

Наземная сейсморазведка

Двигаемся навстречу к полной дискретизации в наземной 3Д съемке

Moving towards full-sampling in land 3D acquisition

Marty Williams и Scott Hoenmans, Input/Output, разъясняют требования современной 3Д наземной сейсморазведки и делают прогнозы относительно новых технологий ведения съемки для достижения полной дискретизации при записи сейсмического сигнала.

Геофизики нуждаются в сейсмических данных для получения как надежной и геологически достоверной картины строения глубинных толщ земли, так и времени их образования. Для этого требуется, чтобы пространственная дискретизация была достаточной для обеспечения необходимого разрешения не только для поиска объектов бурения, но также и для описания условия осадконакопления, неоднородностей внутри и за пределами резервуара и других важных, но едва ли заметных деталей, связанных с поиском и разработкой нефтяных месторождений. Для получения этих результатов необходимо значительно повысить плотность дискретизации при проведении наземных съемок, размещая большее количество точек записи, чем это делается сегодня. В настоящее время стоимость станций, записывающих сигнал отраженной сейсмической волны с дискретизацией повышенной плотности, неоправданно высока, и, кроме того, они довольно сложны в эксплуатации. К счастью совсем скоро будет введено в коммерческое использование новое поколение беспроводных сейсмических систем записи, которые позволят геофизикам производить наблюдения с дискретизацией повышенной плотности.

Пространственная дискретизация

Пространственное разрешение не является просто размером бина. На пике популярности миграции до суммирования и анализа анизотропии для получения качественного результата необходимо дискретизировать все области до суммирования. Этот критерий редко соблюдается при проведении современных измерений из-за его стоимости. А стоимость и ограничения современных систем записи способствуют использованию недостаточной для интерпретаторов разрешающей способности и дают сильно зашумленные данные. Все эти минусы вызывают артефакты миграции, неоднозначности AVO анализа и некорректность анализа анизотропии.

Решением для преодоления сегодняшних ограничений возможностей интерпретации является повышение плотности дискретизации записываемых сейсмических данных. Для этого необходимо выполнить следующие условия:

- Интервалы между источниками и приемниками должны быть одинаковы как по инлайнам, так и по кросслайнам (при ортогональной геометрии)
- Интервалы внутри группы должны быть достаточными, чтобы избежать эффектов аляйсинга и регулярного шума
 - Усиление на источнике должно коррелироваться с усилением на приемнике
- Источник и приемник имеют симметричный отклик (Vermeer, 1990)

- Дискретизация данных в области оффсетов, азимутов и ОСТ должна проводиться таким образом, чтобы не было ни разрывов, ни эффектов аляйсинга в этих областях

Проведение такой идеальной съемки с полной дискретизацией невыполнимо трудная задача. В регионе, который мы оценивали, это потребовало бы приблизительно 100,000 точек наблюдения. Такое количество превысило бы любое предыдущее число размещенных приемников более, чем в десять раз и даже в этом случае удовлетворило бы идеальному критерию съемки с полной дискретизацией, описанному выше, только частично. Традиционные наземные системы съемки тоже испытывали значительные технические сложности при записи такого количества данных. Даже если бы техническая сторона была бы осуществима, невероятно высокие финансовые затраты не позволили бы этой технологии развиваться дальше.

Однако, пройдет не так много времени, когда этот уровень работ станет экономически эффективным. Соревнование за доступ к ресурсам продолжает нарастать по всему миру. Операторов E&P принуждают вести сейсмические съемки с обязательной заботой об окружающей среде, а за этим строго следят такие организации как Бюро по Недропользованию в США. Эти компании также должны доказывать свое технологическое превосходство при соперничестве за договор о разделе продукции с независимыми государствами-собственниками недр. Как условие, гарантирующее эффективное использование ресурсов, победителями будут выбраны те компании, которые смогут показать лучшие результаты при разведке и разработке нефтяных резервуаров в условиях все возрастающей сложности построения изображений.

К счастью стоимость проведения измерений станциями с высокой плотностью дискретизации продолжает неуклонно снижаться. Капитальные вложения в оборудование и проведение полевых съемок должны падать по мере распространения беспроводных систем записи с точечными приемниками по всему миру. Сопутствующие технологии в этой области, к которым относится хранение данных, энергетические системы и LiDAR (система обнаружения и ранжирования), необходимая программная интеграция планирования съемки, ее проведение - все эти факторы приведут к тому, что процесс записи полевой информации будет производиться более эффективно, и что более важно, эффективность будет расти с ростом профессионализма людей, для которых съемка с большим числом приемников не будет казаться столь невероятной.

Мы стремительно приближаемся к тому моменту, когда новые методы измерений позволят перейти к качественно другому этапу построения изображений. Снимая ограничения, накладываемые проводными системами записи, геофизики смогут работать с программами для построения изображений с полной дискретизацией, что позволит записывать полное сейсмическое поле и не придавать максимального внимания только тем методам дискретизации, которые используются для подавления шума при наземной съемке.

Концепция метода полной дискретизации

Полная дискретизация 3Д съемки требует заполнения приемниками как уже стандартных при традиционной геометрии позиций, так и пространства между ними для каждого выбранного радиуса оффсета вокруг источника.

