

Многодисциплинарный выпуск

Двухуровневная расстановка и обработка данных: новый скачок в сейсмической технологии?

Over/under acquisition and data processing: the next quantum leap in seismic technology?

David Hill, Leendert Combee, и John Bacon, WesternGeco, представляют новую конфигурацию получения данных с помощью буксируемых кос. Они считают, что методика «сверху/снизу» является крупным продвижением в традиционных методиках, которые обеспечивают ранее недостижимые полосы частот, при которых низкочастотные сигналы обеспечивают большую глубинность, и таким образом, улучшенное картирование под базальтами, солями и другими высокопоглощающими покрывающими породами.

В традиционных конфигурациях с морскими буксируемыми косами, неглубоко расположенные источники и кабели увеличивают содержание высоких частот в сейсмических данных, необходимых для разрешающей способности. Однако неглубокие источники и приемники ослабляют низкие частоты, необходимые для стратиграфической и структурной инверсии, и картирования глубоких объектов. Буксирование у поверхности также делает данные более чувствительными к шуму окружающей среды. Напротив, глубоко расположенные источники и кабели подчеркивают низкие частоты, но ослабляют высокие частоты. Вдобавок, данные, записанные посредством буксирования на глубине имеют большее значение отношения сигнал-окружающий шум из-за более благоприятных условий среды. Таким образом, при традиционном дизайне буксируемой косы, пытаются балансировать между этими конфликтующими аспектами и приходят к поиску глубины буксирования источников и кабелей, оптимизирующей полосу частот и отношение сигнал-шум данных для определенной целевой глубины или двойного времени пробега, обычно ценой других более мелких или глубоких объектов.

Конфигурация буксирования кос «сверху/снизу» - это метод получения сейсмических данных, при котором кабели обычно буксируются попарно на двух различных глубинах, при этом один кабель находится над другим. Глубины этих пар кабелей обычно значительно превышают глубины при традиционных конфигурациях. В связи с этими спаренными кабелями возможно вести регистрацию данных парными источниками на двух различных глубинах. И снова отметим, что глубины этих спаренных источников обычно значительно превышают те, которые используются при традиционных конфигурациях буксировки.

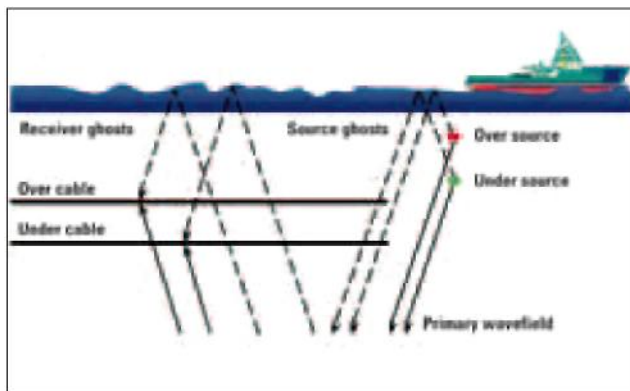


Рисунок 1 Конфигурация получения данных 2D типа сверху/снизу.

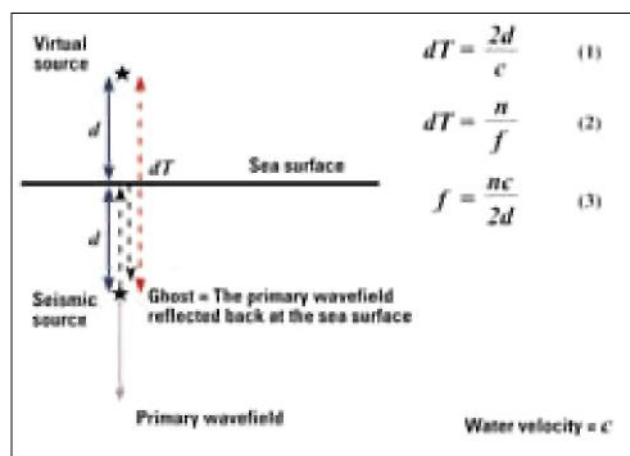


Рисунок 2 Простое получение волн-спутников 1D.

