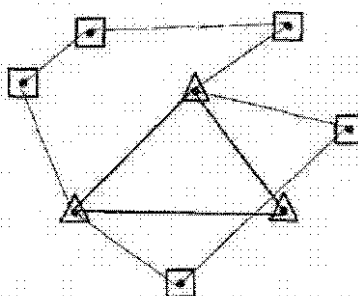
Кроме геометрических параметров построения сети и рекомендуемых методов выполнения измерений существуют и технологические особенности создания спутниковых геодезических сетей. Поскольку спутниковые геодезические приемники являются одновременно и дальномерами с паспортной точностью  $5-10 \text{ мм} + 1-5 \text{ мм} \cdot Z$ , и системами определения координат, точность которых фирмами-изготовителя





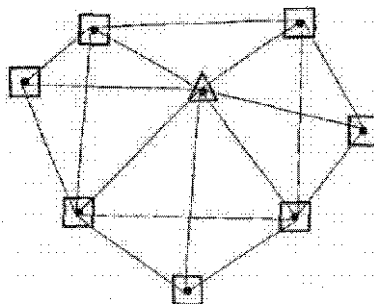
$\triangle$  Исходные (референсные) пункты  
 $\square$  Определяемые пункты сети

Рис. 5.1. Лучевой метод измерений с контролем (1)



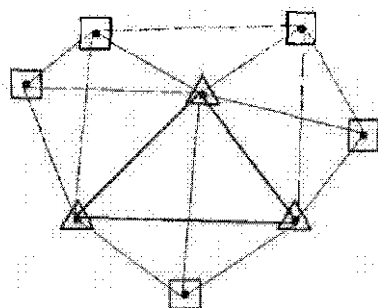
$\triangle$  Исходные (референсные) пункты  
 $\square$  Определяемые пункты сети

Рис. 5.2. Лучевой метод измерений с контролем (2)



$\triangle$  Исходный (референсный) пункт  
 $\square$  Определяемые пункты сети

Рис. 5.3. Сетевой метод измерений (одноранговая сеть)



$\square$  Исходные (референсные) пункты

$\triangle$  Определяемые пункты сети

Рис. 5.4. Сетевой метод измерений (многографовая сеть)

ми не регламентируется, то в зависимости от технологии измерений может быть получена различная точность сети. На практике нашли применение две основные технологии [14, 82]:

- повторных измерений на пунктах, при которой задается количество обязательных повторных измерений на каждом пункте сети;
- обязательного измерения каждой линии сети.

Минимальное количество сеансов наблюдений  $N$  для сети с количеством пунктов  $S$  при использовании  $R$  приемников при количестве повторных измерений  $M$  и количестве совместно используемых приемников в предыдущем и последующем сеансах  $O$  определяется для первой технологии по формуле:

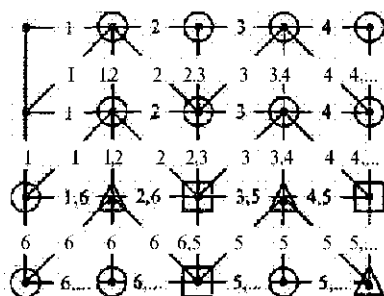
$$N = \frac{M \cdot S}{R}, \quad (5.2)$$

а для второй технологии по формуле:

$$N = \frac{S - O}{R - O'} \quad (5.3)$$

Следует отметить, что первая технология не в полном объеме позволяет реализовать наиболее точный сетевой метод построения сети, поэтому рассмотрим более подробно вторую технологию. На рис. 5.4 приведена схема, поясняющая порядок измерений и перестановок станций в этой технологии. Так для фрагмента сети из 20 пунктов количество сеансов измерений, определенное по формуле (5.3) при трех совместно используемых приемниках в предыдущем и последующем сеансах равно:

$$N = \frac{S - O}{R - O'} = \frac{20 - 3}{6 - 3} = 5,67.$$



- Четырехкратные измерения на пункте
- ⊗ Трехкратные измерения на пункте
- ⊙ Двукратные измерения на пункте
- Однократные измерения на пункте

#### 3.4 Номера сеансов измерений на пункте

Рис. 5.5. Схема измерений по второй сетевой технологии

Фактически требуется 6 сеансов (без учета внешних ограничений), при этом на 2-х пунктах будут выполнены однократные измерения, на 12-ти пунктах двукратные измерения, на 3-х пунктах трехкратные измерения и на 3-х пунктах четырехкратные измерения. Желательно (но необязательно), чтобы пункты с повторными наблюдениями располагались в сети равномерно.

Накопленный опыт проектирования и создания сетей, базирующихся на спутниковых технологиях, свидетельствует о том, что на практике могут возникать ситуации, существенно отличающиеся от стандартных рекомендаций. С учетом этого ниже приведены основанные на практическом опыте обобщенные рекомендации:

- с целью выявления грубых промахов на каждом определяемом пункте наблюдения следует производить дважды при различных условиях отслеживания спутников;

- одновременные наблюдения желательно предусматривать на соседних пунктах, так как разрешение неоднозначностей на коротких расстояниях производится более уверенно;

для региональных и локальных сетей средних размеров хорошим компромиссом является использование от 4 до 10 приемников, что позволяет оптимально сочетать организационные возможности, скорость выполнения работ и надежность измерений;

для проверки получаемой точности некоторое число базисных линий желательно измерять дважды.

Безусловно, этот перечень не исключает неукоснительное выполнение требования по обеспечению благоприятных условий наблюдений спутников на каждом из пунктов.

Паряду с перечисленными выше практическими рекомендациями для процесса проектирования сети разработаны следующие предписания общего характера, которые являлись основополагающими при разработке технических проектов как в России, так и в зарубежных странах (Германия, США, Канада и др.):

- для обеспечения высокой точности на каждой станции должен быть предусмотрен достаточно продолжительный период наблюдений, конкретная продолжительность которого зависит от взаимной удаленности пунктов и требований по точности измерений;

- с целью повышения экономичности следует минимизировать количество повторных сеансов, а также время переезда между пунктами;

- для повышения надежности каждый пункт должен определяться на основе двух полностью независимых измерений с использованием привязки к различным взаимосвязанным референчным пунктам, причем повторные измерения желательно производить с переустановкой антенны приемника и при изменившемся положении спутников.

## 5.2. Предполевое планирование в камеральных условиях

Предполевое планирование включает составление технического и рабочего проекта. Проектирование ведется как традиционным способом с использованием топографических карт, каталогов и нормативно-технической литературы, определяющей требования по точности, плотности и времени выполнения работ, так и с использованием входящего в состав спутникового приемника программного комплекса. Одной из основных стадий, предшествующих составлению технического проекта, является сбор и обобщение всей той необходимой информации об объекте, которая может потребоваться в процессе работы над проектом. Не останавливаясь на тех моментах, которые характерны для традиционных методов проектирования, выделим только те отличительные особенности, которые свойственны спутниковым технологиям построения сетей. Такие особенности проявляются на следующих стадиях:

- при составлении схемы проектируемой сети;
  - при решении вопросов совмещения с существующими на объекте пунктами, координаты которых определены традиционными методами;
  - при выборе методов закрепления точек на местности;
- при проведении полевых рекогносцировочных работ;
  - при составлении расписания наблюдений.

Предварительная схема проектируемой сети, составляемая на начальной стадии разработки проекта, наносится на топографическую карту соответствующего масштаба. При ее составлении, в большинстве случаев, руководствуются теми принципами, которые были описаны в предыдущем разделе. При этом так же, как и при традиционных методах проектирования, стремятся к тому, чтобы плотность сети соответствовала требованиям технического задания и была по возможности равномерной, а пункты такой сети образовывали правильные геометрические построения. Вместе с тем следует отметить, что для векторных трехмерных построений, которые свойственны спутниковым технологиям, геометрия создаваемой сети имеет меньшее значение.

Следует стремиться к максимальному совмещению пунктов проектируемой сети с плановыми и высотными пунктами ранее созданных сетей. Это позволит решить вопросы о преемственности существующих и создаваемых сетей и систем координат, а также нахождения параметров перехода между геоцентрической системой координат и принятой в топографо-геодезическом производстве местной координатной системой. Совмещение пунктов обуславливает, в большинстве случаев, и существенное сокращение затрат, связанных с закладкой новых геодезических центров. Если же необходимость закладки возникает, то условия могут существенно отличаться от рекомендуемых действующими нормативными документами.

Так, например, при развитии локальных сетей, в качестве референсных пунктов, на которых устанавливаются постоянно работающие спутниковые приемники, могут использоваться рабочие центры без требований к длительной их сохранности. Однако при создании региональных сетей, а также при решении геодинамических задач, предусматривающих выполнение повторных высокоточных измерений, предъявляются весьма жесткие требования к длительной сохранности не только планового, но и высотного положения центров. В связи с этим в процессе разработки конкретного технического проекта следует принимать индивидуальные решения о методах закрепления точек на местности, исходя из поставленной задачи.

Основные общие требования к центрам пунктов, которые должны соблюдаться при высокоточных измерениях спутниковыми методами, остаются теми же, что и для традиционных геодезических методов, а именно:

- отыскание закрепленной на местности точки не должно вызывать существенных затруднений;
- закрепленная на конструкции того или иного центра геодезическая марка должна обеспечивать необходимую точность центрирования;

— различные типы центров и их внешнее оформление должны обеспечивать удобство установки над ними соответствующих технических средств, предназначенных как для спутниковых наблюдений, так и для традиционных геодезических измерений.

Ответственным процессом при предъёмочном планировании является проведение обследования и рекогносцировки на местности, которые применительно к спутниковым технологиям имеют целый ряд специфических особенностей.

Как уже отмечалось ранее, при выборе мест расположения пунктов, с которых должны выполняться спутниковые наблюдения, основное внимание уделяется обеспечению благоприятных условий наблюдений спутников. Исходя из этого, не следует размещать пункты внутри тех или иных металлических ограждений, рядом с высокими зданиями, большими и густыми деревьями, а также дру-щими сооружениями, способными экранировать прямое прохождение радиосигналов от спутников. С этой точки зрения наличие на существующих пунктах геодезических наружных знаков в виде деревянных или металлических сигналов и пирамид также является крайне нежелательным.

Во избежание влияния многопутности не рекомендуется размещать пункты вблизи от различного рода отражающих поверхностей. При этом следует учитывать то обстоятельство, что отражения от подстилающей поверхности, расположенной непосредственно под антенной приемника, существенно ослабляются за счет наличия в антенном блоке экранирующих дисков. Поэтому повышенного внимания заслуживают отражающие поверхности в виде вертикальных стен зданий, расположенные в непосредственной близости от установленной на пункте антенны.

Проведенные на местности обследования рекомендуется фиксировать в карточках обследования и рекогносцировочном журнале с обязательным отражением:

- названия пункта и организации, которой он принадлежит;
- описания местоположения;
- ~ приближенных координат и отметки;
- условий подъезда к пункту и возможность доступа к нему (например, в случае расположения пункта на крыше здания);
- специфики установки антенны (или сенсора) спутникового приемника над геодезической маркой (трегер, штатив, выносная мачта и т. д.);
- наличия ориентирных пунктов;
- наличия препятствий над горизонтом при углах возвышения более 10-15°.

Если проектируется использование одного из кинематических режимов работы с использованием тех или иных транспортных средств, то на стадии рекогносцировки на карту обследования наносят маршрут, по которому должен перемещаться движущийся объект с установленным на нем приемником, для обеспечения условий видимости запланированного минимального количества наблюдаемых спутников.

Проектирование работ на объекте с использованием программного комплекса, входящего в комплект спутниковых приемников, позволяет использовать результаты ранее выполненных работ на соседних объектах, организовывать записи для новых объектов, а также уничтожать, копировать, перемещать и переименовывать данные. Для того, чтобы работать в местной системе времени для каждого конкретного объекта, должна быть установлена подходящая временная зона.

Перед началом проектирования необходимо получить информацию о спутниках на проектируемый период выполнения полевых работ — альманах, который включает данные о состоянии спутника, его положении, времени восхождения и нахождения в пределах «окна» наблюдений. Используя эту информацию, специалист может определить лучшие «окна» для полевых измерений, а также лучшее время для наблюдений на пунктах с ограниченной видимостью. В программное обеспечение, как правило, включен некоторый альманах. Он не будет одним из самых новых, но для проектирования работ является вполне достаточным. Информация альманаха автоматически обновляется как только новые данные, получаемые со спутников, передаются в компьютер при очередном сеансе обработки результатов измерений.

Использование программного комплекса при проектировании работ на объекте будет рассмотрено ниже.

Еще одной достаточно важной проблемой, решение которой необходимо предусмотреть на этапе проектирования, является проблема координатных систем.

Как уже отмечалось ранее (см. раздел 3), при использовании спутниковых технологий, базирующихся на GPS, получила распространение геоцентрическая координатная система WGS-84. В то же время при построении геодезических сетей в различных странах (в том числе и в России) широко применяются национальные, региональные и местные геодезические координатные системы, не связанные с WGS-84. Исходя из этого, в техническом проекте должны быть предусмотрены работы по определению параметров перехода между координатными системами и их согласованию (см. подраздел 3.3).

Обобщая изложенную выше информацию, следует отметить, что она наряду с техническим заданием является основным исход-

мым материалом при разработке технического проекта, который, как правило, включает в себя пояснительную записку, графическую и сметную части.

### *5.2.1. Составление технического проекта*

Первым этапом создания технического проекта является получение технического задания на выполнение работ и сбор материалов ранее выполненных геодезических работ. Сбор материалов геодезической обеспеченности производится: в подразделениях, выполнявших ранее геодезические работы на данном объекте, группе изученности мректно-вычислительного бюро (ПВБ), цехе приемки и хранения материалов (ЦПХМ) предприятия, территориальной инспекции Госгеопаздора (ТИГГН), в городских отделах архитектуры (УАГ), маркшейдерских отделах и бюро. При этом собираются:

- материалы обследования на данном объекте по ранее выполненным работам;
- выписки из каталогов координат и высот пунктов на объект работ (выбираются пункты, удовлетворяющие классу создаваемой сети);
- карточки закладки геодезических пунктов;
- выписки из отчетов ранее выполненных геодезических работ (наименование работы, шифр объекта, инвентарный № отчета, год выполнения, наименование организации исполнителя работ, оценка точности работ, каталог пунктов участвовавших в работе, схемы);
- справки о системах координат и высот, применяемых на объекте.

Все собранные материалы систематизируются для предварительного анализа и составления технического проекта.

Вторым этапом создания технического проекта является составление предварительной графической схемы проектируемой сети на топографических картах, масштаб которых должен позволить выдерживать, согласно [27, 29, 45, 46 и др.], линейные и угловые параметры создаваемой сети.

После составления предварительной схемы выбираются пункты существующей геодезической сети для включения их в схему. Для этого на те же карты наносятся существующие пункты геодезической сети соответствующего класса. При нанесении пунктов надо учитывать требования, предъявляемые к пунктам спутниковой сети. Эти требования изложены в [29, 38, 46] и дополнительно будут рассмотрены дальше. На схему наносятся только такие пункты, выбор которых не нарушит геометрических характеристик создаваемой сети.

При проектировании высокоточных спутниковых сетей необходимо предусмотреть включение в общую сеть нивелирных реперов.



Это дает дополнительный эффект по связи высотной и плановой сетей, а также по получению плановых координат пунктов нивелирной сети при создании геодинамических полигонов.

В случае, когда полевые работы по обследованию пунктов и спутниковые измерения планируется проводить одновременно, необходимо учесть тот факт, что если два смежных пункта в сети не найдены, а поиск и обследование резервных пунктов осуществляется навстречу друг другу, то между такими пунктами может получиться очень короткая базисная сторона. Если поиск и обследование смежных пунктов осуществляется в разные стороны, то сторона будет очень длинной. Поэтому, чтобы исключить появление чрезмерно коротких и длинных сторон в сети, которые будут способствовать ухудшению геометрических характеристик сети, следует определять запасные пункты в одном направлении с основным.

Все выбранные пункты анализируются на их пригодность для включения в сеть в качестве основного или резервного. Помимо основных требований, предъявляемых к пунктам геодезической сети и описанных в [27, 45, 58], пункты должны удовлетворять вышеперечисленным требованиям.

Графическая часть проекта выносится на карты с указанием местоположения пунктов, связей при измерениях спутниковыми приемниками и сторон проектируемой сети. Для нанесения графического проекта на карты рекомендуются условные обозначения, приведенные в [59].

В пояснительной записке обязательно должны быть подробно представлены следующие разделы:

- обоснование технического проекта (технические требования, нормативные документы, геодезическая изученность, краткая физико-географическая характеристика объекта работ, проектируемые работы, объемы работ, система координат и высот);
- ранее выполненные работы (наименование пунктов геодезического обоснования, наименование работы, наименование организаций, выполнивших работу, год выполнения, оценка точности, система координат и высот);
- программа выполнения работ с обоснованием выбранной схемы и способа измерений;
- технология выполнения работ с подробным изложением порядка и времени выполнения работ на пунктах;
- график выполнения работ и сдачи готовой продукции;
- методика оценки качества, объективно отражающая реальную точность достигнутых результатов;
- форма представления создаваемой базы данных и сопутствующей графической информации, отвечающей современным требованиям и возможностям.

Поскольку точность взаимного определения пунктов спутниковой сети зависит от удаленности таких пунктов друг от друга, то при проектировании длительности сеанса наблюдений рекомендуется следующая продолжительность наблюдений:

Диапазон измеряемых линий, км	Рекомендуемая продолжи- тельность наблюдений, мин
0,1 - 1,0	10-30
1,1-5,0	30-60
5,1- 10,0	60-90
10,1-30,0	90- 120

Общее время работы на объекте определяется с учетом общего числа сеансов включений на объекте и общего числа приемников.

Следует помнить, что при создании больших сетей целесообразно использовать максимальное число спутниковых приемников. В идеальном случае, когда число приемников совпадает с числом пунктов, участвующих в измерениях, измерения выполняются за один сеанс включений. На практике число сеансов включений в сети зависит от ее конфигурации и числа используемых приемников. Так, например, при сетевом методе создания спутниковой сети минимальное число сеансов TV для сети из 120 пунктов в зависимости от числа приемников будет следующим:

Число приемников	3	3	6	6	6	9	9	9	9	12	12	12
Число пунктов, используемых в двух сеансах	1	2	2	3	4	2	3	4	6	3	4	6
Число сеансов	60	118	30	39	58	17	20	23	38	13	15	19

При организации спутниковых наблюдений в Европейской опорной сети (EUREF) в мае 1989 г. было задействовано около 60 двухчастотных приемников. При построении в 1991 г. опорной сети в Германии (DREF) было использовано 83 двухчастотных приемника. На полевых работах в 1996 г. при реконструкции Московской городской геодезической сети одновременно работало от 12 до 20 двухчастотных приемников. При создании фрагмента спутниковой сети 1 класса (СТС-1) в Волго-Вятском регионе в 1995-1996 гг. использовалось от 6 до 9 двухчастотных приемников.

При создании высокоточной спутниковой сети расстояния между пунктами в треугольниках могут быть достаточно велики — 10 км и более, а спутниковые приемники, находящиеся друг от друга на расстоянии двух и более базисов, имеют еще большее взаимное удаление.

В связи с этим могут возникнуть трудности с обеспечением связи на объекте, так как применяемые при производстве геодезических работ УКВ радиостанции со стандартной дальностью действия не всегда обеспечивают достаточно надежную связь на больших расстояниях.

Во избежание несогласованности при выборе запасного пункта по причине отсутствия связи, а также в связи с тем, что пункт должен быть предварительно подготовлен для спутниковых измерений, необходимо проектировать предварительное обследование и восстановление пунктов с подготовкой их к спутниковым измерениям до начала работ.

### *5.2.2. Составление рабочего проекта*

Перед выездом на полевые работы по созданию высокоточной спутниковой геодезической сети, на основании полученного технического задания исполнитель работ обязан составить рабочий проект и предоставить его на утверждение в установленном порядке (начальник партии, главный инженер экспедиции, начальник ОТК, главный инженер предприятия).

В рабочем проекте подробно освещаются разделы «Проектируемые работы» и «Организация работ», в которых исполнитель описывает исходные данные для выполнения работ, порядок и последовательность их выполнения.

При составлении графической части проекта на карты более крупного масштаба выносят пункты создаваемой спутниковой геодезической сети, выбранные в качестве основных и резервных. На тех же картах выбирают оптимальные пути перемещения между пунктами, на их основе составляют схемы передвижения по объекту с указанием мест и времени встреч для концентрации информации, мест переправ через водные препятствия, схемы радиосвязи.

При помощи входящей в комплект спутниковых приемников программы уточняются графики понижения геометрического фактора на период выполнения работ для каждого пункта. Порядок работы с программой при создании графиков понижения геометрического фактора описан в соответствующих руководствах. На рис. 5.6 представлен график понижения геометрического фактора, поясняющий принцип выбора благоприятных и отбраковки неблагоприятных для измерений интервалов времени.

Так как период обращения спутника вокруг земли составляет около 12 ч, эти графики повторяются с такой же периодичностью. Поэтому графики составляются на период работ из расчета один график на 7-10 дней, в остальные периоды время для наблюдений выбирается интерполированием. В общем случае включение спутниковых прием-

ликов следует проектировать на ночное время, наиболее благоприятное для спутниковых наблюдений. В этом случае светлую часть суток можно использовать для перемещений по объекту работ между измеряемыми пунктами.

Н.Новгород 56° 15'N 43°45'E  
Date: 03/28/95 Window: 10:40-21:00

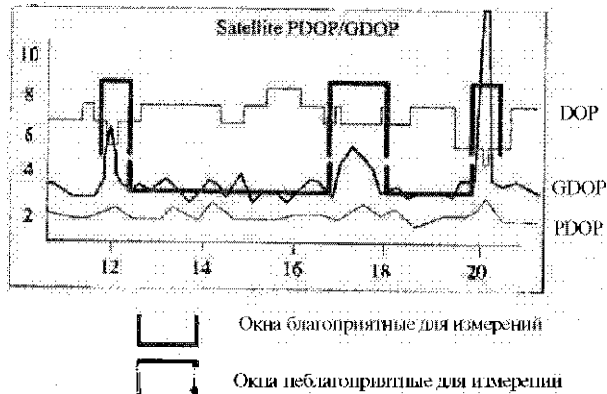


Рис. 5.6. График понижения геометрического фактора

При рабочем проектировании уточняются места установки спутниковых приемников, а при лучевом методе уточняется местоположение опорных и мобильных пунктов.

Выявляются предварительные интервалы времени с хорошими показателями DOP на каждый день наблюдений в течении всего периода. Эти интервалы могут уточняться в процессе работ по мере получения нового альманаха эфемерид (информационный файл, передаваемый совместно со спутниковым сигналом, содержащий эфемериды всех спутников).

При наличии крупномасштабных планов составляют таблицы препятствий на пункты, вокруг которых имеются препятствия для прохождения спутниковых сигналов. Порядок работы при камеральном определении препятствий вокруг пункта следующий.

На крупномасштабном плане (1:5000 — 1:500) при помощи палетки определяется азимут на крайние точки препятствия. Определяя азимут, необходимо учитывать склонение линий километровой сетки и склонение магнитного азимута на период определения угла. Точность измерения угла палеткой 20'. Угол наклона определяют следующим образом. При помощи масштабной линейки и измерителя измеряют расстояние до препятствия с точностью 0,2 мм в масштабе карты, и, используя информационную нагрузку карты (этажность зданий, высота деревьев и т. д.), определяют высоту препятствия. Величину угла вычисляют по формуле:

где  $h$  — высота препятствия,  $S$  — расстояние до препятствия.

Все результаты для каждого пункта, на котором имеются круговые препятствия, заносят в таблицу следующего образца (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Название пункта, класс			п. т. Городской, 2 кл.		
Азимуты и углы наклона препятствий на пункте					
№ п/п	Азимут		Угол наклона		Примечание
1	0°	00'	25°	20'	Дом
2	20	30	25	20	Дом
3	20	30	15	00	—
4	57	10	15	00	-
5	57	10	46	10	Дом
6	92	40	32	30	Дом
7	92	40	15	30	Забор
8	270	50	15	40	Забор
8	270	50	36	20	Дом
9	315	20	38	30	Дом
10	315	20	15	00	
11	0	00	15	00	
Исполнитель: техник Иванов И. И.					

По результатам заполнения таблицы (см. табл. 5.1) составляется абрис препятствий на пункте (рис. 5.7).

Работа на пунктах с препятствиями планируется в нескольких вариантах. Это необходимо для того, чтобы незапланированные перерывы (по метеоусловиям или организационным обстоятельствам) не повлияли на процесс измерений. Для этого составляются индивидуальные для каждого пункта графики понижения геометрического фактора. По этим графикам выбирают время для работы на этих пунктах, а вся работа планируется так, чтобы измерения на них были выполнены в благоприятное время.

Составляется программа наблюдений на конкретных пунктах в конкретные дни. Программа подробно описывает последовательность наблюдений на пунктах выбранных для работы, порядок и маршруты перемещения между пунктами, синхронизирует время включения приемников на пунктах, если измерения выполняются сетевым методом и станции будут включаться одновременно.

Выбираются оптимальные пути перемещения между пунктами. Все проезды между пунктами, обеденные и другие перерывы, предви-

деть которые можно заранее, планируются на периоды неблагоприятных окон наблюдений.

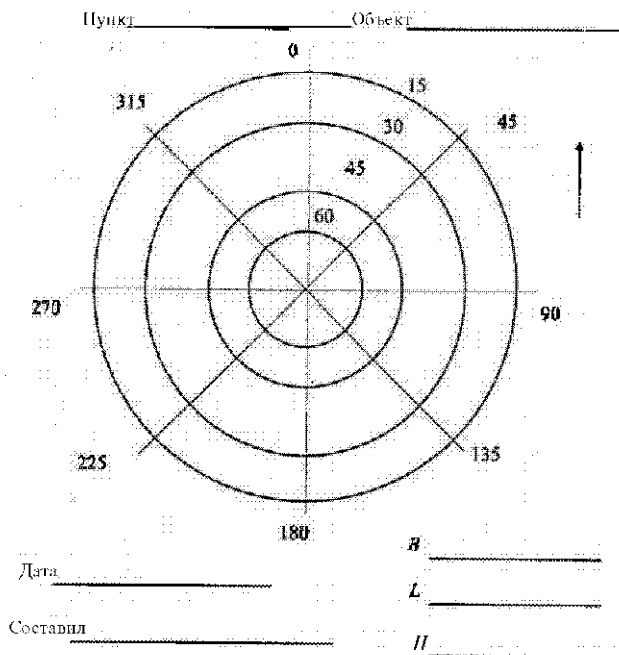


Рис. 5.7. Абрис препятствий на пункте

Графическая часть рабочего проекта составляется на топографических картах в тех же условных знаках, при этом отображаются все проектируемые связи при совместной работе спутниковых приемников, а также (выделенные разным цветом) схемы существующей и проектируемой геодезической сети.

Пояснительная записка к рабочему проекту должна содержать следующие разделы:

- проектируемые работы с указанием всех пунктов, участвующих в наблюдениях, и их связей;
- программа работ на объекте с указанием периода и времени работы на пунктах, маршрутов перемещения между пунктами на объекте;
- распечатанные графики понижения геометрического фактора на период работ и на пункты, имеющие препятствия;
- организация и технология выполнения работы с обоснованием выбора метода измерений и времени работы на пунктах.

### 5.3. Подготовка аппаратуры к полевым измерениям, ее транспортировка и размещение на пункте наблюдения

На стадии подготовки спутниковой приемной аппаратуры к полевым измерениям возникает необходимость в проверке ее работоспособности и в проведении процедуры инициализации, т. е. в задании начальных условий работы.

В большинстве современных геодезических GPS-приемников предусматривается режим самодиагностики, в процессе проведения которого по введенной в приемник программе осуществляется контроль режима работы отдельных узлов. В случае выявления недопустимых отклонений на экране дисплея высвечивается соответствующее сообщение, содержащее характер неисправности и рекомендации по ее устранению (своими силами или посредством обращения в сервисную службу). Некоторые специалисты рекомендуют не ограничиваться проведением самодиагностики, а организовать оперативную калибровку GPS-приемников. Один из методов такой калибровки состоит в подключении двух приемников к одной общей, специально подготовленной антенне, имеющей по крайней мере два выхода с соответствующей развязкой по питанию находящегося в антенне СВЧ-предусилителя. При проведении сеанса наблюдений с использованием указанной схемы вычисляется длина базисной линии, все компоненты которой должны быть равны нулю. Такая процедура, базирующаяся на измерении линии нулевой длины, применяется иногда и при метрологических проверках спутниковых приемников с целью выявления инструментальных источников ошибок.

В процессе выполнения инициализации обращают внимание, прежде всего, на необходимость установления тех начальных данных, которые должны быть одинаковыми во всех синхронно работающих приемниках, которые предусмотрены для участия в одном сеансе наблюдений. К таким данным относятся, в частности, выбор скорости сбора данных, т.е. интервала времени между теми, подвергнутыми компрессии последовательными результатами измерений, которые вносятся в запоминающее устройство приемника. В настоящее время такой интервал устанавливается чаще всего равным 15 с.

Другим параметром, который обычно согласуется перед началом проведения наблюдений, является угол возвышения спутника над горизонтом, с которого начинают выполнять измерения. Такое ограничение по углу возвышения принимается во многих случаях равным  $15^\circ$  (при углах меньших указанной величины измерения не производятся).

В отдельных случаях предусматривается такой режим работы, при котором начало и окончание сеанса наблюдений задаются с помощью входящего в состав приемника таймера. Эти значения также должны

быть установлены одинаковыми во всех приемниках, участвующих в одновременных наблюдениях.

Наряду с установкой начальных данных в процессе подготовки аппаратуры к работе производится проверка наличия в памяти приемника данных об альманахе. Если обнаруживается отсутствие таких данных, то организуется пробный сеанс длительностью не менее 12,5 мин с тем, чтобы загрузить в приемник информацию об альманахе. В противном случае это время должно быть предусмотрено при выполнении первого сеанса наблюдений.

Из других вспомогательных процедур, выполняемых на стадии подготовки аппаратуры к измерениям, следует обратить внимание на необходимость проверки достаточного объема свободной памяти в запоминающем устройстве приемника, а также на состояние зарядки аккумуляторных батарей. Эти компоненты должны обеспечивать бесперебойную работу приемника на протяжении, по крайней мере, одного (а возможно и нескольких) сеансов наблюдений.

При выполнении наиболее точных измерений на линиях большой протяженности иногда на точках стояния приемников предусматривается использование метеорологических приборов с целью определения температуры, давления и влажности воздуха для более строгого учета тропосферных задержек. Такие приборы перед их использованием должны быть поверены и иметь соответствующие аттестационные свидетельства.

Для спутниковой аппаратуры, предназначенной для работы с подвижных объектов в реальном масштабе времени, перечень подготовительных работ существенно расширяется в связи с необходимостью проверки всех тех узлов, которые участвуют в оперативной передаче информации между неподвижной и подвижной станциями. Эти подробности выходят за рамки обсуждаемых здесь проблем.

В процессе подготовки к проведению сеансов спутниковых наблюдений рассматриваются также и вопросы, связанные с доставкой аппаратуры на пункты наблюдений. В этой связи следует отметить, что большинство современных геодезических спутниковых приемников рассчитано на их транспортировку практически любыми транспортными средствами (автомобином, самолетом или водным транспортом). Основное требование, которое предъявляется к транспортным средствам, состоит в том, чтобы обеспечить доставку аппаратуры на пункт наблюдений к точно назначенному сроку. Если для транспортировки используется автомобиль, то иногда рассматривается также возможность питания спутниковых приемников от автомобильных аккумуляторов. При этом рекомендуется так размещать место стоянки автомобиля, чтобы она не создавала помех приему радиосигналов от



спутников (и, в частности, не служила одной из отражающих поверхностей, которые могут создавать многопутность и тем самым влиять на результаты измерений).

При размещении спутниковой аппаратуры на пункте наблюдений и при ее подготовке к ним в задачи обслуживающего персонала входят следующие мероприятия:

- 1) установка антенного блока (или сенсора) на соответствующем приспособлении (штативе, трегере или переносной мачте) и точная его центровка над геодезической маркой;

- 2) соединение отдельных блоков между собой с помощью соответствующих кабелей и подключение аппаратуры к аккумуляторной батарее;

- 3) проверка работоспособности приемника;

- 4) запись в контрольном полевом журнале информации, относящейся к этой станции;

- 5) измерение высоты установки антенны (или сенсора) над геодезической маркой и внесение этой информации через клавиатуру в память приемника, а также в полевой журнал;

- 6) измерение (в случае необходимости) дополнительных параметров (элементов внецентренной установки антенны и метеорологических данных).

После завершения подготовительных работ оператор может приступить к реализации рабочего режима приемника.

#### **5.4. Вхождение в рабочий режим и контроль за ходом измерений**

Под вхождением в рабочий режим подразумевается включение аппаратуры и проверка всех предписанных режимов работы, отображаемых на экране дисплея, включая и ввод необходимых начальных данных, что позволяет подготовить приемник к началу измерений. На данной стадии оператор контролирует степень зарядки подключенных аккумуляторных батарей и количество свободной памяти в запоминающих устройствах приемника. Кроме того, он осуществляет ввод через клавиатуру вышеупомянутых начальных данных (высоту установки антенны, условное название пункта и другую заранее оговоренную информацию).

Отображаемая на экране дисплея информация позволяет контролировать осуществляемый приемником захват радиосигналов от отдельных спутников, их количество, местоположение и качество принимаемых сигналов в виде отношения «сигнал/шум». При этом на табло индицируется также значение геометрического фактора.

После того, как произведен захват сигналов от требуемого минимума спутников и обеспечено допустимое значение геометрического фактора, оператор по каналу связи (если таковой имеется в его распо-

ряжении) сообщает на центральный пункт о готовности аппаратуры к изменениям в соответствии с предписанным расписанием проведения сеанса наблюдений.

Поскольку в современных геодезических спутниковых Приемниках используется, как правило, полностью автоматизированный режим измерений, то в дальнейшем роль оператора сводится к выполнению контрольных функций. При этом он систематически следит за степенью разрядки аккумуляторных батарей и за наличием свободной памяти в запоминающих устройствах. Кроме того, в случае необходимости он принимает предохранительные меры, связанные с разрушительными воздействиями на аппаратуру внешней среды (сильная гроза, ураган и т.п.).

В процессе проведения сеанса наблюдений оператор обязан следить за появляющимися иногда на экране дисплея предупреждающими сообщениями, свидетельствующими о возникновении тех или иных нарушений в работе приемника (например, недопустимая разрядка аккумуляторной батареи). Кроме того, он должен отмечать в контрольном полевом журнале случаи пропуска циклов и их продолжительность, недопустимые значения геометрического фактора, перемены в работе из-за наличия тех или иных радиопомех и т.д.

Во избежание возникновения дополнительных нарушений процесса измерений оператор во время проведения сеанса не должен находиться в непосредственной близости от антенны, так как это может привести к экранировке поступающих от спутников сигналов и/или к возникновению нежелательных отражений.

Если записывающее устройство полностью заполнено, то контроллер автоматически останавливает регистрацию наблюдений. Для подключения другого запоминающего устройства, замены батареи и других действий необходимо планировать технологические перерывы.

### **5.5. Завершение сеанса наблюдений. Хранение собранной информации. Ведение полевого журнала**

Завершение производимых на пункте спутниковых Наблюдений осуществляется, как правило, в соответствии с заранее составленным расписанием. При наличии канала связи оператор сообщает на центральный пункт о том, что он готов закончить наблюдения на своем пункте, а в случае необходимости он может внести предложение о целесообразности его продолжения.

На завершающей стадии рекомендуется произвести повторные измерения высоты установки антенны над геодезической маркой и внести это значение через клавиатуру в память приемнику. Выход из рабочего режима также производится через клавиатуру. При этом под-

разумеается последовательное выполнение предписанных операций, предусматривающих закрепление накопленной информации в запоминающем устройстве приемника и приведение в исходное состояние аппаратуры и программного обеспечения, введенного в эту аппаратуру. После этого может быть отключено электропитание от приемника.

По мере заполнения емкости запоминающего устройства приемника данные копируются в персональный компьютер.

После того как данные будут скопированы, их можно либо принять для последующей обработки, либо сохранить на диске в качестве файлов, либо преобразовать в ASCII файлы формата RINEX.

Для удобства хранения информации рекомендуется придерживаться структуры дерева каталогов (рис. 5.8). Каталог «Имя объекта» при необходимости можно архивировать, применяя программные архиваторы данных.

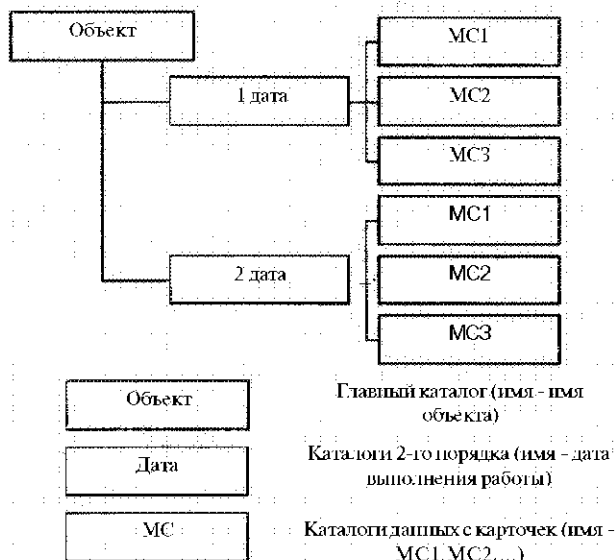


Рис. 5.8. Структура каталогов для хранения данных

По окончании работ исполнители предоставляют к сдаче файлы с результатами полевых измерений на пунктах спутниковой сети, полевые журналы, карточки обследования с оттисками марок и абрисами возвышающихся препятствий, схему обследования, список утраченных пунктов и реперов, уточненные кроки обследованных реперов и пояснительную записку с обоснованием замены пунктов. Материалы к сдаче подготавливаются в соответствии с требованиями нормативно-технических документов.

Помимо работы с приемником оператор непосредственно на пункте завершает все записи, вносимые в контрольный полевой журнал. В нем, как минимум, должна содержаться следующая информация:

- название пункта наблюдения и его условное обозначение, внесенное в регистрационный файл;
- фамилия оператора;
- серийные номера основных компонентов установленной на пункте спутниковой аппаратуры (антенны, приемника, сенсора и т. д.);
- высота установки антенны над геодезической маркой;
- время начала и завершения сеанса;
- номера спутников и их местоположение;
- приближенные координаты пункта наблюдения (по информации, отображаемой на экране дисплея приемника);
- все замечания, касающиеся проведения наблюдений, которые могут оказаться полезными в процессе камеральной обработки результатов измерений.

На отдельных, особо ответственных видах работ рекомендуется произвести фотографирование пункта с установленной аппаратурой.

#### **5.6. Специфика редуцирования результатов спутниковых измерений при внецентричной установке приемников**

Спутниковая геодезическая сеть, создаваемая с использованием спутниковых приемников без привязки к исходным пунктам местной системы координат, может быть создана в кратчайшие сроки. Такая сеть обеспечивает высокую точность сохранения параметров ориентации и масштабирования на больших площадях. Но для создания точной геодезической основы для использования в самых разных областях народного хозяйства необходимо совместно использовать результаты спутниковых и наземных геодезических измерений. Для строгого объединения результатов построения спутниковой и наземной геодезической сетей необходимо совмещать при измерениях пункты спутниковой сети с пунктами наземной сети, а затем при обработке выполнять совместное уравнивание объединенной сети, преследуя цель не только достижения высокой точности уравненных координат, но и сохранения местной системы координат, используемой для топографических, разбивочных, изыскательских и других работ.

Поскольку условия выбора местоположения пунктов наземной сети и пунктов спутниковой сети существенно отличаются, то в ряде случаев возникает необходимость привязки спутниковых измерений к

пунктам наземной сети при внецентренной установке спутникового приемника. При этом возможны два пути решения:

- 1) снесение координат пункта наземной сети на рабочий центр — место установки спутникового приемника;
- 2) передача пространственных координат, определенных спутниковой системой, на пункт наземной сети.

Первый способ неоднократно рассмотрен в геодезической литературе и будет изложен конспективно. При этом следует выделить два варианта: с возможностью установки на пункте наземной сети традиционных геодезических приборов (теодолита, светодальномера) и при недоступности пункта наземной сети.

Для снесения координат пункта А наземной сети на рабочий центр Р — место установки спутникового приемника, способом полярной засечки (рис. 5.9) измеряют горизонтальный угол  $\beta_1$  и линию  $S_1$ . Измеренные линии приводятся к горизонту.