Наземная сейсморазведка

Источники необходимо выносить от пунктов приема на расстояние, равное половине группового интервала как в направлении инлайн, так и в кросслайн. Применяя такой критерий, можно достичь оптимальной дискретизации на поверхности, используя схему съемки с регулярной дискретизацией (Рисунок 1). В этом случае сейсмический сигнал успешно дискретизируется как по офсетам так и по азимутам (Рисунок 2). Достижение полной дискретизации при такой расстановке конечно же идеал. Всегда будут существовать некие компромиссы, обусловленные набором условий на поверхности и техническими возможностями проведения полевой съемки. До тех пор, пока использование беспроводных точечных станций приема не станет коммерческой повсеместно, затраты на их использование будут оставаться непреодолимым препятствием по крайней мере еще несколько лет.

Однако стоит заметить, что нефтяные компании уже начали планирование программ по проведению наземных съемок, закладывая в бюджеты постепенное повышение числа используемых станций. К примеру, недавно мы разрабатывали съемку с полной дискретизацией для крупного месторождения в Северной Америке. Для ее успешного проведения потребовалось бы 100,000 приемников. Такая схема обеспечила бы кратность свыше 8000 (обратите внимание, что на рисунке 2 показана удвоенная кратность только потому, что мы выбрали бинирование данных по азимуту через 10°).

Что значит кратность, когда мы говорим об изображении? Для ответа на этот вопрос необходимо рассмотреть пространственную область, в которой проводится обработка. В данном случае она будет включать в себя область источника, приемника, офсетов, азимутов и ОСТ.

Именно использование дискретизации в этих областях определяет качество финального изображения. Области приемника и источника более других нуждаются в подавлении шума, масштабировании и учете формы исходного импульса. Поскольку традиционно дискретизация более полная в областях источника и приемника, применяемые методы обработки содержат один подводный камень. Поскольку эти области хорошо дискретизированы только в направлении инлайн, удаление шума будет зависеть от направления. Если кто-нибудь захочет проанализировать азимутальную зависимость свойств данных (Jenner, 2002; Williams and Jenner, 2002) или сохранить амплитуды для азимутальной миграции, ему необходимо будет получить доступ к данным с полной дискретизацией.

Область офсетов очень тесно связана с областью азимутов при широкоазимутальном анализе. Именно в этих областях наряду с областью ОСТ, наиболее важен анализ скоростей и анизотропии. Кроме того, в области азимутов и офсетов часто проводится миграция до суммирования. Из всего выше сказанного следует, что полная дискретизация критически необходима для устранения артефактов и футпринтов («footprint») из амплитудных записей (Hill, 1999).