Сейсмические данные, записанные с помощью конфигурации «сверху/снизу» объединяются при обработке данных в один набор данных, который отличается тем, что более высокочастотный в отличие от традиционных данных, записанных на малых глубинах буксировки и более низкочастотный по сравнению с традиционными данными, записанными при больших глубинах буксировки. Этот процесс комбинации обычно в геофизической литературе называется подавлением волн-спутников.

Пользу от использования методики «сверху/снизу» по сравнению с традиционными методами можно обозначить как:

- Значительно более широкий частотный диапазон сигналов, благодаря чему низкочастотное содержимое дает более глубокое проникновение, и таким образом, улучшенное картирование под базальтами, солями и другими высокопоглощающими покрывающими породами. Более того, расширение полосы частот в сторону более низких частот делает сейсмическую инверсию менее зависимой от методов, основанных на моделях:
- Более простой импульс с увеличением полосы частот в сторону повышения частот дает эффект увеличения разрешения, что позволяет проводить более детальную стратиграфическую интерпретацию
- Более высокое отношение сигнал/окружающий шум в результате большего заглубления пар буксируемого кабеля
- Более широкий диапазон погодных условий благодаря парам кабеля глубокой буксировки.
- Потенциальные будущие преимущества данных «сверху/снизу» можно очертить следующим образом:

Многодисциплинарный выпуск

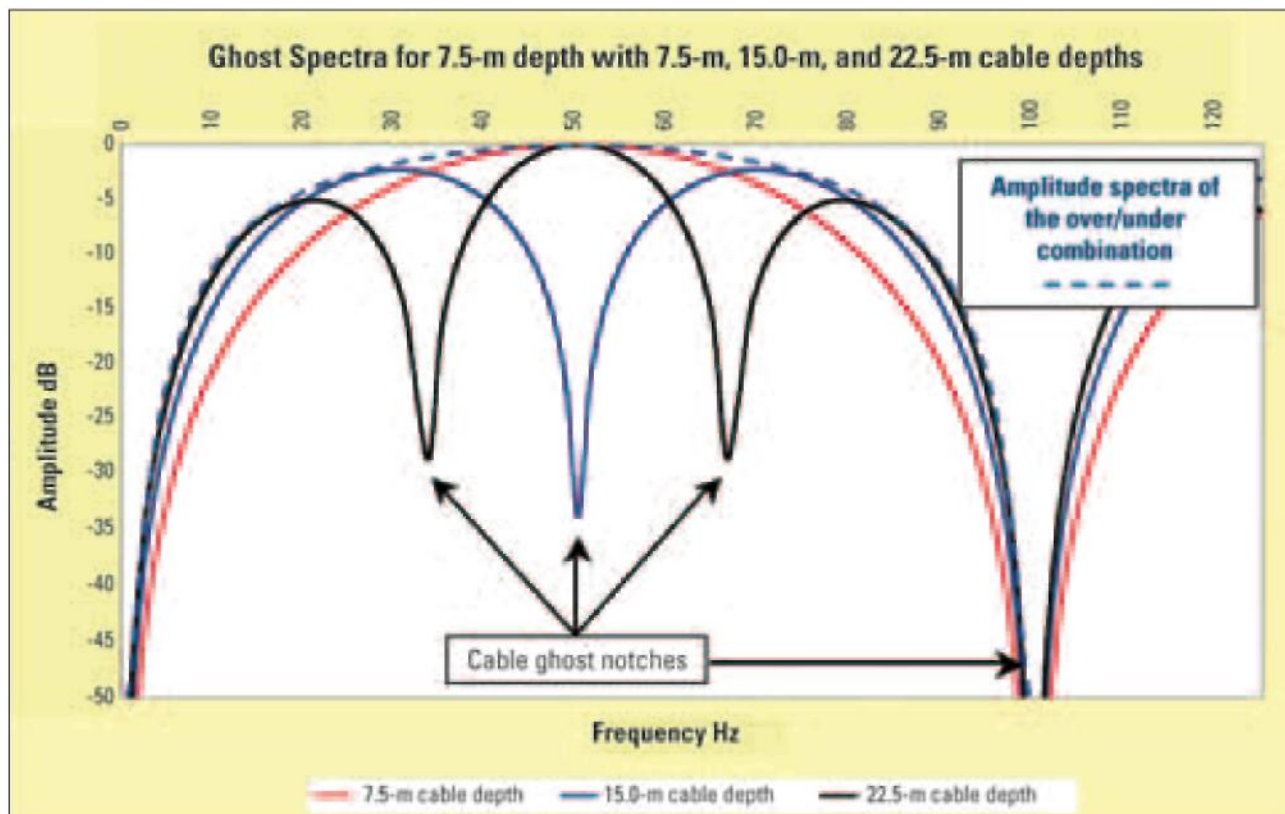


Рисунок 3 Амплитудный спектр отклика волн-спутников для источника на глубине 7.5 м и глубине приемников 7.5 м, 15 м, и 22.5 м.