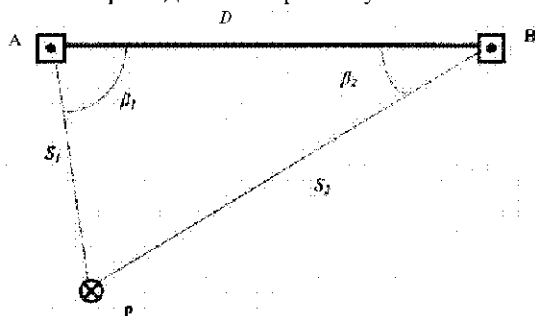


Рис. 5.9. Схема снесения координат пункта наземной сети на рабочий центр спутникового приемника способом полярной засечки

Координаты точки Р вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} X_p &= X_A + S_1 \cos \alpha_1; \\ Y_p &= Y_A + S_1 \sin \alpha_1; \\ \alpha &= \alpha_0 + \beta_1. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Измерения на пункте В выполняют для контроля.

При недоступности пункта наземной сети для снесения координат способом прямой угловой засечки (рис. 5.10) в точке Р разбивают два базиса  $P1=b_1$  и  $P2=b_2$ , а затем измеряют горизонтальные углы  $\gamma_p$ .

**A.ft, ftift-**

По результатам измерений вычисляют линейный  $S$  и угловой  $\alpha$  элементы редукции:

$$\left. \begin{aligned} S &= b_1 \cdot \frac{\sin \gamma_1}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} = b_2 \cdot \frac{\sin \gamma_2}{\sin(\beta_1 + \beta_2)}; \\ \sin \mu &= \frac{1}{D} \sin \beta_2; \mu = 180^\circ - (\beta_2 + \mu); \alpha = \alpha_0 + \mu, \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

где  $D$  - длина опорной стороны между пунктами наземной сети АВ,  $\alpha_0$  - примычный угол,  $\alpha_0$  — дирекционный угол опорной стороны:

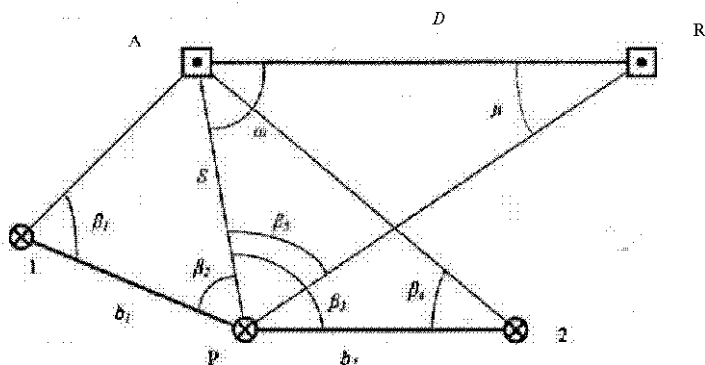


Рис. 5.10. Схема снесения координат пункта наземной сети на рабочий центр способом прямой угловой засечки

Координаты точки Р вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} X_p &= X_A + S \cos \alpha_0 \\ Y_p &= Y_A + S \sin \alpha_0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

При использовании в качестве пункта наземной сети пары стеленных знаков 1, 2 для снесения координат на рабочий центр спутникового приемника Р способом линейной засечки (рис. 5.11) измеряют линии  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$ . Вычисляют приближенные координаты пункта Р ( $X'$  и  $Y'$ ). Вычисление точных координат рабочего центра выполняется по итерационным формулам (5.8) [50].

$$\begin{aligned} \Delta X_1 &= X - X_1, \quad \Delta X_2 = X - X_2, \quad \Delta Y_1 = Y - Y_1, \quad \Delta Y_2 = Y - Y_2; \\ S_1 &= (\Delta X_1^2 + \Delta Y_1^2)^{1/2}, \quad S_2 = (\Delta X_2^2 + \Delta Y_2^2)^{1/2}; \\ l_1 &= S_1 - S_3, \quad l_2 = S_2 - S_3; \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \Delta X_1 / S_1, \quad a_2 = \Delta X_2 / S_2, \quad a_3 = \Delta Y_1 / S_3, \quad b_1 = \Delta Y_1 / S_1; \\ 8X &= (b_1 l_1 - a_1 l_2) / (a_1 b_2 - a_2 b_1), \quad 8Y = (a_1 l_2 - a_2 l_1) / (a_1 b_2 - a_2 b_1); \\ X &= X' + 8X, \quad Y = Y' + 8Y. \end{aligned}$$

Вычисления выполняются до выполнения условия  $8X + 8Y < 0,001$  м.

Для вычисления пространственных координат пункта А по спутниковым наблюдениям на вспомогательных точках  $P_1$ ,  $P_2$  (рис. 5.12) разбивают створ  $P_1$ ,  $P_2$ , А, а затем выполняют спутниковые наблюдения на вспомогательных точках  $P_1$ ,  $P_2$  и измеряют рулеткой или светодальномером расстояния  $P_1 - P_2 = B$  и  $P_2 - A = b_2$ .

По результатам измерений определяют приращения пространственных координат между вспомогательными точками  $P_1$  и  $P_2$ :

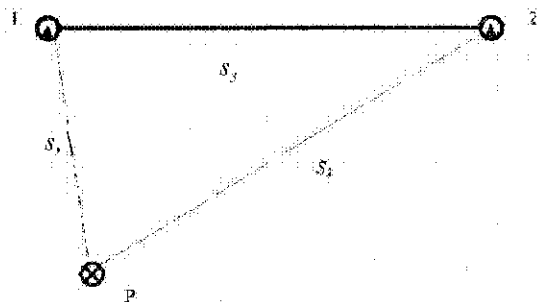


Рис. 5.11. Схема спеснения координат пары степных пунктов на рабочий центр спутникового приемника

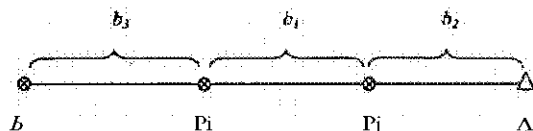


Рис. 5.12. Схема определения пространственных координат пункта наземной сети по спутниковым наблюдениям на вспомогательных точках (1)

$$\begin{aligned}\Delta X &= X_{P_2} - X_{P_1}, \\ \Delta Y &= Y_{P_2} - Y_{P_1}, \\ \Delta Z &= Z_{P_2} - Z_{P_1}.\end{aligned}\tag{5.9}$$

Координаты точки А вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned}X_A &= X_{P_1} + \Delta X \frac{b_1 + b_2}{b_1}, \\ Y_A &= Y_{P_1} + \Delta Y \frac{b_1 + b_2}{b_1}, \\ Z_A &= Z_{P_1} + \Delta Z \frac{b_1 + b_2}{b_1}.\end{aligned}\tag{5.10}$$

Спутниковые наблюдения на вспомогательной точке  $P_1$  и измерение расстояния  $P_1P_2 = b_3$  выполняют для контроля.

При невозможности разбивки створа с одной стороны пункта, створ разбивают, включая в него пункт сети (рис. 5.13).

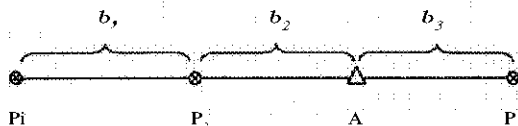


Рис. 5.13. Схема определения пространственных координат пункта наземной сети по спутниковым наблюдениям на вспомогательных точках (2)

Аналогичный вариант схемы определения пространственных координат ственных пунктов А и В по спутниковым наблюдениям на вспомогательных точках  $P_1, P_2, P_3$ , установленных в створе с определяемыми ственными пунктами А и В, приведены на рис. 5.14.

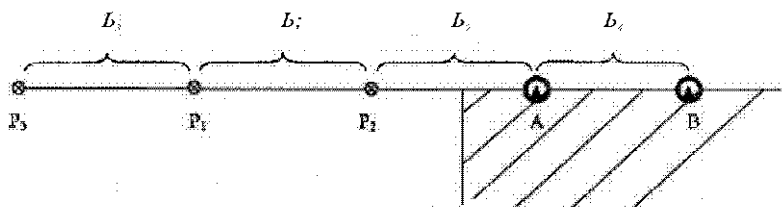


Рис. 5.14. Схема определения пространственных координат ственных пунктов наземной сети по спутниковым наблюдениям на вспомогательных точках одного створа

По результатам измерений определяют приращения пространственных координат между вспомогательными точками  $P_1$  и  $P_2$  по формулам (5.9). Координаты точки А вычисляют по формулам (5.10), а координаты точки В — по формулам:

$$Y_B = Y_{P_1} + \Delta Y \frac{b_1 + b_2 + b_4}{b_1}, \quad (5-11)$$

Спутниковые наблюдения на вспомогательной точке  $P_3$  и измерение расстояния  $P_1-P_3 = B_3$  выполняют для контроля.

При невозможности разбивки одного створа для пары ственных пунктов разбивают два створа, включая в каждый створ один ственный пункт (рис. 5.15).

По результатам измерений определяют приращения пространственных координат между вспомогательными точками  $P_1$  и  $P_2$  по формулам (5.9). Координаты точки А вычисляют по формулам (5.10).

Для определения координат точки В определяют приращения пространственных координат между вспомогательными точками  $P_1$  и  $P_2$ :

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_{P_2} - X_{P_1}, \\ \Delta Y &= Y_{P_2} - Y_{P_1}, \\ \Delta Z &= Z_{P_2} - Z_{P_1}. \end{aligned} \quad (5.12)$$



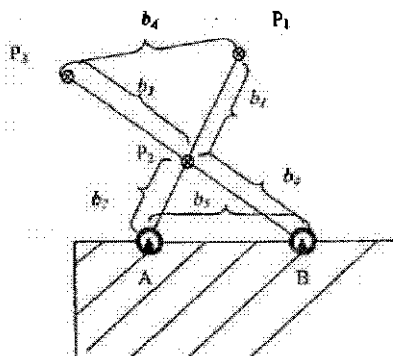


Рис. 5.15. Схема определения пространственных координат створных пунктов наземной сети по спутниковым наблюдениям на вспомогательных точках двух створов

Координаты точки В вычисляются по формулам:

$$X_B = X_{P_3} + \Delta Y \frac{b_1 + b_2}{b_2}, \quad (5.13)$$

$$Y_B = Y_{P_3} + \Delta Y \frac{b_3 + b_4}{b_3},$$

$$\Delta Y = \frac{b_3 + b_4}{b_3 + b_4} = \frac{b_3 + b_4}{b_3 + b_4}$$

Измерение расстояний  $AB = h_1$  и  $P_1P_3 = b_6$  выполняется для контроля.

Разбивка створов для установки вспомогательных точек выполняется не только в плане, но и по высоте с точностью  $\pm 2$  мм (рис. 5.16). При этом измеряются наклонные линии.

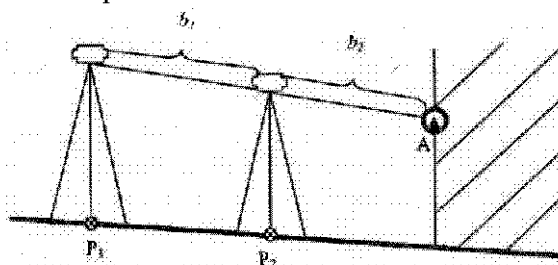


Рис. 5.16. Схема разбивки створа по высоте для установки вспомогательных точек

Программа спутниковых наблюдений при внецентренной установке должна состоять из тройных равных по времени сеансов наблюдений, между которыми производится перестановка антенн спутниковых приемников, повторная центрировка и измерение высоты их установки.

## Раздел 6. Обработка спутниковых измерений, редуцирование и уравнивание геодезических сетей

В общем процессе обработки топографо-геодезической информации принято выделять следующие уровни или этапы [50]:

- первичная обработка;
- предварительная обработка;
- окончательная обработка.

К первичной обработке относят вычисления, выполняемые непосредственно в процессе измерений. Этот этап позволяет контролировать правильность полученных отсчетов и точность единичных измерений. В случае спутниковых измерений первичная обработка выполняется непосредственно в полевых контроллерах, а контролем является наличие видимости неба, наличие необходимого числа спутников и допустимость геометрического фактора в процессе измерений, определение координат в навигационном режиме.

Следующим этапом является предварительная обработка, которая выполняется с целью оперативной оценки качества измерений в ходе, сети или на отдельном объекте. По результатам предварительной обработки может быть сделан вывод о пригодности полевых материалов для окончательной обработки и получения готовой продукции, либо о необходимости переделки брака. Оперативное, до выезда бригады из района работ, выполнение предварительной обработки позволяет повысить качество полевых материалов путем отсеивания недопустимых результатов измерений и сократить затраты, связанные с полевой переделкой или дополнительными измерениями (если отбракованы исходные данные или изменена конфигурация сети). Предварительная обработка выполняется, как правило, с использованием программ, входящих в комплект спутниковых приемников.

Окончательная обработка предназначена для получения готовой продукции — каталогов координат и высот и может быть выполнена после завершения полевых работ и выезда бригад с объекта. Окончательная обработка может выполняться как с использованием программ, входящих в комплект спутниковых приемников, так и с использованием специально разработанных программ.

## 6.1. Первичная обработка спутниковых измерений, производимая в приемнике

В процессе проведения спутниковых наблюдений в приемном устройстве производится не только регистрация отсчетов измеряемых величин, но и их первичная обработка. Такая необходимость возникает не только при использовании кинематического режима, когда координаты движущегося объекта должны вычисляться в реальном масштабе времени, т. е. непосредственно в приемнике, но и при статических режимах работы с целью не только формирования компактного, сглаженного массива данных, предназначенных для последующей обработки, но и для получения текущей информации, отображаемой на экране дисплея приемного устройства, на основе которой оператор может следить за процессом выполняемых измерений, а в случае необходимости и корректировать этот процесс.

Неотъемлемой частью спутниковых приемников является процессорный блок, который не только управляет по заданной программе режимом работы приемника, но и выполняет первичную обработку результатов измерений. При этом обработке подвергается как информация, передаваемая в составе навигационного сообщения, так и результаты измерений, используемые для вычисления псевдодальностей на основе кодовых сигналов и точных значений расстояний между спутником и приемником, базирующихся на фазовых измерениях несущих колебаний.

При обработке передаваемого со спутника навигационного сообщения производится его декодирование, т. е. восстановление информации о текущих эфемеридах спутника, о поправках к показаниям его часов, об ионосферных поправках, об альманахе и о других вспомогательных показателях. Эта информация используется как для формирования файла навигационного сообщения, используемого в дальнейшем при камеральной обработке (пост-обработке), так и для оперативной корректировки показаний часов приемника и для вычисления целого ряда параметров, отображаемых на экране дисплея приемника (приближенные координаты точки стояния, номера наблюдаемых спутников и их расположение на небосводе, геометрический фактор и т. д.).

В процессе обработки, производимой в приемнике, вычисляются также значения псевдодальностей на основе определения времени прохождения кодовыми сигналами расстояний между спутником и приемником. При этом основным источником ошибок, обуславливающим недопустимо большие отклонения в значениях измеряемых расстояний, является сравнительно низкая стабильность частоты опор-

ных кварцевых генераторов, характеризуемая относительной погрешностью на уровне  $HO^9$ .

Для минимизации отмеченного влияния используется более стабильное опорное время, передаваемое со спутника в момент начального захвата приемником излучаемых спутником радиосигналов, которое получило название системного времени (GPS или ГЛОНАСС). При этом основная проблема решения такой задачи связана с необходимостью введения в это опорное время задержки, возникающей на участке прохождения сигналом расстояния между спутником и приемником. С этой целью учитывается тот факт, что отмеченные временные задержки для используемых орбит заключены в диапазоне от 65 до 150 мс. За счет комбинирования псевдодальномерных измерений при многократном использовании спутников удастся уточнить значение системного времени, относящееся к приемнику. При этом остаются только те ошибки в измерении расстояний, которые характерны для конкретно определяемого значения псевдодальности. Для системы iPS такая погрешность применительно к C/A-коду оценивается величиной около 40 м.

Вычисляемые на стадии первичной обработки значения псевдодальностей вводятся в состав файла наблюдаемых данных, используемого при проведении камеральной обработки (пост-обработки). Кроме того, на их основе с применением получаемых из навигационного сообщения эфемерид спутников вычисляются координаты точки стояния приемника на навигационном уровне точности (т. е. с погрешностью в несколько десятков метров).

При выполнении фазовых измерений одно- или двухчастотными приемниками отсчеты в долях фазового цикла производятся на одной или двух несущих частотах с интервалами, исчисляемыми десятками долями секунды. В результате при проведении сеансов наблюдений, длительность которых может достигать нескольких часов (а иногда и суток) накапливается огромный массив данных, для хранения которого требуются устройства памяти чрезвычайно большой емкости. Для преодоления таких технических трудностей непосредственно в приемнике производится уплотнение регистрируемых данных. Такой процесс часто называют также компрессией. В процессе его реализации вычисляются осредненные значения производимых выборок с интервалами, задаваемыми оператором на стадии подготовки приемника к наблюдениям. Как уже отмечалось, такой интервал чаще всего выбирается равным 10-15 с.

Наряду с уплотнением непосредственно в приемнике осуществляется фильтрация данных на основе использования фильтра Калмана. В результате такой фильтрации устраняются отсчеты с недопусти-

мо большими уклонениями. Кроме того, при такой процедуре удается ликвидировать отдельные пропуски циклов, обусловленные невозможностью приема в отдельные моменты времени сигналов от спутников по тем или иным причинам.

При автоматическом режиме обработки данных в приемнике должны выполняться следующие условия:

1) Уход показаний часов приемника от системного времени не должен превышать одной микросекунды. При соблюдении такого условия удается откорректировать уход показаний часов приемника на основе принимаемого от спутника более точного времени с погрешностью в несколько сотен наносекунд. Отмеченная процедура получила название «восстановления» времени.

2) Для вычисления в дальнейшем на следующей стадии обработки верных значений базисных линий расхождения в показаниях часов двух взаимодействующих приемников не должны превышать одной микросекунды. При выполнении этого условия ошибки из-за несинхронности используемых показаний часов приемников оцениваются величинами не более 2 мм, т. е. находятся на уровне влияния шумов.

3) На стадии первичной обработки должны быть выявлены и устранены пропуски полуциклов, обусловленные несовершенством работы электронных узлов приемника (в частности, отслеживающих цепочек обратной связи).

4) Получаемые непосредственно в приемнике на основе кодовых сигналов значения псевдодальностей, относящиеся к одной эпохе, но к различным несущим частотам, должны быть согласованы между собой.

5) При переходах от одной эпохи к другой закономерности изменения определяемых псевдодальностей должны носить сглаженный характер.

Обработанная в приемнике информация используется для формирования файла наблюдаемых данных, а также файла навигационного сообщения, на основе которых производится дальнейшая обработка. Наиболее наглядную структуру такие файлы имеют при отображении их в формате RINEX.

Каждый из файлов состоит из заголовка и основного массива записанных данных.

В заголовке к файлу результатов наблюдений содержится следующая основная информация:

- версия формата и показатели, идентифицирующие файл;
- дата и время начала сеанса наблюдений;
- условное название пункта;
- информация о наблюдателе и его организации;
- тип приемника и антенны;

- приближенные координаты пункта в системе WGS-84;
  - величины, характеризующие вынос фазового центра относительно закрепленной на местности марки;
  - система отсчета фазовых измерений (в циклах или полуциклах);
  - номера спутников, содержащихся в файле;
  - вид наблюдений (кодовые или фазовые наблюдения, к какому коду и к какой несущей частоте они относятся);
  - время записи первого наблюдения,
- а также некоторая другая вспомогательная информация.

Следующий за заголовком массив записанных в рассматриваемый файл данных включает в себя:

- данные, характеризующие эпоху наблюдений (год, месяц, число, а также часы, минуты, секунды);
- количество спутников в записанной эпохе и их номера;
- уход показаний часов приемника (в секундах);
- значения определенных псевдодальностей с использованием C/A-кода и P-кода (в метрах);
- результаты фазовых измерений (для эпохи, начиная со второй, приводятся приращения фазы относительно предыдущей эпохи в долях циклов с соответствующим знаком).

В другом файле, получившем название файла навигационного сообщения, приводятся версия формата и идентификация файла, дата и время начала наблюдений, значения коэффициентов к ионосферной модели, поправки к показаниям часов на спутнике, а также записи, относящиеся к каждой эпохе и содержащие точное системное время, соответствующее моменту послышки со спутника данного сообщения, и значения целого ряда поправок для вычисления эфемерид возмущенной орбиты спутника в заданный момент времени.

## **6.2. Предварительная обработка спутниковых измерений, производимая после окончания измерений**

Предварительная обработка осуществляется с использованием стандартного программного обеспечения фирмы-изготовителя спутниковых приемников и выполняется на полевой базе партии или бригады. Основными критериями контроля при этом являются разрешение неоднозначности по всем линиям сети, оценка точности по внутренней сходимости результатов обработки, сходимость результатов по замкнутым построениям в сети и, наконец, сходимость с ранее выполненными измерениями и контрольными расстояниями между известными пунктами [14, 82].

Большинство современных программ камеральной обработки спутниковых измерений (пост-обработки) разделяются по методу обработки:

- вычисления отдельных линий;
- многоточечные решения.

\*

Метод вычисления отдельных линий является в настоящее время наиболее распространенным и его в любом случае целесообразно использовать при выполнении предварительной обработки даже если программный пакет позволяет реализовать многоточечные решения. Преимущества метода отдельных линий при выполнении предварительной обработки связаны с наличием на этой стадии обработки достаточно большого числа ошибок в данных и в случае многоточечного решения локализовать и устранить их достаточно сложно.

Программное обеспечение, рассчитанное на обработку отдельных линий, обеспечивает лучший контроль и локализацию некачественных линий и точек. Некачественные точки могут быть локализованы по оценке точности линий, сходящихся в этой точке. Как правило, точность таких линий существенно ниже средней на данном объекте. Другим методом контроля, позволяющим локализовать некачественные линии, является контроль по замкнутым построениям — треугольникам, векторным ходам. Если сумма приращений координат по замкнутому векторному ходу соответствует паспортной точности прибора, то линии, входящие в это построение, являются качественными. Общий алгоритм обработки для метода отдельных линий представлен на рис. 6.1.

В последнее время практически все фирмы-изготовители спутниковых приемников поставляют программное обеспечение, реализующее оба метода обработки. Но эти программы имеют ограничения и ориентированы, как правило, на стандартные условия измерений и вычислений для максимальной автоматизации процесса обработки и снижения требований к квалификации исполнителя. Так, например, большинство таких программ при реализации метода отдельных линий накладывают ограничения на длину линии, а при реализации многоточечного решения, как правило, накладывают ограничения на число одновременно обрабатываемых точек и продолжительность периода измерений.

Для устранения этих ограничений используются процедуры совместного уравнивания отдельных линий, объединенных в общую сеть, или отдельных блоков многоточечного решения, объединенных на общем объекте.

Важным этапом предварительной обработки является получение результатов в формате, пригодном для окончательной обработки. Не-

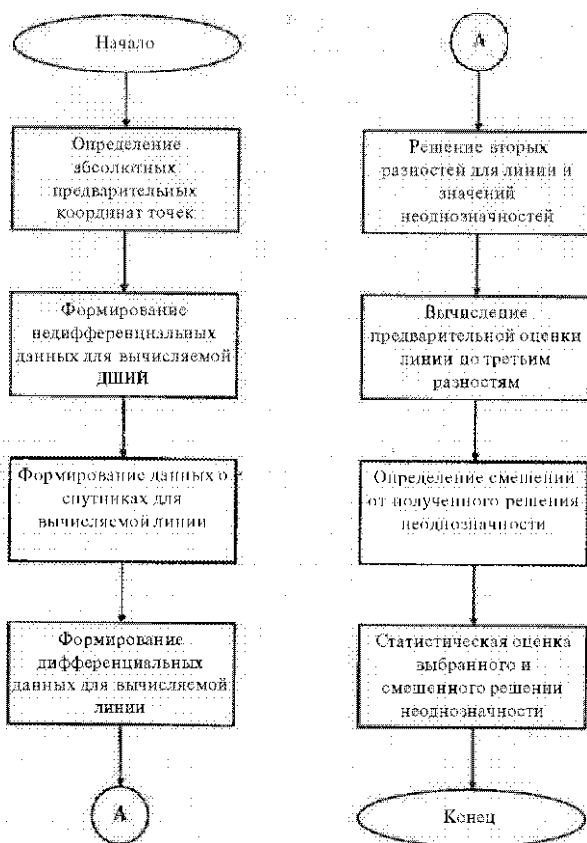


Рис. 6.1. Общий алгоритм вычисления отдельной линии

смотря на то, что данные практически любой программы могут быть представлены в текстовом формате ASCII, их организация существенно различается в зависимости и от фирмы-изготовителя и даже от конкретного типа приемника. Попытка стандартизации результатов измерений привела к созданию независимого формата обмена данными между различными типами приемников. Этот формат, получивший название RINEX (рис. 6.2), состоит из трех файлов текстового формата ASCII:

- файл данных, полученных при измерениях, содержащий даль-померные данные;
- файл с метеорологическими данными;
- файл, содержащий навигационное сообщение.

Файлы имеют различную длину, максимальное значение равно 80 символам в строке. Каждый файл содержит секцию заголовков и сек-



Файл данных об измерениях	Файл метеорологических данных	Файл навигационного сообщения
Заголовок	Заголовок	Заголовок
Пункт	Пункт	Примечания
Исполнители	Тип наблюдений	
Оборудование	Примечания	
Редукции		
Типы наблюдений		
Примечания		Данные
Данные	Данные	
Эпохи	Эпохи	Эпохи
Спутники	Измерения	Параметры показаний часов спутников
Измерения		Орбитальные параметры спутников
Признаки		Ионосферные поправки
		Признаки

Рис. 6.2. Общая структура формата RINEX

пию данных. Файл навигационного сообщения располагается независимо, в то время как файлы измерений и метеорологических данных должны быть созданы для каждого используемого при наблюдениях пункта.

### 6.3. Окончательная обработка спутниковых измерений

Окончательная обработка в зависимости от точности и размеров геодезической сети, созданной спутниковыми методами, может выполняться одним из рассмотренных выше методов:

- вычисления отдельных линий;
- многоточечные решения.

При выполнении окончательной обработки необходимо учитывать следующие положения. Если данные фазовых измерений и первых разностей являются слабокоррелированными между собой, то вторые и третьи разности являются коррелированными соотношениями, и учет этих зависимостей является одной из серьезных проблем окончательной обработки.

При спутниковых определениях в общем случае имеются две группы корреляций:

- физические корреляции;
- математические корреляции.

Фазы сигналов  $\Phi^*/f_0$  и  $\Phi^*/S$ , одновременно поступающих от одного спутника  $I$  на входы двух приемников, установленных на двух пунктах  $Li$   $B$ , физически между собой взаимосвязаны, так как они относятся к одному спутнику и практически одинаковым атмосферным условиям. Поскольку физическая корреляция имеет значение на несколько порядков меньше, чем математическая, вводимая через разности, то наибольший интерес представляет анализ способов устранения именно математической корреляции.

Учет корреляций для вторых разностей может быть осуществлен сравнительно легко. Так, например, вторые разности могут быть легко декоррелированы при использовании процедуры ортонормализации. Учет корреляции в третьих разностях оказывается более сложной процедурой.

Для сетевого метода наблюдений использование метода первых разностей обычно подразумевает последовательное вычисление одной из другой базисных линий для всех возможных комбинаций. Так, если в сети выполнены измерения на  $n$  пунктах, то число базисных линий  $N$  можно определить по формуле:

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (6.1)$$

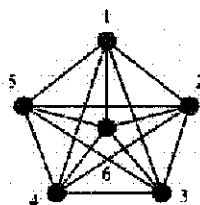
При этом следует отметить, что только  $(n-1)$  из них являются независимыми. На практике применяются три варианта окончательной обработки:

- обработка всех возможных комбинаций отдельных линий;
- обработка только независимых линий;
- комбинированный вариант, в котором используется число линий большее, чем во втором варианте, или при использовании результатов более, чем одного сеанса измерений.

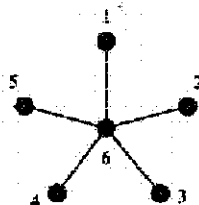
На рис. 6.3 приведены примеры всех трех вариантов для локальной сети из шести пунктов.

Основным недостатком метода вычисления отдельных линий является достаточно большая корреляция линий одного сеанса измерений. Метод многоточечного решения позволяет учитывать такую корреляцию, особенно в однопунктовых сетях с единой программой измерений на каждом пункте.

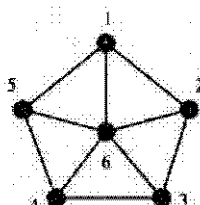
Программа обработки для метода отдельных линий существенно проще, но общее время последовательной обработки всех линий сравнимо с временем многоточечного решения, особенно для локальных сетей из нескольких десятков пунктов.



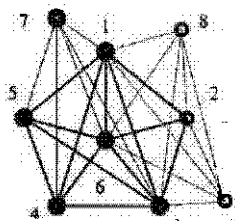
Первый вариант - все возможные комбинации линий:  
6 пунктов, 6 приемников, 1 сеанс, 15 линий



Второй вариант - только независимые линии:  
6 пунктов, 6 приемников, 1 сеанс, 5 линий



Третий вариант - комбинированный:  
6 пунктов, 6 приемников, 1 сеанс, 10 линий



Третий вариант - два сеанса:  
6 пунктов, 6 приемников, 2 сеанса. (1 - пункты 1, 2, 3, 6, 8, 9; 2 - пункты 1, 3, 4, 5, 6, 7), 13 линий

Рис. 6.3. Варианты окончательной обработки локальной сети из шести пунктов

Некачественные измерения на отдельных точках и линиях гораздо легче локализируются и устраняются в методе отдельных линий, но при многоточечном решении гораздо легче выявляются и устраняются пропуски циклов.

Исходя из вышеизложенного, нельзя отдать предпочтение ни одному из методов, и на практике применяются оба метода или их комбинации. Небольшие сети со сторонами до 20 км легко обрабатываются по программам фирм-изготовителей приемников. Даже небольшие сети с достаточно большими длинами линий до 100 и более километров лучше обрабатывать по специальным программам. И наконец, сети, состоящие из сотен пунктов, созданные за достаточно большие интервалы времени, целесообразно обрабатывать, комбинируя программы и методы обработки.

На практике нашли применение следующие технологические схемы:

- окончательная обработка спутниковых измерений по программе фирмы-изготовителя спутниковых приемников;
- окончательная обработка спутниковых измерений по специально разработанной программе.

### *6.3. 1. Окончательная обработка спутниковых измерений по программе фирмы-изготовителя спутниковых приемников*

Программы фирм-изготовителей спутниковых приемников являются наиболее приспособленными к конкретному типу или модельному ряду спутниковых приемников одной фирмы-изготовителя и с этой точки зрения не являются универсальными. Учитывая наличие в производстве большого разнообразия спутниковых приемников и соответствующего им программного обеспечения, а также имеющийся практический опыт в работе с различными комплектами приемников и программ, вопросы обработки спутниковых измерений рассмотрены обобщенно, без привязки к конкретным моделям спутниковых приемников и версиям программного обеспечения этого типа.

Комплекс программ, входящий в комплект спутникового приемника, позволяет обрабатывать результаты измерений, выполненные с помощью спутниковых геодезических приемников этого типа, осуществлять предполевое планирование процесса измерений, выбирать установочные параметры, составлять расписание сеансов измерений. Как правило, такой комплекс программ позволяет обрабатывать данные, полученные с помощью аппаратуры других фирм-изготовителей и сохраненные в формате обмена RINEX.

Программное обеспечение фирм-изготовителей спутниковых приемников позволяет также обрабатывать данные, полученные при особом режиме работы на местности, известном как режим измерений с возвращением (Reoccupation). Эта возможность программы позволяет определять координаты точек в пределах точности съемки по данным двух (или более) небольших интервалов наблюдений, которые были выполнены с интервалом в один час и более, но только в том случае, если наблюдались, по крайней мере, четыре различных спутника.

Общая структура такой программы приведена на рис. 6.4.

Блок планирования предназначен для определения спутников, находящихся в поле зрения каждого пункта сети, как на этапе подготовки к полевым измерениям, так и на различных этапах обработки и анализа результатов измерений. Кроме таблицы видимости, включающей в себя местоположения спутников в течение всего периода работ на объекте, как правило, создаются полярные диаграммы видимости неба с нанесенными траекториями движения спутников. И в таблице, и на диаграмме отображаются зоны экранировки различными предметами. Блок планирования предназначен также для определения и анализа геометрии расположения спутников. Для этого определяется таблица и график значения DOP, по которому планируются периоды благоприятные для работы.

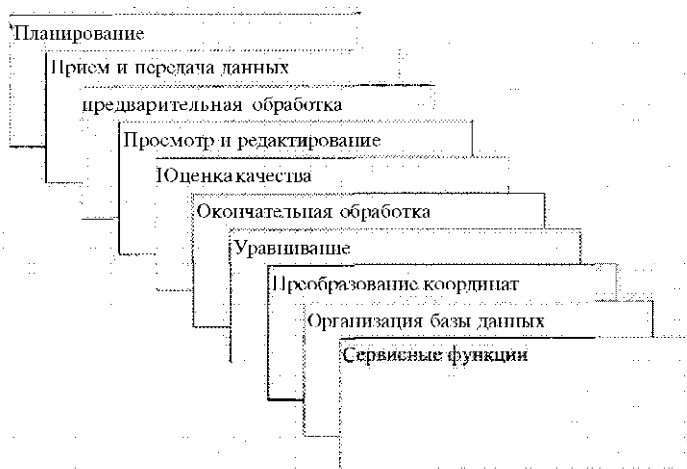


Рис. 6.4. Общая структура программы обработки фирмы-изготовителя спутниковых приемников

Блок приема и передачи данных предназначен для преобразования данных из компактного формата, используемого в приемниках, в текстовый формат типа ASCII. Кроме того, этот блок предназначен для компоновки данных разных приемников, участвующих в измерениях, в соответствии с выбранной технологией обработки и для преобразования данных в обменный формат RINEX.

Блок предварительной обработки предназначен для объединения точных эфемерид с полевыми данными, обработки кодовых данных для получения предварительных координат точек, обработки фазовых измерений, анализа полевых данных и моделирования атмосферы. Данный блок, как правило, реализует следующие вычислительные и контрольные операции:

- разрешение неоднозначностей (на первом этапе как реальные величины, а в последующем как целые числа с уточнением их различными методами);
- вычисление координат пунктов (векторов базисных линий) для статического и кинематического способов измерений, при этом доступны оба метода обработки - отдельных линий и многоточечный.

Блок просмотра и редактирования предназначен для просмотра оператором полевых данных и результатов обработки, объединения в различных комбинациях данных разных приемников, участвующих в измерениях, исключения из обработки ненадежных данных.

Блок оценки качества предназначен для оценки статистических данных матриц апостериорных местоположений и взаимных положе-

ний, контроля замкнутых построений по различным маршрутам, остаточных величин при вычислении базисных линий и результатов исправления пропусков циклов.

Блок окончательной обработки в программе фирмы-изготовителя спутниковых приемников, как правило, позволяет выполнять вычисление координат пунктов (векторов базисных линий) по уточненным значениям эфемерид, отредактированным результатам полевых измерений и полученным данным постоянно действующих пунктов. Кроме того, блок окончательной обработки осуществляет объединение и совместное уравнивание нескольких многоточечных решений, спутниковых измерений и наземных линейно-угловых построений.

Блок уравнивания предназначен для устранения неоднозначных результатов при избыточных измерениях и для повышения их точности.

Блок преобразования координат позволяет выполнять преобразование координат из одной системы в другие по заданным параметрам связи, определять параметры преобразования по имеющимся опорным точкам, а также осуществлять уточнение параметров по новым спутниковым геодезическим измерениям.

Блок организации базы данных предназначен для упорядочения хранения полевых данных и результатов обработки для возможного повторного перевычисления при уточнении эфемерид или опорных пунктов, их архивирования для длительного хранения, графического отображения в виде схем или на основе цифрового картографического материала.

Блок сервисных программ предназначен для редактирования файлов данных, оптимизации схемы объекта и документирования промежуточных и окончательных результатов. Блок сервисных программ содержит, как правило, загрузочные модули для нового программного обеспечения сенсора и контроллера.

Процесс обработки данных (Data Processing) состоит из трех основных этапов. Первый этап заключается в выборе данных и параметров вычислений. Большинство решаемых в этой части задач поддерживается графическими средствами. На втором этапе происходят непосредственно вычисления, выполняемые автоматически, и не требующие никакого вмешательства оператора. Результаты для последующего анализа и хранения в базе данных представляются на последнем этапе.

Выбор данных включает в себя выбор объекта; выбор рабочей временной зоны; выбор пунктов, участвующих в обработке; выбор опорной станции; задание начальных координат опорной станции; определение мобильных станций; выбор интервалов времени для полевых данных, включаемых в обработку.

Выбор параметров вычислений включает в себя корректировку угла отсечки; выбор тропосферной модели; выбор ионосферной модели; выбор варианта использования эфемерид; выбор используемых данных (код, фаза); выбор комбинации частот; выбор максимальной длины вычисляемой линии; корректировку априорного значения средней квадратической ошибки.

Повторные измерения («реокупация») могут выполняться только на точках, наблюдения на которых проводились в статическом режиме. При указании на некоторую точку для реокупации на экран выводятся все периоды наблюдения для этой точки из всей рабочей зоны, а не только для определенного дня. Выбранные интервалы наблюдений, по крайней мере два, будут объединены. Максимальное число выбираемых интервалов ограничено числом неизвестных (максимально 40), которое необходимо найти для решения этой задачи. Если это число больше допустимого, появляется сообщение об ошибке. Число неизвестных может быть получено по формуле:

$$U = 3 + (L - N), \quad (6.2)$$

где  $U$  — число неизвестных;  $1 = 1$  для определения фазы только на частоте  $L1$ ;  $L = 2$  для определения фазы на частотах  $L1$  и  $L2$ ;  $N$  — общее число спутников.

Программа обработки может предлагать следующий выбор используемых данных:

- 1) код и фаза;
- 2) только код;
- 3) только фаза.

По умолчанию принимается «код и фаза». Это гарантирует, что при кинематическом режиме, например, в случае потери захвата спутника, будет доступно решение по коду.

Использование варианта «только код» ускорит процесс вычисления в тех случаях, когда не требуется очень высокая точность, например, для дифференциальных решений по коду в прикладных задачах при нахождении на некотором расстоянии от берега.

Вариант «только фаза» может быть полезен в случаях, когда измерения по коду по какой-либо причине испорчены.

Программа обработки предлагает, как правило, следующие комбинации частот:

- 1)  $L1 + L2$ ;
- 2)  $P$ ;
- 3)  $L2$ .

По умолчанию принимается  $L1 + L2$ . Если доступны измерения только на частоте  $L1$  (для отдельных эпох или даже для всего набора данных), а выбран вариант « $L1 + L2$ », то система автоматически ис-

пользует L1, игнорируя L2. Выбор L1 или L2 заставит систему использовать для вычисления только данную частоту.

Программа обработки предлагает, как правило, установить максимальную длину базисной линии, для разрешения неоднозначности. Это значение, как правило, не должно превышать 20-30 км. Нет особого смысла увеличивать эту величину до большего значения, поскольку, даже если при этом и удастся разрешить неоднозначности, возможны ошибки (обусловленные атмосферными возмущениями). В таком случае значительно более надежным является решение, полученное без попытки разрешения неоднозначности, хотя значения средних квадратических ошибок могут быть весьма высокими.

Априорное значение средней квадратической ошибки также задается на этапе выбора данных и параметров вычислений. Это значение представляет собой порог для отделения фазовых помех от измерений изменений фазы. Если фазовые помехи измерений превышают данное значение, для разрешения неоднозначностей не предпринимается никаких попыток. При неудачном разрешении неоднозначности (возможно вследствие шумов в ионосфере) это значение может быть увеличено, чтобы допустить большее количество шума. Однако следует быть очень осторожным с увеличением данного значения. Хотя это может и помочь разрешить неоднозначности, но нет гарантии, что неоднозначности разрешены правильно. Таким образом, не следует увеличивать пороговое значение свыше принятого по умолчанию без возможности перекрестной проверки решения.

Для статических наблюдений пользователь может определять какое количество регистрируемых данных использовать в процессе обработки. Например, частота регистрации наблюдений, используемая в молевых условиях, может быть равна 1 с. В процессе обработки данных в камеральных условиях можно использовать каждую секунду или каждую третью секунду наблюдения. Обработка данных возможна с частотой 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30 и 60 секунд.

Координаты выбранного местоположения опорной станции для вычисления базисных линий в идеале должны быть известны с точностью в пределах 10 м. Большие ошибки в координатах местоположения опорной станции могут привести к ошибкам при вычислении базисной линии. Они могут также вызвать ошибки масштаба, элементов разворота и, возможно, скажутся на неудачном разрешении неоднозначности.

Если надежные начальные координаты места расположения опорной станции недоступны, за начальное принимается навигационное положение, полученное приемником.