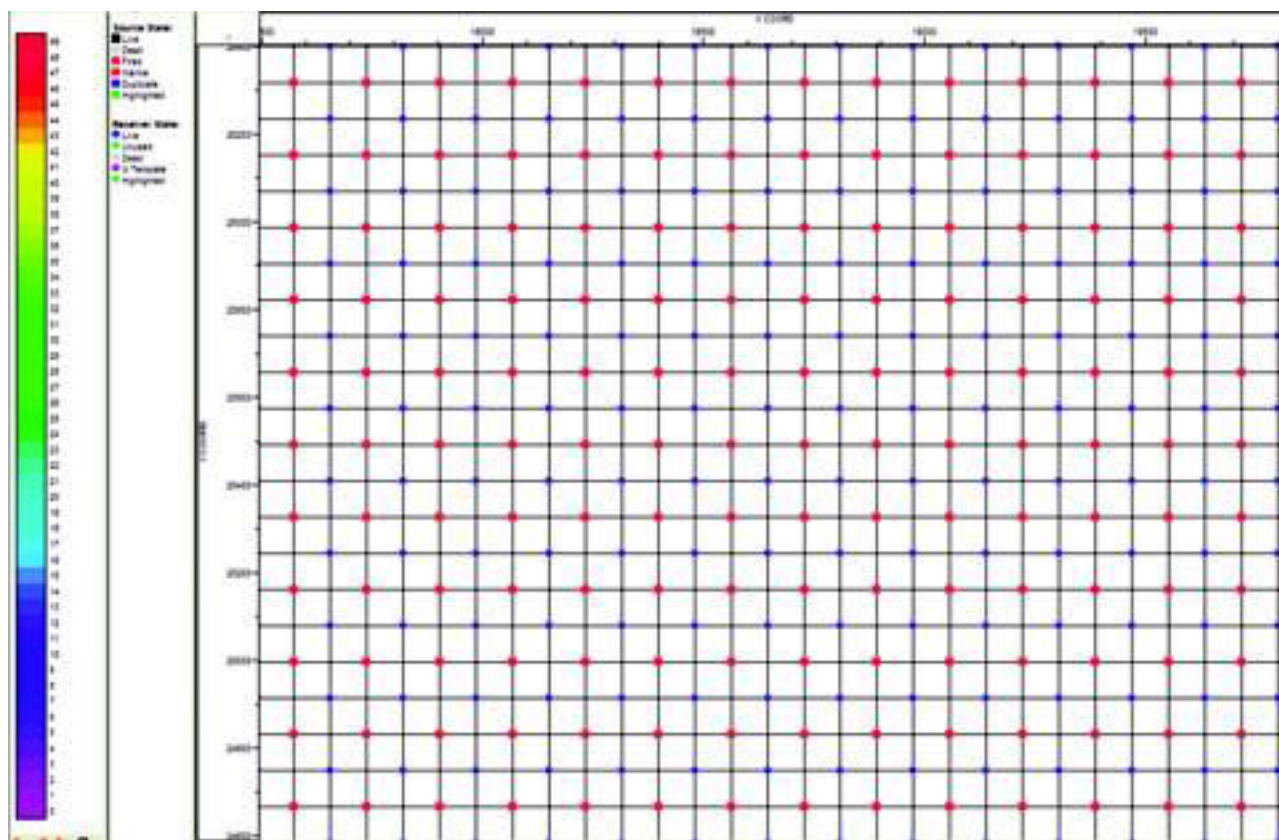


Рисунок 1 Геометрия съемки с полной дискретизацией. Синие точки соответствуют приемникам, а красные – источникам. Черными линиями показаны границы бинов размером 25 на 25 м.

Наземная сейсморазведка

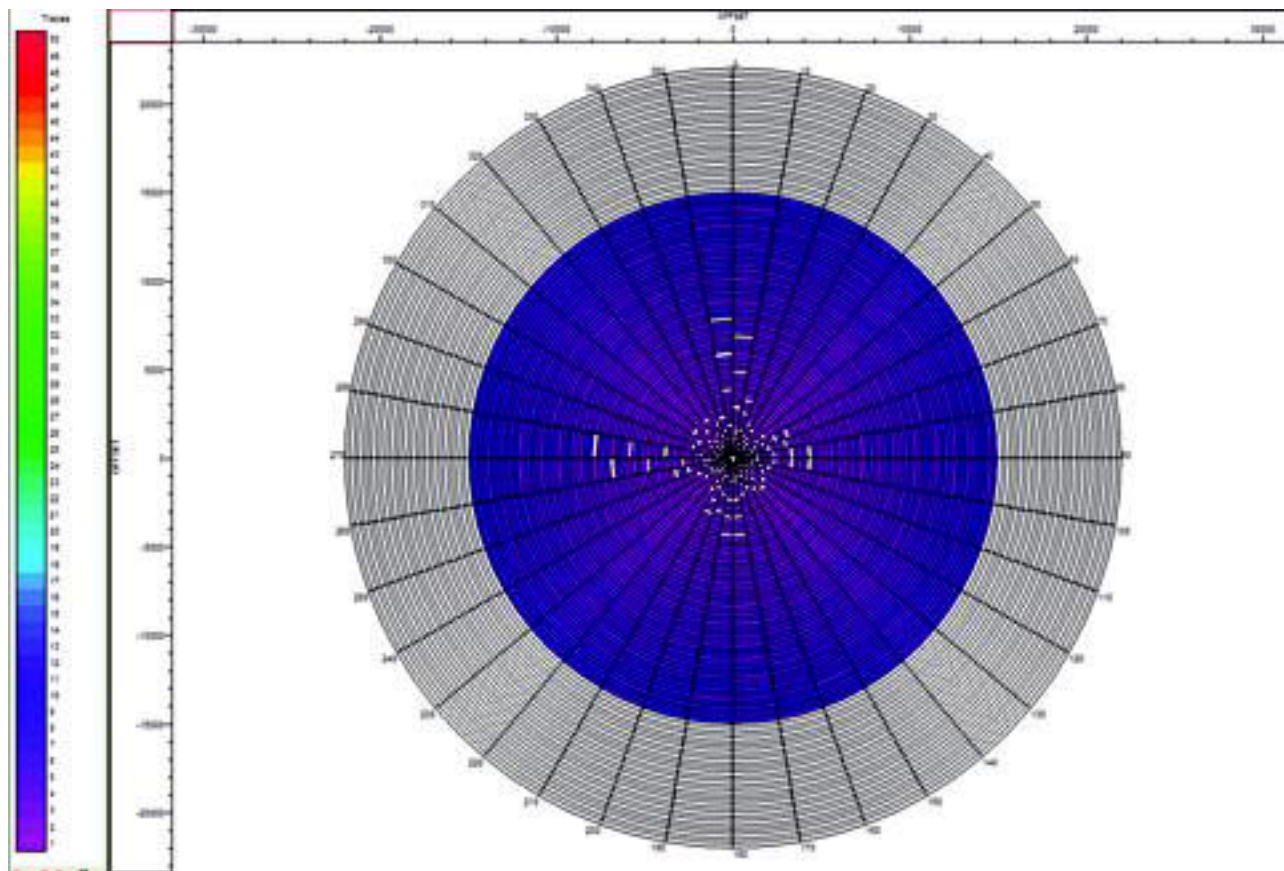


Рисунок 2 Круговая диаграмма бина при съемке с полной дискретизацией. Диаграмма построена для азимутальных секторов 10° и секторов по офсетам примерно 100м. Максимальный вынос составляет приблизительно 5000 м.

При работе на больших азимутах методы и рассчитываемые атрибуты зависят от наличия полного диапазона офсетов. Как и для многих геологических областей области офсетов должна быть поделена на азимуты, содержащие достаточное количество точек наблюдения во избежание потери разрешающей способности и смешивания амплитуд (Williams and Jenner 2002).