Деструктивная интерференция дает возможность режекции спектра, тогда как конструктивная интерференция ведет к образованию максимумов.

- Получение возможности подавления кратных волн на буксируемом кабеле как в данных, получаемых океаническим донным кабелем
- Устранение эффектов влияния поверхности на морские данные из данных 3D, что, таким образом, улучшает повторяемость данных 4D.

Концепция

Концепция методики получения данных типа «сверху/снизу» была известна и понятна начиная с середины 1980х. Сначала эта технология была предложена Sønneland и Berg (1985) и спустя некоторое время впервые опробована Geco-Prakla в Баренцевом море. Эта первая попытка не была удачной, поскольку два кабеля не удалось удерживать вертикально спаренными. Недавнее коммерческое использование методики типа «сверху/снизу» стало возможным путем разработки управляемого кабеля Q-Marine. Системы управления, связанные с кабелем, способны удерживать кабели «сверху/снизу» в горизонтальном положении и вертикально выравнивать один над другим в пределах незначительного отклонения, что требуется для корректной работы системы.

Запись данных сейсмического поля на двух различных глубинах разрешает использовать несколько новейших сейсмических приложений. Одно из таких приложений, и основная тема нашей статьи, это увеличение полосы частот и получение простого сейсмического импульса, получаемого с помощью устранения волн-спутников источника и приемника путем комбинации «сверху/снизу».

На рисунке 1 дано схематическое изображение геометрии «сверху/снизу», со спаренными источниками и спаренными кабелями на двух разных глубинах. Поле волн излучается из источника и не только перемещается вниз, но и попадает наверх. Из-за того, что поверхность моря отличается высоким акустическим импеданс-контрастом на границе воздух/вода, она действует как зеркало, и поле волн, перемещающееся вверх, отражается обратно от поверхности моря с противоположной полярностью. Это отражение вниз называется волной-спутником источника, и оно интерферирует сложным образом с распространяющимся вниз полем волн, добавляя коду к первичному импульсу, идущему вниз. Это сложное поле, распространяющееся вниз, затем отражается от поверхности и становится сложным полем, распространяющимся вверх и попадает на сейсмическую косу. Поле идущее вверх также отражается от поверхности моря и дает волну-спутник приемников, которая также интерферирует сложным образом с распространяющимся вверх полем волн, снова добавляя коду первичному импульсу. Эта сложная интерференция волн-спутников источника и приемника с сейсмическим полем, добавляя коду к первичному сейсмическому импульсу, является ключевым фактором, ограничивающим разрешение сейсмических данных.

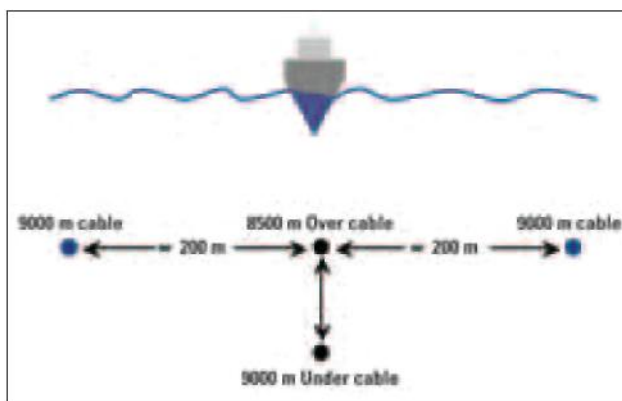
На рисунке 2 показана концепция образования 1D волны-спутника источника, где распространение волнового поля нормально к поверхности моря. Время задержки волны-спутника – время пробега от источника до поверхности и обратно, т.е. общее расстояние, деленное на скорость звука в воде (уравнение 1).