Режим обработки отдельной точки дает возможность вычислить лучшее абсолютное положение, по сравнению с навигационным определением, путем использования кодовых измерений. Однако для определения наилучшего положения отдельной точки должны использоваться как минимум одно- или двухчасовые данные наблюдений.

Этап непосредственно вычислений осуществляется автоматически и не требует никакого вмешательства оператора. Результаты вычислений для последующего анализа и хранения в базе данных представляются на последнем этапе обработки.

### *6.3.2. Окончательная обработка спутниковых измерений по специально разработанной программе*

Программы обработки спутниковых измерений, разработанные организациями независимыми от производителей спутниковых приемников, являются наиболее универсальными. Такие программы не ограничены особенностями конкретного типа или модельного ряда спутниковых приемников одной фирмы-изготовителя. Общая для большинства таких программ структура аналогична структуре программ фирм-изготовителей спутниковых приемников (см. рис. 6.4).

Как правило, в таких программах исключены функции планирования и предварительной обработки. Одновременно с этим существенно расширены функции анализа данных и отбраковки сомнительных результатов наблюдений. Кроме того, большинство программ имеют большие возможности введения различных поправок и корректировок для уменьшения влияния внешних условий измерений.

Наиболее известными из специально разработанных программ являются:

- Bernese;
- GIPSY;
- GAMIT и др.

Программа Bernese разработана Астрономическим институтом университета г. Берна. Обработка данных в программе Bernese основана на формировании первых разностей фазовых измерений между станциями для каждой серии наблюдений. При этом выполняются следующие операции: выбираются базовые линии наименьшей длины, подбирается максимальное число синхронных наблюдений для каждой пары станций, вводятся поправки за смещение и зависимость положения фазовых центров различных антенн от азимутов и возвышений ИСЗ.

Программа GIPSY (GPS Inferred Positioning System) — разработка JPL — использует свободные от влияния ионосферы линейные комби-

нации фазовых измерений и, если доступны, то псевдодальности, полученные по P-коду. Никаких разностей измерений не формируется. Одновременно оцениваются векторы состояния ИСЗ, координаты пунктов, поправки часов ИСЗ и приемников, параметры тропосферы, а также положение и ориентация системы координат опорных станций [91].

Комплекс программ GAMIT (GPS At MIT) и GLOBK (GLOBal Kalman filter) — совместная разработка Массачусетского технологического института (MIT) и Института океанографии (SIO). Программа GAMIT предназначена для определения трехмерного относительного положения наземных станций. Ее основная алгоритмическая модель базируется на разностях измерений, что позволяет исключить влияние ухода часов ИСЗ, ошибок эфемерид ИСЗ и среды распространения сигнала на точность оценки параметров. Обработка данных выполняется в основном автоматически, но для интерактивного редактирования и восстановления пропусков циклов может быть использована вспомогательная программа CVIEW. Программа GLOBK предназначена для объединения отдельных решений, полученных GAMIT, и их совместного уравнивания. Работа этой программы основана на алгоритме фильтра Калмана. Координаты пунктов и элементы орбит ИСЗ принимаются этой программой как «кизианаблюдения» [91].

#### 6.4. Уравнивание геодезических сетей, созданных на основе использования спутниковой технологии

Геодезические сети независимо от технологии их создания всегда содержат избыточные измерения. При помощи избыточных измерений контролируются и устраняются некачественные результаты. Кроме того, избыточные измерения используют для оценки точности выполненных измерений. С другой стороны, избыточные измерения приводят к неоднозначным значениям координат и высот геодезических сетей. Процесс уравнивания выполняется с целью получения однозначных результатов и для повышения их точности. Как правило, эта задача решается по методу наименьших квадратов минимизацией выражения  $\sum p v^2$ , где  $p$  — веса измерений или координат, а  $v$  — соответствующие поправки. Правильный выбор весов измерений приводит к повышению точности результатов уравнивания и, наоборот, ошибочные веса могут привести к снижению точности геодезической сети.

Примером определения весов может служить фрагмент геодезической сети (рис. 6.5), спутниковые наблюдения в которой выполнены шестью приемниками в течение шести сеансов.

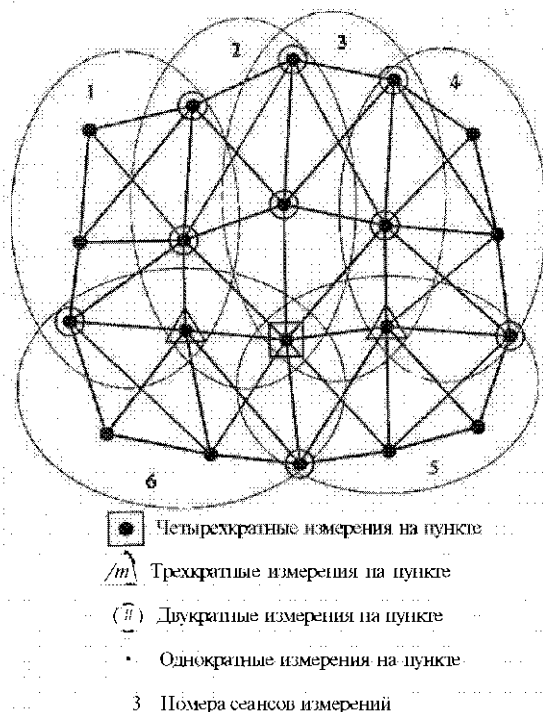


Рис. 6.5. Схема фрагмента геодезической сети из 20 пунктов, созданной с использованием спутниковой технологии

Если принять за единицу вес однократно измеренной линии, то вес линии, измеренной в двух сеансах, следует задать в 1,4 раза выше. В случае многоточечного решения, если вес координат пункта, на котором выполнены однократные измерения, принять равным единице, то пункт, участвовавший в двух и более сеансах, получит вес 1,41; 1,73 и т. д.

На практике нашли применение следующие технологические схемы:

- уравнивание по программе фирмы-изготовителя спутниковых приемников;
- уравнивание по специально разработанной программе;
- уравнивание спутниковых измерений, как сетей трилатерации.

#### 6.4.1. Уравнивание по программе фирмы-изготовителя спутниковых приемников

Основными блоками программы, участвующими в процессе уравнивания, являются:

- просмотр и редактирование;
- уравнивание;

- преобразование координат;
- сервисные программы.

Данные выбранного объекта можно просматривать и редактировать в графическом и табличном виде в блоке «Просмотр и редактирование». Информацию, относящуюся к пунктам, такую, как идентификатор пункта, атрибуты, смещение антенны, координаты и т. д., можно просматривать и редактировать в любое время. Использование фильтров позволит выводить на экран только те пункты, которые удовлетворяют определенным критериям.

Блок «Уравнивание» обеспечивает пользователя средством для исполнения уравнивания векторов базисных линий по методу наименьших квадратов в пространственной геоцентрической системе координат WGS-84 или ПЗ-90. Данные могут импортироваться непосредственно из любого объекта или же импорт данных может быть осуществлен из подходящего по формату ASCII файла. Может выполняться свободное или несвободное уравнивание. Процесс уравнивания реализуется в автоматическом режиме, и, как правило, не требует участия оператора.

Для получения результатов в системе координат пользователя необходимо провести преобразования координат из одной системы в другую. Для этой цели предоставляется несколько возможностей:

- 1) создавать библиотеки наборов координат, эллипсоидов, параметров трансформации и наборов проекций;
- 2) определять различные типы параметров преобразования координат;
- 3) осуществлять различные виды преобразования;
- 4) использовать различные картографические проекции;
- 5) объединять программы вычисления картографических проекций, определенных пользователем.

#### *6.4.2. Уравнивание по специально разработанной программе*

Процесс уравнивания спутниковых измерений по специально разработанной программе мало отличается от уравнивания по программе фирмы-изготовителя спутниковых приемников. В специально разработанных программах могут быть расширены функции преобразования координат, объединения данных полученных различными приборами и методами. Кроме того, в таких программах могут быть использованы оригинальные алгоритмы уравнивания.

Большинство специально разработанных программ уравнивания позволяют использовать не только результаты спутниковых измере-

ний, но также результаты наземных геодезических измерений — горизонтальные и вертикальные углы, измеренные и редуцированные линии, превышения и т. д. Такие задачи возникают практически всегда при реконструкции и развитии городских геодезических сетей. Как уже отмечалось выше, принципиально важным при использовании разнородных данных является правильное установление весов всех величин, участвующих в уравнивании.

На практике нашли применение следующие технологические схемы:

- общее совместное уравнивание всех геодезических построений на территории с последовательной корректировкой весов и отбраковкой ненадежных величин;
- ранжирование по точности уравниваемых частей геодезической сети и раздельное уравнивание каждого выделенного класса построения.

Преимущества и недостатки есть у каждого метода, и конкретные рекомендации по их использованию можно выработать только после тщательного анализа всей имеющейся на данную территорию геодезической информации. Как правило, рекомендуемая технология уравнивания определяется на стадии технического проектирования.

#### *6.4.3. Уравнивание спутниковых измерений как сетей трилатерации*

Суть метода уравнивания спутниковых измерений, как сетей трилатерации заключается в вычислении длин линий на физической поверхности Земли по одной из вышеперечисленных программ, редуцирование этих длин на нужную поверхность относимости и уравнивание сети трилатерации по известным программам.

Работа выполняется в следующей последовательности:

- определение всех линий в сети, которые были измерены с достаточной точностью, например, всех линий, непосредственно измеренных парой приемников;
- отбор из общего числа линий тех, которые удовлетворяют требованиям к конфигурации геодезической сети (по критериям длин линий, углов в треугольниках, жесткости геометрических фигур и т. д.);
- вычисление длин отобранных линий на физической поверхности Земли (наклонных линий);
- редуцирование наклонных линий на заданную поверхность относимости (эллипсоид, плоскость в трех- или шестиградусной зоне, плоскость местной системы координат с условной высотой и условным осевым меридианом и т. д.);

- уравнивание и оценка точности полученной сети трилатерации с использованием одной из известных программ уравнивания геодезических сетей.

Этот метод уравнивания наиболее целесообразно использовать в случае недостаточной уверенности в точности исходных данных, например, при реконструкции городских геодезических сетей. Он позволяет осуществить гибкий подход к вопросам уравнивания и определения точных значений ключа связи государственной и местной систем координат с минимальными искажениями результатов измерений. Практически этот метод использовался многими аэрогеодезическими предприятиями Роскартографии при обработке городских геодезических сетей крупных и средних городов, таких как Москва, Нижний Новгород, Владимир, Иваново, Кострома, Саранск, Киров и другие.

## Раздел 7. Использование спутниковых технологий для построения геодезических сетей

Опорные геодезические сети, создаваемые спутниковыми методами, принято в мировой практике подразделять на глобальные, континентальные, национальные, региональные и локальные геодезические сети. Применительно к территории России предусмотрено построение на основе спутниковой технологии фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), представляющей собой высшее звено в структуре координатного обеспечения территории нашей страны. Последующими звеньями в государственной опорной геодезической сети по своему рангу являются высокоточная геодезическая сеть (ВГС) и спутниковая геодезическая сеть 1 класса (СГС-1). Вместе с тем в последние годы достаточно интенсивно развиваются локальные геодезические сети, базирующиеся на совместном использовании спутниковых и традиционных наземных методов. В последующих подразделах приведена краткая информация об особенностях построения и состоянии развития спутниковых геодезических опорных сетей как в нашей стране, так и за рубежом.

### 7.1. Построение глобальной опорной геодезической сети

Характерные для современных спутниковых систем позиционирования особенности, проявляющиеся в возможности точного и оперативного определения координат пунктов, расположенных в пределах всего земного шара, были использованы в последние десятилетия для создания глобальной опорной геодезической сети. Схема расположения пунктов, входящих в такую сеть, была приведена на рис. 1.11.

Систематические спутниковые наблюдения, проводимые на пунктах глобальной сети, позволяют периодически уточнять координаты этих пунктов, вычислять точные значения эфемерид наблюдаемых спутников, входящих в рассматриваемые системы позиционирования. Кроме того, они позволяют изучать геодинамические явления, происходящие в земной коре, в пределах всего земного шара, и в таких составных частях атмосферы, как ионосфера и тропосфера.

Для обеспечения точного мониторинга вращения Земли и движения полюсов с помощью современных космических геодезических

(ехнологий Международное бюро времени (МБВ) - Bureau International de l'Heure (BIH) в 1984 г. создало наземную систему - HTS84 (BIH Terrestrial System) на основе спутниковых лазерных даль-иомерных систем (SLR), радиоинтерферометров со сверхдлинной ба-Юй (VLBI) и спутниковых доплеровских измерений. В 1988 г. когда Международная служба вращения Земли IERS (International Earth Rotation Service) заменила BIH, была создана система координат ITRF88 (IERS Terrestrial Reference System), которая соответствовала следующим требованиям:

- система является геоцентрической с началом в центре масс Земли, включая океан и атмосферу;

- ориентация системы согласуется с параметрами ориентирования Земли - Earth Orientation Parameter (EOP) на эпоху 1984,0;

- используемая в системе модель скоростей станций имеет нулевые величины остаточного вращения по отношению к земной коре;

- масштаб соответствует общеземной системе координат.

Для поддержания ITRF в соответствии с вышеназванными требованиями, начиная с 1988 г., ежегодно производится уточнение системы путем включения в нее новых измерений и пунктов. Для получения скоростей движения станций была использована модель движения тектонических плит NUVEL-1, в которой соблюдалось требование отсутствия остаточного вращения.

Модель NUVEL-1 вместе с неравномерным распределением станций ITRF по всему миру дает смещение между ITRF и IERS EOP 0,2 угловых миллисекунды в год. К 1992 г. это несовпадение с осью вращения Земли достигло примерно одной угловой миллисекунды. Скорости станций модели NUVEL-1 были пересмотрены с использованием спутниковых наблюдений на 150 пунктах и вошли в систему координат ITRF92.

Отмеченный подход обусловил необходимость организации Международной службы GPS для геодинамики (IGS), в состав которой наряду с административными подразделениями вошли не только многочисленные станции слежения, но и центры по обработке данных, включая и анализ получаемых результатов. Точность определения координат пунктов, входящих в глобальную опорную геодезическую сеть, на начальной стадии характеризовалась средними квадратическими ошибками на уровне около 15 мм в плане и около 35 мм по высоте. По мере совершенствования методики наблюдений и обработки, отмеченные ошибки были уменьшены до 5 мм в плане и 8 мм по высоте.

В середине 90-х годов в составе службы IGS были организованы международные центры по обработке и анализу получаемых данных. /Для согласования поступающей в эти центры информации был разра-



ботан специальный формат независимого обмена программным обеспечением, который получил сокращенное название SINEX.

На основе обработки и анализа результатов, проводимых в течение ряда лет спутниковых наблюдений из всего набора пунктов, входящих в глобальную сеть, было выделено несколько десятков наиболее стабильных пунктов, которые были использованы для уточнения Международного наземного референсного каркаса (ITRF). Этот каркас предназначен не только для установления положения и масштаба геоцентрической координатной системы, но и для определения параметров вращения Земли и, как следствие, для установления взаимосвязи со звездной (небесной) системой координат.

По результатам обработки измерений координат пунктов, входящих в ITRF, было уточнено положение центра масс Земли, который принят за начало геоцентрической системы координат. Достигнутая при этом точность оценивается средней квадратической ошибкой на уровне около 10 см. Проводимые в этой связи еженедельные определения в течение нескольких лет выявили следующий разброс смещений начала координат:

- по оси X от -20 до +60 мм,
- по оси Y от 0 до +90 мм,
- по оси Z от -80 до +30 мм.

Кроме того, зарегистрирован разброс значений масштабирующего фактора в пределах от  $+2 \cdot 10^{-9}$  до  $-6 \cdot 10^{-9}$ . Изменений в ориентировке координатных осей при этом не замечено.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что значения координат, относящиеся к различным эпохам, могут несколько различаться. В частности, такое расхождение относится и к широко используемым координатным системам WGS-84 и ITRF, поскольку первая из них относится к эпохе 1984 г., а вторая может относиться к более поздним эпохам.

Для контроля за состоянием исходной глобальной координатной системы и проведения в случае необходимости корректировки этой системы служба IGS с 1 января 1994 г. перешла на постоянное отслеживание координат пунктов глобальной опорной геодезической сети и на систематическую обработку получаемых при этом результатов.

Исследовательский центр наук о Земле (GFZ) в Потсдаме (Германия) в числе других аналитических центров в Европе и США ведет разработки в области построения и эксплуатации глобальной сети постоянных GPS-пунктов [81]. Данные с этих пунктов предназначены для целей Международной службы GPS для геодинамики (IGS), осуществляющей определение точных орбит спутников, координат и скоростей GPS-пунктов, а также поправок часов. Предполагается, что глобальная иерархическая сеть IGS после завершения ее создания и раз-

пития, будет состоять из 30-40 основных станций и 150-200 станций региональных и локальных сетей. 24 из них (в том числе 4 основных, 20 региональных и локальных станций) работают под эгидой GFZ. В число курируемых GFZ постоянных пунктов IGS на территории СНГ включены следующие: Китаб, Звенигород, Дудинка, Красноярск, Майданак, Ташкент, Петропавловск, Душанбе, Чимкент, Иссык-Куль, Каракол, Нарын.

В России в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 16 марта 1996 г. № 293 к открытому опубликованию без ограничений точности разрешены координаты следующих включенных в международную сеть станций (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Название станции	Широта	Долгота
Сейсмическая станция Москва (г. Обнинск)	55°28"	36°32'
Обсерватория Института астрономии РАН (г. Звенигород)	55 07	36 34
Главная Астрономическая обсерватория РАН (г. Пулково)	59 46	30 20
Астрофизическая обсерватория РАН (п. Зеленчук)	41 03	43 48
Сейсмическая станция Арти (п. Арти)	56 40	60 55
Астрономическая обсерватория УО РАН (г. Екатеринбург)	56 26	58 34
Обсерватория Красноярского технического университета (г. Красноярск)	56 08	93 07
Сейсмическая станция Якутск (г. Якутск)	62 02	129 41
Обсерватория Института космофизических исследований Якутской АН (г. Тикси)	71 35	128 47
Сейсмическая станция Магадан (г. Магадан)	59 34	150 46
Сейсмическая станция Южно-Сахалинск ИМГиГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск)	47 02	142 43

## 7.2. Построение континентальных опорных геодезических сетей

Стремление к созданию на отдельных континентах геодезической координатной основы повышенной точности с учетом характерных для конкретных континентов факторов, оказывающих влияние на изменения с течением времени значений определяемых координат, обусловило целесообразность построения континентальных

опорных геодезических сетей. Одним из примеров такой сети может служить Европейская геодезическая опорная сеть, основу которой составляет референцный каркас, получивший сокращенное название EUREF. Создание такой сети на базе использования спутниковых технологий, включающей в себя около 90 пунктов, было начато в конце 80-х годов. При ее построении с участием 16-ти европейских стран наряду с использованием GPS были предусмотрены измерения с помощью спутниковых лазерных дальномерных систем (SLR) и радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (VLBI). На рис.7.1 приведена схема расположения пунктов, вошедших в состав EUREF.

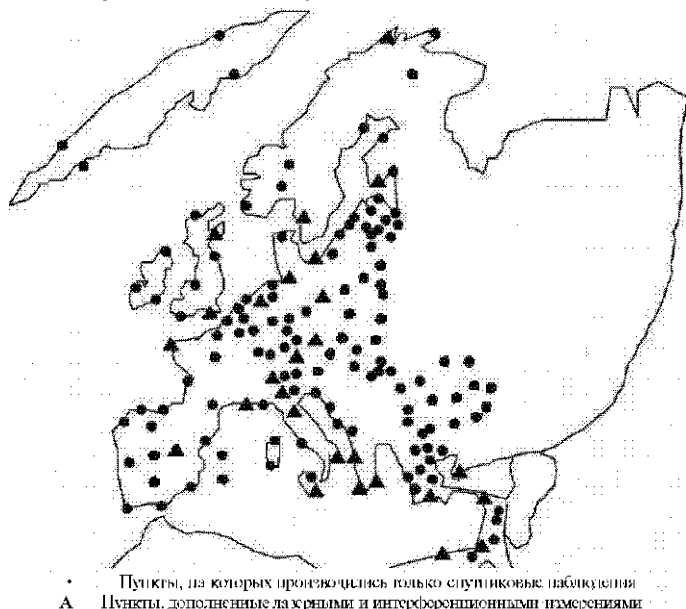


Рис. 7.1. Схема постоянно действующих пунктов системы EUREF по состоянию на 1995 г.

Обработка результатов выполненных измерений производилась с участием 12-ти вычислительных центров. Полученная при этом точность, базирующаяся на формализованном учете случайных ошибок измерений, оказалась на уровне менее 1 см по всем трем координатным осям. В то же время из сравнения с лазерными и интерференционными измерениями реальная точность оценивается на уровне нескольких сантиметров.

Характерные для EUREF вычисляемые значения координат пунктов, входящих в эту сеть, находят применение не только для текущего использования заинтересованными организациями, но и для вы-

числения параметров перехода к другим координатным системам (в частности, ITRF и WGS-84).

В последующие годы EUREF получила дальнейшее развитие как за счет организации дополнительных станций спутниковых наблюдений, так и за счет подключения к этой сети целого ряда ранее не участвующих стран (Чехия, Венгрия, Польша, Латвия и др.) [88].

### 7.3. Построение государственной геодезической сети России на основе спутниковых технологий

Наряду с глобальной и континентальными геодезическими сетями, создаваемыми на основе применения спутниковых методов, аналогичные подходы используются и при построении национальных опорных геодезических сетей, охватывающих как территории отдельных стран, так и их составных частей. К числу таких стран относится и Россия, на территории которой в соответствии с Концепцией перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений создается новая высокоэффективная государственная геодезическая сеть, базирующаяся на применении методов спутниковой геодезии.

Концепция перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений разработана с целью обеспечить наиболее рациональное и эффективное в существующих условиях практическое определение координат и высот пунктов земной поверхности на всей территории страны с точностями, требуемыми для решения возможно более широкого круга научно-технических и производственных задач [32, 35]. В соответствии с концепцией указанная цель может быть достигнута, если на территории страны (или группы заинтересованных стран) будет существовать единая по точности сеть надежно закрепленных на местности геодезических пунктов со средними расстояниями между ними порядка 30 - 35 км (средняя плотность 1 пункт на 1000 км<sup>2</sup>). В этом случае любой заинтересованный потребитель, располагающий как минимум двумя двухчастотными спутниковыми приемниками, может выполнять интересующие его координатные определения дифференциальным методом относительно пунктов указанной сети. По крайней мере один из этих пунктов всегда будет находиться на расстоянии не далее 20 — 25 км от места определений. Как было рассмотрено выше, именно до таких расстояний полностью реализуется инструментальная точность современных спутниковых приемников при продолжительности наблюдений около часа. В менее обжитых районах плотность опорной сети может быть уменьшена до 1 пункта на 2000 км<sup>2</sup>. Отрицательное влияние

на точность увеличивающихся расстояний между опорными пунктами и пунктами, определяемыми потребителями, можно компенсировать увеличением времени наблюдений. В малообжитых и труднодоступных районах допускается увеличение расстояний между пунктами опорной сети до 100 км. В этом случае для привязки развиваемых потребителем локальных сетей к единой государственной системе координат с требуемой точностью, возможно увеличение продолжительности наблюдений до нескольких часов и даже суток.

Взаимное положение опорных пунктов должно быть известно со средними квадратическими ошибками не более 1,0—1,5 см. Такая опорная сеть в настоящее время может быть создана существующей спутниковой аппаратурой при следующих условиях:

- создаваемая сеть будет опираться на построения более высокого уровня, обеспечивающие исключение деформаций регионального и глобального характера;

- создаваемая сеть будет отнесена к единой для всей страны геоцентрической системе координат.

Концепция послужила базовым документом при разработке Основных положений о государственной геодезической сети [46] и Инструкции по построению государственной геодезической спутниковой сети [29], в соответствии с которыми предусмотрено создание на территории России и других заинтересованных государств трех уровней или классов государственной геодезической спутниковой сети:

- фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС);
- высокоточная геодезическая сеть (ВГС);
- спутниковая геодезическая сеть I класса (СГС-I).

### *7.3.1. Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС)*

Высший уровень в структуре координатного обеспечения территории страны занимает фундаментальная астрономо-геодезическая сеть. Она служит исходной геодезической основой для дальнейшего повышения точности пунктов государственной геодезической сети. ФАГС практически реализует геоцентрическую систему координат в рамках решения задач координатно-временного обеспечения (КВО) страны.

Основными ее функциями являются:

- задание и оперативное воспроизведение общеземной геоцентрической системы координат;

- устранение возможных глобальных и региональных искажений ВАГС и СГС-I;

- экспериментальное выявление и учет деформирующего влияния ии-динамических процессов на стабильность координатной основы;
- метрологическое обеспечение перспективных запросов практики.

Техническое оснащение работ по созданию ФАГС должно обеспечивать не только предельно возможную в настоящее время точность взаимного положения пунктов, но и их связь с центром масс Земли. Поэтому предполагается максимально использовать все существующие возможности и измерительные средства уже существующих проектов, в том числе международных. Часть пунктов ФАГС (10-15) должны быть постоянно действующими геодинамическими обсерваториями. Предполагается включение в ФАГС пунктов радиointерферометрического комплекса «Квазар» (3 пункта: п. Светлое (близ С.-Петербурга, п. Бадары в районе Иркутска, п. Зеленчук на Северном Кавказе), которые предполагается доукомплектовать высокоточными лазерными дальномерами и спутниковой аппаратурой. Кроме того, предполагается включение в ФАГС четырех пунктов Госстандарта, работающих по программе «Дельта», (Менделеев, Новосибирск, Иркутск, Благовещенск), которые также предполагается доукомплектовать высокоточными лазерными дальномерами и спутниковой аппаратурой. Еще часть постоянно действующих обсерваторий ФАГС может быть создана на основе существующих пунктов космического геодезического комплекса ВТС, работающего по программе ГеоИК.

Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть состоит из постоянно действующих и периодически определяемых пунктов, формирующих единую сеть на территории Российской Федерации и других заинтересованных государств.

В состав постоянно действующих пунктов ФАГС по согласованию включаются пункты службы вращения Земли Госстандарта России, пункты спутниковых наблюдений РАН и пункты радиointерферометрических измерений со сверхдлинной базой, а также часть астрономо-геодезических пунктов космической геодезической сети (АГП КГС), расположенных на территории страны. В состав постоянно действующих пунктов на стадии обработки в ФАГС включается также необходимая часть пунктов, входящих в международную геодинамическую сеть пунктов (IGS), независимо от их государственной или ведомственной принадлежности.

В состав периодически определяемых пунктов ФАГС могут быть включены пункты Роскартографии, РАН и АГП КГС на территории страны, не вошедшие в число постоянно действующих пунктов ФАГС, пункты наблюдений ГЛОНАСС, а также пункты службы вращения Земли Госстандарта России и пункты, периодически участвующие в

программах лазерной локации спутников и длиннобазисной радиоинтерферометрии.

Расположение остальных пунктов ФАГС определяется, исходя из решения задач геодинамики и требования равномерного покрытия всей территории страны. Расстояние между смежными пунктами ФАГС 650...1000 км. Общее их число составит 50-70 пунктов.

Количество, расположение постоянно действующих и периодически определяемых пунктов ФАГС, состав аппаратуры и программы наблюдений определяются научно-технической программой построения и функционирования ФАГС с учетом проектов международного сотрудничества.

Все пункты ФАГС должны быть фундаментально закреплены с обеспечением долговременной стабильности их положения как в плане, так и по высоте.

Пространственное положение пунктов ФАГС определяется методами космической геодезии в геоцентрической системе координат относительно центра масс Земли со средней квадратической ошибкой 10-15 см. Средняя квадратическая ошибка взаимного положения пунктов ФАГС должна быть не более 2 см по плановому положению и 3 см по высоте с учетом скоростей их изменения во времени. В число основных задач построения ФАГС входит достижение требуемой точности и достоверное оценивание точности создаваемой новой геоцентрической системы координат и определение изменений координат пунктов ФАГС во времени.

На пунктах ФАГС выполняются определения нормальных высот и абсолютных значений ускорений силы тяжести. Определения нормальной высоты производится нивелированием не ниже II класса, абсолютные определения силы тяжести по программе определения фундаментальных гравиметрических пунктов. Пункты ФАГС при этом могут получить статус пунктов государственной фундаментальной гравиметрической сети (ГФГС).

Периодичность этих определений на пунктах ФАГС устанавливается в пределах 5 — 8 лет и уточняется в зависимости от ожидаемых изменений измеряемых характеристик.

Задаваемая пунктами ФАГС геоцентрическая система координат согласовывается на соответствующем уровне точности с фундаментальными астрономическими (небесными) системами координат и надежно связывается с аналогичными пунктами различных государств в рамках согласованных научных проектов международного сотрудничества.

Параметры связи между земной системой координат, задаваемой пунктами ГГС, с фундаментальными астрономическими (небесными)

координатами на адекватном уровне точности устанавливаются операционными наблюдениями ГСВЧ и публикуются в бюллетенях серии Е.

С 1999 г. началось создание ФАГС на европейской части России. Выполненная обработка 4-х пунктов ФАГС свидетельствует о том, что полученная точность координатных 15-суточных измерений по всем трем координатным осям характеризуется средней квадратической погрешностью, не превышающей 8,3 мм. В 2000 г. такие наблюдения на упомянутых пунктах были произведены повторно. Полученные при этом материалы измерений находятся в стадии обработки.

В последующие годы выполнялось дальнейшее наращивание исходящих в ФАГС пунктов на всей территории России, включая и ее восточные регионы (рис. 7.2).

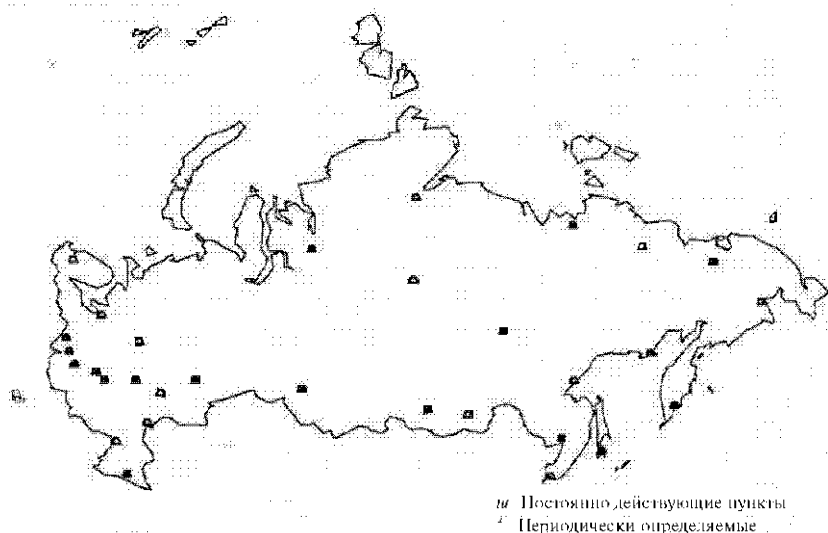


Рис. 7.2. Схема расположения пунктов ФАГС

Постоянно действующие пункты ФАГС: Билибино, Зеленчук, Екатеринбург, Иркутск, Магадан, Менделеево, Нижний Новгород, Новгород, Новосибирск, Норильск, Петропавловск-Камчатский, Пулково, Светлое, Тикси, Хабаровск, Москва (ЦНИИГАиК), Южно-Сахалинск, Якутск.

Периодически определяемые пункты ФАГС: Анадырь, Архангельск, Астрахань, Аян, Владивосток, Калининград, Котлас, Мурманск, Ростов-на-Дону, Самара, Тура, Чита, Чокордах.



СГС-1 представляет собой пространственное геодезическое построение, создаваемое по мере необходимости, в первую очередь, в экономически развитых районах страны, состоящее из системы легко доступных пунктов с плотностью, достаточной для эффективного использования всех возможностей спутниковых определений потребителями, как правило, со средними расстояниями между смежными пунктами 25-35 км.

СГС-1 создается относительными методами космической геодезии, обеспечивающими определение взаимного положения ее смежных пунктов со средними квадратическими ошибками  $3\text{ мм} + 10'' \cdot D$  по каждой из плановых координат и  $5\text{ мм} + 210'' \cdot D$  по геодезической высоте.

СГС-1 может строиться отдельными фрагментами. В каждый фрагмент должны включаться все пункты ВГС и ФАГС, попадающие в область, перекрывающую фрагмент на треть расстояния между смежными пунктами ВГС на данной территории.

Средняя квадратическая ошибка определения положения пунктов СГС-1 относительно ближайших пунктов ВГС и ФАГС не должна превышать 1-2 см в районах с сейсмической активностью 7 и более баллов и 2-3 см в остальных регионах страны.

Нормальные высоты должны определяться на всех пунктах СГС-1 либо из геометрического нивелирования с точностью, соответствующей требованиям к нивелирным сетям П...III классов, либо из спутникового нивелирования как разности геодезических высот, определяемых относительными методами космической геодезии, и высот квазигеоида.

Окончательная точность положения пунктов СГС-1 определяется по материалам обработки в соответствии с методиками, определяемыми нормативно-техническими документами по построению СГС-1 и утверждаемыми Федеральной службой геодезии и картографии России.

Для связи с астрономо-геодезической сетью (АГС) и нивелирной сетью часть пунктов СГС-1 должна быть совмещена или связана с существующими пунктами АГС и реперами нивелирной сети не ниже III класса. Связь, как правило, должна определяться методами космической геодезии со средними квадратическими ошибками не более 2 см для плановых координат при привязке пунктов АГС и 1 см для геодезических высот при привязке нивелирных реперов. При высотной привязке использование пунктов АГС с известными нормальными высотами вместо нивелирных реперов не допускается. Расстояние между пунктами АГС, совмещенными с пунктами СГС-1 или привязанными к ним, не должно быть больше 70 км при средней плотности СГС-1 и 100 км при построении разреженной сети СГС-1 в необжитых

районах. Расстояние между нивелирными реперами для связи с пунктами СГС-1 должно быть не более 100 км.

Повторные определения координат пунктов ГГС и высот реперов должны планироваться в необходимом объеме и с требуемой точностью для выявления деформаций земной поверхности и изучения закономерностей их изменений. При необходимости повторных определений координат пунктов в сейсмоактивном регионе построение СГС-1 планируется с повторным определением пунктов ВГС на этой и смежной территориях.

В районах произошедших землетрясений с магнитудой 5 и более повторное определение координат пунктов геодезических сетей проводится в возможно короткие сроки. Протяженность создаваемых фрагментов СГС-1, включая пункты ВГС, на которые опираются фрагменты СГС-1, должна обеспечивать опору на пункты, не затронутые влиянием произошедшего землетрясения. Необходимость повторных определений координат пунктов геодезических сетей, обусловленная деформациями техногенного происхождения, обосновывается маркшейдерскими и другими геолого-геофизическими данными.

Пункты СГС-1, совмещенные или связанные с реперами нивелирной сети I - III классов, используются для уточнения высот квазигеоида.

В исключительных случаях в районах, не обеспеченных необходимыми данными о высотах квазигеоида, для определения нормальных высот допускается применение тригонометрического нивелирования. В последнем случае средняя квадратическая ошибка взаимного положения смежных пунктов по высоте должна быть не более 0,20 м.

По согласованному с ЦНИИГАиК техническому проекту Верхне-молжское АПП в 1995-1996 г впервые в России выполнило работы по созданию фрагмента спутниковой сети I класса на свою зону деятельности. Спутниковая сеть I класса в соответствии с Концепцией перехода юлографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений [32] представляет собой сплошную сеть со сторонами 20-50 км. Полевые работы на первой очереди объекта проведены с июля по октябрь 1995 г. силами трех экспедиций НАШ с использованием шести приемников Wild GPS System 200 [54]. Первая очередь объекта занимает площадь около 230 тыс. км<sup>2</sup> и расположена на территории Ивановской, Костромской, Нижегородской, частично Владимирской и Ярославской областей, Республик Марий Эл и Чувашия. Схема первой части объекта приведена на рис 7.3.

Для создания высокоточной спутниковой сети на объекте использованы пункты триангуляции, полигонометрии, а также фундаментальные и грунтовые реперы нивелирования.

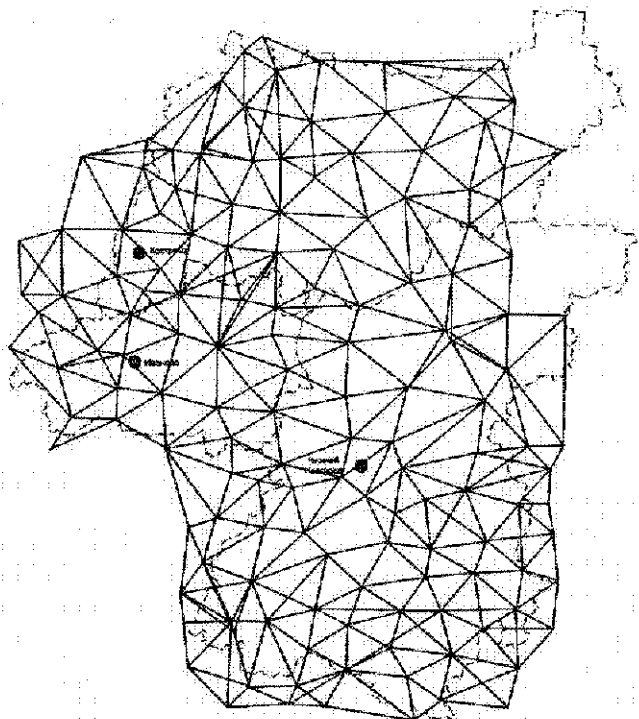


Рис.7.3. Спутниковая сеть 1 класса на территориях Нижегородской, Ивановской и Костромской областей

При выборе пунктов учитывались следующие требования:  
 углы между смежными пунктами не менее  $30^\circ$  и не более  $150^\circ$ ;  
 пункты равномерно покрывают всю территорию объекта;  
 в западной и южной частях объекта расстояние между пунктами 30-40 км, на остальной территории 40-55 км.

Перед полевыми работами проведены контрольные измерения всеми приемниками на эталонном базисе 2 разряда.

Полевые работы включали обследование пунктов, входящих в состав спутниковой сети, и наблюдения на них. При этом использованы топографические карты масштаба 1: 1 000 000 с вынесенным рабочим проектом всей сети, 1: 200 000 с указанными для каждой станции пунктами сети, 1: 50 000 для поиска пункта на местности; комплекты спутниковой геодезической системы Wild GPS System 200; персональные компьютеры типа NoteBook (один на две бригады); технические теодолиты для составления абрисов препятствий на пунктах; радиостанции типа «Ангара»; вахтовые автомобили и подсобное оборудование для работы в автономном режиме в течение длительного срока.

При выполнении работ отработывалась методика проектирования и подготовки высокоточных спутниковых измерений, технология исполнения полевых работ с применением трех и более спутниковых приемников. Кроме геометрических параметров построения сети существуют и технологические особенности создания спутниковых геодезических сетей.

При создании фрагмента СГС-1 использован сетевой метод построения с непосредственным измерением каждой стороны.

Спутниковые наблюдения проводились при одновременном включении всех приемников, установленных на ближайших друг к другу пунктах сети. При этом в каждом сеансе наблюдений были измерены не только запроектированные линии между соседними пунктами, но и дополнительные, соединяющие любую пару участвовавших в наблюдениях приемников. Дополнительно измеренные линии можно использовать для контроля измерений и вычислений. По окончании сеанса наблюдений часть станций оставалась на месте, а другие перемещались на следующие по проекту пункты. В очередном сеансе измерений линии между пунктами первой группы измерялись повторно. Наличие линий, измеренных дважды, позволяет выполнить контроль их определения из разных сеансов.

Наблюдения на пунктах выполнялись при следующих условиях: статический режим измерений; угол отсечки 15"; минимальное количество спутников 4; частота регистрации 15 с. Продолжительность непрерывного сеанса наблюдений составила 6 ч. Время начала измерений (23 ч) выбрано согласно графикам изменения показателя GDOP при проектировании полевых работ.

При выполнении работ в 1995 г. расчетное минимальное количество сеансов наблюдений в сети из 146 пунктов при использовании 6 приемников и 3 совместно используемых пунктов в каждом сеансе равно 48. Фактически с учетом внешних ограничений (гидрография, границы объекта, пропуск сеанса отдельными станциями) потребовалось 54 сеанса.

Полевые работы выполнялись в следующей последовательности: шесть станций выезжают на пункты, составляющие исходную фигуру сети (четыре треугольника). После обследования пунктов, за 1 ч до времени включения станции, исполнители уточняют время включения станций на пунктах по радиосвязи. Станции включаются и работают одновременно в течение 6 ч.

После того как все приемники отработали, три приемника остаются на тех же пунктах для осуществления связи новых измерений со старыми, а три других приемника переезжают на новые пункты. В следующее включение три приемника, которые не перемещались от-

работают совместно дополнительно 6 ч. При этом получаемые ими линии измеряются дважды. Основной проблемой организации полевых работ при создании спутниковой сети 1 класса является четкая синхронизация времени включения всех приемников. Это обеспечивалось тщательным проектированием времени включения станций, которое затем уточнялось в процессе выполнения работ на объекте по радиосвязи.