В конечном счете нашей целью является получение сейсмограмм ОСТ, дискретизация по офсетам которых одинакова для любого набора азимутов. Даже при использовании самых передовых технологий сбора данных одинаковая дискретизация по азимутам и по офсетам недостаточна для обеспечения всего необходимого диапазона азимутов, нужного для получения заданной разрешающей способности. И зачастую мы вынуждены применять губительную интерполяцию, чтобы мигрировать азимутальные сейсмограммы.

Пока достижение полной дискретизации данных остается идеалистическим приближением, что же тогда можно ожидать от «почти» полной дискретизации при съемке? На какой компромисс мы можем согласиться? И каким образом мы можем контролировать расхождения? На примере Северной Америки, описанном выше, для сбора данных необходимо от 1500 до 3000 геофонов при использовании достаточно широкой азимутальной расстановки (Рисунок 3). Число станций и количество измерений обеспечивает

примерно кратность равную 30-40 (Рисунок 4). На некоторых месторождениях и для некоторых объектов такая кратность может быть удовлетворительной. В нашем же случае месторождение прошло очень сложную тектоническую и диагенетическую историю. Хотя сама поверхность обладает пологим рельефом, азимутальная изменчивость хорошо заметна. Исследуемый участок обладает сильной анизотропией: до 7% изменение скоростей Р – волн. Породы характеризуются высоким скоростями. Приповерхностные скорости начинаются с 3000 м/с и возрастают до 4500 м/с в резервуаре, который находится на средней глубине.

Еще добавляет сложности тот факт, что многие участки на поверхности сложены твердыми породами. Соотношение V_p/V_s на поверхности изменяется от трех до менее, чем двух. Отношение сигнал/шум может быть низким в связи с поверхностными волнами, зашумлением Р-волн волнами обмена (на Рисунок 5 показан макробин 9×9 , суммированный по офсетам после ввода скоростных поправок. Кратность каждого офсета превышает 30). Максимальные частоты, восстановленные из данных, редко превышают 70 Гц, а центральная частота находится в области 20 Гц.

Хотя на месторождении было проведено несколько 3Д сейсмических проектов (при использовании источников Vibroseis), данные обладали достаточно низкой кратностью и ограниченной полосой частот.

Наземная сейсморазведка

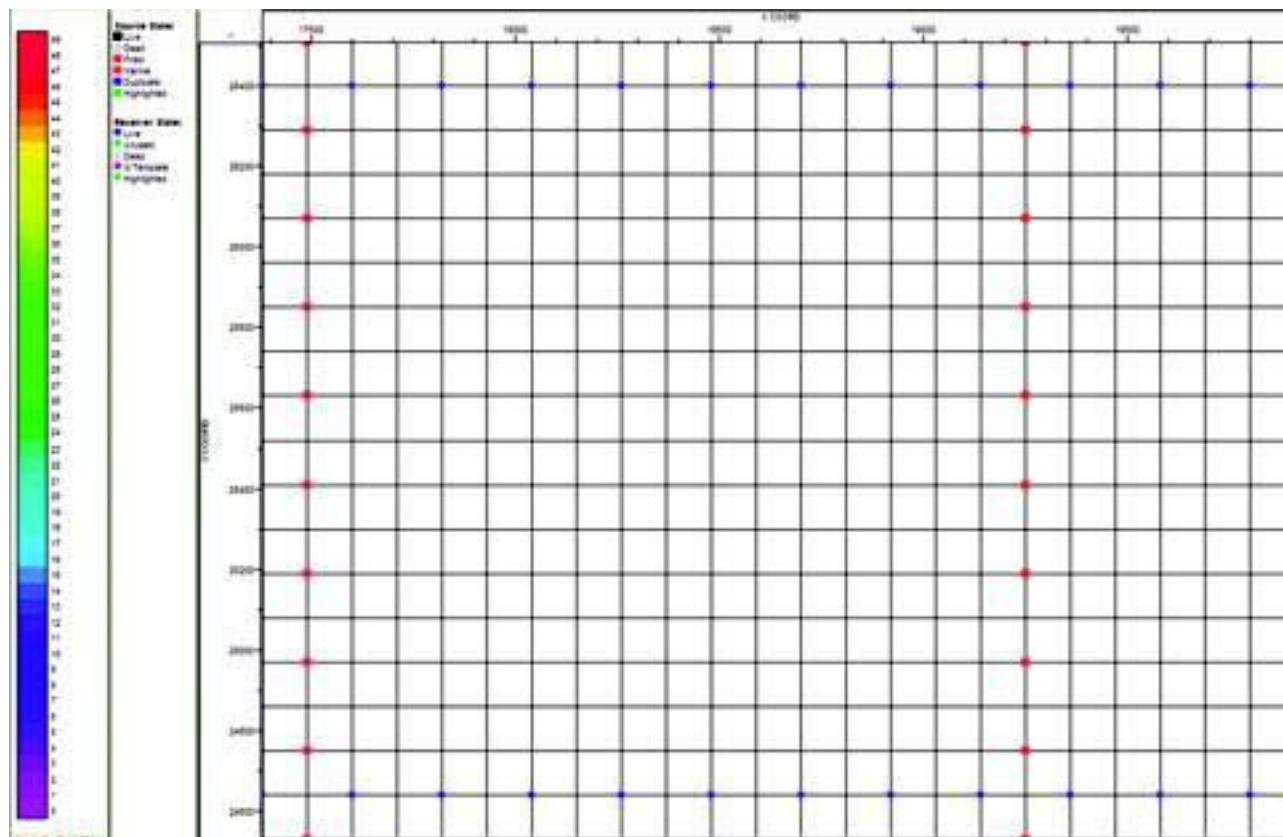


Рисунок 3 Геометрия стандартной ортогональной съемки. Синие точки соответствуют приемникам, а красные – источникам. Черными линиями показаны границы бинов размером 37.5 на 37.5 м