Многодисциплинарный выпуск

Поскольку полярность поля волн, отраженных от поверхности моря, обращена, если время задержки волны-спутника эквивалентно целому числу периодов на той же частоте 'f' (уравнение 2), то волна-спутник и нисходящее поле волн будут деструктивно интерферировать на этой частоте. Из уравнения 3, очевидно, что на частотах, кратных целому числу функции глубин источника, эта деструктивная интерференция ведет к режекции частотного спектра первичного поля волн. Подобным образом, если время задержки кратно нечетному целому числу половин длин волн на некой частоте 'f', то конструктивная интерференция будет происходить на этой частоте и приводить к образованию максимумов частотного спектра первичного поля волн. Эта частотно-зависимая конструктивная и деструктивная интерференция действует как полосовой фильтр и является ключевым фактором при ограничении полосы частот сейсмических данных.

В качестве альтернативы, рассмотрим случай виртуального источника, Рисунок 2, на высоте 'd' над поверхностью моря, эквивалентной глубине 'd' сейсмического источника ниже поверхности моря. Волновые поля распространяются как от реального, так и от виртуального источников одновременно. Однако распространение поля от виртуального источника имеет

Рисунок 4 Геометрия системы наблюдения 2D типа «сверху/снизу».



полярность, противоположную полю от реального источника, что вызывает обращение полярности поля волны-спутника, отраженного от поверхности моря. Затем время задержки спутника можно выразить как функцию расстояния между виртуальным и реальным источниками.

На рисунке 3 представлена схема амплитудного спектра поля волн, распространяющегося перпендикулярно к поверхности моря, на спектре вырезаются волны-спутники приемника на частотах, задающихся уравнением 3 (Рисунок 2) для глубин кабеля 7.5 м, 15 м, и 22.5 м.

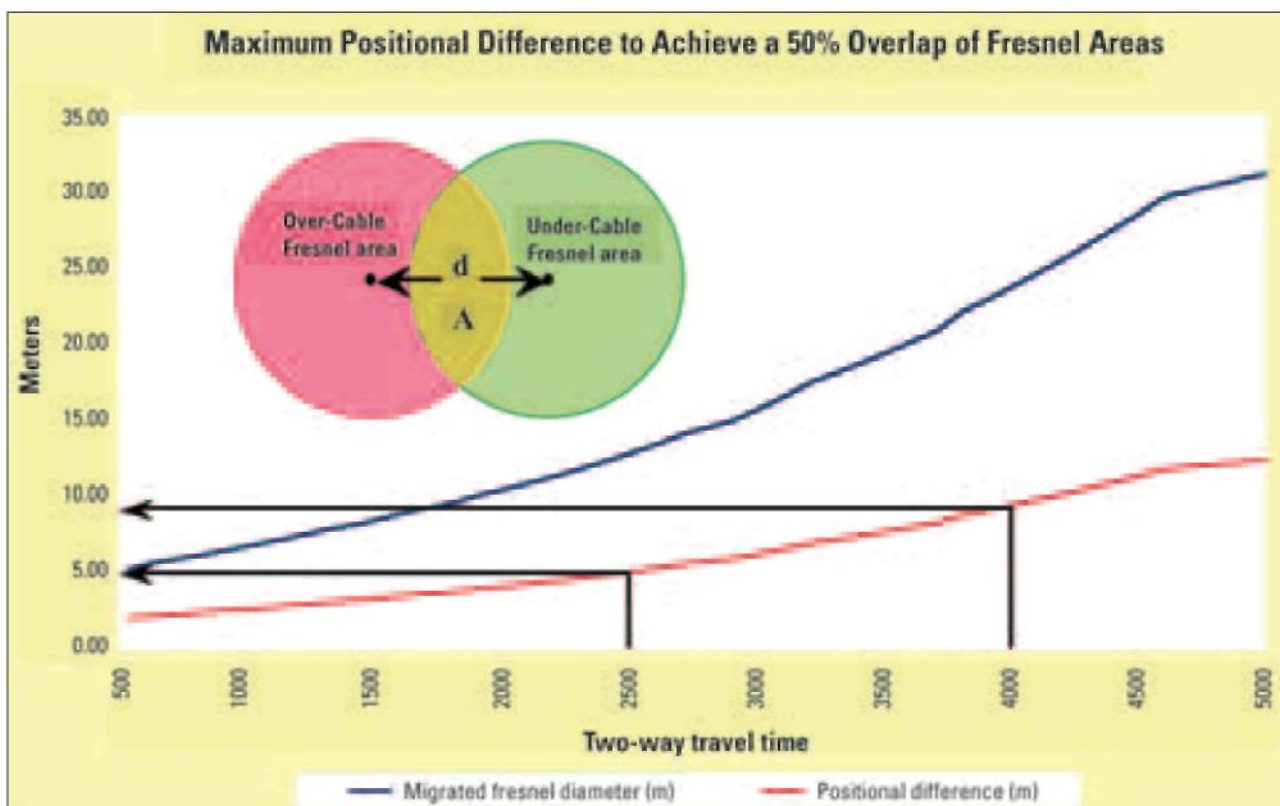
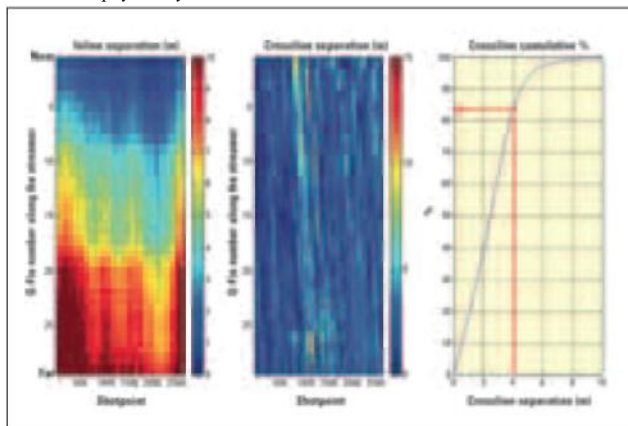