На стадии предварительной обработки базисные линии вычислялись с помощью пакета программ SKI на персональных компьютерах типа NoteBook по методике, согласно которой объект разбивается на блоки, содержащие 10 — 20 пунктов (для каждого блока открывается проект в пакете программ SKI); вычисления базисных линий проводятся при системных параметрах обработки, применяемых в программе по умолчанию, за исключением параметров «Ионосферная модель» (устанавливается значение «Computed model») и ограничения длины линии «Limitation», задаваемого в соответствии с длиной обрабатываемой линии; если линия измерена более чем в одном сеансе, обрабатываются данные всех сеансов наблюдений; перед началом обработки базисных линий вычисляются координаты по крайней мере одного из пунктов в режиме Single Point, шестичасовой интервал наблюдений разбивается на два интервала продолжительностью по 3 ч; базисная линия вычисляется на каждом из интервалов с записью результатов в файле-протоколе обработки.

Предварительный анализ результатов первого этапа измерений показал обоснованность применения сетевого дифференциального метода при измерениях на высокоточных спутниковых геодезических сетях. Пример расхождений между линиями из изданного каталога и линиями, непосредственно измеренными в поле парой приемников, приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Линия		Длина линии, км	Расхождения, м	Относительные расхождения
От	до			
Бугор	Относ	48,0	-0,024	1/1 999 847
Относ	Выкса	21,8	+0,015	1/1 451 047
Бугор	Выкса	36,3	-0,002	1/1815 9102

Тем не менее анализ проведенный уже по первым 128 линиям северной части объекта дал следующие результаты:

Длина линии, км ..... 44,0  
 Расхождения, м ..... -0,15  
 Относительные расхождения ..... 1/293 333

Такие значительные систематические отклонения подтвердились при дальнейших работах.

Полевые работы на второй очереди фрагмента СГО1 выполнены с мая по сентябрь 1996 г. силами шести экспедиций ВАГП при участии предприятия «Центрмаркшейдерия» с использованием девяти приемников [43]. Вторая очередь объекта площадью 180 тыс. км<sup>2</sup> расположена на территории Кировской и Нижегородской областей, Республики Мордовия и частично Рязанской области, Республик Марий Эл и Удмуртия.

Полевые измерения и предварительная обработка на второй очереди фрагмента СГС-I выполнялись аналогично первой очереди. Общее количество пунктов фрагмента СГС-1 первой и второй очередей составило 250.

Схема фрагмента СГС-1 приведена на рис 7.4.

Анализ результатов определения базисных линий показал:

- избежать сбоев в приеме сигналов невозможно (даже на открытых пунктах);

- число и величина сбоев (число потерянных пиктов) в большинстве случаев оказывают влияние на разрешение неоднозначности и понижают точность вычислений;

- с разрешением неоднозначности вычислено 10% линий;

- относительная разность длин линий, вычисленных на двух и более интервалах, изменяется в пределах 1:100 000-1:5 000 000;

- для линий с разрешением неоднозначности в большинстве случаев разность длин и соответствующих координат меньше по сравнению с аналогичными значениями при неразрешении неоднозначности;

- определение местоположения пункта в режиме «Single Point» практически не зависит от использования точных или бортовых эфемерид.

После окончания предварительной обработки второй очереди фрагмента СГС-1 было проведено сопоставление длин всех измеренных линий фрагмента СГС-1 (редуцированных на плоскость в СК-42) со значениями, полученными из решения обратной геодезической задачи по координатам пунктов из изданных каталогов. Для удобства анализа расхождения были сгруппированы по классам пунктов ГГС (табл. 7.3).

Таблица 7.3

Класс пунктов	Средние расхождения, м
1 - 1	-0,1097
1 - 2	-0,1737
1 - 3	-0,1122
2 - 2	-0,1516
2 - 3	-0,1548
3 - 3	-0,135

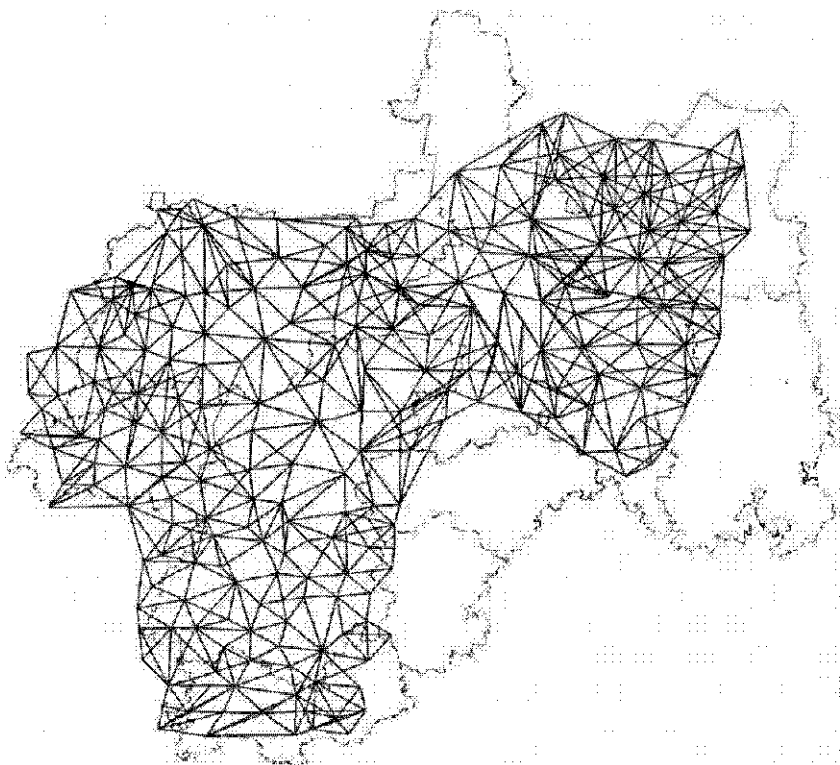


Рис. 7.4. Схема фрагмента СГС-1 в зоне деятельности Верхневолжского АПД

Окончательная обработка такого большого фрагмента высокоточной геодезической сети выполнялась в несколько этапов. На первом этапе были определены все линии сети в двух вариантах (по двум программам). Первый вариант — обработка ВАПП с использованием программы SKI фирмы Leica AG (Швейцария). Второй вариант — обработка ЦНИИГАиК с использованием программы GPSurvey фирмы Trimble Navigation Ltd (США). На втором этапе в МИИГАиКе с использованием программы Bernese, разработанной Астрономическим институтом университета г. Берна (Швейцария), были определены пространственные координаты исходных пунктов для обработки относительно пунктов ITRF Менделеев, Потсдам, Анкара, Китаб. В качестве исходных пунктов использовались специально заложенные пункты на крышах зданий ВАПП и его филиалов в городах Нижнем Новгороде, Иваново, Костроме, Кирове, Саранске. Схема определения исходных пунктов приведена на рис. 7.5. На третьем этапе в ВАПП были вычислены пространственные координаты всех пунктов фрагмента СГС-1, выполнено уравнива-

ние и получены координаты пунктов в государственной системе координат СК-42.

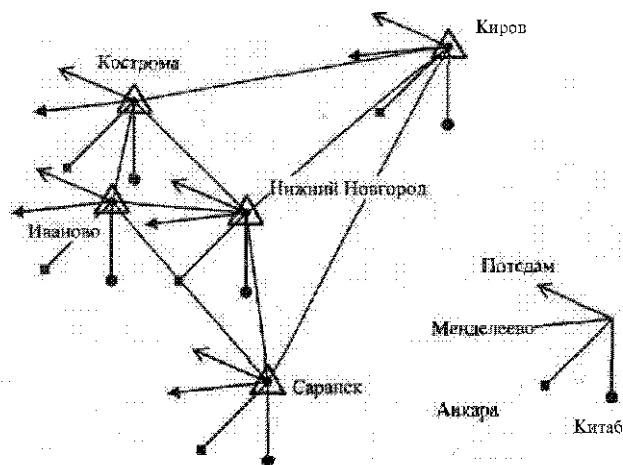


Рис. 7.5. Схема определения исходных пунктов фрагмента СГС-1

По итогам работ был составлен проект Методических рекомендаций по использованию спутниковых приемников Wild GPS System 200 при создании спутниковой сети 1 класса.

#### 7.4. Создание и реконструкция городских геодезических сетей с использованием спутниковых технологий

Наряду с созданием глобальных, континентальных и национальных опорных геодезических сетей спутниковые технологии широко используются в различных странах мира при построении и реконструкции региональных и локальных геодезических сетей. В последние годы спутниковые технологии стали применяться в широких масштабах при землеустроительных работах, при создании и эксплуатации крупных инженерных сооружений (атомные электростанции, гидротехнические сооружения) и при решении других задач прикладной геодезии. Повышенный интерес проявляется к созданию и реконструкции локальных опорных геодезических сетей в крупных городах на основе применения спутниковых методов.

Помимо государственной геодезической сети (ГГС) Основными положениями о государственной геодезической сети [46] предусмотрено создание геодезических сетей специального назначения. Геодезические сети специального назначения создаются в тех случаях, когда дальнейшее сгущение пунктов ГГС экономически нецелесообразно или когда требуется особо высокая точность геодезической сети.



Геодезические сети специального назначения создаются в единых государственных системах координат или в местных системах координат, устанавливаемых для отдельных участков местности. Под местной системой координат понимается система координат с началом, отличным от начала координат действующей государственной системы геодезических координат. Такая система устанавливается на отдельные участки местности площадью до 5000 км<sup>2</sup>, либо в пределах территории одного административного района или подобной ему административно-территориальной единицы субъекта Российской Федерации, а также в пределах территории города.

Местные системы координат устанавливаются Федеральной службой геодезии и картографии России. Учет и хранение исходных данных, раскрывающих переход от этих местных систем координат к государственным системам координат (ключи перехода) осуществляется органами государственного геодезического надзора - территориальными инспекциями (ТИГН). Допускается установление местных систем координат органами и организациями в пределах их компетенции при обязательном согласовании таких систем координат с соответствующими инспекциями госгеонадзора. При этом ключи перехода передаются в инспекцию госгеонадзора.

При создании и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых приемников необходимо учитывать следующие особенности:

- наличие практически во всех городах локальной системы координат, созданной с целью уменьшения расхождений при измерениях на физической поверхности и на крупномасштабных планах;
- необходимость сохранения городской системы координат при любых реконструкциях, переуравниваниях и других работах с целью сохранения большого количества точных (5-10 см) топографических и кадастровых материалов;
- наличие в крупных городах специальных геодезических сетей, предназначенных для строительства метро и редуцированных, как правило, на свою поверхность относимости;
- наличие в ряде городов специальных геодезических сетей, точность которых отличается от точности городских геодезических сетей.

Специфика построения геодезических сетей в городах обусловлена, прежде всего, многопрофильной деятельностью различных городских организаций, у которых возникает необходимость в получении разнообразной геодезической информации и которые предъявляют различные требования к плотности и местам расположения пунктов сети, а также к точности координатных определений.

Отмеченный разнообразный подход привел к тому, что на территориях многих городов стали создаваться различными ведомственными организациями независимые геодезические сети, которые в целом ряде случаев базировались на различных, слабо согласованных друг с другом координатных системах, а также на различных исходных высотных отметках. Современные спутниковые методы открыли возможность построения объединенной опорной геодезической сети, удовлетворяющей запросам различных заинтересованных организаций.

Фактическая точность городской геодезической сети в большинстве городов соответствует требованиям для выполнения стандартных топографо-геодезических работ в городах (топографические съемки масштабов 1:500 и мельче, вынос в натуру проектов и др.). Наибольшие отклонения, выявленные при очередном цикле реконструкции и переуравнивания, составляют, как правило, не более 10 см. Гораздо худшие результаты имеют участки городской сети в присоединенных к городу территориях, где ранее была своя местная система координат либо геодезическая основа на этих территориях создавалась методом наращивания без совместного уравнивания геодезической сети на всей территории города. На таких участках отклонения достигают 20 см и более.

Противоречия между фактическим состоянием и требованиями по точности и однородности городской геодезической сети решаются, как правило, при очередном цикле реконструкции и переуравнивания, включающего в себя следующие этапы:

- сбор сведений о геодезических работах, выполненных на территории города;
- анализ местной системы координат и топографической съемки, базирующейся на различных участках геодезической сети;
- проектирование и выполнение работ по созданию и восстановлению участков сети в местах ее утраты и в перспективных районах;
- совместное переуравнивание городской сети с использованием старых и новых данных;
- анализ расхождения координат совмещенных пунктов, подбор ключа местной системы координат, минимизирующего эти расхождения;
- составление новых каталогов координат городской геодезической сети и замена ими старых;
- выдача рекомендаций по дальнейшему использованию материалов топографической съемки в зависимости от полученных расхождений.

#### *7.4.1. Опыт создания и реконструкции городских геодезических сетей в 1992-1995 гг.*

Верхневолжское аэрогеодезическое предприятие (ВАШ) и Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК) сотрудничают по использованию спутниковых технологий с начала 90-х годов. За прошедшее время были выполнены большие объемы производственных работ, а также приобретен опыт спутниковых геодезических измерений для различных целей от создания опорных геодезических сетей до топографических съемок в кинематическом режиме. Более чем десятилетний опыт в создании и реконструкции городских геодезических сетей выявил все преимущества использования спутниковых систем по сравнению с традиционными методами.

Уже на начальном этапе, характеризующемся полным отсутствием нормативно-технических документов по использованию спутниковых приемников, был выполнен ряд производственных работ по созданию высокоточных городских спутниковых геодезических сетей. Реконструированы высокоточные каркасные сети 2 класса в городах Иваново и Кострома (рис. 7.6 и 7.7). Выполнены работы по уточнению триангуляции города Павлово и связи ее с государственной геодезической сетью. Составлен проект и начаты работы по реконструкции городской геодезической сети Нижнего Новгорода (триангуляция 2 и 3 классов).

При выполнении этих работ был применен и отработан сетевой метод создания геодезической сети в дифференциальном режиме. При сравнении расстояний, непосредственно измеренных в поле, с расстояниями из каталогов координат установлено, что непосредственно измеренные парой спутниковых приемников линии городской триангуляции имеют относительные расхождения с каталожными значениями лучше 1:500 000, а не измеренные непосредственно могут быть хуже 1:100 000.

При выполнении работ в городах был выявлен ряд условий, способствующих увеличению производительности работ с применением спутниковых геодезических систем. Это, в первую очередь, тщательное проектирование всей сети с предварительным обследованием всех выбранных пунктов. Во вторых, это выбор способов и методов создания сети, исходя из количества пунктов в сети, количества приемников, участвующих в работе и требований к точности их определения. В третьих это оперативная оценка точности полевых измерений на объекте, например, сравнение горизонтальных дальностей между исходными пунктами с дальностями, полученными по спутниковым измерениям и редуцированным на заданную поверхность.

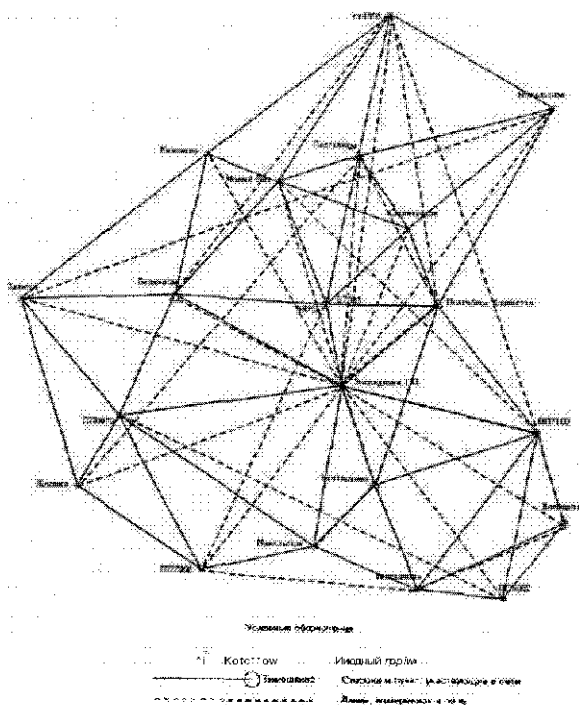


Рис.7.6. Каркасная сеть в г. Иваново

При камеральной обработке результатов полевых измерений, выполненных на производственных объектах по созданию, восстановлению и реконструкции геодезических сетей городов Иваново, Костромы и Павлово, была отработана методика уравнивания высокоточных городских геодезических сетей как в местной, так и в государственной системах координат.

Опыт начального этапа производственных работ по созданию высокоточных городских спутниковых геодезических сетей был обобщен в 1995 г. в руководящем техническом материале (РТМ) [62].

*РТМ «Применение приемников спутниковой системы WILDGPS System 200 фирмы Лейка (Швейцария) при создании и реконструкции городских геодезических сетей»*

Общие, принципиальные вопросы создания государственной геодезической сети России рассмотрены в «Концепции перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутнико-

вых координатных определений», вышедшей в 1995 г. Детальная регламентация геодезических работ с использованием спутниковых приемников должна быть раскрыта в Основных положениях и Инструкциях, разработка и утверждение которых ведутся, но в настоящее время не завершены.

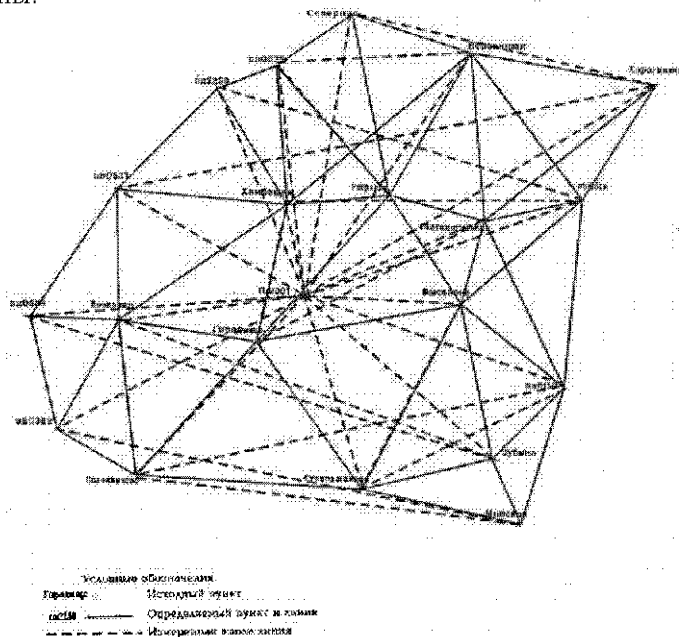


Рис. 7.7. Каркасная сеть в г. Костроме

Одним из первых нормативных документов, детально регламентирующих выполнение полевых геодезических работ с использованием спутниковых приемников, был разработанный в Верхневолжском аэрогеодезическом предприятии руководящий технический материал по применению приемников спутниковой системы при создании и реконструкции городских геодезических сетей [62]. Этот РТМ был рекомендован Роскартографией в качестве временного отраслевого нормативного документа (№ 5-15-2463 от 12.09.95).

В РТМ рассмотрены этапы проектирования, полевого исполнения и предварительной обработки результатов полевых измерений, определены установочные параметры для работы приемников, интервалы времени измерений в зависимости от класса создаваемой сети, предложены схемы работ и методы измерения спутниковых сетей, описан порядок работы при камеральной обработке спутниковых измерений.

В приложениях РТМ приведены схемы городских геодезических сетей; порядок составления графиков DOP на объект или пункт; поряд

и ж составления графиков препятствий вокруг пунктов; форма записи шумов и углов наклона препятствий; форма абриса препятствий для пункта; порядок приема данных с карточек памяти в компьютер; порядок работы при предварительной обработке результатов измерений приемниками геодезической спутниковой системы WILD GPS System 200 с применением программы SKI; условные знаки для схем городских геодезических сетей, полученных с применением спутниковых приемников.

#### *7.4.2. Опыт создания и реконструкции городских геодезических сетей в 1996 - 2001 гг.*

В дальнейших производственных работах получили подтверждение положения РТМ о необходимости создания высокоточных сетей только в дифференциальном режиме.

Основными задачами создания и реконструкции городских геодезических сетей были необходимость сохранения городской системы координат, в которой ранее были выполнены крупномасштабные съемки территории города (1:500—1:2000), и одновременно с этим обеспечение высокой точности городской геодезической сети для решения других за-

• Ч. Работы по модернизации городской геодезической сети, как правило, планировались в два этапа. На первом этапе создавалась каркасная сеть с максимально возможной точностью (с относительными ошибками до 5-10%). В каркасную сеть включалось не менее 50% пунктов городской (ОИ) триангуляции 1, 2 и 3 классов, а также основные узловые пункты нивелирования 4 класса и пункты высокоточных сетей специального назначения (геодезическая сеть метрополитана, нивелирная сеть и др.).

Результаты измерений редуцировались на плоскость в местной системе координат. Уравнивание каркасной сети выполнялось в следующих вариантах:

- с использованием исходных пунктов городской геодезической сети (пунктов государственной сети);
- как свободную сеть, опирающуюся на один исходный пункт и дирекционный угол;
- с измененными параметрами местной системы координат.

В каждом варианте выполнялся анализ расхождений координат в совмещенных пунктах. Такой анализ и подбор новых параметров местной системы координат необходим с целью сохранения местной системы координат, принятой при создании топографических планов масштаба 1:500. Масштабирование результатов спутниковых измерений, как правило, не применялось, а максимально использовалось вычисленное редуцирование результатов измерений на средний уровень го-

2. Часть пунктов новой сети должна быть совмещена с пунктами существующих ведомственных геодезических сетей с целью объединения их и обеспечения надежной и точной связи между ними.

3. В новой сети выделяется каркас из нескольких пунктов с расстояниями между ними 10—15 км, на которых необходимо произвести измерения повышенной точности (желательно не хуже  $H0 \sim 2$ ). Пункты такого каркаса необходимы для организации мониторинга деформационных процессов, происходящих в пределах города.

4. Пункты новой сети должны быть совмещены с пунктами существующей высотной сети, определенной геометрическим нивелированием не ниже второго класса.

5. Для математической обработки спутниковых измерений на требуемом уровне точности один пункт (желательно несколько) должен быть привязан к международной спутниковой сети с целью определения его абсолютных координат в системе WGS-84 с дециметровой точностью.

6. Уравнивание новой сети и преобразование координат ее пунктов из WGS-84 в требуемые системы координат, например в СК-42, необходимо сделать в пространственной системе координат. Такое уравнивание и преобразование координат обеспечит определение в каждом пункте новой сети высот квазигеоида с точностью, которой обладают спутниковые измерения. Каталог высот квазигеоида и карта, построенная на его основе, дадут возможность определить нормальные высоты других определяемых пунктов без выполнения гравиметрической съемки и тем самым снять известную высотную проблему при сгущении новой сети и ее дальнейшей эксплуатации заинтересованными организациями.

Указанные основные положения концепции были практически реализованы на следующих этапах реконструкции МГТС. Следующими этапами были разработка технико-экономического обоснования и технического проекта реконструкции Московской городской геодезической сети. Наряду с учеными и специалистами МИИГАиКа в этой работе принимали участие специалисты различных организаций России:

- ОИФЗ им. О. Ю. Шмидта,
- Института геологии и геоэкологии,
- Мосгоргеотреста,
- ТОО «Радиус-М» при дерекции строящегося Метрополитена,
- Московского АГП,
- Верхневолжского АГП.

Разработанный в 1995 г. в соответствии с договором, техническим заданием и календарным планом работ проект реконструкции МГТС был рассмотрен на ряде совещаний с участием специалистов админи-





2. Рекогносцировка и подготовка пунктов сети, при которой были окончательно выбраны 222 пункта МГГС. Результаты рекогносцировки оформлялись в виде карточек с информацией о пунктах сети. Подготовка пунктов к спутниковым измерениям включала ремонт 20 пунктов, создание 21 новых пунктов с закладкой 10 новых центров. По результатам рекогносцировки была уточнена схема реконструкции МГГС. Обоснование и уточнение расположения пунктов для геодинимической части геодезической сети Москвы заключалось в выборе пунктов на основании геофизических критериев, т.е. с учетом расположения флексуно-разрывных зон на территории Москвы. Было выбрано 36 пунктов. Почти все пункты расположены в грунте и совмещены с фундаментальными реперами I или II классов.

3. Планирование спутниковых измерений на пунктах МГГС, которое включало в себя определение: времени суток, количества видимых спутников (не менее 4), величины геометрического фактора (не более 8), угла места спутника (не менее  $15^\circ$ ), составление информационных карт для отдельных сеансов наблюдений и схем расположения пунктов в сеансе.

#### 4. Спутниковые измерения на пунктах МГГС.

Проведение спутниковых измерений на пунктах МГГС выполнялось в основном спутниковыми приемниками концерна Leica AG (Швейцария): Wild GPS System-200 и Leica GPS System-300. Измерения проводились в летне-осенний период 1996 г. Всего было выполнено 36 сеансов наблюдений по 6 часов работы в каждом сеансе. На трех исходных пунктах (МИИГАиК, Менделеево и Звенигород) измерения проводились непрерывно в целях обеспечения необходимой точности абсолютных координат при последующей обработке измерений. Спутниковые измерения на пунктах геодинимической части сети проводились двумя сеансами по 22 приемника в каждом сеансе.

Предварительная обработка, анализ и оценка качества спутниковых измерений включала в себя разрешение неоднозначностей, получение предварительных значений линий и координат, предварительный анализ и оценку качества спутниковых измерений по результатам повторных измерений (18 линий), по результатам повторных измерений линий геодинимической части сети (24 линии) разными типами спутниковых приемников, по результатам сравнения измерений трех линий спутниковыми приемниками и высокоточными светодальномерами, по невязкам треугольников.

Обобщенная оценка качества выполненных спутниковых измерений предварительно характеризуется средней квадратической ошибкой взаимного положения пунктов порядка 6 мм и относительной ошибкой порядка  $1/2\ 000\ 000$  при среднем расстоянии между пунктами 13 км.

Результаты полевых спутниковых измерений, выполненных в 1996 г., и экспертное заключение о них были обсуждены на межведомственном совещании 30 декабря 1996 г. в присутствии представителей ведущих геодезических организаций Москвы.

В настоящее время комплекс работ по реконструкции Московской городской опорной геодезической сети в основном завершен. Выполнен полный анализ спутниковых измерений. Завершено уравнивание спутниковых измерений в системе координат WGS-84, преобразование координат пунктов МГТС из системы координат WGS-84 II Московскую городскую систему координат, в государственную систему координат 1942 г. (СК-42) [40].

Продолжение работ на геодинамической сети будет рассмотрено в разделе 8.

### *Опыт реконструкции геодезической сети Нижнего Новгорода*

История создания геодезической сети г. Нижнего Новгорода относится к 1929 г., когда была создана городская триангуляция и определена местная система координат Нижнего Новгорода, действующая до настоящего времени. За время своего существования сеть трижды реконструировалась и расширялась. В 1982 г. по результатам последнего переуравнивания на территории города существовало 123 исходных пункта триангуляции 2–4 классов, около 2500 пунктов полигонометрии 4 класса, 1 и 2 разрядов. Значительная часть пунктов была утрачена либо не пригодна к использованию. Кроме того, в городе была создана высокоточная геодезическая сеть метростроя, не связанная в установленном порядке с городской сетью.

В связи с недостаточным количеством исходных пунктов высших классов (только один 1 класса остальные 2 класса) и в целях максимального совмещения спутниковой сети с городской триангуляцией, на территории города построена высокоточная базисная часть каркасной сети, представляющая собой центральную систему, состоящую из 7 пунктов, опирающуюся на базис длиной 22 км (абсолютная разность традиционных и спутниковых наблюдений составила 12 мм). Треугольники в центральной системе приблизительно равносторонние от 10 до 22 км. Углы в треугольниках не менее 40°. С помощью этого построения, совместившего наиболее точные пункты работ прошлых лет и охватившего всю прилегающую территорию города, сохранена местная система координат Нижнего Новгорода (рис. 7.9).

Остальная часть каркасной геодезической сети построена как сплошная сеть треугольников с углами не менее 30° и сторонами не менее 3000 м, пункты которой по возможности совмещены с существ-

вующими пунктами городской триангуляции. Всего в каркасную сеть города вошло 76 пунктов, В том числе:

- 2 пункта СГС-1;
- 6 пунктов государственной сети 1–3 класса;
- 24 пункта городской триангуляции 2 класса;
- П пунктов городской триангуляции 4 класса;
- 10 пунктов ведомственных геодезических работ;
- 4 пункта смежных городских геодезических сетей;
- 3 пункта городской полигонометрии;
- 2 грунтовых репера II и III класса;
- 10 вновь заложенных пунктов (тип центра 160).

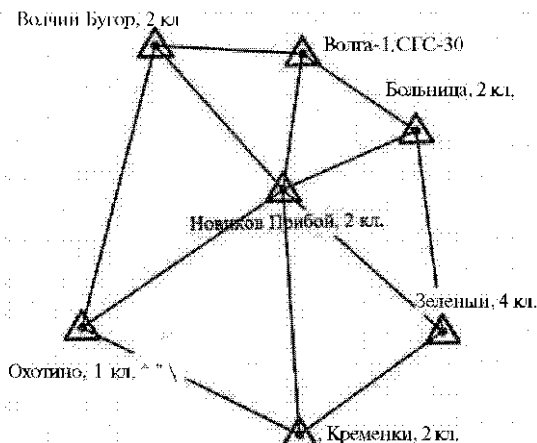


Рис. 7.9. Схема каркасной сети г. Нижнего Новгорода

Полевые работы по созданию сети производились в марте 1996 г. шестью двухчастотными GPS-приемниками Wild GPS System 200. Продолжительность сеансов наблюдений составляла от 1 до 6 часов в зависимости от их условий. К основным проблемам при производстве работ следует отнести: влияние переотраженных сигналов спутников на качество наблюдений, зашумление сигналов от радиопередающих и коммуникационных устройств, затенение сигналов городскими зданиями и сооружениями.

Уравнивание каркасной геодезической сети выполнено в двух системах координат: в государственной (СК-42) и местной. Количество пунктов, вошедших в уравнивание, составило 163. Так как измерения на пунктах, вошедших в уравнивание, выполнены в разные эпохи, отличаются по точности и методикам наблюдений, уравнивание выполнялось по специальной схеме.

В целях исключения искажений высокоточных спутниковых наблюдений сети за счет ошибок исходных пунктов работ прошлых лет уравнивание каркасной спутниковой геодезической сети выполнялось отдельно; пункты этой сети использовались на последующих этапах в качестве исходных для переуравнивания всей остальной сети города.

Относительные ошибки сторон высокоточной базисной части каркасной сети составляют от 1:2 500 000 до 1:4 500 000, разность координат совмещенных пунктов составили от 12 до 99 мм.

Относительные ошибки сторон остальной части каркасной спутниковой сети составили от 1:300 000 до 1:1 000 000.

Вместе с тем по результатам обработки данных каркасной геодезической сети и старых геодезических данных были выявлены недопустимые значения взаимного положения некоторых пунктов в СК-42 и местной системе координат, причиной которых являются:

- динамика земной поверхности (пункт тр. Новинки — 0,5 м);
- ошибки наблюдений предыдущих работ (пункт тр. Каравиуха - 0,1 м);
- ошибки уравнивания предыдущих работ (пункт тр. Кременки - 0,2 м);
- ошибки редуцирования предыдущих работ (пункт тр. Безводное — 0,4 м).

По результатам уравнивания произведено сравнение координат из каталогов прошлых лет издания. В местной системе координат расхождения составили от 3 до 88 мм, в государственной системе координат (СК-42) до 10 см и более. Расхождение длин сторон в СК-42 содержат значительную систематическую ошибку.

Создание в Нижнем Новгороде каркасной геодезической сети и установление жесткой связи с ближайшими пунктами ГГС спутниковыми методами, позволило:

- в значительной степени локализовать деформацию сети от ошибок исходных пунктов и грубых ошибок;
- улучшить однородность структуры сети;
- повысить точность сети;
- объединить различные геодезические построения;
- установить параметры пересчета координат из различных СК;
- получить практическое подтверждение высокой точности СК-95;
- передать на пункты точные пространственные координаты в системе ITRF 94.

Дальнейшим этапом обработки явилось совместное уравнивание параметрическим способом в местной и государственной системах координат всей городской геодезической сети как линейно-углового по-

строения с учетом весов измеренных величин старых и новых наблюдений.

Общее количество пунктов, вошедших в уравнивание, составило 240. В том числе:

пункты СГС-1	2
пункты государственной сети 1 — 3 класса	15
пункты городской триангуляции 2 класса	34
пункты городской триангуляции 4 класса	63
пункты ведомственных геодезических работ	16
пункты городских геодезических сетей смежных городов	4
пункты городской полигонометрии 4 класса	3
пункты городской полигонометрии 1, 2 разрядов	66
грунтовые репера II и III классов	2
вновь заложенные пункты (тип центра 160)	9

Относительные ошибки по результатам совместного уравнивания городской геодезической сети Нижнего Новгорода составляют от 1:300 000 до 1:1 000 000, разность координат совмещенных пунктов — от 12 до 99 мм.

#### *Реконструкция геодезической сети г. Владимира*

До последнего времени геодезическая сеть г. Владимира, объединяющая триангуляционные и полигонометрические построения, а также нивелирные ходы и сети разных лет, выполненные различными ведомствами по разным нормативным документам, являлась достаточно разнородной и по точности не соответствовала современным и перспективным направлениям развития инфраструктуры города.

Наибольшие проблемы, вызванные разнородностью и низкой точностью сети, проявлялись при оформлении документов на землю и при проведении на территории города различными ведомствами инженерно-строительных работ, прокладке коммуникаций и так далее.

Реконструкция геодезической сети г. Владимира выполнялась совместно специалистами ВАШ, МИИГАиКа и городского комитета по земельной реформе [60].

До начала проведения работ в целях обеспечения преемственности геодезической информации был выполнен анализ существующих на территории города геодезических построений, установлена их точность.

При проведении работ по реконструкции городской геодезической сети была проведена сравнительная оценка длин сторон между пунктами городской и государственной геодезических сетей; полученных из спутниковых измерений и вычисленных по значениям координат пунктов, определяющая достаточно объек-

тивно реальную точность взаимного положения пунктов существующей сети.

Полученные разности для пунктов государственной сети (рис. 7.10) имеют один и тот же знак и масштабно зависят от длины стороны. Это подтверждает наличие масштабной ошибки в координатах пунктов.

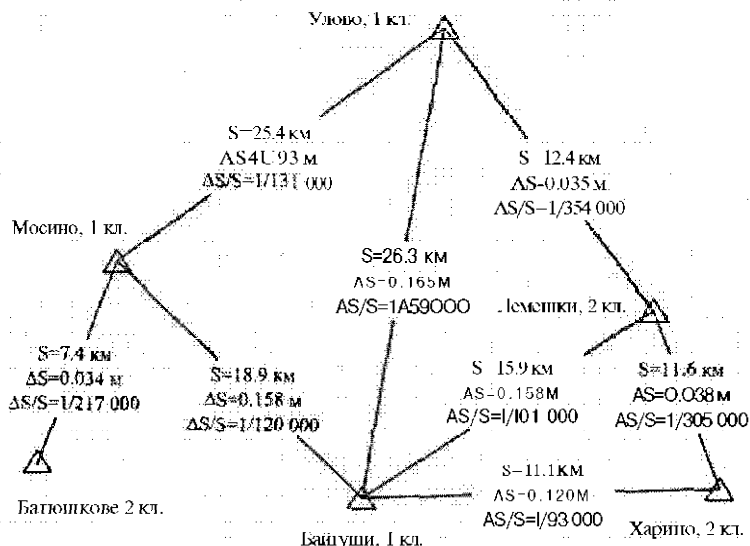


Рис. 7.10. Схема контрольных линий между пунктами государственной геодезической сети

Принимая во внимание тот факт, что местная сеть была сформирована на основе пунктов существующей государственной сети и получила ее ошибки, абсолютные значения расхождений в местной системе -  $D_x$ ,  $D_y$  достигают 15-20 см уже в зоне радиуса 5 км от условного начала. Так же, как и при анализе точности государственной геодезической сети, в местной системе координат обнаруживается тенденция изменения масштаба с увеличением расстояния от условного нуля.

Учитывая, что оценка качества сети проводилась только по пунктам 1-3 классов, можно предположить, что реальная погрешность взаимного положения пунктов 4 класса и 1, 2 разрядов, составляющих основную часть пунктов городской сети, может быть существенно больше, особенно на окраинах города при удалении от осевого меридиана местной системы координат.

В проекте реконструкции городской геодезической сети г. Владимира были закреплены следующие положения, опробованные ранее

при реконструкции геодезических сетей городов Москвы, Нижнего Новгорода, Иваново, Костромы:

1. Создать основу городской геодезической сети спутниковым методом в виде сплошной сети, включающей 30—40 пунктов, равномерно расположенных на территории города и присоединенных территорий.

2. Пункты проектируемой сети совместить с пунктами государственной геодезической сети и городской геодезической сети, полученными из работ разных ведомств, а также с реперами нивелирования I и II классов.

Это обеспечивало необходимое объединение существующих в городе систем координат; повышение их точности и надежности определения параметров преобразования между используемыми в г. Владимире системами координат; исключение дорогостоящей и трудоемкой процедуры закладки новых центров.

В новой геодезической сети были выделены 4 исходных пункта. На указанных пунктах выполнены спутниковые измерения, обеспечивающие их взаимное положение с повышенной точностью. Для корректной математической обработки спутниковых измерений эти 4 пункта сети привязаны к международной спутниковой сети EUREF. Это обеспечило передачу координат в системе WGS на пункты городской сети с максимально возможной точностью.

При построении опорной геодезической сети г. Владимира использовались 8 одновременно работающих станций Wild GPS System 200/300. Для организации бесперебойной работы была проведена рекогноспировка пунктов, составлено расписание спутниковых наблюдений, осуществлен качественный и количественный подбор аппаратуры, определены места установки опорных и мобильных станций, рассчитаны длительность сеансов и график наблюдений, схемы перемещения станций на объекте, а также решен целый ряд других вспомогательных вопросов.

Схема спутниковых измерений включает следующие этапы:

- создание исходных пунктов (основные референц-пункты);
- спутниковые измерения на пунктах каркасной сети;
- спутниковые измерения на пунктах городской сети.

На 4-х исходных пунктах был проведен непрерывный девятичасовой сеанс. Передача координат осуществлена от интегрированных в международную референциальную сеть пунктов Менделеево (ВНИИФТ-РИ) на расстоянии 200 км от Владимира и Звенигород (Астросовет РАН) — 250 км. Обработка результатов измерений сторон Менделеево — «исходные пункты», Звенигород — «исходные пункты» и сторон между исходными пунктами осуществлена в трех вариантах.

В качестве окончательных координат исходных пунктов приняты значения из решения программы BERNESE по линиям между исходными пунктами. Остальные варианты рассматриваются только как контрольные.

В течение непрерывного девятичасового сеанса на 4-х исходных пунктах остальные станции осуществляли наращивание каркасной сети - два синхронных сеанса по 4 ч с перерывом 1 ч на переезд. Во время последующих четырехчасовых сеансов выполнялось наращивание каркасной сети.

На следующем этапе измерений пункты каркасной сети являлись исходными для измерений на пунктах спутниковой городской геодезической сети.

Измерения на пунктах спутниковой городской геодезической сети выполнялись синхронно группой из 8 спутниковых приемников. Длительность сеансов 2+2 ч с перестановкой антенны между сеансами. Перекрытия между сеансами составляли не менее 3-х пунктов. Всего было выполнено 18 синхронных сеансов спутниковых измерений на 41 пункте опорной геодезической сети.

В процессе выполнения полевых работ осуществлялись предварительная обработка поступающей информации, анализ и отбраковка некачественных измерений. Результаты измерений на стадии предварительной обработки обработаны с помощью программных пакетов SKI и BERNESE с использованием точных эфемерид спутников на время измерений.

Предварительный контроль качества осуществлялся по невязкам замкнутых построений и разностям двойных измерений. По результатам предварительной обработки среднее значение максимального вектора отклонения от среднего планового положения пункта по объекту составило 12 мм, и 15 мм по высоте. Максимальные значения расхождений  $D_x = 34$  мм,  $D_y = 43$  мм, что вызвано неудовлетворительными условиями приема спутниковых сигналов на некоторых пунктах. Для предварительной оценки качества спутниковых наблюдений, обработана статистика двойных измерений по объекту.

В результате было обработано и уравнено 426 связей между пунктами сети и получены следующие значения оценки точности, характеризующие качество измерений:

средняя квадратическая ошибка измерения линии по разностям двойных измерений 6 мм;

средняя квадратическая ошибка среднего значения линии по разностям двойных измерений 4 мм;

относительная погрешность измерения линии по разностям двойных измерений 1:950 000;



относительная погрешность уравниваемого значения линии по разностям двойных измерений 1:1 350 000.