Несмотря на то, что азимутальное распределение вполне достаточно, проблемы с отношением сигнал/помеха зачастую приводят к неосуществимости анализа анизотропии. Вследствии этого неблагоприятные временные сдвиги, вызванные анизотропией скорости, постоянно возрастают с глубиной, в результате чего длина волны рассчитывается из неверных данных. Практический способ решения этой проблемы – прореживание данных, для того чтобы сузить азимутальное распределение и ограничить число выносов. К сожалению, такой способ вместе с тем понижает кратность съемки. Но и без применения прореживания, неопределенность анизотропии, ошибки в определении скоростей суммирования и неразрешенность AVO анализа будут оставлять отпечатки на амплитуде и фазе сигнала, немисливо усложняя работу интерпретатора, особенно при анализе атрибутов.

Разработка съемки с полной дискретизацией

Осознавая финансовые расходы и эксплуатационные возможности, мы разработали подход, позволяющий решить проблему дискретизации, которая заключается в проектировании съемки, которая обеспечит дискретизацию близкую к полной и которая будет задействовать технологии и методы полноволновых измерений (Criss et al., 2005). Для программы разведки Северо-Американского газового месторождения проект съемки включал примерно 20,000 точек наблюдения (Рисунок 6 и 7 в сравнении с Рисунок 1 и 2).

Для установления оптимального соотношения между числом станций и стоимостью съемки:

- Были удалены приемники с интервалом 50-100 м.
- Групповой интервал составил 50 м вместо стандартных 75 м или более
- Точки взрыва были прорежены на новую регулярную сетку с интервалом 100м вместо 50 м.

Такие параметры съемки позволяли обеспечить расстояние между трассами в области источника 50 м, а области приема 100м. Поверхностная волна подавлялась бы в обеих областях, но сигнал все еще мог подвергаться эффектам аляйсинга. Изменение интервала с прежних 75м до 50 м в данной съемке будет обеспечивать дополнительное пространственное разрешение с размером бина в 25 м, что позволит различать узкие аллювиальные долины, которые делят породы на песчаные интервалы и междолинные прибрежные фации. Определение свойств песчаников не является нашей первостепенной задачей, однако ответ на вопрос присутствуют ли они или нет поможет дать дополнительную информацию о нахождении возможных песчаных фаций.

При условии, что источником будет единственный заряд динамита в скважине, а запись будет осуществляться с помощью точечных мультikomпонентных приемников, данные будут симметрично дискретизированы за исключением ситуации, когда источник и приемник находятся не в одной плоскости.