Рисунок 5 Пример концепции зоны Френеля. Красные и зеленые кружки представляют мигрированные зоны Френеля для данных, записанные на кабелях сверху и снизу, соответственно. Синей линией является переменный во времени диаметр зоны Френеля. Желтым обозначена область наложения 'A' когда центры зон Френеля разделены некоторым расстоянием 'd'. Красная кривая – разница 'd' положений центров двух зон Френеля, которая уравнивает области 'A' и равна 50% от площади поверхности одной зоны Френеля.

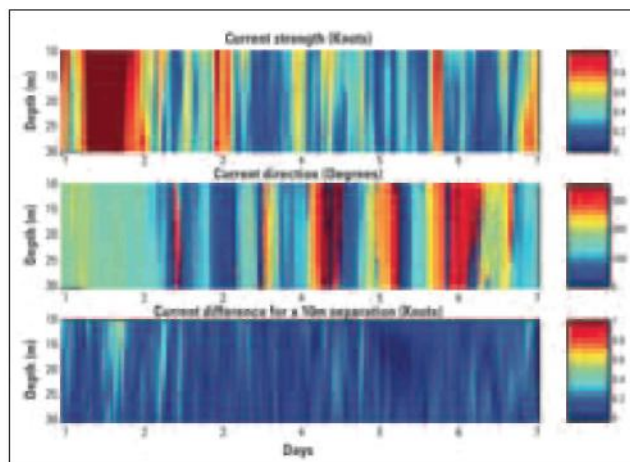
Многодисциплинарный выпуск

Рисунок 6 Диагностика разности позиций по инлайну и кросслайну для одного профиля 2D «сверху/снизу», взятая из недавней съемки типа «сверху/снизу».



Основным принципом комбинирования «сверху/снизу», является использование данных, записанных двумя глубокими кабелями (в этом примере) для разделения волнового поля на компоненты восходящие и нисходящие. Восходящая компонента – это первичное поле; нисходящая компонента – отражение-спутник от свободной поверхности. Поле восходящих волн имеет более простой сейсмический импульс и его спектр свободен от спутников, имеет более широкую полосу частот, чем это достигается традиционной конфигурацией буксируемых кос.

Рисунок 7 Сила и направление течения, измеренные как функция глубины ниже поверхности моря.



Были предложены различные методы для подавления спутников с помощью конфигурации «сверху/снизу». Они включают методы Sønneland et al. (1986), Posthumus (1993), Amundsen (1993), Singh et al. (1996), и Weglein et al. (2002). Далее в этой работе мы использовали методику Posthumus (1993) для комбинации типа «сверху/снизу» как кабелей, так и источников. Этот метод относительно устойчив, но требует явного задания нескольких переменных, о которых мы поговорим позже.