На завершающей стадии обработки были решены следующие задачи:

- совместное уравнивание спутниковых и наземных измерений;
- уточнение ключей перехода между координатными системами;
- создание единого каталога и составление технического отчета.

После выполнения анализа измерений для уравнивания сети в местной системе координат в качестве основного был принят вариант уравнивания сети максимально свободной от ошибок исходных данных. Были выбраны десять пунктов каркаса, совмещенных с наиболее надежными пунктами городской сети: Мосино, Мостострой, Бродницы, Байгуши, Кир.Завод, Лемешки, База, Харино, Улова, Батюшкове, которые составили сеть первого ранга. Эта сеть была обработана как свободная от исходного пункта каркасной сети База. Ориентировка сети была максимально приближена к городской.

Пункт База в дальнейшем планировалось интегрировать в ВГС и использовать как постоянно действующий пункт для г. Владимира. Нулевой пункт местной системы координат — Собор для этой цели непригоден, так как пункт представляет собой шпиль на куполе собора и выполнение на нем спутниковых измерений соответствующей точности не представляется возможным.

Взаимное положение десяти пунктов сети первого ранга после уравнивания характеризуется следующими погрешностями:

- средняя относительная ошибка сети первого ранга составила 1:200 000 000;
- средняя квадратическая ошибка линии в сети составила 0,002 м.

Пункты сети первого ранга были приняты в качестве исходных для уравнивания сети второго ранга. Уравниваемая сеть второго ранга состояла из 31 пункта, конфигурация сети представляет собой геодезические фигуры со сторонами от 1 до 10 км. При уравнивании каждая линия задавалась со своим весом, исходя из точности измерительной аппаратуры и длины линий.

В результате уравнивания получены следующие характеристики сети:

- средняя относительная ошибка сети второго ранга составила 1:3 000 000;
- средняя квадратическая ошибка линии в сети составила 0,001 м.

Эти значения подтверждают точность измерительной аппаратуры и качество выполненных измерений. При этом расхождения в значениях координат совмещенных пунктов, полученных в результате уравнивания для данного варианта и используемых ранее, составили:

- по оси *Xom* +0,005 до +0,120 м при среднем значении +0,0001 м;  
 — по оси *Kot* +0,004 до +0,086 м при среднем значении +0,0002 м.  
 Среднее квадратическое отклонение по 21 совмещенному пункту - 0,064 м.

Завершающим этапом обработки явилось совместное уравнивание всей городской геодезической сети в местной и государственной системах координат как линейно-углового построения с учетом весов измеренных величин старых и новых наблюдений.

Общее количество пунктов, вошедших в уравнивание, составило 2200. В том числе 148 пунктов каркасной сети:

пункты государственной сети 1–3 классов	7
пункты городской триангуляции	37
пункты ведомственных геодезических работ	11
пункты городской полигонометрии 4 класса	45
пункты городской полигонометрии 1, 2 разрядов	25
вновь заложенные пункты (тип центра 160)	20

Относительные ошибки по результатам совместного уравнивания городской геодезической сети г. Владимира составляют от 1:100 000 до 1:1 000 000, разности координат совмещенных пунктов составили от 21 до 303 мм.

#### *7.4.3. О необходимости координации работ по созданию государственной и городских геодезических сетей*

При выполнении работ по реконструкции городских геодезических сетей крупных городов — центров субъектов Федерации, таких, как Сэров, Владимир, Нижний Новгород, Иваново, Кострома, Киров, Саранск, были выявлены существенные расхождения между точностью взаимного положения пунктов ГГС, являющихся исходными, и точностью измерений в городской сети с использованием спутниковых систем (рис. 7.11-7.14; табл. 7.4). Это противоречие было реальностью для пользователей каталогов координат СК-42. Как уже было сказано ранее, принципиальным отличием новой государственной системы координат СК-95 от СК-42 является ее однородность (относительные погрешности в ГГС СК-42 колеблются от 1:50 000 до 1:500 000), а также существенное снижение накопленных погрешностей от Пулково до Дальнего Востока. К сожалению, введение СК-95 не полностью устранило противоречия между точностью городских геодезических сетей и точностью государственной геодезической сети, пункты которой должны использоваться в качестве исходных [23].

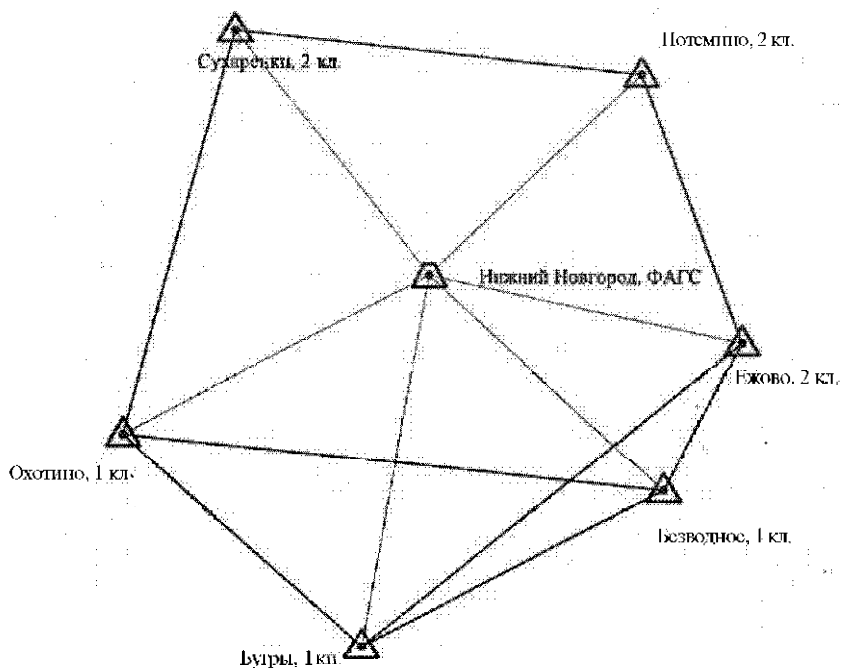


Рис. 7.11. Схема контрольных линий между пунктами государственной геодезической сети в Нижнем Новгороде

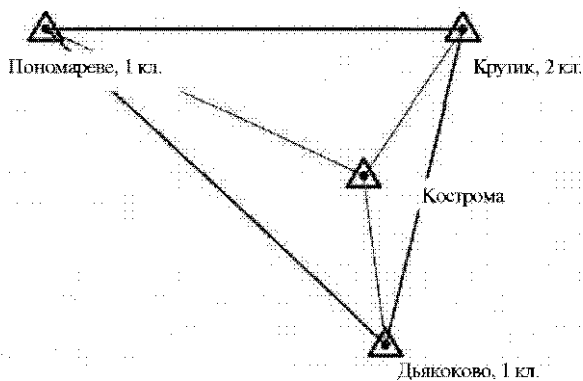


Рис. 7.12. Схема контрольных линий между пунктами государственной геодезической сети в Костроме

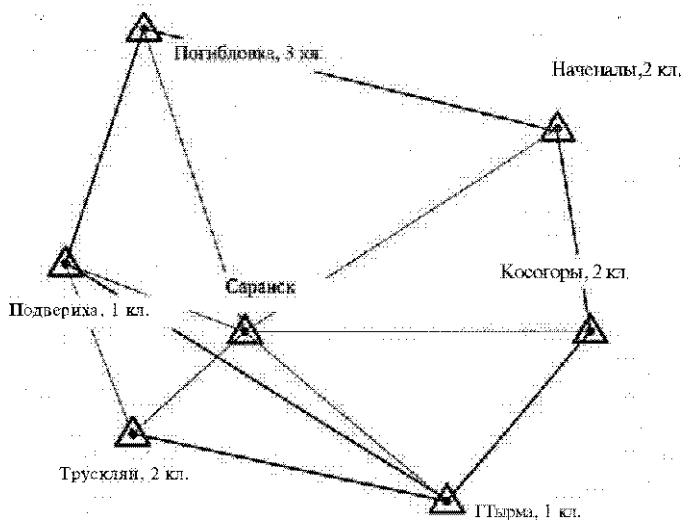


Рис. 7.13. Схема контрольных линий между пунктами государственной геодезической сети в Саранске

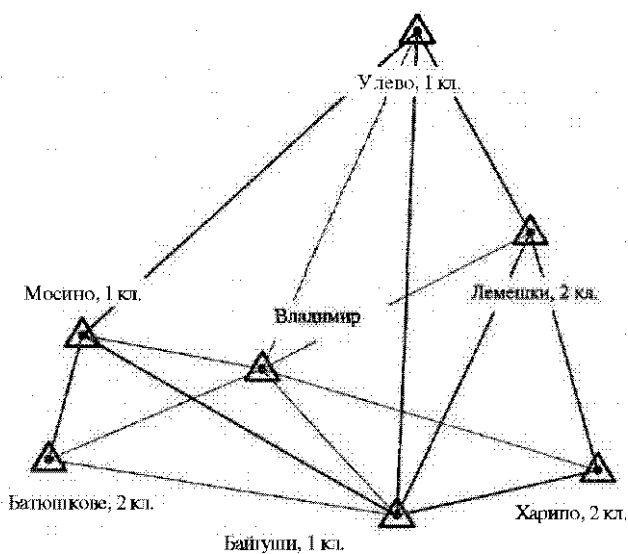


Рис. 7.14. Схема контрольных линий между пунктами государственной геодезической сети во Владимире

Таблица 7.4

Длины			Расхождения			
			СК-42		СК-95	
От	до	D, км	AD, м	D/AD	AD, м	D/AD
г. Нижний Новгород						
Охотино, 1 кл.	Сухаренки, 2 кл.	31.7	0,027	1/1 160 000	0,046	1/688000
Охотино, 1 кл.	Безводное, 1 кл.	40.5	-0,464	1/87 000	-0,060	1/670000
Охотино, 1 кл.	Бугры, 1 кл.	23.9	-0,160	1/149 000	-0,003	1/8870000
Сухаренки, 2 кл.	Потемино, 2 кл.	31.1	-0,316	1/98 000	-0,053	1/582000
Безводное, 1 кл.	Бугры, 1 кл.	25.3	-0,287	1/88 000	0,004	1/6596000
Безводное, 1 кл.	Ежово, 2 кл.	12.4	0,051	1/245 000	-0,016	1/768000
Потемино, 2 кл.	Ежово, 2 кл.	21.8	-0,069	1/316 000	0,055	1/396000
Бугры, 1 кл.	Ежово, 2 кл.	36.3	-0,193	1/189 000	-0,003	1/1198000
г. Кострома						
Пономарево, 1 кл.	Дьяконово, 1 кл.	55.3	-0,403	1/137 000	0,054	1/1024000
Пономарево, 1 кл.	Крутик, 2 кл.	44.0	-0,390	1/113 000	-0,034	1/194000
Головинск, 2 кл.	Крутик, 2 кл.	30.6	0,059	1/519 000	-0,022	1/1391000
Красное, 2 кл.	Коковино, 2 кл.	26.4	-0,059	1/447 000	-0,009	1/2933000
г. Саранск						
Начаналы, 2 кл.	Косогоры, 2 кл.	27.8	0,087	1/320 000	0,087	1/320000
Пырма, 1 кл.	Подвериха, 2 кл.	58.8	-0,239	1/246 000	0,091	1/646000
Н. Самаевка, 1 кл.	Кулдым, 1 кл.	42.2	0,164	1/257 000	0,037	1/1140000
Подвериха, 2 кл.	Н. Самаевка, 1 кл.	48.1	-0,062	1/776 000	-0,194	1/248000
г. Владимир						
Байгуши, 1 кл.	Улово, 1 кл.	26.3	0,165	1/159 000	-0,034	1/780000
Байгуши, 1 кл.	Мосино, 1 кл.	18.9	0,158	1/120 000	-0,018	1/1057000
Байгуши, 1 кл.	Лемешки, 2 кл.	15.9	0,158	1/101 000	0,030	1/536000
Байгуши, 1 кл.	Харино, 2 кл.	11.1	0,120	1/93 000	-0,013	1/846000
Улово, 1 кл.	Мосино, 1 кл.	25.4	0,193	1/131 000	-0,041	1/626000
Улово, 1 кл.	Лемешки, 2 кл.	12.4	0,035	1/354 000	-0,063	1/196000
Мосино, 1 кл.	Батюшково, 2 кл.	7.4	0,034	1/217 000	0,035	1/209000
Лемешки, 2 кл.	Харино, 2 кл.	11.6	0,038	1/305 000	0,007	1/1685000

Связь городской геодезической сети и государственной геодезической сети для устранения существенного расхождения точности взаимного положения пунктов ГГС, являющихся исходными, и точностью измерений в городской сети с использованием спутниковых систем рекомендуется осуществлять следующим образом. Пространственные координаты одного или нескольких исходных пунктов городской сети, определенные относительно стационарных пунктов (Менделеево, Звенигород, Анкара и др.), а также результаты измерений между этими пунктами и всеми пунктами ГГС, входящими в городскую сеть, направляются в предприятие Роскартографии, ответственное за уравнивание ГГС, где используются при очередном этапе уравни-

нивания ГТС. Новые координаты пунктов ГТС могут использоваться для уравнивания городской сети в государственной системе координат и получения каталогов в этой системе без искажения результатов спутниковых измерений.

Измерения на исходном пункте городской сети - постоянно действующем пункте города, интегрированном в ВГС, целесообразно периодически повторять для целей уточнения его абсолютных координат и использования этих данных в решении задач высшей геодезии - уточнении параметров общеземных систем координат.

#### *7.4.4. Разработка проекта «Инструкции по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS»*

Необходимость разработки нормативно-технических документов, регламентирующих геодезические работы в городах, стала очевидной после появления в различных производственных организациях высокоточных современных приборов - электронных теодолитов, тахеометров, светодальномеров, спутниковых приемников с паспортной точностью 1-2 см. Требования к точности городских геодезических сетей, изложенные в [30, 64], устарели и не соответствовали современным возможностям. Если в 1995 г. на Международной конференции «Сферы применения GPS-технологий» эта проблема поднималась в нескольких докладах [53, 68], то уже в 1999 г. на Международной конференции «220 лет геодезическому образованию в России» была организована работа круглого стола «GPS-технологии при развитии городских геодезических сетей» [60].

В соответствии с «Программой разработки новых и переработки ранее утвержденных нормативно-технических актов и нормативных документов по производству на период 1999-2000 годы», утвержденной руководителем Роскартографии 28 июня 1999 г. в 2000-2001 годах был разработан проект «Инструкции по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS» [41]. Проект подготовлен на основе опыта построения и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем в городах Москве, Владимире, Нижнем Новгороде, Туле, Костроме, Саранске, Рузаевке, Вязниках, Павлово, Сарове, Тольятти, Сызрани и других специалистами Верхневолжского АГП, Московского АГП и МИИГАиКа.

Основой для разработки проекта Инструкции служили «Концепция перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений», «Инструкция по

топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500» (ГКИНП-02-033 — 79), «Руководство по математической обработке геодезических сетей и составлению каталогов координат и высот пунктов в городах и поселках городского типа» (ГКИНП-06-233 — 90), РТМ В-01-95 «Применение приемников спутниковой системы WILD GPS System 200 фирмы Лейка (Швейцария) при создании и реконструкции городских геодезических сетей».

В разработке проекта принимали участие ведущие специалисты полевых и камеральных подразделений Верхневолжского и Московского АГП, руководители, научные работники и ученые ВАШ, МАГП, МИИГАиК.

С введением Инструкции предполагается отменить действие следующих нормативно-технических документов:

разделов 5.7-5.1.2, 6.1-6.20, 7.1-7.11, 8.1-8.44 «Инструкции по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500» (ГКИНП-02-033-79), изд. 1982 г. и дополнение от 16.02.88 г.;

Руководства по математической обработке геодезических сетей и составлению каталогов координат и высот пунктов в городах и поселках городского типа, (ГКИНП-06-233 - 90), изд. 1990 г.;

РТМ В-01-95 «Применение приемников спутниковой системы WILD GPS System 200 фирмы Лейка (Швейцария) при создании и реконструкции городских геодезических сетей», ВАШ, 1995 г.

В проекте Инструкции изложены сведения о спутниковых радионавигационных системах (СРНС) ГЛОНАСС и GPS, классификации спутниковых городских геодезических сетей, освещены принципы построения и этапы создания и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых технологий.

Целью реконструкции городских геодезических сетей является повышение точности сети, надежности определения параметров преобразования между геоцентрической общеземной координатной системой, государственной и городской геодезическими системами координат и возможность формировать каталог координат пунктов во всех используемых в городе координатных системах.

Главной особенностью работ по созданию и реконструкции городских геодезических сетей является необходимость сохранения городской системы координат, в которой ранее были выполнены крупномасштабные съемки территории городов (1:500—1:2000) и одновременно с этим обеспечить высокую однородную точность городской геодезической сети для решения других задач.

Периодичность реконструкции городских геодезических сетей производится в сроки, определенные для обновления топографических планов. Допускается осуществлять реконструкцию без обновле-

ния планов в случае большой утраты пунктов при интенсивном развитии городской инфраструктуры или увеличения ее территории.

Структурная схема спутниковых измерений включает следующие этапы:

- создание одного или нескольких исходных пунктов (ИП);
- спутниковые измерения на пунктах каркасной сети (КС);
- спутниковые измерения на пунктах спутниковой городской геодезической сети I класса (СГС-1), в том числе на существующих пунктах ранее созданной городской геодезической сети для связи с традиционной сетью;
- обработку результатов измерений совместно с ранее выполненными плановыми и высотными сетями.

В проекте Инструкции приводятся рекомендации по созданию и хранению каталогов и схем в электронной форме с прилагаемым банком геодезических данных. Это дает возможность оперативного исправления при последующих топографо-геодезических работах, а также обеспечивает исходной информацией обработку геодезических измерений, цифровой картографии, ГИС-технологий для издания разнообразных каталогов и топографо-геодезических материалов, экспорта данных в различные информационные системы.

В приложениях к Инструкции приведены примеры схем спутниковых сетей, формулы обработки, образцы оформления отчетных материалов производства с использованием ЭВМ. Компьютерные элементы оформления касаются применяемых в документах текстов и шрифтов к ним, а также таблиц, каталогов координат, условных знаков, этикеток.

Проект Инструкций рассматривался и обсуждался в апреле 2001 г. на совещании главных инженеров и ведущих специалистов Роскартографии «О ходе работ по введению государственной системы координат СК-95», на различных семинарах и совещаниях специалистов в области спутниковых технологий в 2001 -2002 гг.

Первая редакция Инструкции принята распоряжением Роскартографии от 11.12.2001 г. № 84-р [41]. В настоящее время ведутся работы над второй редакцией.



## Раздел 8. Специальные применения спутниковых геодезических измерений для решения различных геодезических задач

Высокая точность координатных измерений, обеспечиваемая спутниковыми системами типа GPS и ГЛОНАСС, в сочетании с возможностью определения взаимного положения пунктов, удаленных друг от друга до тысячи и более километров, а также оперативность проведения всего комплекса спутниковых измерений открыли широкие перспективы для решения как навигационных, так и различных геодезических задач. На базе использования таких систем созданы и создаются глобальные, континентальные, национальные, региональные и локальные геодезические сети, которые различаются между собой по плотности расположения пунктов, по требованиям к точности координатных определений, а также по целому ряду других технических показателей. При этом открылась возможность изучать в широких масштабах геодинамические процессы, происходящие в земной коре, как в глобальных масштабах, так и на отдельных участках земной поверхности. Вместе с тем спутниковые методы позиционирования с успехом применяются при решении различных задач инженерной геодезии.

Наряду с координатными определениями пунктов, жестко связанных с земной поверхностью, спутниковые методы находят широкое применение при определении местоположений различных движущихся объектов (плавсредства, летательные аппараты и наземный транспорт). Применительно к рассматриваемым нами вопросам спутниковые технологии широко используются в настоящее время в морской геодезии, а также при выполнении топографических съемок местности с применением летательных аппаратов.

Ниже в обзорном изложении освещены основные характерные особенности спутниковых координатных определений, которые находят свое применение при решении различных геодезических задач. Кроме того, в подразделе 8.6 рассмотрены отдельные аспекты навигационного применения описываемых спутниковых систем при их использовании как в глобальных масштабах, так и на отдельных небольших территориях с размещением спутниковых приемников на различных движущихся объектах.

### 8.1. Решение геодинамических задач

Одна из характерных особенностей современного этапа развития геодезии состоит в том, что достигнутый на основе использования спутниковых методов высокий уровень точности координатных определений в сочетании с оперативностью получения конечных результатов позволил изучать более детально многие динамические процессы, происходящие в земной коре. При этом открылась возможность исследовать смещения интересующих нас пунктов в пределах всего земного шара, что позволило осуществить переход от «статической» геодезии к «динамической». Эта задача стала одной из основных для созданной в 90-х годах Международной службы GPS для геодинамики (IGS).

Как уже отмечалось ранее, эта служба стала ответственной за организацию непрерывных спутниковых наблюдений на пунктах, входящих в глобальную опорную геодезическую сеть. Такой мониторинг позволяет отслеживать смещения рассматриваемых пунктов на сантиметровом (и даже на миллиметровом) уровне точности и составлять постоянно обновляемые карты движения как материков, так и отдельных островных образований, находящихся в открытом океане. В качестве примера на рис.8.1 приведена карта, на которой в векторной форме показаны смещения пунктов глобальной сети за 5 лет (с 1993 по 1998 г.) по данным, полученным с помощью GPS в Потсдамском центре анализа (Германия).

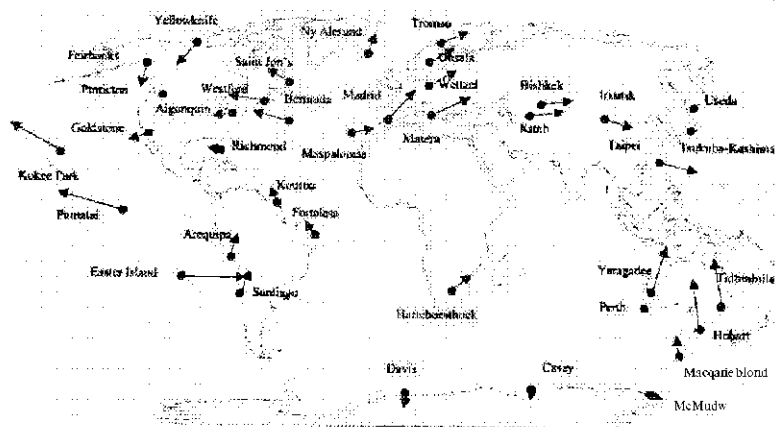


Рис. 8.1. Схема смещения пунктов IGS за период с 1993 по 1998 годы

Приведенные на рис.8.1 данные свидетельствуют о том, что смещения отдельных пунктов сети достигают за отмеченный период до 3 см и более. Такая информация представляет большой интерес как при ус-

тановлении истинного положения наземного референсного каркаса, так и при изучении тектонической активности процессов, происходящих в земной коре.

Наряду с изучением геодинамических процессов в глобальных масштабах заслуживает внимания и региональные движения земной коры. Для их исследования создаются региональные геодинамические сети в таких сейсмически активных регионах, как Калифорния; регион Средиземного моря, неовулканическая рифовая зона в Исландии и др. В таких регионах удастся обнаружить ощутимые смещения местоположения пунктов сети с течением времени на основе использования спутниковых технологий. Вектора смещений, полученные на основе двух последовательных эпох наблюдений на территории Исландии за период с 1987 по 1990 г., оцениваются на уровне 3 - 5 см в год при точности измерений для каждой эпохи между соседними станциями равной около 1-2 см.

В процессе проведения таких исследований возникла существенная трудность, связанная с необходимостью отождествления «стабильных» опорных точек в изучаемом регионе, относительно которых фиксируются выявленные смещения. Эта проблема стала предметом отдельных исследований. О некоторых результатах в этой области было доложено на проходящих в последние годы международных симпозиумах [80, 86].

Дальнейшая локализация размеров изучаемых территорий привела к целесообразности изучения деформаций земной поверхности на участках, где создаются и эксплуатируются крупные инженерные сооружения, а также на территориях крупных городов. Актуальность отслеживания опасных деформаций грунта в городах продиктована резким возрастанием различного рода разрушений и провалов, связанных, прежде всего, с активным воздействием со стороны человека на приповерхностные геологические структуры. К таким воздействиям следует отнести интенсивное освоение подземного пространства, изменения уровня грунтовых вод, вибрационные воздействия со стороны постоянно нарастающих транспортных потоков, повышение концентрации активных примесей в грунтовых водах на территориях химических предприятий. С целью предупреждения различного рода разрушений в городах и на отдельных промышленных объектах стали создаваться специализированные геодинамические сети, на пунктах которых организуются систематические спутниковые наблюдения с максимально достижимым уровнем точности. Одним из примеров такой сети является геодинамическая сеть, созданная специалистами МИИГАиКа в Москве на базе Московской городской опорной геодезической сети (рис. 8.2). Расположение пунк-

тов Московской геодинамической сети выбиралось из тех предпосылок, чтобы часть из них можно было рассматривать в качестве опорных, т. е. в наименьшей степени подверженных влиянию деформационных процессов, а остальная часть в наибольшей степени отвечала бы за смещения земной поверхности в различных регионах города. С учетом этого вся сеть включала в себя около 40 пунктов, а девять из них выбраны в качестве опорных.



Рис. 8.2. Схема геодинамической сети Москвы

За период с 1996 по 2000 г. на данной сети выполнено 8 циклов измерений с интервалом около полугода. На основе проведенного анализа представилась возможность выявить локальные зоны, подверженные ощутимым деформациям земной поверхности, обуславливающим смещения до 1-2 см.

Поскольку при проведении измерений на таких сетях возникает необходимость не только в обеспечении предельно высокой точности измерений, но и в отделении реальной величины смещений от остаточного влияния систематических ошибок, то для ответа на эти вопросы необходима организация специальных исследований. Такие исследования были проведены учеными и специалистами МИИГАиКа за указанный выше период.

По результатам исследований установлено, что доминирующую роль играют ошибки, обусловленные многопутностью и остаточным влиянием тропосферной рефракции.

Один из методов ослабления отмеченного влияния базируется на выборе повышенной длительности сеанса наблюдений (от одних суток и более). Наряду с этим повышенного внимания заслуживают следующие специализированные методы:

- ослабление влияния многопутности за счет использования на пунктах наблюдения нестандартных экранирующих приспособлений;
- более строгий учет влияния тропосферной рефракции за счет применения радиометров водяных паров;
- организации специализированных методов вычислений, позволяющих определять тропосферные задержки в процессе обработки результатов измерений.

При изучении смещений земной поверхности в городах особое место отводится территориям тех крупных городов, которые расположены в зонах с повышенной тектонической активностью. Примером такого города может служить Красноярск. На его территории в 1999 г. МИИГАиКом совместно с Красноярским АГП начаты работы по созданию геодинамической сети, которая в перспективе позволит отслеживать возникновение опасных деформаций приповерхностных геологических структур. Аналогичные работы начаты в 2000 г. Верхневолжским АГП в г. Казани.

## **8.2. Применение спутниковых технологий в прикладной геодезии**

Высокая точность современных спутниковых координатных определений на линиях различной протяженности в сочетании с возможностью проведения измерений в самых разнообразных физико-географических условиях создали предпосылки для эффективного использования спутниковых методов при решении широкого круга задач прикладной геодезии. В последние годы такие методы стали все чаще использоваться при строительстве тоннелей, сооружении мостов, проложении магистральных трубопроводов, создании и дальнейшей эксплуатации линейных ускорителей заряженных частиц и других крупных инженерных сооружений.

Специфика использования спутниковых методов на вышеупомянутых видах работ состоит не только в оперативном определении координат замаркированных точек с высокой точностью, но и в разработке методов определения ориентирных направлений. При этом измерения приходится, зачастую, проводить в условиях частичной экранировки поступающих от спутников радиосигналов различными видами конструкций создаваемых объектов. Отмеченные особенности обуславливают целесообразность разумного сочетания наземных и спутниковых методов геодезических измерений, объединяющих в себе

спутниковую приемную аппаратуру с такими традиционными геодезическими инструментами, как теодолиты, тахеометры, нивелиры и створные лазерные системы.

Применительно к строительству тоннелей с использованием спутниковых методов последние применяют с целью построения наземных высокоточных геодезических сетей, перекрывающих всю площадь между входными порталами и устанавливающих связь с опорными сетями соответствующего класса. При создании тоннелей в сложных рельефных условиях преимущество спутниковых методов становится наиболее ощутимым. Накопленный к настоящему времени опыт на такого вида работах свидетельствует о том, что при расстоянии между порталами до 10 км спутниковые методы обеспечивают точность на уровне около 1 см. Отработанные на их основе специализированные методы определения ориентирных направлений обеспечивают разрешающую способность на уровне около одной угловой секунды при взаимном расстоянии между пунктами не менее 400 м [90].

При создании различного рода дамб возникает необходимость проведения геодезических работ не только в процессе строительства, но и при дальнейшей их эксплуатации с целью идентификации и анализа возникающих деформаций и смещений элементов конструкции, находящихся под большим внешним давлением. Для достижения повышенной точности получаемой информации и ее объективности спутниковые методы во многих случаях объединяют с наземными методами, базирующимися на использовании тахеометров и высокоточных нивелиров. Совместное использование перечисленных выше технических средств и методов позволяет своевременно и достаточно надежно выявлять опасные деформации и смещения.

Примером описанного подхода может служить Сергиево-Посадская гидроаккумулирующая электростанция. На этом объекте для слежения за деформациями и смещениями наиболее ответственных компонентов конструкции гидроузла использованы в комплексе наземные и спутниковые геодезические методы. При этом пункты, ответственные за величину изучаемых деформаций, закреплены непосредственно на компонентах конструкции гидроузла, а опорные пункты, относительно которых определяются деформации и смещения, размещены на окружающей территории за пределами электростанции. Полученные результаты исследований свидетельствуют о том, что разрешающая способность использованных комплексных методов соответствует нескольким миллиметрам как в плановой плоскости, так и по высоте.

При выполнении геодезических работ на таких крупных инженерных сооружениях, как современные линейные ускорители заряженных частиц, основные особенности связаны с тем, что замаркиро-

ванные пункты располагаются практически на одной прямой. Для иллюстрации на рис.8.3 приведена конфигурация размещения пунктов на двухмильном линейном ускорителе в Стэнфорде (США).

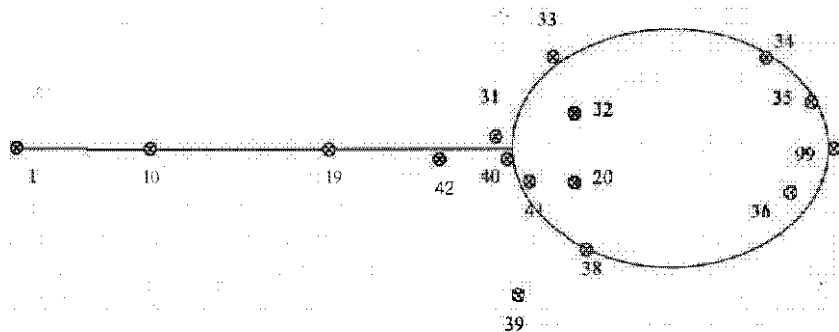


Рис. 8.3. Конфигурация геодезической сети на Стэнфордском линейном ускорителе

При использовании наземных методов, основанных на измерении углов и расстояний, возникает необходимость в организации дополнительных пунктов с целью улучшения геометрии сети, что неизбежно приводит к неоправданным дополнительным технико-экономическим затратам и другим осложнениям. В отличие от наземных методов спутниковые методы не столь критичны к геометрии расположения пунктов и оказываются вполне пригодными для обеспечения требуемой точности координатных определений на пунктах, расположенных вдоль прямолинейной трассы.

На ускорителях рассматриваемого типа в местах стыковки необходимо обеспечить миллиметровый уровень точности как в плане, так и по высоте. Для удовлетворения столь высоких требований так же, как и в предыдущем случае, возникает необходимость в комплексном использовании наземных и спутниковых технических средств. На основе анализа спутниковых измерений на упомянутом ускорителе в Стэнфорде установлено, что в горизонтальной плоскости размеры больших полуосей эллипсов стандартных уклонений не превышают 3 мм. Для оценки точности вертикального компонента было выполнено сравнение разностей высот над выбранным референц-эллипсоидом (что характерно для спутниковых измерений) с разностями нивелирных высот. Полученное расхождение оказалось равным 5 мм, что объясняется недостаточно строгим учетом наклона поверхности квазигеоида.

Для выверки створности установки элементов конструкции линейного ускорителя была применена створная лазерная система, позволяющая определять уклонения от оси линейного базиса, имеющего длину около 3 км, с точностью лучше, чем 0,1 мм. Использование для

этих целей векторных решений, основанных на применении GPS, обеспечило расхождения, не превышающие  $\pm 1$  мм.

Круг задач, решаемых в прикладной геодезии с применением спутниковых технологий, не ограничивается приведенными выше примерами. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации, посвященные затронутым вопросам.

### **8.3. Особенности применения спутниковых технологий в морской геодезии**

Характерная особенность решения задач, относящихся к морской геодезии и базирующихся на использовании спутниковых технологий, состоит в том, что в отличие от задач, связанных с судовождением, местоположения специализированных плавсредств определяются на более высоком уровне точности (единицы метров, а иногда и десятые доли метров). При этом все измерения выполняются в реальном масштабе времени, а получаемые результаты согласовывают с другими техническими средствами, используемыми для определения тех величин, которые, в конечном счете, интересуют потребителей.

Возможные области применения спутниковых методов в морской геодезии принято разделять на две условные группы, исходя из требований, предъявляемых к уровню точности.

К первой группе, для которой требования к уровню точности ограничиваются несколькими метрами, могут быть отнесены такие сферы применения, как:

- промерные работы на акваториях гаваней, в прибрежных водах и на внутренних водоемах;
- картографирование морского дна в территориальных зонах экономического развития или в научных целях;
- определение мест нахождения тех или иных подводных датчиков и соответствующих технических средств, используемых при морских изысканиях полезных ископаемых;
- выполнение гидрографических работ;
- проведение точных гравиметрических и сейсмических съемок.

При решении перечисленных задач преимущественное распространение получил дифференциальный метод спутниковых измерений, базирующийся на использовании кодовых сигналов. При таком режиме работы референцная станция располагается, как правило, на берегу в точке с известными координатами, а мобильная станция на борту используемого плавсредства. Для реализации дифференциального режима измерений поправки, определяемые на референцной станции, передаются по радиоканалу на бортовую мобильную станцию, где и про-



изводятся оперативные вычисления уточненного местоположения плавсредства. Отмеченные поправки представляют собой, как правило, поправки к измеренным до соответствующих спутников расстояниям, а не поправки к координатам референсной станции. Такой подход позволяет оперировать с информацией, относящейся к одним и тем же спутникам, наблюдаемым с референсной и мобильной станций. Для иллюстрации на рис.8.4 отображен принцип организации дифференциального режима работы спутниковой аппаратуры потребителей.

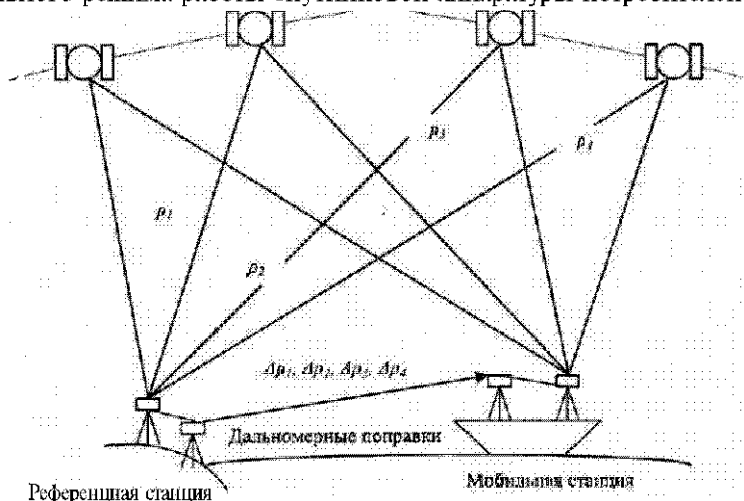


Рис. 8.4. Принцип дифференциального режима работы, используемого в морской геодезии

Передача дальномерных поправок с референсной станции на мобильную осуществляется с использованием стандартизированного формата, разработанного Радиотехническим комитетом морской службы (RTCM). Этот формат предусматривает возможность передачи по радиоканалу достаточно широкого набора данных, в том числе и приведенных на рис.8.4 дальномерных поправок.

В качестве референчных станций при решении задач морской геодезии могут быть использованы также и постоянно действующие радиомаяки, основанные на применении спутниковых систем типа GPS или ГЛОНАСС.

Ко второй группе, охватывающей области применения спутниковых технологий в морской геодезии, которые требуют обеспечения наиболее высокого уровня точности, могут быть отнесены:

- работы, связанные с обслуживанием береговых инженерных сооружений;
- контроль за положением расположенных на морской поверх-

ности платформ, используемых при проведении работ, связанных с добычей нефти, газа и других полезных ископаемых;

— управление драгами, ведущими дноочистительные работы на акваториях гаваней, в устьях рек и на других видах водоемов;

— изучение геодинамических процессов на акваториях морей и океанов.

Обеспечение требуемого высокого уровня точности на таких видах работ достигается, как правило, за счет использования фазовых методов спутниковых измерений, которые рационально сочетаются с псевдодальномерными (кодовыми) методами. Основная трудность реализации таких комбинированных методов сводится к необходимости надежного и оперативного разрешения неоднозначностей характерных для фазовых измерений в условиях установки мобильной станции на движущемся объекте. Для решения отмеченной проблемы в последние годы разработаны достаточно эффективные оперативные методы, базирующиеся на рациональном совместном использовании фазовых и кодовых измерений.

Наряду с описанной выше проблемой при выполнении характерных для морской геодезии работ приходится учитывать и тот факт, что плавсредство, на котором устанавливается мобильная станция, может подвергаться из-за волнений морской поверхности разного рода разворотам и качкам, что, в свою очередь, приводит к непредсказуемым изменениям в пространстве замаркированной точки отсчета. Для учета таких изменений используют модернизированные методы спутниковых измерений, позволяющие определять азимутальные положения судна, а также его продольные и поперечные качки. Один из подходов к решению такой задачи состоит в использовании спутниковых приемников с несколькими разнесенными на небольшие расстояния антенными системами. Антенны могут располагаться по треугольнику, вершина которого находится в носовой части судна, а основание - поперек его кормовой части. Проведенные в этой области исследования свидетельствуют о том, что упомянутые подходы позволяют определять ориентировку положения судна с точностью около  $\pm 1^\circ$ , а продольную и поперечную качку - на уровне около  $\pm 0,25$  мрад.

Одна из дополнительных задач, характерная для морской геодезии, состоит в необходимости разработки метода пересчета положения точек, ответственных за местоположение судна, к тем исходным точкам, от которых производятся измерения другими техническими средствами (как, например, промерные измерения глубин, выполняемые с помощью эхолотов или гидролокаторов бокового обзора).

#### 8.4. Выполнение аэросъемочных работ с использованием спутниковых координатных определений

При проведении картографирования местности современными фотограмметрическими методами эффективно применяются спутниковые системы позиционирования. С их помощью производят определение в полете координат и ориентации аэрофотосъемочной камеры, осуществляют вождение по заданным маршрутам летательных аппаратов и создают на местности сеть с необходимым количеством опознаков.

Обеспечение требуемого при крупномасштабных съемках дециметрового уровня точности достигается за счет применения дифференциального метода спутниковых измерений с использованием фазовых методов, для реализации которых разработаны специальные быстродействующие способы разрешения неоднозначностей. При этом требуют своего решения и такие вспомогательные проблемы, как синхронность работы находящегося на борту спутникового приемника и съемочной камеры, определение элементов эксцентриситета между фазовым центром антенны и центром проекции камеры, а также применение дополнительных мер в случае недостаточного количества наблюдаемых спутников.

Для преодоления трудностей, связанных с получением однозначных значений расстояний, измеряемых фазовыми методами, разработан специальный быстродействующий метод разрешения неоднозначности в полете (OTF). Не останавливаясь на подробном рассмотрении принципов работы OTF, заметим, что данный метод базируется на рациональном сочетании фазовых и наиболее точных кодовых измерений, сопровождаемых оперативными методами обработки получаемых данных. Практическое апробирование последних версий рассматриваемого метода свидетельствует о том, что достаточно надежное разрешение неоднозначностей достигается при последовательной регистрации всего нескольких эпох спутниковых наблюдений.

Поскольку спутниковый приемник позволяет непрерывно отслеживать поступающую на его вход информацию и получать данные о приращениях количества целых циклов, относящихся к фазовым измерениям, то упомянутый оперативный метод разрешения неоднозначности OTF используется, как правило, или в начале маршрута полета самолета, или в тех случаях, когда в поле зрения остается менее четырех спутников, что наиболее часто наблюдается при наклонах самолета во время его виражей.