Наземная сейсморазведка

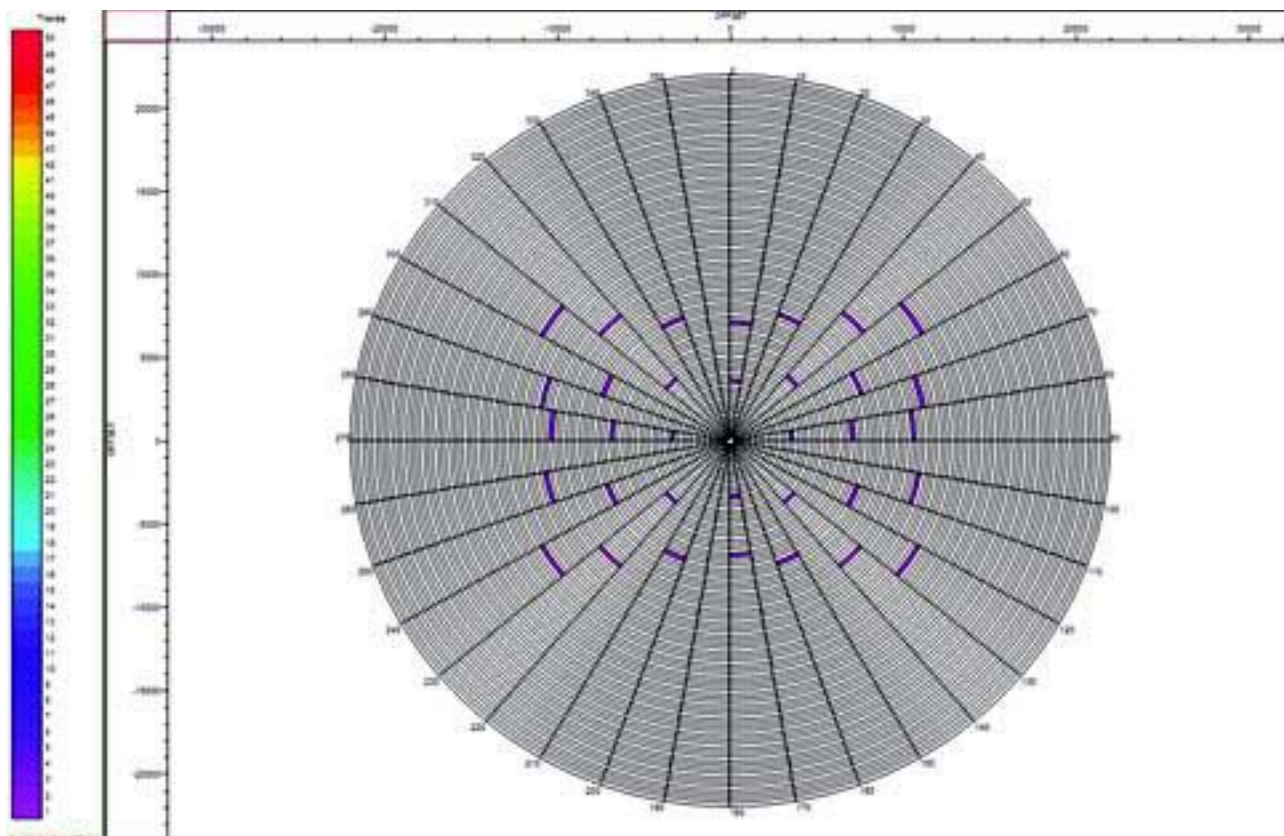


Рисунок 4 Круговая диаграмма обычного бина при стандартной ортогональной съемке. На диаграмме заданы 10° азимутальные сектора и приблизительно 100 м сектора по офсетам с максимальной длиной офсета в 5000 м.

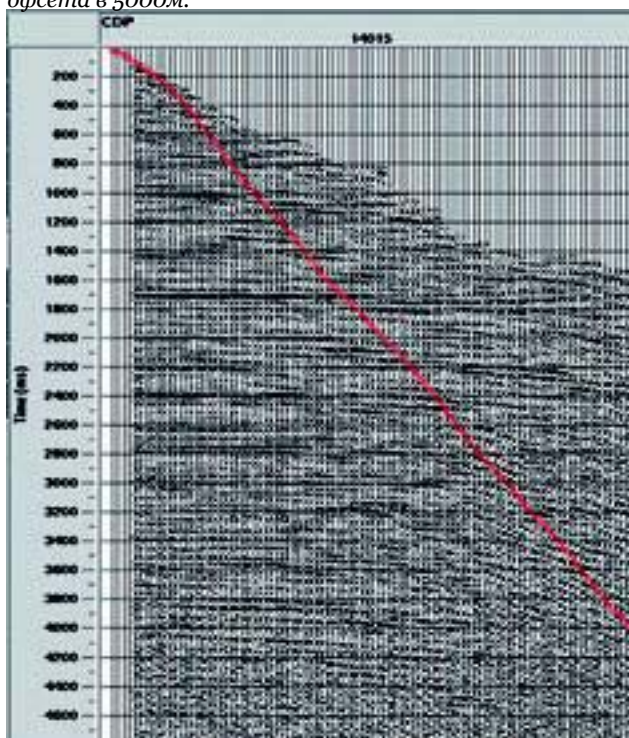


Рисунок 5 Сейсмограмма ОСТ с макробина 9x9. Запись на дальних оффсетах загрязнена сигналом обменных волн. Съемка проводилась на поверхности, представляющей обнажение осадочных пород с низким соотношением V_p/V_s . На дальних оффсетах частицы поверхности колеблются не строго вертикально. Поверхностная волна не представлена, в связи с суммированием по макробину.

В данном случае очень важна симметричная дискретизация, так как данные впоследствии будут подвергнуты анализу на предмет выяснения азимутальных свойств, которые тесно связаны с анизотропией, вызванной разломами, трещинами и локальными скоростными неоднородностями. Несимметричная схема съемки между источником и приемником оказывает неблагоприятное влияние на азимутальное изображение p -волн и может полностью испортить запись обменных волн. Сохранение симметрии способствует использованию достоверной информации, полученной с полноволновых датчиков ЗС, а не обычных сейсμοприемников.

Проведение такой съемки даст возможность получить отличную дискретизацию в традиционном смысле для области приемников, источников и ОСТ. В области офсетов будут присутствовать пробелы, которые требуют интерполяции; хотя количество точек интерполяции будет зависеть от выбранного сектора. Если сектора выбраны правильно, то разрешающая способность и дискретизация по азимутам будет достаточной и без вредного влияния избыточной интерполяции.

Наземная сейсморазведка

Для этой съемки необходимыми требованиями являются расстановка, обеспечивающая 10° сектора с не более чем пятью пропущенными офсетами внутри сектора. При таких ограничениях цель едва ли может быть достигнута при использовании только однократных наблюдений на офсет / азимутальный бин и незначительного дублирования. При суммировании трех смежных ОСТ практически отсутствуют разрывы в области офсетов. Для заполнения пробелов в 10° секторах, использующих данную схему съемки, необходимо было бы заменить удаленные источники и приемники, а этот шаг привел бы к увеличению стоимости съемки в связи с необходимостью добавочного оборудования и повышенных требований к источникам. Другой возможностью является использование дополнительных приемников в съемке для достижения полной дискретизации. Однако это нарушит баланс между усилением на источнике и приемнике, удваивая или учетверяя количество необходимых приемников.