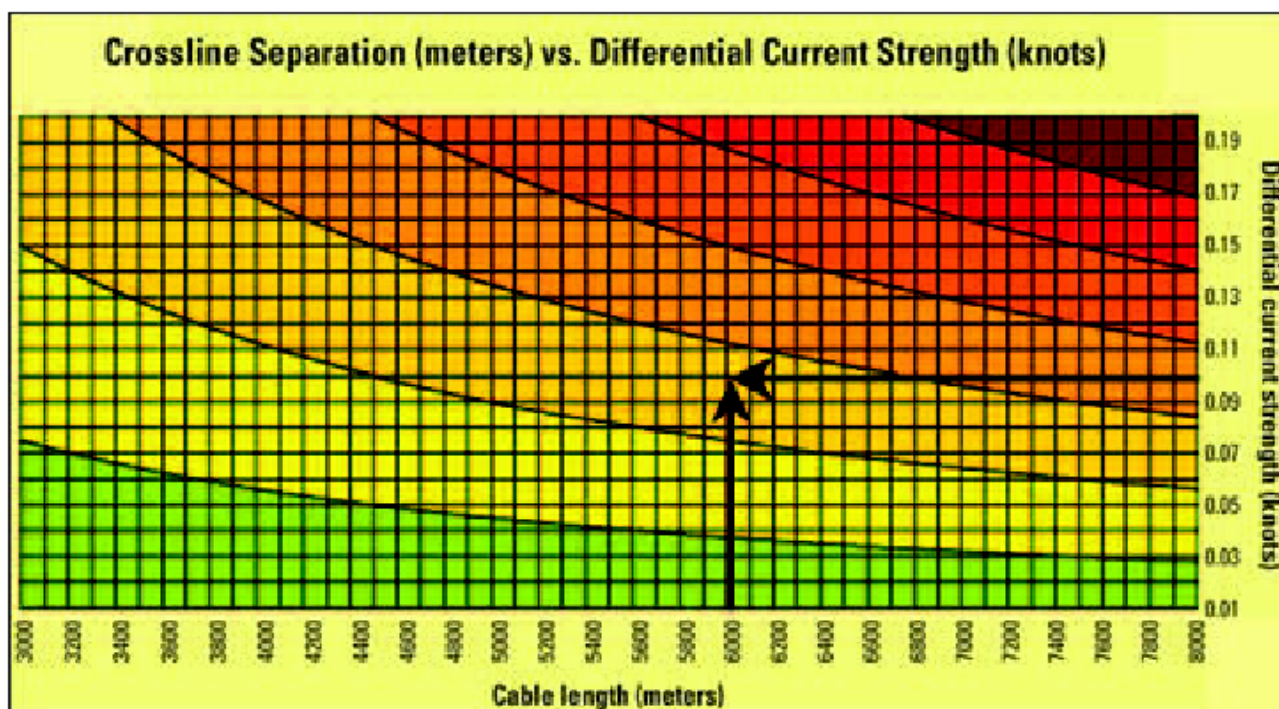


Рисунок 8 Интервал между кросслайнами в метрах для самых дальних офсетов пары кабелей «сверху/снизу», для длин кабеля от 3000 м до 8000 м (ось X) и для дифференциальной силы течения от 0 узлов до 0.5 узлов (ось Y без какого-либо управления косой).

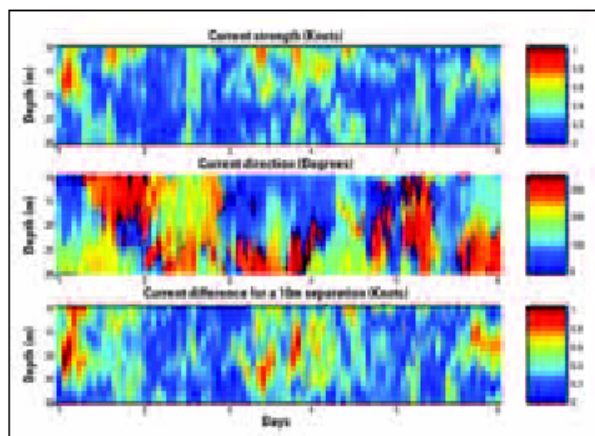


Рисунок 9 Второй пример силы и направления течения, измеренного как функция глубины под поверхностью моря.