Что касается точности конечных результатов, то потенциальные возможности спутниковых фазовых измерений позволяют без каких-либо затруднений обеспечить необходимый для крупномасштабных

аэросъемочных работ дециметровый уровень точности. Вместе с тем ощутимая потеря точности может наблюдаться в случае несинхронной регистрации спутниковых измерений и срабатывания затвора съемочной камеры. Для решения этой проблемы в используемый на борту самолета комплекс аэросъемочной аппаратуры вводится внешнее управляющее устройство, обеспечивающее синхронный режим работы, относящийся к спутниковым измерениям и к работе затвора аэросъемочной камеры. По результатам проведенных исследований установлено, что нарушение отмеченного синхронизма может приводить к возникновению ошибок, достигающих нескольких метров.

Невозможность пространственного совмещения фазового центра антенны спутникового приемника с центром проекции фотокамеры обуславливает наличие трехмерного эксцентриситета, включающего в себя расстояние между упомянутыми центрами и три угла ориентации. Поскольку расстояние является инвариантной величиной, то оно может быть определено в статических условиях традиционными техническими средствами. Для определения ориентации платформы с установленным на ней оборудованием в динамических условиях приходится прибегать к использованию таких специализированных устройств, как наклономеры, а в отдельных случаях и к применению трех разнесенных в пространстве антенн спутникового приемника. Проведенные в этой области исследования свидетельствуют о том, что информация об углах ориентации имеет меньшее значение, чем знание точного положения центра фокуса камеры в момент съемки [80].

Проблема вождения аэросъемочных самолетов по заданным маршрутам относится к навигационным применениям спутниковых систем позиционирования. Для ее реализации используется тот же самый спутниковый приемник, работающий в дифференциальном режиме и выдающий результаты в реальном масштабе времени. Достижение характерного для аэросъемочных работ вождения самолета с точностью на уровне около 10 м не вызывает существенных затруднений.

Применительно к решению задач, связанных с созданием спутниковыми методами наземного геодезического обоснования, следует заметить, что необходимая точность на уровне от одного до пяти метров может быть реализована на основе применения кодовых измерений и использования упрощенной спутниковой приемной аппаратуры (например, одночастотных приемников, работающих в дифференциальном режиме). Технология выполнения работ по созданию съемочного обоснования подробно рассмотрена в утвержденной в 2002 г. «Инструкции по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS», ГКИНП (ОНТА)-02-262 - 02 [25].

## 8.5. Использование спутниковых технологий при выполнении топографических и различных специализированных съемок

Позитивные технико-экономические предпосылки, способствующие широкому применению спутниковых методов при проведения на местности различного вида съемок, связаны с открывшимися возможностями производить координатные определения оперативно, с высокой точностью, при любых условиях погоды и при отсутствии прямой видимости между пунктами. Основным ограничительным фактором является при этом требование обеспечения свободного обзора той части небосвода, где в момент измерений находятся наблюдаемые спутники. На практике такое требование не всегда удается выполнить из-за наличия различных экранирующих объектов (кроны деревьев, геодезические наружные знаки, стены зданий и др.), окружающих установленный на пункте спутниковый приемник. В этой связи при организации работ предпочтение отдают комбинированным методам, подразумевающим рациональное сочетание спутниковых наблюдений с измерениями такими геодезическими инструментами, как электронные тахеометры.

Накопленный к настоящему времени опыт применения упомянутых комбинированных методов свидетельствует о том, что спутниковые технологии чаще всего используют для создания съемочного обоснования снимаемого участка местности, а детальная съемка осуществляется только на открытых территориях или с помощью наземных технических средств. Создаваемое при этом геодезическое обоснование чаще всего реализуется через построение локальных сетей, для которых характерны небольшие удаления между пунктами и сравнительно невысокие требования к точности координатных определений.

С технико-экономической точки зрения при проведении спутниковых измерений в таких сетях целесообразно использовать сравнительно недорогие одночастотные приемники геодезического типа в сочетании с оперативными и экономичными методами наблюдений и последующей обработки.

Примерами могут служить такие приемники, как «Землемер Л1-М» (РИРВ, Россия), SR 510 (Leica, Швейцария), 4600 LS Suveror (Trimble, США), Geotracer 2100 (Geotronics, Швеция), Pro Mark II (Thales, Франция) и др. Перечисленные типы приемников приспособлены для работы как в быстродействующем статическом режиме («Быстрая статика»), так и в полукинематическом режиме, получившем название Stop/Go (Стою/Иду). Они достаточно просты в обращении, имеют сравнительно небольшой вес и потребляют небольшое количество электроэнергии. Точность измерений такими приемниками в со-

четании с отмеченными режимами измерений характеризуется средними квадратическими ошибками на уровне около 2 см в плане и 5 см по высоте. Поскольку свойственные спутниковым технологиям методы позволяют получать ориентированные в пространстве векторы, которые характеризуются не только линейной величиной, но и направлением, то последнее свойство используется при съемках для определения азимутальных направлений с погрешностью в несколько угловых секунд. Эта точность зависит, прежде всего, от расстояния между пунктами и возрастает по мере увеличения дальности.

Разработанные к настоящему времени спутниковые технологии широко используются при проведении на местности самых разнообразных съемок. Наряду с хорошо известными топографическими съемками следует отметить такие области применения, как:

- съемки, связанные с различного рода землеустроительными работами;
- съемки, приуроченные к прокладке трасс для шоссе и железных дорог;
- геодезическое обеспечение геолого-геофизических работ;
- съемки, связанные с ведением лесного хозяйства.

Этот перечень может быть существенно расширен.

Не останавливаясь на отдельных особенностях спутниковых координатных определений, характерных для различных видов съемок, выделим обобщенные особенности, связанные с применением спутниковых методов.

При проведении спутниковых измерений при благоприятных условиях наблюдения спутников могут быть использованы хорошо отработанные подходы, которые достаточно подробно описаны в предыдущих разделах. Вместе с тем съемки местности приходится во многих случаях проводить в условиях, когда поступающие от спутников радиосигналы экранируются различного рода препятствиями. Такая ситуация возникает чаще всего при проведении съемок в залесенных районах, которые в нашей стране занимают обширные территории.

Для успешного использования спутниковых технологий в залесенной местности предложены различные подходы. В некоторых случаях предлагается размещать приемники на полянах или даже делать необходимые вырубки деревьев. В Методических рекомендациях, разработанных Сибирским научно-исследовательским институтом геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГиМС) [16], приведена специальная таблица, регламентирующая удаление приемника от деревьев в зависимости от высоты последних. С целью обеспечения качественных измерений рекомендуется производить установку приемников на полянах с радиусом от 5 до 170 м (в зависи-

мости от высоты деревьев, возвышающихся над уровнем антенны от 2,5 м до 30 м).

Другой подход к решению рассматриваемой проблемы состоит в разработке специальной облегченной мачты, позволяющей оперативно поднимать антенну приемника на высоту, исключающую экранировку сигналов кронами деревьев. Полученные результаты свидетельствуют о том, что точность спутниковых измерений в таких условиях эквивалентна точности, характерной для открытой местности.

При проведении различного рода съемок спутниковыми методами повышенное внимание уделяется минимизации ошибок измерений, обусловленных отражениями как от подстилающей поверхности, так и от окружающих объектов (многопутность). Для решения этой проблемы производится модернизация антенных систем спутниковых приемников, которые оснащаются дополнительными приспособлениями, позволяющими ослабить влияние отражений на прямые сигналы, поступающие от спутников. Наряду с этим совершенствуются методы обработки, ориентированные на минимизации влияния отражений. Одной из специфик выполняемых работ, связанных со съемкой местности, является целесообразность применения местных координатных систем, причем потребителей чаще всего интересуют высоты, получаемые из нивелирования. В то же время спутниковые методы позволяют получать геодезические высоты, относящиеся к поверхности выбранного эллипсоида, которые существенно отличаются от нивелирных высот. Как свидетельствуют экспериментальные данные [57, 84], такие расхождения даже на участках сравнительно небольших размеров могут достигать 40 см и более.

Для решения отмеченной проблемы в создаваемые сети включают пункты с известными из нивелирования высотными отметками. Если же возникает необходимость получения информации для всех остальных пунктов сети без проложения на местности многочисленных нивелирных ходов, то такая проблема может быть решена на основе совместного использования спутниковых и гравиметрических данных.

Технология выполнения работ по производству съемок подробно рассмотрена в «Инструкции по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОПАСС и GPS», ГКИПП (ОПТА)-02-262-02 [25].

#### *Кинематический режим измерений и обработки в реальном времени*

Кинематический режим измерений и обработки в реальном времени (Kinematic GPS — RTK GPS) [89] при времени измерений на од-

ном пункте до 5 с позволяет выполнять обработку в реальном масштабе времени (on line), т. е. одновременно с выполнением измерений. Основное применение кинематического режима измерений и обработки в реальном времени (Real-Time Kinematic GPS - RTK GPS) - это плановая и высотная съемки открытой территории, создание локальных сетей ступенчатости на небольших удаленных объектах, вынос в натуру проектов. Сравнительные данные по производительности [89] приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Вид работ	RTK GPS	Тахеометрия	Нивелирование	Обработка
Плановая съемка	220%	100%	—	0,5 ч
Планово-высотная съемка	240%	100%	—	0,5 ч
Высотная съемка	240%	—	100%	0,3 ч
Создание сетей ступенчатости	300%	100%	—	1,5 ч
Вынос проекта в натуру	325%	100%	—	—

Наиболее важным преимуществом кинематического режима измерений и обработки в реальном времени (Real-Time Kinematic GPS — RTK GPS) является полное отсутствие необходимости повторного выезда на объект для исправления выявленных в процессе обработки недостатков, так как обработка и контроль качества выполняются непосредственно в процессе измерений.

Не всегда повышение производительности от использования спутниковых приемников оправдывает высокую стоимость технических средств и программного обеспечения, поэтому использование на конкретных видах работ тех или иных моделей спутниковых приемников необходимо увязывать с требуемой точностью получения координат. Так, например, точность определения координат для плановой привязки спутниковых снимков среднего разрешения, для координирования отдельных объектов при обновлении карт мелких масштабов 1:50 000 - 1:1 000 000 лежит в пределах 5 - 100 м. При использовании навигационного режима измерений и обработки точность порядка 5 — 40 м может быть получена в реальном масштабе времени, а более высокая, порядка 1 м, при последующей камеральной обработке. При этом не требуется применять дорогостоящие фазовые геодезические приемники, а достаточно использовать более дешевые приемники и соответствующее программное обеспечение. Недорогие кодовые спутниковые приемники многих фирм в последнее время получили встроенную функцию дифференциальных определений в реальном масштабе времени (DGPS).



## 8.6. Особенности решения навигационных задач с использованием спутниковых приемников

Одним из наиболее значимых и перспективных направлений практического применения спутниковых навигационных систем является автоматическое местоопределение подвижных объектов (automatic vehicle location, AVL), активно развивающееся в настоящее время. Многие фирмы-производители связной и навигационной аппаратуры потребителя (спутниковых приемников) также изготавливают и поставляют оборудование, размещаемое на подвижных объектах и выполняющее функции бортовых контроллеров с определением собственных координат, скорости, курса, с интерфейсом внешних датчиков и исполнительных устройств и предназначенное для объединения в комплекс транспортной навигации. Как правило, подобный комплекс состоит из базовой станции и групп подвижных объектов, взаимодействующих при помощи радиоканала.

### *8.6.1. Персональные навигационные системы*

При навигационных измерениях в автономном режиме приемник используется без базовой станции, при этом точность единичных определений местоположения составляет 5–40 м в зависимости от скорости движения и внешних условий. Простейшие модели персональных спутниковых приемников предоставляют возможность получения текущих координат с указанной выше точностью в системе координат WGS-84 и скорости движения. Более сложные модели позволяют определить, кроме того, направление движения и отобразить на жидкокристаллическом дисплее ряд сервисных функций, например, отклонение от заданного маршрута, расстояние до заданной точки, а также графически отобразить маршрут движения в пределах окна встроенного дисплея.

К первым моделям приемников такого типа относятся Geo-Explorer, ScoutMaster фирмы Trimble Navigation, GARMIN-38, 40, 45 фирмы GARMIN INTERNATIONAL INC и др.

Современные модели спутниковых приемников позволяют графически отобразить маршрут движения на электронной карте в пределах окна встроенного дисплея. Характерным примером таких приборов является новая серия GeoExplorer CE. Новые приборы представляют собой интегрированные в один корпус компьютер с операционной системой Microsoft Windows CE, GPS-антенну и приемник GPS. Наличие Windows CE позволяет использовать программное обеспечение ГИС, например, TerraSync (Trimble Navigation), ArcPad (ESRI) ли-

бо другое специализированное программное обеспечение. Серия GeoExplorer CE позволяет выполнить дифференциальную коррекцию в режиме реального времени или с помощью последующей обработки по программам TerraSync или GPScorrect для повышения точности. В серию входят следующие модели:

GeoXM — 8-канальный GPS-приемник, обеспечивающий точность после дифференциальной коррекции кодовых измерений 2–5 м;

GeoXT — 12-канальный GPS-приемник, обеспечивающий субметровую точность после дифференциальной коррекции кодовых измерений и до 30 см после обработки фазовых измерений. Дополнительно GeoXT оснащен технологией снижения влияния многопутности Everest.

Обе модели имеют достаточный объем внутренней памяти — 128 или 512 Мб и могут быть укомплектованы адаптером сотового телефона для беспроводного доступа к картографическим данным [76].

При навигационных измерениях возможны следующие режимы работы:

— режим определения местоположения подвижной станции в реальном времени (рис. 8.5);

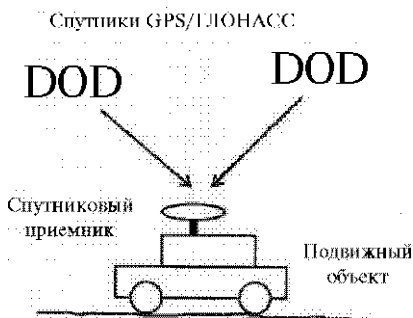


Рис. 8.5. Автономный режим определения местоположения подвижной станции в реальном времени

— режим слежения за местоположением подвижной станции в реальном времени (рис. 8.6);

— комбинированный режим, при котором точное положение подвижной станции определяется и в точке нахождения подвижной станции, и на диспетчерском пункте (в месте нахождения базовой станции).

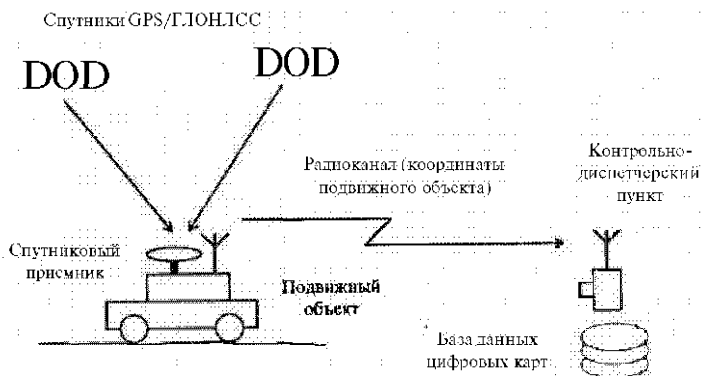


Рис. 8.6. Автономный режим слежения за местоположением подвижной станции в реальном времени

### 8.6.2. Навигационные системы транспортных средств

Одним из первых вариантов диспетчерской информационной системы является система ПРИН ДИС, представленная фирмой АО «ПРИН», которая предлагает на российском рынке спутниковые навигационные системы TRIMBLE [2]. Уже в этой первой системе были реализованы все основные функции автоматизированной диспетчерской системы. ПРИН ДИС позволяет определять координаты подвижных объектов и отображать их на электронной карте местности, выведенной на экран компьютера. В состав системы входят персональный компьютер, программное обеспечение, аппаратура связи и спутниковые приемники. Положение каждого подвижного объекта в режиме реального времени отображается на экране специальным значком. Каждому объекту присваивается имя, которое индицируется рядом со значком. На экран можно также вывести курс и скорость движения объектов.

Программное обеспечение работает в среде Windows, что позволяет оператору ПРИН ДИС использовать преимущества многозадачного и многооконного режимов и видеть одновременно несколько районов электронной карты в разных окнах. В каждом окне можно задать свой масштаб отображения и отслеживать движение группы объектов, при этом масштаб изображения и границы участка электронной карты автоматически меняются таким образом, чтобы все объекты заданной группы оказались в поле зрения. Прием данных от спутниковых приемников осуществляется в специальном формате «ТАР-протокол».

Воздушные, морские и наземные транспортные перевозки играют важную роль в экономическом развитии всех без исключения стран и регионов. По транспортным путям в возрастающих объемах круглосуточно в разных направлениях перемещаются огромные массы грузов и большое количество пассажиров. Российские транспортные магистрали, имеющие большую протяженность и не всегда хорошее качество, не являются исключением из этого общего правила.

В условиях увеличения грузооборота, криминализации обстановки на дорогах и акваториях, развития системы страхования, усиления конкуренции, необходимости повышения дисциплины и безопасности вопрос эффективного управления и контроля транспортными средствами на сложных разветвленных маршрутах или на дальних расстояниях становится наиболее актуальным. В условиях жесткой конкуренции трудно найти руководителя организации, использующей транспорт, который не стремился бы снизить накладные расходы, повысить эффективность работы диспетчеров, водителей, капитанов, машинистов, улучшить контроль за состоянием подвижного состава.

Кроме того, особого внимания требует транспортировка грузов, обладающих особыми свойствами (токсичные и радиоактивные отходы, взрывчатые и отравляющие вещества, негабаритные грузы, деньги и драгоценности, оружие и др.).

Кроме задач глобальной навигации международных (или междугородных) перевозок существуют не менее важные задачи локальной навигации для постоянного автоматического определения местонахождения объекта, направления и скорости его движения и отображения информации на электронной карте.

К таким локальным задачам относятся контроль за местоположением специальных транспортных средств службы инкассации, милиции, ГАИ, такси, аварийных служб; сигнализация угона и отслеживание пути угнанного автомобиля; контроль за перевозкой грузов; контроль за местонахождением судов в условиях прибрежного плавания.

Поскольку определение координат с использованием спутниковых приемников решается одинаково и в случае глобальной навигации, и при решении локальных задач, то основными отличиями глобальных и локальных систем будут дальность действия каналов связи и наличие картографической основы на необходимую территорию.

### *Глобальные системы контроля и управления транспортом*

Одним из вариантов глобальной системы контроля и управления транспортом является система Galaxy, предложенная фирмой АО «ПРИН» [2].

Концепция слежения за транспортом и контроля перевозок подразумевает оперативное получение диспетчерской службой объективной информации о координатах, скорости и направлении движения транспорта, а также отслеживание данных о состоянии машины и груза (вскрытие контейнера, удар, опрокидывание, вес, температура рефрижератора и т. п.). Необходимо также обеспечить информационное взаимодействие между экипажем и диспетчерским центром, включая обмен свободным текстом, стандартными и экстренными сообщениями («нападение», «остановлен ГАИ», «авария, есть жертвы» и др.). Решая задачу снижения накладных расходов на эксплуатацию и поддержание системы слежения в работоспособном состоянии, ведущие отечественные, зарубежные и совместные компании пошли по «космическому пути», т. е. используют спутниковую навигацию и космическую связь. «Космический путь» обеспечивает непрерывность, глобальность, надежность связи и контроля в любой точке земного шара.

В качестве спутниковой радионавигационной системы предлагается использовать систему GPS, позволяющую подвижным объектам на земле и воде путем приема и обработки сигналов от нескольких навигационных спутников определять свои координаты (широту, долготу и высоту), направление и скорость движения, направление на очередную точку маршрута, пройденное и оставшееся расстояние до промежуточной или конечной точки маршрута, другие характеристики. Достоинством GPS является непрерывность передачи информации, всепогодность и анонимность потребителя.

Для информационного взаимодействия (голосовая связь, передача данных с различной скоростью и т. п.) подвижных средств и диспетчерского центра, осуществляющего непосредственный контроль, слежение и управление транспортом, наиболее широко используется система мобильной спутниковой связи IMMARSAT.

IMMARSAT — международный консорциум, образованный в 1979 г. и объединивший 79 стран, в том числе и Россию. Он владеет собственным квартетом спутников второго поколения, двумя IMMARSAT-3, арендует MARECS Европейского космического агентства, емкости трех INTELSAT и трех MARTSAT. Вся эта армада геостационарных спутников обеспечивает высоконадежную мобильную связь на всей территории Земли, за исключением полярных областей. В 1995 г. было решено развивать и поддерживать IMMARSAT. С этой целью в существующую систему будут включены 12 спутников на высоте около 10 000 км, размещенных на двух круговых орбитах с наклоном 45°. 20 наземных станций IMMARSAT обеспечивают связь спут-

ников между собой, с национальными и международными телекоммуникационными сетями.

В рамках этой системы в 1992 г. была разработана технологическая концепция Standart-C, которая предназначена для транспортных приложений, для глобальной двусторонней передачи кодированных текстовых сообщений.

В состав Galaxy входит:

- приемопередающая станция спутниковой связи с GPS-приемником;
- специализированный бортовой компьютер;
- набор датчиков.

Бортовой комплект оборудования обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- отправку сообщений в центр, в том числе отчета о местоположении и состоянии датчиков;
- получение сообщений из центра;
- печать сообщений на принтере внутри транспортного средства;
- прием и отправку форм и макросообщений;
- отображение служебной информации;
- экстренный тревожный вызов.

Станция Galaxy комплектуется электронным блоком и малогабаритной приемопередающей антенной, работающей через IMMARSAT и принимающей сигналы GPS. Galaxy имеет встроенный шестиканальный GPS-датчик, определяющий координаты и скорость транспортного средства, и с помощью спутника передает в диспетчерский центр или принимает от него служебные данные.

Специализированный бортовой компьютер MDT (Mobile Data Terminal) для совместной работы с Galaxy имеет ударопрочный корпус, герметичную русифицированную клавиатуру, жидкокристаллический дисплей 4 строки по 40 символов. MDT позволяет подключить различные датчики, такие как датчики температуры для холодильника, датчики уровня топлива, датчики сигнализации об ударе и опрокидывании, датчики взвешивания груза, датчики пожарно-охранной сигнализации (блокировка дверей, сейфов, включение спецустройств и выключение двигателя), датчик тахометра для фиксации режима работы двигателя. В MDT вмонтирован специальный слот для карточки памяти, которая может использоваться как накопитель маршрутной информации, а также слот для считывания штрихкодовой информации. Компьютер может быть перепрограммирован для связи, для накопления маршрутной информации, для того и другого одновременно. Существует возможность изменить программу таким образом, чтобы по таймеру или при прохождении

заданных точек маршрута на диспетчерский пункт передавалась объективная привязанная по времени и координатам информация о состоянии всех датчиков.

Диспетчерский центр представляет собой комплекс, включающий до 20-ти персональных ЭВМ, работающих в локальной сети. При этом диспетчерам разрешен доступ только к определенной информации. Программное обеспечение центра состоит из картографического модуля, пакета LOGIQ и интерфейса к системе IMMARSAT через телефонный модем, линию X.25 или станцию Galaxy.

Программное обеспечение системы позволяет передавать текстовые сообщения всем или выбранным транспортным средствам, принимать сообщения от водителей или экипажей и отображать положение транспортного средства на электронной карте по полученным координатам. В его основе лежит база данных, в которой сохраняется вся информация о состоянии транспортных средств и действиях диспетчеров. В любой момент времени можно получить данные о том, где был транспорт и каково его состояние.

При включении в состав аппаратуры центра больших экранов возможен перенос отображения информации на средства коллективного пользования.

Ряд исследовательских проектов Европейского сообщества позволил определить следующие преимущества и выгоды предлагаемой технологии.

1. Сокращение расходов на телефонные разговоры (график IMMARSAT-C значительно экономичнее).
2. Возможность попутной загрузки.
3. Повышение безопасности перевозок (оперативный информационный обмен).
4. Эффективный контроль за экипажем.
5. Снижение расхода топлива.
6. Сокращение холостого пробега.
7. Экономия времени диспетчера и водителя.
8. Улучшение планирования использования средств.
9. Быстрая помощь при аварии или поломке.
10. Повышение уровня сервиса для заказчика.
11. Повышение среднего коэффициента загрузки.
12. Расширение круга решаемых задач.

#### *Локальные системы контроля и управления транспортом*

Одним из вариантов локальной системы контроля и управления транспортом является система, разработанная фирмой САТЕЛЛИТ

СПБ и ГП «АЭРОГЕОДЕЗИЯ» (Санкт-Петербург) и внедряемая в центральном регионе России Верхневолжским АПП, которые предлагают на российском рынке систему космического позиционирования и сопровождения подвижных объектов на электронных картах SDS-2[14].

Система SDS-2 предназначена для постоянного автоматического определения местонахождения объекта, направления и скорости его движения. Выдача данных производится на персональный компьютер. Отображение информации производится на электронной карте. Система обеспечивает двусторонний обмен информацией по управлению и контролю за состоянием объекта.

Область применения системы:

1. Автоматический контроль за местоположением специальных транспортных средств:

- службы инкассации;
- милиции и ГАИ;
- служебных автомобилей;
- такси;
- аварийных служб.

2. Сигнализация попытки угона и отслеживание пути угнанного автомобиля.

3. Автоматический контроль за перевозкой грузов на любых транспортных средствах.

4. Автоматический контроль за местонахождением любых судов на рейдах и в условиях прибрежного плавания.

Основные технические данные и состав системы приведены ниже.

Число отслеживаемых объектов ...	до 1000
Режим обмена .....	активный (запрос-ответ), выдача экстренных сигналов с подвижных объектов
Частота опроса объектов .....	до трех в секунду
Характеристика радиоканала .....	УКВ-канал, совместимый с голосовой связью, или сотовый радиотелефон в стандартах GSM или MMT450
Функции слежения .....	за одним объектом, группой или всеми объектами с отображением на электронной карте
Режимы выдачи данных .....	графический, текстовый и голосовой
Дополнительный сервис .....	возможность модификации карт (ввод новых стационарных объектов)



Стационарный диспетчерский центр SDS-21C состоит из ПЭВМ IBM PC с процессором Intel486 или Pentium, УКВ-радиостанции, контроллера пакетной связи или телефонного модема. Мобильный диспетчерский центр SDS-21M состоит из Notebook с процессором Intel486 или Pentium, УКВ-радиостанции или сотового телефона, контроллера пакетной связи. Мобильная станция SDS-22 состоит из УКВ-радиостанции или сотового телефона, прибора позиционирования и передачи данных SDS-221, контроллера пакетной связи, концентратора сигналов и управления исполнительными устройствами SDS-222.

Другим вариантом локальной системы контроля и управления транспортом является разработанная ЗАО «Трансетсервис» радиотелефонная система транспортной навигации «Магеллан-М», которая в настоящее время внедряется совместно с АО «Российская национальная служба экономической безопасности» для постоянного автоматического слежения за маршрутом движения подконтрольных подвижных объектов с отображением их местоположения на экране компьютера на фоне карты города, а также для обеспечения служебной оперативной связью экипажей, подразделений охраны, мобильных групп и служб безопасности объектов [14].

Основу «Магеллан-М» в полной конфигурации составляет многозонавая транковая система радиосвязи, реализуемая в стандарте LTR (E.F. Johnson). Система обеспечивает следующие способы передачи информации: голосом, зашифрованным голосом, цифровым кодом.

Принцип работы системы аналогичен SDS-2 и заключается в следующем: приемники GPS, установленные на подвижных объектах, с помощью навигационных спутников определяют координаты объектов, затем радиоканал доводит эту информацию через систему ретрансляторов до адресата (контрольного поста охраны, диспетчерского пункта службы безопасности или технологического диспетчерского пункта). Для обеспечения оперативного взаимодействия мобильных групп охраны используется голосовая связь как в групповом и адресном режимах, так и по открытому каналу.

Система может обслуживать до 65536 объектов с частотой обновления информации о местоположении до 150 подвижных объектов в минуту. Система базируется на оборудовании фирмы Kenwood (Япония). Фирмой Kenwood разработан и производится бортовой контроллер (GPS Modem) со встроенным 6-канальным GPS-приемником, устанавливаемый на борту подвижного объекта и стыкуемый практически с любой мобильной радиостанцией УКВ/ДЦВ диапазона, работающей в режиме conventional. Специальный протокол позво-

ляет объединять в систему свыше 65 тыс. подвижных объектов, поддерживать разделение на группы, работать в синхронном сигнальном или запросном режимах, производить индивидуальные, групповые, аварийные вызовы и вызовы в выделенных зонах, устанавливать маски состояния датчиков, прослушивать салон автомобиля, воздействовать на исполнительные устройства и транслировать дифференциальные поправки.

#### *Системы навигации, охраны и мониторинга подвижных объектов*

Универсальная система навигации, охраны и мониторинга «Track Master» фирмы GEO SPECTRUM INTERNATIONAL Ltd. [14, 71] предназначена для:

- управления транспортным парком, контроля за состоянием подвижных объектов и их перемещением в реальном масштабе времени;
- охраны мобильных и стационарных объектов;
- мониторинга окружающей среды (на базе воздушных, наземных и морских средств передвижения);
- наземной и воздушной автономной навигации.

Система позволяет решать следующие задачи:

- слежение за выбранной группой транспортных средств (до 1000) на любом расстоянии;
- охрана до 1000 мобильных и стационарных объектов;
- передача по выделенному радиоканалу телеметрии (географических координат, курса, скорости, идентификатора транспортного средства и т.д.), видеоизображений и текстовых сообщений с транспортного средства и стационарного объекта, а также прием, регистрация и отображение полученной информации на диспетчерском центре;
- определение транспортным средством своих географических координат, курса, скорости и отображение этих параметров на экране монитора бортового компьютера с привязкой к электронной карте местности;
- оптимизация маршрута движения транспортных средств;
- оптимальная прокладка маршрутов нефтяных и газовых трубопроводов;
- дистанционное управление транспортными потоками в РМВ;
- мониторинг окружающей среды с использованием стационарных измерительных постов и подвижных экологических лабораторий, передача полученных данных на диспетчерский центр и их обработка в реальном масштабе времени, оповещение службы экологической помощи.

В состав системы входят следующие подсистемы:

- диспетчерский центр;
- информационного обмена;
- аппаратуры потребителя.

Диспетчерский центр решает следующие основные задачи:

- контроль местонахождения и перемещения мобильных объектов, контроль их состояния;
- централизованное управление движением группы объектов;
- сбор, хранение и архивация данных о движении объектов контроля и их состоянии за заданный период;
- осуществление высокоточного дифференциального режима привязки абонентов системы;
- выдача информации об утоне автотранспорта, вызов соответствующих служб и т.д.

Центр включает следующие основные элементы:

- систему контроля перемещений и управления потребителями;
- аппаратуру приема и передачи данных о положении и состоянии контролируемых объектов и сигналов управления (подсистему связи);
- навигационную аппаратуру для вычисления и передачи дифференциальных коррекций;
- программное обеспечение.

Положение сопровождаемых объектов отображается на экранах мониторов в виде условных значков, наложенных на компьютерную карту местности. Состояние каждого из наблюдаемых объектов (координаты, скорость движения, изображения объектов, состояние датчиков) отображается в виде текстовой и графической информации. На экран дисплея диспетчера выводится также вспомогательная информация об аварийных ситуациях на объектах, сигналы об отклонении от маршрута.

Подсистема информационного обмена предназначена для организации полудуплексного (дуплексного) обмена цифровыми данными между мобильным терминальным оборудованием и оконечным оборудованием обработки данных диспетчерского центра.

В состав подсистемы входит:

- аппаратура канала передачи данных мобильного абонента;
  - аппаратура канала передачи данных диспетчерского пункта;
  - беспроводные сети связи и выделенные каналы проводной связи.
- Состав бортовой аппаратуры:
- спутниковый навигационный приемник с антенной (GPS и совмещенный GPS+ГЛОНАСС);
  - портативная ПЗС-камера;
  - станция УКВ-диапазона или спутниковая связь;

- бортовая микроЭВМ. Подсистема автономной навигации.

В состав комплекса автономной навигации транспортных средств входят следующие модули:

- модуль позиционирования на основе GPS, ГЛОНАСС или GPS+ГЛОНАСС-приемника и других доступных навигационных датчиков, включая систему счисления на основе электронного компаса и одометра (при наличии его на автомобиле);

- модуль визуализации и отображения на базе с электронной картой города;

- специальное программное обеспечение, реализующее функции совместной обработки информации от навигационного приемника, цифровой карты, системы счисления.

## Заключение

Стремительное расширение сфер применения спутниковых систем типа GPS и ГЛОНАСС стимулирует постоянно увеличивающийся рост количества поступающей в обращение спутниковой приемной аппаратуры и ее совершенствование, включая методы наблюдений и последующей обработки. По опубликованным в последнее время данным [73] выпуском приемной аппаратуры потребителей занимаются более 60 фирм, которыми создано более 400 различных типов спутниковых приемников, при этом совершенствованию подвергаются и все спутниковые системы в целом. Прогрессу в этой области способствуют многочисленные исследования, ориентированные на совершенствование процесса наблюдений и обработки спутниковых измерений. Такие исследования позволили существенно минимизировать влияние различных источников ошибок, что привело к значительному повышению как точности, так и надежности конечных результатов измерений. В заключение в сжатой форме изложим основные направления дальнейшего совершенствования рассматриваемых систем, а также некоторые вопросы их совместного использования, включая и объединение таких систем с другими техническими средствами, позволяющими определять местоположения как неподвижных точек на местности, так и движущихся объектов. Особого внимания заслуживают проблемы метрологической аттестации спутниковых приемно-вычислительных комплексов, основная роль которой состоит в обеспечении единства измерений в области координатных и линейных измерений, а также в оценке реальной, а не формализованной точности получаемых данных.

### Пути дальнейшего совершенствования спутниковых систем позиционирования

Накопленный за последние годы опыт эксплуатации спутниковых систем типа GPS и ГЛОНАСС выявил целесообразность совершенствования таких систем и позволил наметить наиболее перспективные направления их дальнейшего совершенствования. Вместе с тем появились предложения о создании новых спутниковых систем позиционирования. В конспективном изложении приведем краткую

информацию об опубликованных в печати планах дальнейшего совершенствования существующих спутниковых систем и прорабатываемых предложениях по созданию новой системы, получившей название «Галилео».

### *Планируемые усовершенствования системы GPS*

Наиболее ощутимые затраты, возникающие в процессе эксплуатации GPS, связаны с решением проблемы периодического обновления спутников в связи с ограниченным сроком их службы. Исходя из этого, повышение срока активного существования спутников на орбитах представляет собой одну из наиболее актуальных проблем. Как уже отмечалось (см. подраздел 1.5.1), этому показателю уделяется постоянное внимание. Он улучшается при введении в эксплуатацию каждого нового типа спутников. Примером тому может служить заключенный в настоящее время с фирмой Boling (США) контракт на изготовление 30 новых усовершенствованных спутников типа Блок-ИФ, расчетный срок службы которых предполагается повысить до 14–15 лет.

Используемые на борту спутника атомные (рубидиевые и цезиевые) опорные генераторы планируется заменить на водородные мазеры, которые обеспечивают более высокую стабильность частоты в течение длительных интервалов времени.

Очередное совершенствование GPS связано с предполагаемым размещением на спутниках последних моделей средств межспутниковой связи в сочетании с устройствами по обмену данными и системами измерения расстояний между спутниками. Такой комплекс открывает возможность выполнения автономной синхронизации часов на спутниках и автономного уточнения параметров орбит спутников.

При введении в действие такого комплекса периодичность обновления навигационных сообщений на спутниках может быть увеличена до 180 дней без существенного ухудшения качества информации, поступающей потребителям в составе навигационных сообщений.

С 2003 г. планируется начать передачу общедоступного C/A-кода на второй несущей частоте, что существенно упростит процедуру вхождения в связь с конкретным спутником для гражданских потребителей. При этом расширяются возможности учета влияния ионосферы при работе с кодовыми сигналами на второй несущей частоте.

Очередное усовершенствование связано с планируемым вводом третьей несущей частоты. Оно существенно облегчит процедуру разрешения неоднозначностей при использовании фазовых измерений, базирующихся на несущих частотах.

Количество спутников в «созвездии» GPS предполагается увеличить до 30—36, что позволит повысить качество спутниковых наблюдений, производимых с пунктов с ограниченными условиями видимости, и ослабить влияние геометрии расположения спутников на точность производимых координатных определений.

На проведение в течение 6 лет указанных мероприятий предполагается выделить около 400 млн долларов США [73].

### *Перспективы дальнейшего совершенствования системы ГЛОНАСС*

Дальнейшее совершенствование системы ГЛОНАСС неразрывно связано с разработкой спутников с повышенным сроком службы с тем, чтобы легче решать задачу постоянного поддержания полного «созвездия» спутников, входящих в систему ГЛОНАСС. Накопленный к настоящему времени опыт свидетельствует о том, что срок службы спутников ГЛОНАСС составляет в среднем около 3,5 лет [18, 73]. В усовершенствованной системе ГЛОНАСС-М предполагается повысить этот срок до 5 лет. Наряду с этим ведутся проработки по установке на спутниках системы ГЛОНАСС более стабильных бортовых атомных стандартов частоты с относительной среднесуточной нестабильностью не хуже  $1\text{--}10^{-13}$ .

К другим направлениям модернизации следует отнести перспективу введения на второй несущей частоте общедоступного СТ-кода (аналог С/А-кода для системы GPS). Вместе с тем предполагается уменьшить уровень немоделируемых возмущений орбиты, что позволит повысить прогнозируемую точность эфемеридной информации.

В общем комплексе планируемых усовершенствований этой системы особого внимания заслуживают вопросы, связанные с согласованием используемых в системах GPS и ГЛОНАСС различных глобальных координатных систем (WGS-84 и ПЗ-90). Эта проблема была одной из ключевых при проведении международного эксперимента IGEX-98, посвященного глобальным исследованиям системы ГЛОНАСС [92]. Одна из задач таких исследований, ориентированных на возможность применения системы ГЛОНАСС для высокоточных определений координат пунктов, состояла в оценке методов перехода от одной координатной системы к другой без ощутимой потери точности для пунктов, находящихся в различных точках земного шара. К настоящему времени эту задачу нельзя считать полностью решенной.

При проработке различных направлений использования системы ГЛОНАСС повышенное внимание обращено на ее эффективное использование при создании широкозонной дифференциальной систе-

мы, позволяющей оперативно определять координаты неподвижных и движущихся объектов на повышенном уровне точности (более подробная информация о такой системе приведена ниже).

Успешная реализация намеченных планов, связанных с дальнейшим совершенствованием системы ГЛОНАСС, позволит не только повысить потенциальную точность и надежность координатных определений, но и будет способствовать более эффективному решению вопросов по совместному использованию систем GPS и ГЛОНАСС.

### *Краткие сведения о планируемой спутниковой навигационной системе «Галилео»*

Накопленный к настоящему времени опыт использования систем GPS и ГЛОНАСС, а также связанные с этими системами многочисленные исследования создали предпосылки для разработки новой более совершенной спутниковой системы, получившей условное название «Галилео». Такое предложение было выдвинуто по инициативе Европейского научного сообщества и Европейского космического агентства.

Одна из особенностей упомянутой системы состоит в том, что предлагаемая группировка спутников должна включать в себя до 32 космических аппаратов, а также 9 геостационарных спутников. Такое глобальное «созвездие» предусматривается ориентировать на оптимальное обслуживание стран, расположенных в высоких широтах. Планируется, что система «Галилео» может рассматриваться как независимая, но по своим основным техническим характеристикам должна быть совместима с существующими системами типа GPS и ГЛОНАСС.

Система «Галилео» ориентирована прежде всего на навигационное обслуживание авиации и морского флота, а также различных сухопутных транспортных средств. В ней предполагается предусмотреть систему оповещения об авариях, которая должна оперативно передавать координаты места аварии. Помимо навигационного использования системы «Галилео» предусматривается ее применение для решения широкого круга задач по землеустройству, для обеспечения работ на шельфе и в открытом море, а также для выполнения различных геодезических и топографических работ.

Предполагается, что опытное использование системы «Галилео» может быть начато в 2005 г., а в 2008 г. она должна достичь работоспособности в полном объеме.



## Перспективы развития дифференциальных спутниковых подсистем

Открывшиеся возможности значительного повышения точности спутниковых координатных определений за счет использования дифференциальных методов обусловили повышенный интерес к дальнейшему совершенствованию и расширению области применения этих методов. Один из путей их практической, реализации неразрывно связан с созданием специализированных дифференциальных подсистем различного уровня. К настоящему времени достаточно широкое распространение получили континентальные, региональные и локальные подсистемы.