Экономическое решение состоит в том, чтобы расширять азимутальные сектора. Но это может потребовать заполнения пропущенных ячеек офсетов-азимутов и дублирования трасс в некоторых бинах, что может повлечь за собой ненужное дублирование офсетов. В настоящее время мы не можем оценить границы азимутальных секторов; однако, мы хорошо знаем, к чему это может привести из данных обработки до миграции, когда широкие сектора дают неудовлетворительное решение при подстановке

эллиптического решения для скоростей и AVO. Напротив другие виды наземной съемки сосредотачиваются на азимутальной симметрии, записывая направленное волновое поле, и высокой оперативности.

Для получения полnodискретных данных при разумных затратах нефтяные и газовые компании планируют ввести в действие недавно анонсированную систему беспроводной наземной записи FireFly от I/O. Съемка будет производиться в реальном времени с использованием новейших навигационных приборов GPS и LiDAR. В связи с ожидаемым зашумлением данных (вызванным в основном низким соотношением V_p/V_s на поверхности), данные будут записываться, с использованием полноволновых датчиков 3C VectorSeis. Запись многокомпонентных 3C данных позволит обработчику устранять из записи вертикальной компоненты обменные волны. При успешном удалении обменных волн с вертикальной записи, аналогично можно удалить энергию Р – волн с записи горизонтальной компоненты.

Выводы

Следующее поколение наземной съемки будет сосредоточено на получении полnodискретных изображений отраженной сейсмической энергии.

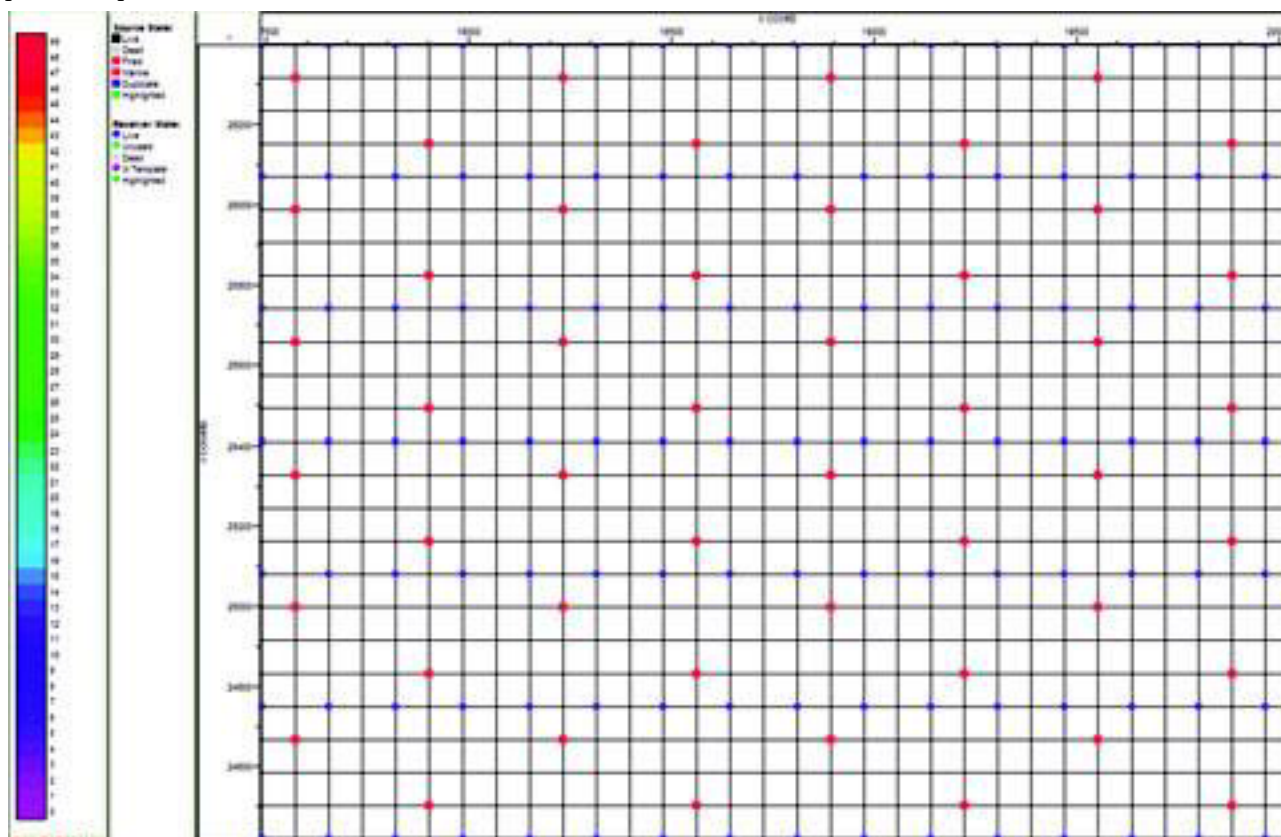


Рисунок 6 Геометрия усеченной полnodискретной съемки. Синие точки соответствуют приемникам, а красные – источникам. Черными линиями показаны границы бинов размером 25 на 25 м