Амплитудный спектр данных, получаемых при подавлении спутников расстановкой типа «сверху/снизу» с помощью методики Posthumus (1993) является взвешенной суммой амплитудного спектра в наборах данных расстановки сверху и снизу. Веса максимизируют вклад сигнала от каждого набора данных расстановки снизу и сверху при суммировании. Получающийся спектр без волн спутников имеет режестку спутников и его полоса частот расширяется до максимальной частоты, задаваемой первой вырезкой волны-спутника или гармоникой, общей для всех глубин источников и кабелей. Спектр данных без волн-спутников от комбинации кабеля «сверху/снизу» с глубинами кабеля 15 м, и 22.5 м, шире, чем спектр данных традиционных буксируемых конфигураций, при которых кабель буксируется на глубине 7.5 м, эквивалентной расстоянию между кабелями в системе «сверху/снизу», Рисунок 3.

Размышления на тему сбора данных

Геометрия наблюдений 2D «сверху/снизу» отражена на Рисунке 4 и содержит 4 кабеля: пара кабелей «сверху/снизу» и один кабель, буксируемый с одной из сторон пары «сверху/снизу» для обеспечения акустической сети позиционирования, необходимой для определения положения верхнего и нижнего кабелей. Опубликованные методики подавления волн-спутников требуют, чтобы поле волн, зарегистрированных кабелем сверху, соответствовало полю волн, записываемому нижним кабелем с временной задержкой. При работе, это означает, что кабели нижний и верхний надо держать на постоянной глубине с постоянным расстоянием по вертикали и без латерального смещения. Следовательно, основными требованиями к системе регистрации «сверху/снизу» является выравнивание кабелей по вертикали один над другим и поддержание выравнивания в вертикальной плоскости на протяжении всей съемки. На практике это требование невыполнимо; таким образом, требуется прагматический подход к практически допустимому латеральному смещению. Концепция зон Френеля позволяет нам достигать допустимых величин.

При заданной представительной переменной во времени кривой спада максимальной частоты и соответствующей представительной функции скорости,

Многодисциплинарный выпуск

Можно рассчитать мигрированный диаметр зоны Френеля как функцию двойного времени пробега. Если нам потребуется, чтобы площадь поверхности мигрированной зоны Френеля для данных, записанных верхним кабелем, имел более 50% перекрытия с площадью поверхности мигрированной зоны Френеля для данных, записанных нижним кабелем, мы можем рассчитать евклидово кодовое расстояние между центрами зон Френеля, которое удовлетворяет этому критерию наложения и дает практически приемлемый допуск.

Как можно видеть из Рисунка 5, для того, чтобы критерий зоны Френеля удовлетворялся, центры зон Френеля – общие средние точки – должны быть на расстоянии менее 10 м; для достижения целевого двойного времени пробега 4.0 с, или 5 м для достижения целевого двойного времени пробега 2.5 с. Поскольку координаты источника общие для поля волн, записанного обоими кабелями, евклидово кодовое расстояние между координатами приемника не должно превышать 20 м для глубоких целей и 10 м для неглубоких целей.

На Рисунке 6 показаны характеристики управления перемещением для стандартных расстановок «сверху/снизу». Рисунок слева показывает расстояние по инлайну между соответствующими устройствами управления кривой Q-Fin на обоих кабелях. В головной части кабеля (ближе к судну), расстояние по инлайну между соответствующими позициями устройств подруливания на паре верхнего и нижнего кабелей близко к нулю. Однако, расстояние по инлайну возрастает как функция положения устройства подруливания вдоль двух кабелей. Из практических соображений нижний кабель слегка длиннее верхнего (Рисунки 4 и 10) таким образом, чтобы хвостовые буй, свободно плывущие на концах каждого из кабелей, не задевали друг друга при поворотах профиля. Как следствие их разной длины, нижний кабель находится под большим давлением, чем верхний кабель и таким образом, растягивается немного больше. Также, небольшие различия в балласте могут вносить различия в позицию по инлайну. Однако, более короткий интервал группирования 3.125 м в косе позволяет правильно выравнивать положения датчиков верхнего и нижнего кабелей по вертикали при обработке данных, таким образом, убирая различия в положениях по инлайну.