К континентальным системам, получившим название широкозонных, могут быть отнесены такие дифференциальные подсистемы, как американская (WAAS), европейская (EGNOS) и японская (MSAS). Дифференциальные поправки в таких подсистемах, образующие навигационное поле, передаются от референчных станций с известными координатами к мобильным станциям потребителей через геостационарные спутники, что позволяет обеспечить формирование навигационного поля на территории достаточно больших размеров. В частности, рабочая зона подсистемы WAAS простирается по долготе (в западном направлении) от 60 до 170°, а по широте (в северном направлении) от 16 до 70° [93].

Использование потребителями передаваемой дифференциальными подсистемами информации открывает возможность значительно ослабить влияние различного рода источников ошибок (тем самым повысить точность и надежность определяемых координат). Кроме того, рассматриваемые подсистемы позволяют осуществить дополнительный контроль целостности сигналов спутниковой системы, под которой понимается способность системы оперативно и своевременно предупреждать пользователей о возможных нарушениях в работе всей системы.

Проведенные исследования с подсистемой WAAS свидетельствуют о возможности достижения точности определения плановых и высотных координат в динамике на уровне около 2 м при условии использования общедоступных кодовых сигналов. В ближайшей перспективе предполагается продолжить совершенствование такой подсистемы, уделив повышенное внимание вопросам ее использования для навигационного обеспечения воздушных судов.

На европейском континенте создается аналогичная широкозонная дифференциальная подсистема EGNOS. В ее разработке принимают участие многие ведущие страны Западной Европы. Для передачи корректирующих сигналов в такой подсистеме также используют

ся геостационарные спутники-ретрансляторы типа «Инмарсат». Подобно WAAS данная подсистема рассматривается как основное средство авиационной навигации, используемое как на стадии полета самолетов по заданным маршрутам, так и при их посадке на аэродромы. Зона покрытия, осуществляемого с помощью EGNOS, охватывает территории большинства европейских стран, а также Турцию, Северное море и восточную часть Атлантического океана.

Рост интенсивности воздушного движения в северном регионе Тихого океана обусловил целесообразность создания подобной системы в этой части земного шара. Инициативу решения такой проблемы проявила Япония. В этой стране реализуется широкозонная дифференциальная подсистема MSAS. Зона ее действия охватывает северную часть Тихого океана между Азией и Америкой, включая всю совокупность островов Японии. Основополагающей составной частью такой подсистемы являются многофункциональные транспортные космические аппараты, выводимые на геостационарные орбиты.

В нашей стране в стадии проработки находятся предложения об использовании в качестве аэронавигационной системы спутниковых систем позиционирования GPS и ГЛОНАСС в сочетании с широкозонными дифференциальными подсистемами EGNOS и MSAS. Вместе с тем рассматриваются предложения по созданию отечественной широкозонной подсистемы, охватывающей всю территорию России. Реализация таких предложений будет способствовать решению вопросов по навигационному обеспечению полета самолетов различных стран мира, оснащенных современным спутниковым оборудованием.

Наряду с рассмотренными выше широкозонными подсистемами значительное внимание в различных странах мира уделяется проблемам создания региональных дифференциальных подсистем (РДПС). Примерами таких РДПС являются система Starfix фирмы Fugro и система Skyfix фирмы Racal Survey Limited. Дальность действия упомянутых РДПС составляет около 2000 км, а заявленная точность местоположения составляет 1–3 м.

Совместными усилиями европейских и российских специалистов создается РДПС, получившая условное название Еврофикс (Eurofix). В процессе ее разработки рассматривается возможность передачи корректирующих поправок с помощью радиотехнических систем дальней навигации типа «Loran-C» и «Чайка». К преимуществам такого решения следует отнести сокращение затрат, связанных с разработкой и дальнейшей ее эксплуатацией, поскольку реализация отмеченной РДПС осуществляется на основе уже существующей структуры, а также обеспечение улучшенной работоспособности с городских и горных районах [73]. Точность определения координат данной РДПС оцени-

вается на уровне около 5 м. Проведенные в 1999 г. пробные испытания на территории Украины и Белоруссии подтвердили высокую эффективность работы РДПС «Еврофикс». По результатам этих испытаний погрешность измерений составила: при удалениях около 500 км — 2,48 м, а при удалениях около 1000 км — 3,37 м.

Применительно к решению геодезических задач наибольший интерес представляют локальные дифференциальные подсистемы (ЛДПС). Характерная особенность ЛДПС состоит в сравнительно небольшой дальности действия (до 50—100 км) при обеспечении повышенного уровня точности (сантиметровый для фазовых измерений и дециметровый для кодовых измерений). К настоящему времени упомянутые подсистемы уже созданы в целом ряде стран (Германия, Нидерланды, Финляндия и др.). Рассматриваемые ЛДПС находят применение не только в геодезии, но и в авиации, в качестве навигационных систем (при заходах самолета на посадку и при его приземлении), а также при проводке морских судов в зонах узких проливов, на акваториях морских портов и гаваней.

В России вопросам разработки ЛДПС уделяется повышенное внимание. Применительно к условиям нашей страны предполагается, что сеть ЛДПС, базирующихся на использовании спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС, будет эффективно использоваться при организации всенаправленных радиомаяков с целью обеспечения морской и авиационной навигации.

При выполнении различных геодезических и топографических работ предполагается функционирование ЛДПС на базе постоянно действующих активных пунктов. В соответствии с «Концепцией перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений» [32] предполагается создание сети постоянно действующих (активных) пунктов, ведущих непрерывные наблюдения всех ИСЗ навигационно-геодезических систем и передающих дифференциальные поправки потребителям по каналам связи в режиме реального времени. Создание сети постоянно действующих (активных) пунктов осуществляется на базе пунктов ФАГС. Одним из таких пунктов является функционирующий в Верхневолжском АПП с 1997 г. постоянно действующий спутниковый пункт «Нижний Новгород», получивший в 1999 г. статус постоянно действующего пункта ФАГС [14, 43].

Основной проблемой функционирования таких постоянно действующих пунктов в активном режиме для передачи дифференциальных поправок в режиме реального времени по каналам связи (радиоканал, выделенные линии, Интернет и др.) являются ограничения на точность открытого опубликования координат таких пунктов. Поэто-

му крайне важно в ближайшее время постановлением Правительства Российской Федерации разрешить открытое опубликование координат постоянно действующих активных пунктов ФАГС с любой точностью для практической реализации высокоточных локальных дифференциальных подсистем на территории России.

### Проблемы метрологической аттестации спутниковой геодезической аппаратуры

При проведении широкомасштабных высокоточных спутниковых измерений четко обозначилась проблема, связанная с обеспечением единства линейных измерений в области больших длин, которые выполняются как современными спутниковыми, так и традиционными геодезическими методами. Так, уже в 1995 г. на Международной конференции «Сферы применения GPS-технологий» [53, 68] этой проблеме были посвящены шесть докладов. Специфика метрологической аттестации спутниковой геодезической аппаратуры заключается в том, что аттестацию должны проходить не только аппаратура, но и применяемые программы обработки.

Накопленный к настоящему времени материал измерений свидетельствует о том, что при сравнении результатов, полученных спутниковыми и классическими геодезическими методами, наблюдаются трудно объяснимые расхождения [23]. Этот факт обуславливает необходимость принятия соответствующих мер по установлению хорошо обоснованной метрологической связи между различными методами с тем, чтобы обеспечить предусмотренное законом единство измерений в области больших длин. Такая задача решается на основе разработки метрологических поверочных схем, высшим звеном в которых является первичный эталон длины. В настоящее время в качестве такого принят единый эталон времени, частоты и длины, реализованный в виде высокостабильного атомного генератора, основным метрологическим параметром которого является частота генерируемых колебаний, которая легче других исходных параметров поддается измерениям. Для перехода от эталонного значения частоты к эталону длины используется такая физическая константа, как скорость электромагнитных волн в вакууме, которая в настоящее время известна с точностью в несколько единиц девятого знака. Этот показатель и характеризует уровень точности первичного эталона длины.

Из рассмотрения принципов работы спутниковых систем позиционирования следует, что на борту спутников устанавливаются высокостабильные атомные или молекулярные генераторы, которые, по существу, являются аналогами генераторов, применяемых в качестве

первичных эталонов времени-частоты-длины. Следует при этом заметить, что показания бортовых опорных генераторов систематически сверяются с первичными эталонами. Отмеченный подход свидетельствует о наличии надежной метрологической связи между бортовыми и эталонными генераторами, минуя необходимость использования каких-либо побочных метрологических цепочек. Поскольку бортовые опорные генераторы на спутниках работают в условиях вакуума, то длина волны излучаемых несущих колебаний может быть принята в качестве эталонной, которая является базовой при измерении расстояний между спутником и находящимся на земной поверхности приемником. Фактические значения измеряемых дальностей оказываются отягощенными различными источниками ошибок, минимизация влияния которых позволяет приблизиться к потенциальной точности спутниковых методов позиционирования. На основе вышеизложенного представляется возможным сделать вывод о том, что проводимые сертификации и метрологические поверки спутниковой аппаратуры преследуют цель не ревизии корректности построения всей метрологической цепочки, а оценку эффективности методов минимизации остаточного влияния тех или иных источников ошибок.

Проведенные в последние годы исследования в области высокоточных спутниковых измерений свидетельствуют о том, что основными источниками ошибок таких измерений являются внешние условия (в частности, атмосфера и многопутность). За счет использования хорошо продуманных методов спутниковых наблюдений и последующих вычислений удастся реализовать миллиметровый уровень точности на линиях протяженностью в несколько десятков километров [95].

При создании континентальных опорных геодезических сетей высокая точность координатных определений достигнута на Европейском континенте (референсная сеть EUREF). Наиболее представительные пункты такой сети, оснащенные не только высокоточными спутниковыми приемниками, но и лазерными спутниковыми дальнометрами, а также станциями радиоинтерферометра со сверхдлинной базой, могут быть приняты в настоящее время за основу, на базе которой могут быть построены современные метрологические полигоны на миллиметровом уровне точности.

Изложенный выше подход представляет несомненный интерес для создания в России аналогичных метрологических полигонов. Включение в состав таких полигонов базовых линий длиной в несколько десятков километров открывает возможность оценки у аттестуемых приемников значений ошибок, пропорциональных длине измеряемых линий на уровне первых единиц восьмого десятичного знака. Вместе с тем наличие в составе метрологических полигонов корот-

ких базовых линий (длиной в несколько десятков или сотен метров) позволяет произвести оценку ошибок спутниковых измерений, не зависящих от длины определяемых линий.

Основные общие вопросы создания геодезических полигонов для метрологической аттестации спутниковой геодезической аппаратуры рассмотрены в РТМ «Полигоны геодезические. Общие технические требования» [65]. Одним из таких полигонов является геодезический полигон Верхневолжского АГП [55, 56]. Полигон сертифицирован системой сертификации геодезической, топографической и картографической продукции, сертификат соответствия № РОСС RU.KP03/C00041. Схема полигона приведена на рисунке.

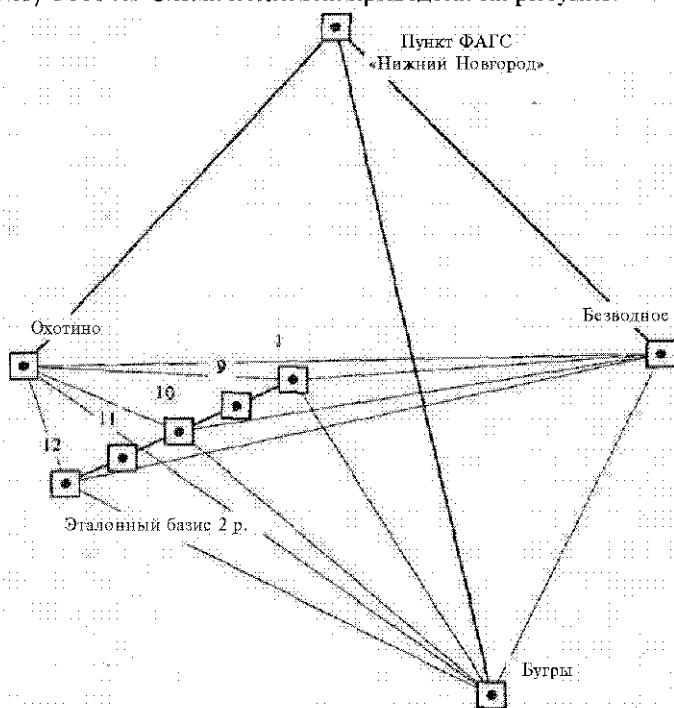


Схема геодезического полигона

В связи с тем, что при выполнении производственных работ каждый спутниковый приемник может работать с любым приемником из имеющихся в наличии, эталонирование спутниковых приемников необходимо выполнять по схеме, аналогичной измерению горизонтальных углов в триангуляции способом «во всех комбинациях» или способу контроля приборной поправки дальномера, основанному на измерении нескольких линий, расположенных в одном створе, во всех

комбинациях [55, 66]. В качестве эталонных отрезков для базиса 2 разряда можно рекомендовать интервалы 500, 1000, 1500 и 2000 м (пункты 1, 9, 10, 11 и 12, см. рисунок).

График работ для случая эталонирования девяти приемников приведен в таблице.

№ приемника на пункте 1	Номера приемников на пунктах 9, 10, 11, 12							
	2	3	4	5	6	7	8	9
	Номера сеансов							
1	1-4	2-5	3-6	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11
2		12-15	13-16	14-17	15-18	16-19	17-20	18-21
3			19-22	20-23	21-24	22-25	23-26	24-27
4				25-28	26-29	27-30	28-31	29-32
5					30-33	31-34	32-35	33-36
6						34-37	35-38	36-39
7							37-40	38-41
8								39-42

*Примечание.* В первой колонке и первой строке номера приемников, 1-4 - номера сеансов измерений между приемниками.

Из других проблем, касающихся специфики метрологической аттестации высокоточных геодезических спутниковых приемников, обращают на себя внимание вопросы установления надежной взаимосвязи между ошибками измерений спутниковыми методами, относящимися к длинам базисных линий и неразрывно связанными с ними разностями координат конечных точек этих линий. Проведенные к настоящему времени исследования свидетельствуют о том, что при оценке точности координатных определений с использованием спутниковых технологий приходится учитывать не только длину вектора, соединяющего точки с искомыми координатами, но и его ориентировку в окружающем пространстве. Эти задачи нельзя считать решенными к настоящему времени.

### **Совместное использование различных спутниковых систем и их комплектование с другими техническими средствами**

Одним из перспективных направлений дальнейшего развития современных спутниковых систем позиционирования является совместное комплексное использование информационных радиосигналов, поступающих от спутников, входящих в состав GPS и ГЛОНАСС. Проведенные в этой области исследования свидетельствуют о возможности повышения точности и надежности результатов измерений при навигационном использовании таких систем.

К предпосылкам, способствующим решению такой проблемы, могут быть отнесены как достаточно близкая идеология построения упомянутых систем, так и близкое по срокам их создание. По результатам многочисленных совместных исследований установлено, что за счет наблюдаемого при этом улучшения геометрического фактора, который зависит от количества используемых спутников и их распределения в пределах обозреваемого небосвода, точность определения координат как в плане, так и по высоте может быть улучшена примерно в 1,5 раза [73]. Дополнительное повышение точности при совместном использовании GPS и ГЛОНАСС достигается за счет увеличения объема обрабатываемой информации, подверженной в меньшей степени остаточному влиянию систематических ошибок, свойственных каждой из этих систем в отдельности.

Наряду с отмеченными факторами улучшается автономный контроль целостности сигналов в приемнике (RAIM), в результате чего уменьшается уровень вероятности появления ложной тревоги «потеря сигнала». При использовании рассматриваемых систем в навигации установлено, что их комплексирование позволяет повысить помехоустойчивость в условиях существования естественных и искусственных помех, а также непрерывность и надежность результатов навигационных определений. В 1988 г. после переговоров между Федеральным авиационным управлением США и соответствующими службами СССР информация о сигналах C/A-кода системы ГЛОНАСС была передана в Комитет по аэронавигационным системам будущего Международной организации гражданской авиации (ICAO-FANS) [87].

Приведенные выше аргументы обусловили целесообразность разработки комбинированных спутниковых приемников, приспособленных для работы как с системой GPS, так и системой ГЛОНАСС. По опубликованным данным [73] к настоящему времени только отечественными фирмами разработано более 30 типов совмещенных навигационных спутниковых приемников. Наряду с этим от зарубежных фирм поступило на рынок более 20 типов таких приемников. Дальнейшее расширение их количества несколько сдерживается из-за существенного сокращения за последнее время количества спутников системы ГЛОНАСС, находящихся в обращении.

Применительно к решению геодезических задач проблема совмещения систем GPS и ГЛОНАСС на характерном для геодезии высоком уровне точности оказывается более сложной. Отработка методов комплексирования таких систем базируется на использовании разработанных в последние годы высокоточных двухчастотных приемников, приспособленных для приема радиосигналов от обеих вышеупомянутых систем.



Одной из первых компаний, выпустившей на рынок геодезические совмещенные приемники ГЛОНАСС/GPS, была компания Ashtech Inc (США) - ныне THALES NAVIGATION (Франция). Геодезический одночастотный совмещенный приемник ГЛОНАСС/GPS GG24-Surveyor этой компании имеет 24 канала и работает по всем находящимся в поле зрения спутникам систем ГЛОНАСС и GPS. GG24-Surveyor обеспечивает возможность работы в любом режиме: статическом, кинематическом, реального времени (RTK).

В работах по созданию сети ФАГС, а также при создании геодезического полигона Верхневолжского АТП для метрологической аттестации спутниковых приемников использовались двухчастотные совмещенные геодезические спутниковые приемники Legacy E GGD LE с антеннами RegAnt RA фирмы JAVAD Position System (США).

С применением подобных приемников в 1998 г. был проведен международный эксперимент IGEX-98 с целью изучения рационального совместного использования GPS и ГЛОНАСС на геодезическом уровне точности.

В эксперименте было задействовано более 60 приемников, размещенных на территориях 26 стран, и 30 спутниковых лазерных дальномеров, которые были размещены в 15 странах. Независимая обработка полученных данных, которая производилась несколькими обрабатывающими центрами с применением координатных систем ПЗ-90 и ITRF, выявила наличие взаимного разворота этих систем вокруг оси Z равного 0,3—0,4" и смещения вдоль этой оси на уровне около одного метра [92]. По результатам эксперимента внесена рекомендация о целесообразности продолжения исследований с ориентацией на устранения выявляемых несогласований, препятствующих успешному совместному использованию систем GPS и ГЛОНАСС, а также их комплексированию с вновь создаваемой системой «Галилео».

Другим перспективным направлением комплексирования различных методов координатных определений является проработка вопросов совместного использования спутниковых систем позиционирования с некоторыми ранее разработанными системами, способными решать аналогичные задачи.

Применительно к навигации повышенного внимания заслуживают вопросы комплексирования спутниковых систем как с автономными инерциальными навигационными системами, так и с наземными радионавигационными системами.

К положительным качествам навигационных инерциальных систем следует отнести прежде всего автономность их работы, что позволяет непрерывно получать интересующую потребителей информацию независимо от состояния внешней среды и наличия тех или иных ра-

диопомех. Вместе с тем точность навигационных определений такими системами существенно занижается из-за дрейфа показаний используемых гироскопов. Комплексирование инерциальных систем со спутниковыми системами позиционирования типа GPS и ГЛОНАСС позволяет удачно сочетать возможности получения повышенного уровня точности и обеспечения бесперебойности информации о местоположениях движущихся объектов. В настоящее время такому сочетанию уделяется повышенное внимание при разработке многофункциональных интегрированных комплексов, предназначенных для обеспечения вождения воздушных судов по заданным маршрутам и при их посадке на аэродромы.

Другим направлением совместного использования различных типов навигационных систем является объединение спутниковых систем с наземными радионавигационными системами. Несмотря на то, что в последние годы сферы применения наземных систем существенно сокращаются за счет использования спутниковых систем, тем не менее выдвигаются и реализуются обоснованные предложения о целесообразности комплексирования спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС с такими наземными радионавигационными системами, как «Loran-C» и «Чайка». Отмеченный подход позволяет обеспечить надежное определение навигационных параметров в условиях повышенного уровня различного рода радиопомех, быстрее выходить на рабочий режим в случае потери принимаемых сигналов и оперативно корректировать получаемые данные, подверженные влиянию тех или иных источников систематических ошибок. Примером такого объединенного комплекса может служить созданная в 1999 г. в России интегрированная аппаратура НК-100, ориентированная на совместную работу со спутниковой системой GPS и наземными радионавигационными системами «Loran-C/Чайка».

При выполнении наиболее массовых геодезических и топографических работ прослеживается стремление к совместному использованию спутниковых приемников и электронных тахеометров. Базирующаяся на таком сочетании технология характеризуется большой гибкостью и высокой производительностью, поскольку при этом открывается возможность проведения измерений в самых разнообразных условиях (в том числе и на тех участках местности, где не представляется возможным организовать прием информационных сигналов от спутников). Одним из вариантов комплексирования в суммарных комплексах такого типа является быстрая замена входящих в такой комплекс технических средств, а также программа и методика совместной обработки получаемых данных. В частности, с учетом таких требований шведская фирма «Геотроникс» разработала GPS-приемник

марки «Геотрейсер 2000» и электронные тахеометры типа «Геодиметр 510» и «Геодолит 506». Другим вариантом является конструктивное объединение спутникового приемника и электронного тахеометра.

Комплексное использование современных спутниковых и наземных систем позиционирования не ограничивается приведенными выше примерами. В последние годы ведется непрерывный поиск принципов создания многофункциональных и высокоэффективных интегрированных систем, позволяющих определять местоположения движущихся и неподвижных объектов оперативно, надежно, на высоком уровне точности и с высокой экономической эффективностью.

## Словарь англоязычных терминов

В 2001 г. вышел РТМ «Спутниковая технология геодезических работ. Термины и определения» [63], включающий 118 терминов в области спутниковой геодезии. Кроме того, в данном нормативном акте, учитывая большое распространение нерусифицированного оборудования и программного обеспечения, приведено 50 англоязычных терминов. Ниже приведен расширенный словарь англоязычных терминов, который может быть полезен при освоении спутниковых геодезических приемников и программного обеспечения с нерусифицированными меню.

- |   |   |
|---|---|
| 1. Almanac<br>Альманах  | Набор приближенных спутниковых данных, используемый для вычисления местоположения спутника, времени появления его над горизонтом, возвышения и азимута.   |
| 2. Ambiguity<br>Неоднозначность   | Неизвестное целое число циклов восстановленной фазы несущих колебаний, содержащееся в неразрешенной последовательности измерений и обусловленное временем прохождения радиосигнала от одного отдельного спутника до одного конкретного приемника. |
| 3. Ambiguity fixing on the fly (OTF)<br>Разрешение неоднозначности в полете | Метод разрешения неоднозначности, характерной для фазовых измерений, который позволяет получить однозначное значение измеряемых расстояний в динамике, т.е. на движущихся объектах.   |
| 4. Ambiguity function method<br>Метод разрешения неоднозначности            | Метод для определения такой серии неоднозначных величин, которая минимизирует фактор рассогласования решения, подразумевающего нахождение вектора базисной линии.   |
| 5. Anti-spoofing (A-S)<br>"Антимистификация"                                | Процесс дополнительной зашифровки Р-кода (в форме Y-кода).  |

6. Anywhere fix  
Автономная привязка

7. Argument of latitude  
Аргумент широты

8. Argument of perigee  
Аргумент перигея

9. Ascending node  
Узел восхождения

10. Atmospheric propagation delay  
Задержка распространяюще-  
гося сигнала, обусловленная  
атмосферой

11. Bandwidth+  
Ширина полосы (частот)

12. Baseline  
Базисная линия

13. Bearing  
Пеленг

14. Beat frequency  
Частота биений

Определение спутниковым приемником местоположения без предварительного ввода в него ориентировочных значений координат и времени.

Сумма истинной аномалии и аргумента перигея.

Угол, измеряемый в плоскости орбиты от узла восхождения до точки перигея.

Пересечение орбиты, по которой движется объект, с референсной плоскостью (например, с экваториальной плоскостью) в той точке, где координаты широты возрастают.

Задержка во времени, которой подвержены передаваемые со спутника радиосигналы, из-за влияния ионосферных и тропосферных слоев земной атмосферы.

Ширина спектра сигнала (его частотное представление), выражаемая в герцах.

Длина трехмерного вектора между двумя станциями, на которых был организован одновременный сбор данных GPS и для которых выполнялась обработка материалов измерений с использованием дифференциальных методов.

Используемый в навигации термин, который характеризует угол между опорным направлением (например, направлением на географический север, "магнитный" север, север координатной сетки) и траекторией движения.

Одна из двух частот, получаемых в результате смещения сигналов двух различных частот. При этом частоты биений оказываются соответственно равными сумме или разности первоначальных частот. Например,

15. Bias

Смещение

на основе тождества:  $\cos A \cos B = 1/2 [\cos(A+B) + \cos(A-B)]$  первоначальные сигналы имеют частоты  $A$  и  $B$ , а сигналы биений — комбинационные частоты  $A+B$  и  $A-B$ .

Смещение результатов измерений, обусловленное неучтенным влиянием источников систематических ошибок.

16. Binary biphas modulation

Бинарная парафазная модуляция

Изменения фазы равные 0 или 180 градусов (в бинарном представлении эти изменения соответствуют 0 и 1), которым подвергаются несущие колебания постоянной частоты. Такая ситуация может быть смоделирована функцией вида  $y = A \cos(\omega t + \varphi)$ , где  $A$  — амплитуда функции, представляющая собой последовательность величин +1 и -1 (характеризуя тем самым фазовые изменения равные соответственно 0 и 180°). Сигналы GPS подвергаются парафазной модуляции.

17. Binary pulse code modulation

Бинарная импульсная кодированная модуляция

Импульсный вид модуляции, при реализации которого в качестве модулирующих сигналов используется последовательность двоичных кодов. Такое кодирование обычно соответствует совокупности единичных и нулевых посылок с определенными параметрами. С помощью таких посылок изменяется какой-либо параметр несущих колебаний, например, частота или фаза.

18. C/A-code

C/A-код

Так называемый грубый, общедоступный код GPS, которым модулируется сигнал GPS, имеющий частоту L1. Этот код представляет собой последовательность, состоящую из 1023 псевдослучайных бинарных парафазных модуляций несущих колебаний GPS с битовой скоростью

19. Carrier

Несущие колебания

1,023 МГц, что соответствует периоду повторяемости кода равному одной миллисекунде.

Под такими колебаниями понимают радиоволны, у которых по крайней мере одна характеристика (например, частота, амплитуда или фаза) может подвергаться модуляции в соответствии с закономерностями изменения известной опорной величины.

20. Carrier beat phase

Фаза биений несущих колебаний

Фаза сигнала, которая наблюдается в том случае, когда принимаемый спутниковый сигнал несущей частоты представляет собой результат биений (т.е. возникает сигнал разностной частоты) при взаимодействии с опорным сигналом приемника, который имеет постоянное номинальное значение частоты.

21. Carrier frequency

Несущая частота

Частота немодулированных колебаний на основном выходе радиопередатчика. В GPS несущая частота L1 равна 1575,42 МГц, а несущая частота L2 равна 1227,60 МГц.

22. Celestial equator

Небесный экватор

Это большой круг, который представляет собой проекцию географического экватора вращения Земли на небесной сфере.

23. Chain

Цепочка

Этот термин может употребляться при съемках в статическом режиме, режиме Стою/Иду и кинематическом режиме. Цепочка содержит все те данные, для которых допускается, что может быть определен один набор неоднозначностей. Он будет действителен для всех данных в этой цепочке. Если имеет место потеря захвата сигнала, то вычисления будут выполняться только в пределах этой цепочки. Без разрешения неоднозначностей результаты вычислений будут иметь низкую точность.

24. Channel  
Канал  
Часть приемного тракта спутникового приемника, содержащая блоки приема и слежения за сигналами одного спутника.
25. Chip  
Элементарная посылка  
Это интервал времени нулевого или единичного уровня в бинарном импульсном коде.
26. Chip rate  
Частота следования элементарных посылок  
Число элементарных посылок за одну секунду (например, для C/A-кода эта частота равна 1,023-Ю<sup>6</sup> посылок/с).
27. Clock bias  
Ошибка часов  
Разность в показаниях времени часов относительно единого системного времени GPS.
28. Clock offset  
Уход показаний часов  
Постоянная разность в показаниях времени двух часов.
29. Code  
Код  
Используемая для связи система сигналов, в которой произвольно выбранным последовательностям нулей и единиц приписываются определенные значения.
30. Compacted data  
Уплотненные данные  
Первичные («сырые») данные, уплотненные за установленный интервал времени (время уплотнения) в одно единственное значение наблюдений (измерений), используемое для записи.
31. Control segment  
Сектор управления (в системе GPS)  
Размещенное на земной поверхности оборудование, входящее в состав системы GPS и функционирующее под эгидой правительства США. Оно отслеживает поступающие от спутников сигналы, определяет орбиты спутников и засылает в память спутников откорректированное информационное сообщение.
32. Conventional International Origin (CIO)  
Стандартное международное начало  
Среднее положение оси вращения Земли, относящееся к периоду 1900-1905 гг.
33. Correlation type channel  
Канал корреляционного типа  
Канал в приемнике GPS, в котором используется цепочка обратной



- связи с линией задержки для поддержания определенного соотношения (корреляционного типа) между точной копией кода GPS, генерируемого в приемнике, и принимаемым от спутника кодом.
34. Cross-correction  
Перекрестная корреляция
- Корреляционная зависимость между передаваемыми со спутника и формируемыми в приемнике кодовыми сигналами, используемая при формировании опорных кодовых сигналов в приемнике.
35. Cut off angle  
Угол отсечки
- Минимальный угол возвышения спутника над горизонтом, ниже которого приемник не отслеживает спутники.
36. Cycle slip  
Пропуск циклов
- Нарушение непрерывности слежения за фазой несущей частоты, в результате чего происходит временная потеря захвата поступающих от спутников GPS радиосигналов. Это приводит к потере целочисленного количества циклов при фазовых измерениях несущих колебаний на частоте биений.
37. Data consistency  
Согласованность данных
- Понятие, используемое при управлении потоком входных данных и обозначающее комплектность и достоверность поступающих данных.
38. Data integrity  
Целостность данных
- Фундаментальное требование, предъявляемое к любой системе управления данными. Понятие состоит из трех компонентов:
- согласованность данных;
  - сохранность данных;
  - защита данных.
39. Data management  
Управление данными
- Понятие, включающее в себя все концептуальные, технические и структурные формы деятельности, необходимые для хранения, модификации, защиты и восстановления данных.

40. Data message  
Информационное сообщение  
Сообщение, входящее в состав сигналов GPS, которое содержит информацию о местоположении спутника, поправки к показаниям часов и состояние работоспособности спутника. В данное сообщение включается также приближенная информация о статусе других спутников, входящих в «созвездие» GPS (альманах).
41. Data protection  
Ограничение доступа к данным  
Понятие, включающее в себя комплекс мер, регламентирующих доступ к данным.
42. Data security  
Защита данных  
Понятие, включающее в себя комплекс мер, регламентирующих защиту данных от каких-либо повреждений и утраты.
43. Data set  
Набор данных  
Физически реализованный компонент программы, с помощью которого записываются данные GPS в контроллере. Он может объединять данные одной или нескольких цепочек.
44. Deflection of the vertical  
Уклонение вертикали  
Угол между нормалью к эллипсоиду и вертикалью (истинным положением отвесной линии). Обычно он рассматривается в виде компонентов, находящихся в плоскости меридиана и в плоскости первого вертикала.
45. Delay Lock  
Фиксация задержки  
Метод, с помощью которого принимаемый код (генерируемый с помощью часов спутника) сравнивается с опорным кодом (генерируемым с помощью часов приемника), причем последний сдвигается во времени до тех пор, пока эти два кода совпадут.
46. Delta pseudorange  
Разность псевдодальностей  
Изменение дальности на пути «спутник-приемник» между моментами прохождения кодовых посылок.
47. Differenced measurements  
Дифференциальные измерения  
Измерения GPS могут быть разностными (дифференциальными) относительно приемников, относитель-

но спутников и относительно времени. Хотя возможно много комбинаций, но современная договоренность, касающаяся дифференциальных фазовых измерений GPS, состоит в том, чтобы формировать разности в следующем порядке: вначале разность между приемниками, во вторую очередь разность между спутниками и в третью очередь разность между различными моментами времени.

Измерения, базирующиеся на первой разности, т. е. между приемниками, представляют собой мгновенную разность текущих фаз принимаемого сигнала, измеряемых одновременно двумя приемниками при наблюдениях одного и того же спутника.

Измерения, базирующиеся на второй разности, т.е. между приемниками и между спутниками, представляют собой разность между первой разностью, полученной для одного спутника, и соответствующей первой разностью, полученной для выбранного опорного спутника.

Измерения, базирующиеся на третьей разности, т.е. между приемниками, между спутниками и между различными моментами времени, представляют собой разность между второй разностью, относящейся к одному моменту времени, и аналогичной второй разностью, относящейся к другому моменту времени. Режим работы GPS, при котором реализуются дифференциальные измерения.

Определение относительных координат между двумя или более приемниками, которые одновременно

48. Differential GPS(DGPS)  
Дифференциальный режим работы
49. Differential positioning  
Дифференциальное определение местоположения

50. Dilution of precision (DOP)

Понижение точности

отслеживают одни и те же сигналы GPS.

Коэффициент геометрического вклада в точность определения местоположения (DOP). Фактор DOP учитывает увеличение ошибки определения местоположения в зависимости от расположения «созвездия» спутников на момент измерений. Применительно к GPS в зависимости от параметров уравнений используют следующие термины: GDOP, PDOP, HDOP, VDOP.

51. Dopplershift

Доплеровский сдвиг (частоты)

Возникающее изменение частоты принимаемого сигнала, обусловленное скоростью изменения расстояния между передатчиком и приемником.

52. Doppler-aiding

Доплеровская поддержка

Использование доплеровского изменения частоты принимаемого сигнала для обеспечения устойчивого отслеживания спутникового сигнала.

53. Dynamic positioning

Динамическое определение местоположения

Определение распределенных во времени наборов координат для движущегося приемника, причем каждый набор координат относится к одной выборке данных и обычно вычисляется в реальном масштабе времени.

54. Eccentric anomaly E

Эксцентрисная аномалия

Переменная величина в проблеме взаимодействия двух тел. Эксцентрисная аномалия E связана со средней аномалией M уравнением Кеплера:  $M = E - e \sin E$ , где  $e$  - эксцентриситет.

55. Eccentricity

Эксцентриситет

Это отношение расстояния от центра эллипса до его фокуса к большой полуоси:  $e = (1 - b^2/a^2)^{1/2}$ , где  $a$  и  $b$  - соответственно большая и малая полуоси эллипса.

56. Ecliptic

Эклиптика

Большой круг небесной сферы, плоскость которого является мгновен-

57. Ellipsoid

Эллипсоид

ной орбитальной плоскостью движения Земли.

В геодезии, за исключением особо оговоренных случаев, под данным термином понимается математическая фигура, образованная в результате вращения эллипса вокруг его малой оси (иногда данное определение относят также и к сфероиду). Эллипсоид определяют две величины; обычно их задают через длину большой полуоси  $a$  и через сжатие  $f$ , которое определяется как  $f=(a+b)/a$ , где  $b$  - длина малой полуоси. Применяются понятия вытянутый и трехосный эллипсоиды.

58. Ellipsoid height

Эллипсоидальная высота

Вертикальное расстояние между положением точки на земной поверхности и поверхностью эллипсоида.

59. Ephemeris

Эфемериды

Перечень местоположений или расположений небесного объекта как функция времени.

60. Ephemeris error

Ошибка в значениях эфемерид

Это разность между действительным положением спутника и местоположением, предсказанным на основе спутниковых орбитальных данных (эфемерид).

61. Epoch

Эпоха

Индивидуальный фиксированный момент времени, используемый как опорная точка на шкале времени.

62. European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)

Служба стационарного навигационного покрытия Европы

Служба, обеспечивающая передачу корректирующих поправок к спутниковым измерениям на территории Европы.

63. Fast switching channel

Быстро переключаемый канал

Канал спутникового приемника, предназначенный для быстрой выборки данных.

64. Flattening

Сжатие

$f = (a - b)/a = 1 - (1 - e^2)/2$ , где  $a$  - большая полуось,  $b$  - малая полуось,  $e$  - эксцентриситет.

65. Frequency band  
Полоса частот
66. Frequency spectrum  
Спектр частот
67. Fundamental frequency  
Фундаментальная частота
68. GDOP  
Геометрический фактор понижения точности определения места и времени
69. Geodetic Datum  
Геодезические исходные данные
70. Geoid  
Геоид
71. Geoidal separation  
Удаление геоида (от референц-эллипсоида)

Диапазон частот, соответствующий конкретному участку шкалы электромагнитных волн.

Распределение амплитудных значений колебаний отдельных частот как функция частоты в сигнале.

Это используемая в GPS основная частота, равная 10,23 МГц. Несущие частоты L1 и L2 соответствуют основной частоте, умноженной на целое кратное число.  $L1=154F=1575,42$  МГц,  $L2=120F=1227,60$  МГц.

Фактор, характеризующий понижение точности определения местоположения и времени из-за геометрии расположения спутников.

Математическая модель, которая наилучшим образом соответствует определенной части или всему геоиду. Она определяется эллипсоидом и взаимосвязью между эллипсоидом и точкой на топографической поверхности, принятой за начало исходных дат. Эта взаимосвязь может быть установлена с помощью шести величин (геодезическая широта, геодезическая долгота и высота исходной точки, два компонента уклонения вертикали в этой точке и геодезический азимут от исходной до некоторой другой точки).

Обоснованная эквипотенциальная поверхность, которая совпадает со средним уровнем моря и которая может создавать воображаемое продолжение под континентами. Эта поверхность всегда перпендикулярна к направлению силы гравитации.

Это расстояние от поверхности референц-эллипсоида до геоида, измеренное по нормали к эллипсоиду.

72. GPS  
«Глобальная система позиционирования».
73. GPS time  
Время GPS  
Непрерывная шкала отсчета времени, основанная на координатном универсальном времени (UTC) от 6 января 1980 г.
74. Gravitational constant  
Гравитационная постоянная  
Коэффициент пропорциональности в законе гравитации Ньютона  
 $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ М}^3/\text{С}^2$ .
75. Great circle course  
Курс по дуге большого круга  
Этот термин используется в навигации. Он характеризует кратчайшую связь между двумя точками.
76. Greenwich mean time (GMT)  
Гринвичское среднее время  
Среднее солнечное время, отнесенное к гринвичскому меридиану. Используется как первичный базис стандартного времени в пределах всего земного шара.
77. Handover word  
Передаточное слово  
Кодовое слово в информационном сообщении спутника, которое управляет синхронизацией времени при переходе от C/A-кода к P-коду.
78. HDOP  
Геометрический фактор понижения точности плановых координат  
Фактор, характеризующий понижение точности плановых координат из-за геометрии расположения спутников.
79. Inclination  
Наклон (орбиты)  
Угол между орбитальной плоскостью вращения объекта и некоторой опорной плоскостью (например, экваториальной плоскостью).
80. Integer bias term  
Элемент смещения целого числа циклов  
См. Ambiguity.
81. Integrated Doppler  
Интегральный доплер  
Измерение доплеровского сдвига частоты или фазы за определенный промежуток времени.
82. Integrity  
Целостность  
Способность спутниковой системы обеспечивать пользователей своевременными предупреждениями о невозможности ее использования в навигационных целях.
83. International Earth Rotation Service (IERS)  
Служба, отслеживающая с высокой точностью смещения положений

- Международная служба вращения Земли
84. International GPS Service (IGS)  
Международная служба GPS для геодинамики
85. International Terrestrial Reference frame (ITRF)  
Международный наземный референцный каркас
86. Ionosphere  
Ионосфера
87. Ionospheric Delay  
Ионосферная задержка
88. Keplerian orbital elements  
Элементы кеплеровской орбиты
- полюсов и параметры вращения Земли.
- Служба, координирующая организацию спутниковых наблюдений на постоянно действующих станциях в пределах всего земного шара, обработку получаемых результатов и их анализ для целей геодинамики.
- Постоянно обновляемый наземный референцный каркас, состоящий из набора непрерывно наблюдаемых спутниковыми методами наиболее стабильных пунктов. На его основе устанавливается положение и масштаб периодически корректируемой геоцентрической координатной системы, а также уточняются значения параметров вращения Земли.
- Слой заряженных частиц (ионов) в атмосфере Земли на высотах от 50 до 1000 км над поверхностью.
- Задержка, которую испытывает радиосигнал, проходя через ионосферу (неоднородную и диспергирующую среду). Фазовая задержка зависит от содержания свободных электронов в ионосфере. Она оказывает влияние на параметры сигналов несущей частоты. Групповая задержка также зависит от дисперсионных свойств ионосферы и оказывает влияние на модулирующий (кодовый) сигнал. Фазовая и групповая задержки имеют одну и ту же величину, но противоположны по знаку.
- Для описания любой астрономической орбиты используется следующий перечень параметров:  
а - большая полуось;  
е - эксцентриситет;  
о - аргумент перигея;



89. Kinematic positioning  
Кинематическое позиционирование
90. L band  
Полоса частот L диапазона
91. Lane  
Дорожка
92. Least squares estimation  
Оценка по способу наименьших квадратов
93. Local Time  
Местное время
94. Mean anomaly  
Средняя аномалия
95. Mean motion  
Среднее движение
96. Mission  
Миссия (рабочие установки)
97. Multichannel receiver  
Многоканальный приемник
98. Multipath error

П - прямое восхождение узла возвышения;  
 i - наклон орбиты;  
 и - истинная аномалия.  
 См. Dynamic positioning.