Наземная сейсморазведка

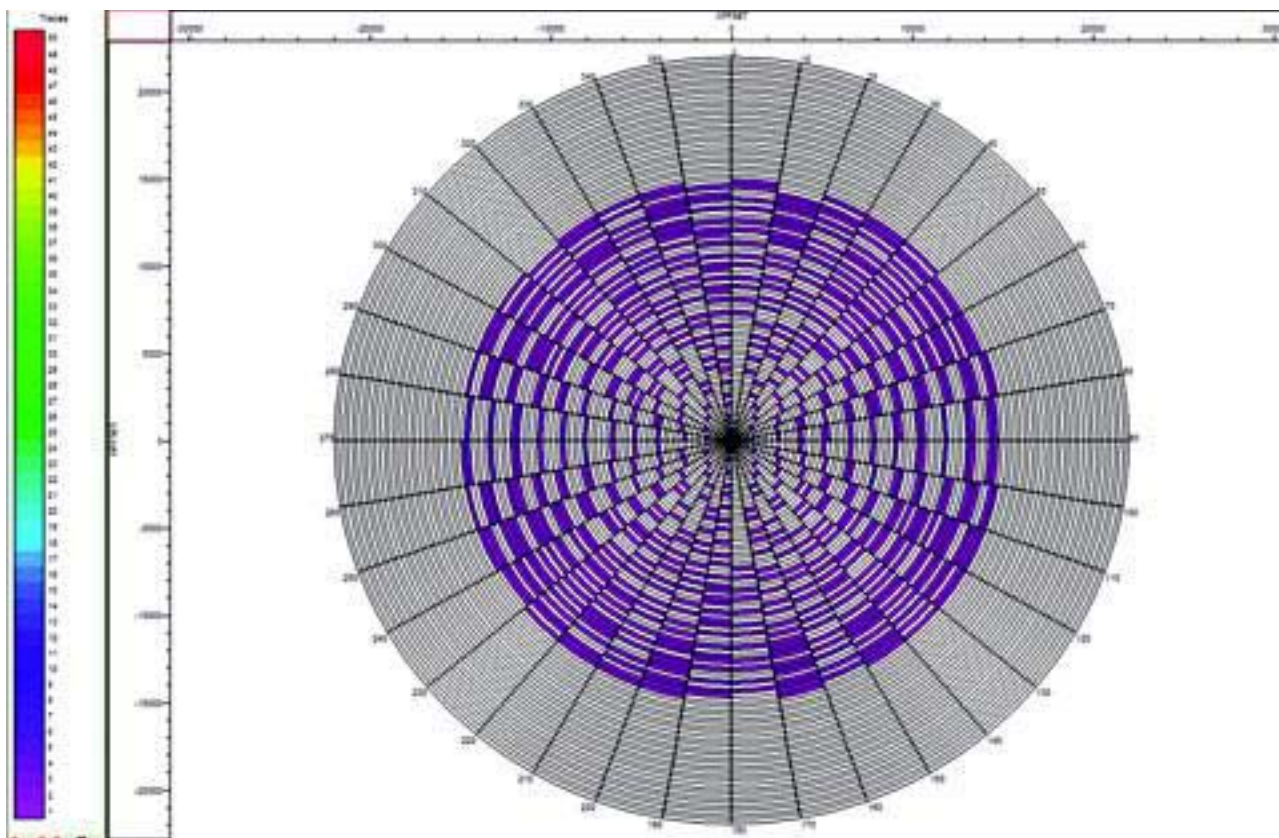


Рисунок 7 Круговая диаграмма обычного бина при усеченной полnodискретной съемке. На диаграмме заданы 10° азимутальные сектора и приблизительно 100 м сектора по офсетам с максимальной длиной офсета в 5000 м.

Это потребует большое количество точек приема и абсолютно новые технологии и методы съемки. Процесс построения изображения отойдет от проблем, связанных с губительными эффектами, ввиду недостаточной дискретизации, и станут еще на один шаг ближе к достижению полной дискретизации сейсмического волнового поля. А пока проектировщики съемки будут продолжать пытаться балансировать между идеальным интервалом дискретизации, шириной азимутального сектора и дискретизации офсетов и стоимостью работ, эти соотношения будут давать различные результаты построения изображения. Увеличение кратности и получение более эффективного суммирования, как результат съемки с полной дискретизацией, будет устранять большинство проблем, связанных с шумом, артефактами миграции до суммирования. Это позволит расширить возможности описания свойств резервуара и сделать еще один большой шаг к торжеству сейсморазведки.

Ссылки

- Jenner, E. [2002] Azimuthal, AVO: Methodology and data examples. *The Leading Edge*, **21**, 8, 782 - 786.
- Vermeer, G. [1990] *Seismic Wavefield Sampling*, *Geophysical Reference 4*. Society of Exploration Geophysicists
- Williams, M. and Jenner, E. [2002] Interpreting seismic data in the presence of azimuthal anisotropy; or azimuthal anisotropy in the presence of the seismic interpretation. *The Leading Edge*, **21**, 8, 771 - 774.
- Hill, S., Shultz, M., and Brewer, J. [1999] Acquisition footprint and fold-of-stack plots. *The Leading Edge*, **18**, 6, 686 - 695.
- Criss, J., Kiger, C., Maxwell, P., and Jim Musser, J. [2005] Full-wave seismic acquisition and processing: the onshore requirement. *First Break*, **23**, 2, 53-61.