Этот диапазон радиочастот простирается от 390 до 1550 МГц. Несущие частоты L1 и L2, передаваемые спутниками GPS, лежат в пределах этого диапазона.

Условный линейный отрезок, соответствующий, как правило, длине волны колебаний с частотой, образованной из комбинации несущих частот. Если получаемая комбинация больше частоты несущих колебаний, то вводят понятие «узкой дорожки» (narrow lane). В противном случае используется понятие «широкой дорожки» (wide lane).

Метод оценки неизвестных параметров на основе минимизации суммы квадратов остаточных величин измерений.

Местное время равно времени GMT плюс временная зона.

$M = n(t - T)$ , где  $n$  - среднее движение,  $t$  - реальное время,  $T$  - момент прохождения перигея,

$n = 2\pi/p$ , где  $p$  — период обращения.

Описывает способ, с помощью которого компонуются действия в аппаратуре WILD GPS System 200 при работе в поле.

Приемник, позволяющий параллельно отслеживать несколько спутников независимыми каналами.

Ошибка определения местоположе-

Ошибка из-за многопутности (из-за отражений)

ния, являющаяся результатом интерференции радиоволн, которые проходят расстояние между спутником и приемником несколькими путями различной электрической длины из-за отражений от земной поверхности и объектов вблизи приемника.

99. Multiplexing channel  
Мультиплексный канал

Канал в приемнике, который подключается при приеме сигнала конкретного спутника, пропуская ряд спутниковых сигналов от других спутников, со скоростью подключений, которая синхронизируется битовой скоростью передачи информационного сообщения от спутника (50 бит/с или 20 мс, характерных для одного бита). Таким образом, одна полная последовательность прохождения завершается за время кратное 20 мс.

100. Observing Session  
Сеанс наблюдений

Период времени, в течение которого данные GPS регистрируются одновременно двумя или более приемниками.

101. Offset  
Отстояние

Показатель, характеризующий результаты измерений, выходящий за допустимые пределы.

102. Operation Type  
Тип работы

Режим работы, который может быть реализован в аппаратуре WILD GPS System 200. Обычно он обозначается через аббревиатуру, содержащую три символа: STS (статический), SGS (режим «Стою/Иду»), KIS (кинематический), NAV (навигационный).

103. Orthometric height  
Ортометрическая высота

Расстояние от точки на земной поверхности до поверхности геоида, измеряемое по направлению отвесной линии (высота относительно среднего уровня моря).

104. Outage  
Простой

Состояние системы GPS во времени и в пространстве, в котором оценка

105. P-code  
P-код

точности выходит за допустимые пределы.

Точный GPS-код, представляющий собой последовательность псевдо-случайных бинарных парафазных модуляций несущей частоты GPS с частотой передачи чипов 10,23 МГц, которая не повторяет сама себя в течение около 267 суток. Каждый однедельный сегмент P-кода является уникальным для одного спутника GPS, и он приходит в исходное состояние каждую неделю. Доступ к P-коду осуществляется правительством США только для санкционированных потребителей.

106. PDOP  
Геометрический фактор  
понижения точности опре-  
деления местоположения в  
пространстве

Фактор, характеризующий пониже-  
ние точности определения местопо-  
ложения объекта в пространстве из-  
за геометрии расположения спутни-  
ков.

107. Perigee  
Перигей

Точка на геоцентрической орбите,  
расстояние от которой до центра  
масс Земли является минимальным.  
Метод, с помощью которого фаза  
опорного сигнала точно отслежива-  
ет фазу принятого сигнала на основе  
сравнения фаз двух сигналов.

108. Phase lock  
Захват фазы

См. Reconstructed carrier phase.

109. Phase observable  
Фаза, подлежащая наблю-  
дениям

110. Point Positioning  
Местоопределение одной  
точки

Независимый процесс наблюдений,  
выполняемых отдельным приемни-  
ком, используя информацию о псев-  
додальностях, передаваемую по ра-  
диоканалу со спутников.

111. Polar motion  
Движение полюсов

Движение мгновенной оси враще-  
ния Земли по отношению к твердо-  
му телу Земли. Оно является нерегу-  
лярным, но более или менее близ-  
ким к круговому движению с ампли-  
тудой около 15 м и основным перио-

112. Post processing  
«Пост обработка»

дом около 430 суток (такое движение называют Чандлеровым).

Процесс вычисления местоположений в режиме разделенного времени на основе использования предварительно собранных приемниками GPS данных.

113. Precise positioning service (PPS)  
Сервисная служба точного позиционирования

Средства и методы, обеспечивающие самый высокий уровень точности определения местоположения точек, выполняемого с помощью GPS. Базируются на использовании P-кода и двух несущих частот.

114. Project  
Проект (объект)

Характеризует область или работу, которые в своем логическом развитии содержат все сведения об измеряемых точках. Как правило, измерения точек производится совместно в однородной группе (например, при съемке локального региона), однако проект может состоять также из целого ряда отдельных и независимых серий наблюдений.

115. Propagation delay  
Задержка при распространении (радиосигналов)

См. Atmospheric propagation delay, а также Ionospheric delay.

116. Pseudolite  
Имитатор

Расположенная на земной поверхности и используемая для реализации дифференциального режима станция GPS, которая передает сигналы со структурой, аналогичной той, которую имеют реальные сигналы, передаваемые со спутников GPS.

117. Pseudorandom noise (PRN) code  
Псевдослучайный шумовой код

Группа бинарных последовательностей, которая обладает свойствами, аналогичными шумовым сигналам, но которая может быть классифицирована. Самым важным свойством PRN-кода является то, что такая последовательность имеет минимальное автокорреляционное значение

## И 8. Pseudorange

Псевдодальность

за исключением нулевого интервала.

Расстояние до спутника, полученное в приемнике на основе корреляции принятого и генерируемого кодов без учета несинхронизации часов.

## 119. Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)

Радиотехническая комиссия, обслуживающая морские службы

Комиссия, которая разрабатывает стандарты для передачи результатов фазовых измерений, псевдодальностей и корректирующих поправок при организации дифференциальных кинематических методов координатных определений спутниковыми системами.

## 120. Range

Дальность

Этот термин используется в навигации и подразумевает длину траектории между двумя точками. Обычно траектории представляют собой дугу большого круга или линию румба.

## 121. Rapid static survey

Работа в режиме «Быстрая статика»

Этот термин характеризует статический режим с короткими продолжительностями сеансов наблюдений. Данный режим позволяет достичь быстрого разрешения неоднозначности, которое реализуется с помощью программного обеспечения SK1.

## 122. Raw data

Необработанные («сырые») данные

Первичные данные GPS, которые регистрируются приемником.

## 123. Receiver channel

Канал в приемнике

Это высокочастотные блоки, а также цифровое аппаратное и программное обеспечение в приемнике GPS, которые необходимы для отслеживания сигналов, поступающих от одного из спутников GPS на одной или двух несущих частотах GPS. Разность между фазой поступающих несущих колебаний GPS, подверженных доплеровскому сдвигу, и фазой колебаний опорной частоты

## 124. Reconstructed carrier phase

Фаза преобразованного несущего сигнала

- (постоянно равной номинальному значению), генерируемых в приемнике.  
См. Differential positioning.
125. Relative positioning  
Относительное местоположение
126. Reliability  
Надежность
127. Reoccupation  
Реокупация (повторные измерения)
128. Rhumb line  
Линия румба
129. Right ascension of ascending node  
Прямое возвышение восходящего узла
130. RINEX  
Формат RINEX
- Эффективность обнаружения грубых ошибок, мерой которой являются обнаруживаемые ошибки минимальной величины.  
Метод, предусматривающий измерение каждого пункта более, чем один раз. Каждое измерение должно быть произведено с интервалом более, чем один час с тем, чтобы позволить спутникам изменить свою геометрию. Метод объединяет данные всех измерений в одно единственное решение. Этот метод наиболее эффективен в тех случаях, когда нормальные наблюдения невозможны из-за наличия препятствий или из-за того, что при первом измерении нельзя было разрешить неоднозначность.  
Термин, используемый в навигации. Это траектория движения между двумя точками, причем в любой промежуточной точке азимут остается постоянной величиной.  
Угловое расстояние, измеряемое от точки весеннего равноденствия, положительное в восточном направлении и отсчитываемое вдоль небесного экватора к восходящему узлу.  
Аббревиатура от полного названия Receiver INdependent EXchange (независимый обмен между приемниками). Данное понятие включает в себя набор стандартных определений и форматов, позволяющих осуществить свободный обмен данными GPS.

### 131. RTCM

Аббревиатура от полного названия Radio Technical Commission for Maritime (Радиотехническая комиссия, обслуживающая морские сервисные службы). Эта комиссия устанавливает принципы организации линий связи для передачи данных, необходимых при работе в дифференциальном режиме, с трансляцией сообщений, содержащих поправки, характерные для GPS. Упомянутые сообщения передаются от станции управления полевым пользователям.

### 132. Satellite Configuration Конфигурация спутников

Состояние «созвездия» спутников в конкретный момент времени, относящееся к конкретному пользователю или к группе пользователей.

### 133. Satellite Constellation «Созвездие» спутников

Это расположение в пространстве полного набора спутников, входящих в систему подобную GPS.

### 134. Selective availability (SA) Селективный доступ

Понижение (деградация) точности определения местоположения отдельных точек для гражданских потребителей, вводимое Министерством США. SA реализуется или за счет добавления псевдослучайного сигнала к показаниям часов, или за счет деградации информации об орбитах.

### 135. Sidereal day Звездные сутки

Интервал времени между двумя последовательными верхними прохождениями точки весеннего равноденствия.

### 136. SINEX Формат данных SINEX

Аббревиатура от полного названия Software-Independent Exchange (независимый обмен между обрабатывающими программами). Данное понятие включает в себя набор формализованных подходов, позволяющих осуществлять свободный обмен данными, получаемыми из обработки различными программами.

137. Site  
Местонахождение
  138. SKI (Static Kinematic post processing software)  
Программное обеспечение фирмы Leica
  139. Solar day  
Солнечные сутки
  140. Space segment  
Космический сектор
  141. Spread spectrum system  
Системы с расширенным спектром
  142. Spheroid  
Сфероид
  143. Squared reception mode  
Метод квадратичного приема
  144. Squaring-type channel  
Канал приемника «квадратичного типа»
  145. Standart positioning service (SPS)  
Стандартная сервисная служба позиционирования
  146. Static positioning (survey)  
Статическое определение местоположения
- Место, где установлен приемник с целью определения координат.
- Программное обеспечение для обработки данных, полученных аппаратурой WILD GPS System 200.
- Интервал времени между последовательными прохождением Солнцем верхней точки.
- Составная часть всей системы GPS, которая расположена в космосе, т.е. спутники.
- Системы, в которых сигнал передается в диапазоне частот более широком, чем необходимо для передачи информации.
- См. Ellipsoid.
- Метод, основанный на отслеживании сигналов GPS на частоте L2, при использовании которого удваивается несущая частота и не применяется P-код.
- Канал приемника GPS, в котором принимаемый сигнал умножается сам на себя с целью получения второй гармоники несущих колебаний, которая не содержит кодовой модуляции.
- Средства и методы, обеспечивающие самый стандартный уровень точности определения местоположения точек, выполняемый с помощью GPS. Базируются на использовании C/A-кода и одной несущей частоты.
- Определение местоположения при неподвижной антенне приемника. Термин включает в себя следующие режимы работы: статический; быстрый статический;



147. Stop & Go Survey  
Режим «Стою/Иду»

Специальный вид кинематической съемки, при котором после разрешения неоднозначности в начальной точке мобильный приемник может перемещаться между другими пунктами, но без потери захвата спутниковых сигналов. Для определения местоположения промежуточных точек на геодезическом уровне точности таким способом достаточно фиксации всего нескольких эпох. Если случается потеря захвата сигналов спутников, то необходимо выполнить новое разрешение неоднозначности на очередной точке.

148. Switching channel  
Переключаемый канал

Канал приемника, через который последовательно пропускается большое количество спутниковых сигналов (каждый от конкретного спутника и на конкретной несущей частоте) со скоростью, которая ниже скорости передачи данных в информационном сообщении (и асинхронна с ней).

149. TDOP  
Геометрический фактор  
понижения точности опре-  
деления показаний часов  
приемника

Фактор, характеризующий понижение точности определения показаний часов приемника из-за геометрии расположения спутников.

150. Time mark  
Временная отметка

Сигнал, передаваемый с периодичностью один импульс в секунду, что характерно для передаваемой секунды времени GPS.

151. Time zone  
Временная зона

Временная зона - это местное время минус среднее время по Гринвичу (GMT).

152. Translocation  
Транслокация

См. Differential positioning.

153. True anomaly  
Истинная аномалия

Угловое расстояние, измеряемое в орбитальной плоскости от центра Земли (принятого фокуса) при на-

154. Universal time  
Универсальное время
  155. User equivalent range error (UERE)  
Ошибка определения расстояний, характерная для индивидуального пользователя
  156. User interface  
Интерфейс пользователя
  157. User segment  
Сектор потребителей
  158. UT
  159. ИТО
  160. UT1
  161. UT2
  162. UTC
  163. VDOP  
Геометрический фактор понижения точности определения высоты
  164. Vernal equinox  
Точка весеннего равноденствия
- ходении спутника (т.е. тела, находящегося на орбите) в точке перигея до его текущего положения.
- Местное солнечное среднее время, отнесенное к гринвичскому меридиану.
- Вклад в ошибку измерения расстояний, обусловленный индивидуальным источником ошибок, причем он выражается в единицах длины в предположении, что источник ошибок является некоррелированным относительно других источников ошибок.
- Способ и средства управления и контроля за работой спутникового приемника.
- Составная часть системы GPS, которая включает в себя приемники для приема сигналов GPS.
- Аббревиатура для универсального времени.
- UT, полученное из непосредственного наблюдения звезд.
- UT0, откорректированное за движение полюса.
- UT1, откорректированное за сезонные вариации скорости вращения Земли.
- Универсальное координатное время, эквивалентное атомному времени, которое поддерживается очень близко к UT2 за счет периодического исправления уклонений.
- Фактор, характеризующий понижение точности определения высоты из-за геометрии расположения спутников.
- Пересечение небесного экватора с эклиптической, когда угол наклона солнечной орбиты возрастает (примерно 21 марта).

165. WGS-84

Всемирная геодезическая  
координатная система  
1984 г.

Координатная система, на которой базируются все измерения GPS и получаемые результаты.

166. Wide Area Augmentation Service (WAAS)

Служба по обеспечению  
широкой зоны передачи  
корректирующих поправок

Спутниковая дифференциальная подсистема, обеспечивающая передачу корректирующих поправок в зоне радиусом в несколько тысяч километров.

167. Y-code

Y-код

Дополнительно закодированная версия P-кода, которая передается спутниками GPS с той целью, чтобы затруднить доступ к P-коду несанкционированным пользователям.

168. Z-count word

Счетное слово Z

Время часов в системе GPS, отсчитываемое от ведущего края следующего подформата данных, с помощью которого в GPS передается информационное сообщение (обычно выражается в виде целого числа шестисекундных интервалов).

# Список литературы

1. Базлов Ю.А., Герасимов А.П., Ефимов Г.Н., Насретдинов К.К. Параметры связи систем координат//Геодезия и картография. — 1996. — № 8. — С.6-7.
2. Бирюкова. Глобальная система мобильной связи, контроля и управления трафиком// Системы безопасности, - 1996. - № 5. - С. 20-23.
3. Бовиши П.А., Зубинский В.П., Остап О.М. Совместное уравнивание общегосударственных опорных геодезических сетей//Геодезия и картография. - 1995. - № 8. - С. 6-17.
4. Бойков В.В., Галазин В.Ф., Кораблев Е.В. Применение геодезических спутников для решения фундаментальных и прикладных задач// Геодезия и картография. - 1993. - № 11. - С. 8-12.
5. Бородко А.В., Ефимов Г.Н. О реконструкции геодезических сетей городов Московской области//Геодезия и картография. - 2002. - № 6. - С. 26-29.
6. Вейс Г. Геодезическое использование искусственных спутников Земли: Пер. с англ. - М.: Недра. 1967. - 115 с.
7. Вентцель М.К. Сферическая астрономия. — М.: Издательство геодезической и картографической литературы, 1952.
8. Верницкий М.П., Генке А.А., Побединский Г.Г. Метрологическая аттестация топографо-геодезических динамических систем//Геодезия и картография. 1989. № 11. - С.26-28.
9. Временная инструкция по составлению технических проектов и смет на топографо-геодезические работы. - М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1974.
10. Генке А.А. Аттестация GPS-приемников фирмы «Лейка» в России//Репортер. — № 1. - М.: Картоцентр - Геодезиздат. 1997. - С. 8.
11. Генке А.А., Кислов В.С., Ююшеев Л.С. Создание полигона для аттестации спутниковых приемо-вычислительных комплексов//Геодезия и картография. - 1994. — № 2. - С. 10-13.
12. Генке А.А., Лобазов В.Я., Ямбаев Х.К. Результаты исследований аппаратуры спутникового позиционирования GPS WILD-SYSTEM 200//Геодезия и картография. - 1993. - № 1. - С. 8-13.
13. Генке А.А., Побединский Г.Г. Автоматизированная портативная радиогеодезическая система для определения плановых координат движущихся объектов//В сб.: Проблемы внедрения новой техники и технологии в топографо-геодезическое производство. — М.: ВАГО, 1990. — С. 3-10.
14. Генке А.А., Побединский Г.Г. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии. — М.: Картоцентр-Геодезиздат. 1999. - 272 с.
15. Геодезический мониторинг по выявлению опасных деформационных процессов на территории крупных городов/Савиных В.П., Ямбаев Х.К., Генке А.А., Лобазов В.Я.//Гезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции «Интеграция фундаментальной науки и высшего образования (состояние и перспективы)», г. Самара, 21-24 сентября 1998 г., с. 50-52.
16. Геодезическое обеспечение геолого-геофизических работ с использованием глобальных спутниковых систем/Прихода АХ, Лапко А.П., Мальцев Г.И. и др. - Новосибирск, 2000. - 158 с.
17. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. - 2-е изд. - М.: ИПРЖР, 1999. - 560 с.
18. Глушков В.В., Насретдинов К.К., Шаравин А.А. Космическая геодезия: методы и перспективы развития. - М.: Институт политического и военного анализа, 2002. — 448 с.
19. ГОСТ 51794—2001. Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек.

20. Егоров В.Б., Гринь О.О. Комбинированный приемник GPS/ГЛОНАСС. Экспресс-информация ЦНИИГАиК. Серия: Геодезия. — 1991. — № 3. — С. 1–7.
21. Единая государственная система геодезических координат 1995 года (СК-95)/Макаренко Н.Л., Демьянов Г.В., Новиков Е.В. и др. — М.: ЦНИИГАиК, 2000. — 34 с.
22. Ефимов Г.П. Результаты уравнивания астрономо-геодезической сети//Геодезия и картография. — 1995. — № 8. — С. 17–22.
23. Ефимов Г.Н., Побединский Г. Г. О необходимости координации работ по созданию государственной и городских геодезических сетей//Геодезия и картография. — 1999. — № 3. — С. 24–30.
24. Злотин В.В., Чернышев Ю.М. Об измерениях сверхдлинных сторон на камчатском геодинамическом полигоне//Геодезия и картография. — 1982. — № 1. — С. 34–38.
25. Инструкция по развитию съемочного обобщения и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. ГКИНП (ОНТА)-02-262-02. — М.: ЦНИИГАиК, 2002. — 124 с.
26. Инструкция о порядке проектирования и финансирования топографо-геодезических и картографических работ, выполняемых предприятиями и организациями Федеральной службы геодезии и картографии России для федеральных государственных нужд (ГКИНП-17-241-94). — М.: 1994.
27. Инструкция о построении Государственной геодезической сети СССР. 2-е изд., испр. и доп. — М.: Недра, 1966.
28. Инструкция по составлению проектно-сметной документации. ГКИНП (НПГА)-16-2000. — М.: ЦНИИГАиК, 2000. — 134 с.
29. Инструкция по построению государственной геодезической спутниковой сети. — М.: ЦНИИГАиК, 2002.
30. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. ГКИНП-02-033-82. — М.: Недра, 1982. — 160 с.
31. Использование искусственных спутников Земли для построения геодезических сетей/Е.Г. Бойко, Б.М. Клепикский, И.М. Лапчис, Г.А. Устинов. — М.: Недра, 1977.
32. Концепция перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений. — М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1995.
33. Кучеренко Л. Е. Оценка точности местоположения, полученного по спутниковой системе NAVSTAR//Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 1992. — № 1. — С. 32–34.
34. Лаурица С. Электронные измерения и навигация: Пер. с англ. — М.: Недра, 1981. — 480 с.
35. Макаренко Н.Л. О переходе на автономные спутниковые методы определения координат//Геодезия и картография. — 1996. — № 5. — С. 4–7.
36. Макаренко Н.Л., Демьянов Г.В. Система координат СК-95 и пути дальнейшего развития государственной геодезической сети//Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. — 2002. — № 1 (33)– 2(34). — С. 59–60.
37. Машимов М.М. Вособщий взгляд на геоспутниковую технологию//Геодезия и картография. — 1994. — № 12. — С. 6–11.
38. Методические рекомендации по использованию спутниковых приемников WILD GPS System 200 при создании спутниковой сети 1 класса. — Нижний Новгород: ВАПИ, 1996.
39. Молоденский М.С., Еремеев В.Ф., Юркина М.И. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли//Гр. ЦНИИГАиК. — М.: Недра, 1960. — Вып. 131. — С. 3–251.
40. Московская городская опорная геодезическая сеть/В.П. Савиных, Х.К. Ямбаев, Ю.Г. Карпушин, А.А. Гейнке, В.Я. Лобазов//Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. — 1997. — № 1 (8). — С. 59–60.

41. *Научно-технический отчет по договору № 294.43 от 15.01.2000 г. Разработка проекта «Инструкции по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS»*/ Борода А.В., Побединский Г.Г., Ямбаев Х.К. и др. - Федеральная служба геодезии и картографии России, Верхневолжское аэрогеодезическое предприятие, Нижний Новгород, 2001 г. - 146 с.
42. *Пенюклонов В.Б., Чугунов И.П., Яковенко Н.Э., Орлов В.В.* Новые возможности развития сети нормальных высот на территории России//Геодезия и картография. - 1996. - № 7. - С. 20-22.
43. *Опыт использования GPS-приемников в работах, выполняемых Верхневолжским АГП*/ Побединский Г.Г., Еруков С.В., Грибов Ю.Б., Андриянов В.А./Геодезия и картография. - 1997. - № 8. - С. 6-13.
44. *Опыт создания геоцентрической системы координат ПЗ-90*/ Бойков В.В., Галазин В.Ф., Каплан Б.Л. и др./Геодезия и картография. - 1993. - № 11. - С. 17-21.
45. *Основные положения о государственной геодезической сети СССР*. - М.: Геодезиздат, 1961.
46. *Основные положения о государственной геодезической сети*. - М.: ЦНИИГАиК, 2002.
47. *Основные положения о создании государственной геодезической сети (ОП ГГС-1994)*. - М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1994.
48. *Пеллинен Л.П.* Высшая геодезия. - М.: Недра, 1978. - 264 с.
49. *Пеллинен Л.П.* Определение параметров фигуры и гравиметрического поля Земли в ЦНИИГАиК//Геодезия и картография. - 1992. - № 4. - С. 29-35.
50. *Побединский Г.Г.* Программирование геодезических задач на языке БЕЙСИК. - М.: Недра, 1991. - 86 с.
51. *Побединский Г.Г.* Спутниковая геодезия в Волго-Вятском регионе//Репортер. - М.: Картоцентр - Геодезиздат, 1997. - № 2. - С. 6-13.
52. *Побединский Г.Г., Верницкий М.И., Генике А.А.* Метрологическая аттестация топографо-геодезических динамических систем//Геодезия и картография. - 1989. - № 11. - С. 26-28.
53. *Побединский Г.Г., Грибов Ю.Б.* Опыт работы ВАПГ по созданию городских геодезических сетей и фрагмента спутниковой сети 1 класса с использованием приемников WILD GPS System 200//Тезисы докладов международной конференции «Сферы применения GPS-технологий», Новосибирск, 21-23 ноября 1995 г. - С. 42-44.
54. *Побединский Г.Г., Грибов Ю.Б.* Опыт создания городских геодезических сетей и фрагмента спутниковой сети 1 класса//Геодезия и картография. - 1996. - № 10. - С. 7-10.
55. *Лебединский Г.Г., Гусев Ю.С., Еруков С.В.* О создании и эталонировании геодезического полигона для метрологической аттестации спутниковых приемников//Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. - 2002. - № 1 (33). - 2 (34). - С. 63-65.
56. *Побединский Г.Г., Гусев Ю.С., Еруков С.В.* Работы по созданию и эталонированию геодезического полигона для метрологической аттестации спутниковых приемников//Тезисы докладов 7-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы ввода и обновления пространственных данных» (Москва, РАГС, 4-6 марта 2002 г.). - М.: ГИС-Ассоциация, 2002. - С. 28-29.
57. *Побединский Г.Г., Еруков С.В.* Использование спутниковых приемников GPS WILD-SYSTEM 200 Верхневолжским АГП/Геодезия и картография. - 1994. - № 1. - С. 9-14.
58. *Правила закладки центров на пунктах геодезической и нивелирной сетей*. - М.: Картоцентр - Геодезиздат, 1993.
59. *Правила закрепления центров пунктов спутниковой геодезической сети*. - М.: ЦНИИГАиК, 2001. - 52 с.

60. *Реконструкция геодезической сети города Владимира/Побединский П.Т., Сучков А.В., Бутович Ю.К., Лобазов В.Я.*// Геодезия и картография. - 1999. - № 4. - С. 24-30.
61. *Романов Д.М., Шасдов А.К.* Моделирование спутниковой радионавигационной системы NAVSTAR//Зарубежная радиоэлектроника. - 1987. - № 12. - С. 31-46.
62. *РГМ* Применение приемников спутниковой геодезической системы WID GPS System 200 фирмы Лейка (Швейцария) при создании и реконструкции городских геодезических сетей. РГМ В-01-95. - Нижний Новгород: ВАГН. 1995. - 52 с.
63. *РГМ* Спутниковая технология геодезических работ. Термины и определения. РГМ 68-14-01. - М.: ЦНИИГАиК. 2001. - 29 с.
64. *Руководство по математической обработке геодезических сетей и составлению каталогов координат и высот пунктов в городах и поселках городского типа.* ГКИПП-06-233-90. - М.: ГИТК СССР, 1990.
65. *РГМ* Полноты геодезические. Общие технические требования. РГМ 68-8.20-93 с изм. 1. - М.: ЦНИИГАиК. 1993.
66. *РГМ* Определение приборной поправки светодальномера способом «во всех комбинациях». РГМ 68-8.21-94. - М.: ЦНИИГАиК. 1994.
67. *Савиных В.П.*// Репортер. - М.: Картоцентр - Геоиздат. 1997. - № 2. - С. 1-2.
68. *Савиных В.П., Ямбаев Х.К., Гешке А.А., Курпунин Ю.Г.* Проблемы реконструкции городских геодезических сетей на основе GPS-технологий/Дезисы докладов международной конференции «Сферы применения GPS-технологий», Новосибирск. 21-23 ноября 1995 г. - С. 5-7.
69. *Сератинис Б.Б.* Глобальные системы позиционирования. 3-е изд. - М.: ИКФ «Каталог», 2002. - 106 с.
70. *Сетевые спутниковые радионавигационные системы* / В.С. Шебшаевич, Н.П. Дмитриев, П.В. Иванцевич и др.; Под ред. В.С. Шебшаевича. - М.: Радио и связь, 1993. - 408 с.
71. *Система безопасности, навигации и мониторинга.* Патент РФ № 212239.
72. *Система геодезических параметров Земли.* «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90)/ Галазин В.Ф., Каплин Б.Л., Лебедев М.Г. и др. - М.: Координационный научно-информационный центр, 1998. - 40 с.
73. *Соловьева Ю.А.* Системы спутниковой навигации. - М.: Эко-Трендз. 2000. - 267 с.
74. *Справочник по картографии/А.М. Берлянт, А.В. Гедымит, Ю.Г. Кельпер и др.* - М.: Недра, 1988. - 428 с.
75. *Татевян Р.А.* Контроль систем GPS. Обзорная информация. - М.: ЦНИИГАиК, 1996.
76. *Трефилова И.В.* Новая GPS-платформа для мобильных ГИС//Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. - 2002. - № 3(35). - С. 44.
77. *Шануров Г.А., Мельников С.Р.* Геоэлектроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ. - М.: УПП «Репрография» МИИГАиК, 2001. - 136 с.
78. *Ямбаев Х.К.* Создание современной опорной геодезической сети Москвы с применением GPS-аппаратуры фирмы «Лейка»//Репортер. - М.: Картоцентр - Геоиздат. 1997. - № 1. - С. 9.
79. *Accuracy by Radio.* GIM Interviews Three Suppliers of Broadcasted Differential GPS Corrections. GIM (Geomatics Info Magazine). - 1996. - № 2. - P. 55-59.
80. *Chranowski A., Chen J.* Design, monitoring and analysis of deformation survey: Problems and Solutions//Proc. 6th Int. FIG-Symposium on Deformation Measurements, Hannover, 1992.
81. *Galas Roman, Reighberg Christoph, Baustert Gerald.* Permanent betriebene GPS Stationen in globalen und regionalen Netzen//Z. Vermessungsw. - 1995. - V. 120. - № 9. - S. 431-438.

82. • Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theorie and Praxis. Springer, Wien, New York, 1993. - 200 p.
83. Kouba J. Status of the IGS Pilot Project to Density ITRF//Annual Report IGS over 1996, November 1997. - P. 101-106.
84. Leick A. GPS. Satellite Surveying (Second Edition)//A Wiley-Interscience Publication, New York, 1994. - 560 p.
85. Li K. Empirische Untersuchungen zur GPS-gestützten kombinierten Blockausgleichung// Wiss. Arb. Univ. Hannover, Hannover, 1992. - № 175.
86. Niemeier W. Potential of GPS for deformation studies// Proc. 6th Int. FIG-Symposium on Deformation Measurements. - Hannover, 1992.
87. Raymond A. Eastwood. An Integrated GPS/Glonass receiver. Navigation. - 1990. - № 2. - P. 141-151.
88. Report on the Symposium of the IAG Subcommission for the European Reference Frame (EUREF) held in Ankara, 22-25 May 1996// Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die internationale Erdmessung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. - Heft № 57. - München, 1996. - 357 s.
89. Schaeffers N. A. RTK GPS Put to Practice. Challenging the Total station/ GIM (Geomatics Info Magazine). - February 1996. - № 2, Vol. 10. - P. 65-68.
90. Seeber G. Satellite Geodesy. Foundations, Methods and Applications// Walter de Gruyter, Berlin, 1993. - 531 p.
91. Seeber H. EUREF - A Modern Geodetic Approach to Establish an All-European Reference System// Reportat Belgo-European Seminar «New Surveyors», Wegimont, 24-25.03.1993. - 17 p.
92. Slater J. A. The International GLONASS Experiment (IGEX-98): Organization, Preliminary Results and Future Plans// Presented at ION-99, Nashville, Sept. 14-17, 1999.
93. Specification Wide Area Augmentation System (WAAS)//U.S. Department of Transport, Federal Aviation Administration, FAA-E-2892 B, March 10, 1997.
94. Surveying with Global Positioning System (GPS)/R.W. King, F.G. Masters, C. Rizos, A. Stolz, J. Collins. Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, 1987. - 128 p.
95. Ware R., Alber C., Rocken C., Solheim F. GPS surveying with 1 mm precision using corrections for atmospheric slant path delay//University Navstar Consortium// University Corporation for Atmospheric Research, 1997.



# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие ко 2-му изданию</b>	<b>3</b>
<b>Введение</b>	<b>6</b>
<b>Раздел 1. Основные принципы действия спутниковых систем определения местоположения</b>	<b>14</b>
1.1. Особенности геодезических измерений спутниковыми методами	14
1.2. Двусторонний и односторонний методы дальномерных измерений	17
1.3. Принципы измерения длин линий, используемые в спутниковой геодезии	21
1.4. Общие принципы построения глобальных спутниковых систем позиционирования	26
1.5. Космический сектор	28
1.5.1. Краткие сведения о спутниках, входящих в состав систем позиционирования	29
1.5.2. Назначение и схемная реализация устанавливаемой на спутниках аппаратуры	32
1.5.3. Высокостабильные спутниковые опорные генераторы	35
1.5.4. Принципы формирования кодовых последовательностей	37
1.5.5. Содержание и формирование на спутнике навигационного сообщения	40
1.5.6. Методы объединения и формы передачи радиосигналов со спутника в аппаратуру потребителя	42
1.6. Сектор управления и контроля	44
1.6.1. Основные функции сектора	44
1.6.2. Компоненты сектора управления и контроля и их взаимодействие	45
1.7. Сектор потребителя (приемно-вычислительный комплекс)	51
1.7.1. Функции геодезического приемно-вычислительного комплекса	52
1.7.2. Обобщенная структурная схема геодезического спутникового приемника	53
1.7.3. Антенные устройства спутниковых приемников и предъявляемые к ним требования	55
1.7.4. Селекция сигналов, поступающих от различных спутников	58
1.7.5. Методы поиска, захвата и отслеживания сигналов, передаваемых различными спутниками	61
1.7.6. Принципы демодуляции принимаемых сигналов	63
1.7.7. Краткие сведения о работе системы управления GPS-приемника	65
1.7.8. Обработка данных, производимая в приемнике	68
<b>Раздел 2. Методы измерений и вычислений, используемые в спутниковых системах определения местоположения</b>	<b>71</b>
2.1. Абсолютные и относительные методы спутниковых измерений	71
2.2. Основные разновидности дифференциальных методов	74
2.3. Специфика проведения псевдодальномерных и фазовых измерений	77
2.4. Принципы измерения псевдодальностей и практическое использование данного метода	79
2.5. Упрощенный анализ фазовых соотношений при спутниковых дальномерных измерениях	81
2.6. Первые, вторые и третьи разности, базирующиеся на фазовых измерениях несущих колебаний	84
2.6.1. Первые разности	84
2.6.2. Вторые разности	86
2.6.3. Третьи разности	88

2.7. Интегральный доплеровский счет	90
2.8. Принципы разрешения неоднозначностей при фазовых измерениях	93
2.8.1. Геометрический метод	95
2.8.2. Метод комбинированного использования кодовых и фазовых измерений	96
2.8.3. Метод поиска наиболее вероятных значений целого числа пиклов	98
2.8.4. Петривиальные методы разрешения неоднозначности	101
2.9. Выявление пропусков фазовых циклов	102
2.10. Общая схема обработки наблюдаемых данных	105
<b>Раздел 3. Системы координат и времени, используемые в спутниковых измерениях</b>	<b>109</b>
3.1. Роль и значение координатно-временного обеспечения для спутниковых методов определения местоположения	109
3.1.1. Общие сведения о системах координат	109
3.1.2. Краткие сведения о системах отсчета времени, используемых в GPS и ГЛОНАСС	113
3.2. Координатные системы, характерные для GPS и ГЛОНАСС	118
3.2.1. Звездные системы координат	118
3.2.2. Геодезические системы координат и их преобразования	122
3.2.3. Переход к общеземной системе координат	129
3.2.4. Геоцентрическая координатная система IJ3-90	132
3.2.5. Геоцентрическая координатная система WGS-84	137
3.3. Методы преобразования координатных систем для спутниковой GPS-технологии и параметры перехода	137
3.4. Особенности определения высот с помощью спутниковых систем	144
<b>Раздел 4. Основные источники ошибок спутниковых измерений и методы ослабления их влияния</b>	<b>147</b>
4.1. Классификация источников ошибок, характерных для спутниковых измерений	147
4.2. Источники ошибок, связанные с неточным знанием эфемерид спутников, и методы ослабления их влияния	148
4.3. Учет влияния внешней среды на результаты спутниковых измерений	151
4.3.1. Влияние ионосферы	152
4.3.2. Влияние тропосферы	159
4.3.3. Многопутность	163
4.4. Инструментальные источники ошибок	166
4.4.1. Ошибки, обусловленные нестабильностью хода часов на спутнике и в приемнике	167
4.4.2. Ошибки, обусловленные неточностью знания точки отсчета	168
4.4.3. Ошибки, связанные с влиянием нестабильности аппаратных временных задержек и внутренних шумов приемника	169
4.5. Геометрический фактор	170
4.6. Причины и методы искусственного зашумления точности GPS-измерений	174
<b>Раздел 5. Проектирование, организация и предварительная обработка спутниковых измерений</b>	<b>177</b>
5.1. Специфика проектирования и организации спутниковых измерений	178
5.2. Предполетное планирование в камеральных условиях	187

5.2.1. Составление технического проекта	191
5.2.2. Составление рабочего проекта	194
5.3. Подготовка аппаратуры к полевым измерениям, ее транспортировка и размещение на пункте наблюдения	198
5.4. Входение в рабочий режим и контроль за ходом измерений	200
5.5. Завершение сеанса наблюдений. Хранение собранной информации. Ведение полевого журнала	201
5.6. Специфика редуцирования результатов спутниковых измерений при внеценной установке приемников	203
Раздел 6. Обработка спутниковых измерений, редуцирование и уравнивание геодезических сетей	209
6.1. Первичная обработка спутниковых измерений, производимая в приемнике	210
6.2. Предварительная обработка спутниковых измерений, производимая после окончания измерений	213
6.3. Окончательная обработка спутниковых измерений	216
6.3.1. Окончательная обработка спутниковых измерений по программе фирмы-изготовителя спутниковых приемников	219
6.3.2. Окончательная обработка спутниковых измерений по специально разработанной программе	224
6.4. Уравнивание геодезических сетей, созданных на основе использования спутниковой технологии	225
6.4.1. Уравнивание по программе фирмы-изготовителя спутниковых приемников	226
6.4.2. Уравнивание по специально разработанной программе	227
6.4.3. Уравнивание спутниковых измерений как сетей трилатерации	228
Раздел 7. Использование спутниковых технологий для построения геодезических сетей	230
7.1. Построение глобальной опорной геодезической сети	230
7.2. Построение континентальных опорных геодезических сетей	233
7.3. Построение государственной геодезической сети России на основе спутниковых технологий	235
7.3.1. Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС)	236
7.3.2. Высокоточная геодезическая сеть (ВГС)	240
7.3.3. Спутниковая геодезическая сеть I класса (СГС-I)	241
7.4. Создание и реконструкция городских геодезических сетей с использованием спутниковых технологий	249
7.4.1. Опыт создания и реконструкции городских геодезических сетей в 1992-1995 гг.	252
7.4.2. Опыт создания и реконструкции городских геодезических сетей в 1996-2001 гг.	255
7.4.3. О необходимости координации работ по созданию государственной и городских геодезических сетей	269
7.4.4. Разработка проекта «Инструкции по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS»	273
Раздел 8. Специальные применения спутниковых геодезических измерений для решения различных геодезических задач	276
8.1. Решение геодезических задач	277
8.2. Применение спутниковых технологий в прикладной геодезии	280
8.3. Особенности применения спутниковых технологий в морской геодезии	283
8.4. Выполнение аэрокосмических работ с использованием спутниковых	

координатных определений .....	286
8.5. Использование спутниковых технологий при выполнении топографических и разнотных специализированных съемок .....	288
8.6. Особенности решения навигационных задач с использованием спутниковых приемников .....	292
8.6.1. Персональные навигационные системы .....	292
8.6.2. Навигационные системы транспортных средств .....	294
Заключение .....	304
Словарь англоязычных терминов .....	319
Список литературы .....	343

Производственно-практическое издание

**Генике** **Аркадий Александрович**  
**Побединский** **Геннадий Германович**

## **Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии**

Издание 2-е, переработанное и дополненное

Главный редактор издательства *Л. Г. Иванова*  
Редактор *Е. А. Евтеева*  
Корректор *Т. А. Бунина*

Изд. лип. ЛР № 021299 от 24.06.98. Сдано в набор 30.05.2003.  
Подписано в печать 29.03.2004. Формат 60x88 1/16.  
Печать офсетная. Ул.-издл. 28,0. Тираж 1000 экз. Заказ

**Картеопентр**  
125413, Москва, Онежская ул. 26