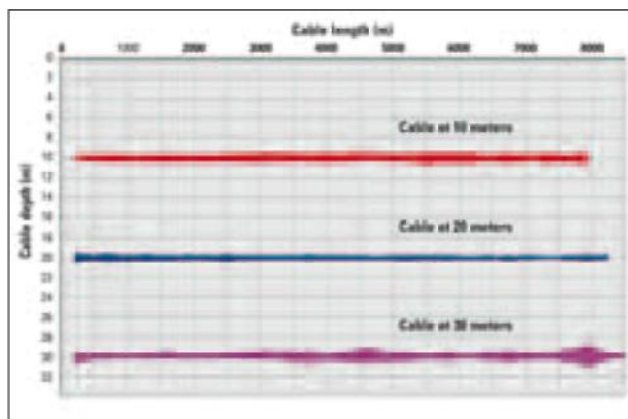


Рисунок 10 Информация о каждом устройстве управления для экспериментальной трех-кабельной конфигурации типа «сверху-снизу». На этом рисунке, информация о глубине кабеля для ПВ 2500 отображается с наложением одна над другой.

Многодисциплинарный выпуск

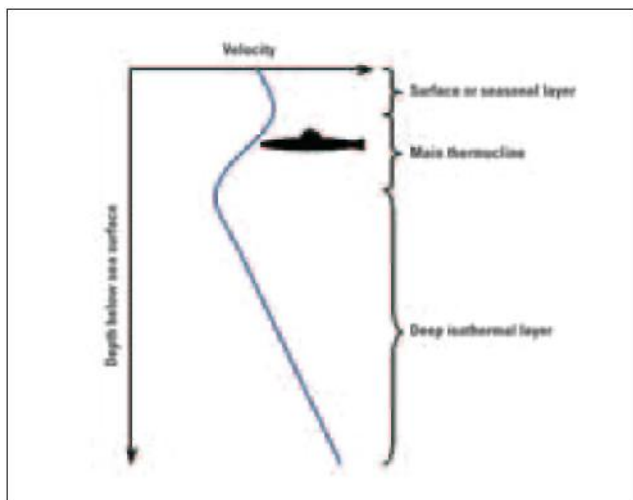


Рисунок 11 Общий профиль скорости звука (SVP) взятый в Федерации Американских Ученых / Аналитическая военная сеть / Флот США / Введение в морское ракетное конструирование / Распространение звука.

График в центре рисунка 6 отображает расстояние по кросслайну между соответствующими позициями устройства управления верхнего и нижнего кабелей; в этом примере, разница в положениях по кросслайну значительно менее 5 м. Обобщенная кривая распределения по кросслайну приведена справа от рисунка 6, и почти на 84% траектории, разница в положениях по кросслайну 4 м и менее.

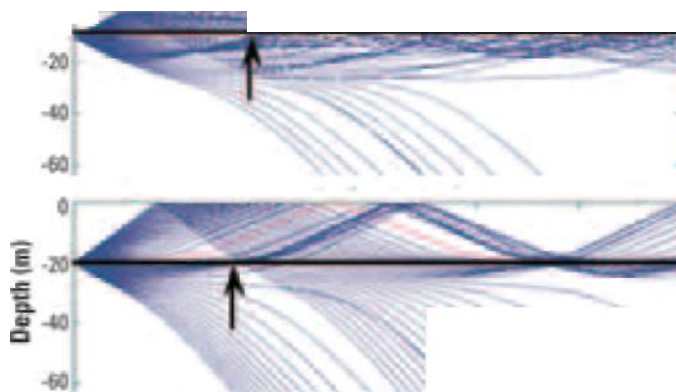
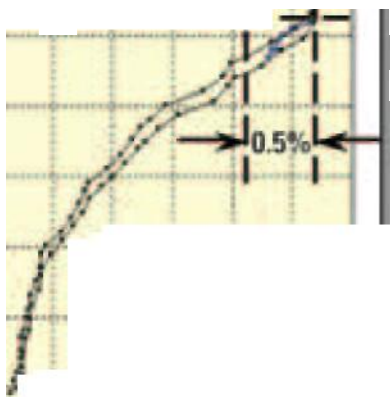


Рисунок 12 Кривая измеренной скорости звука на акватории Западной Африки с путями трассированных лучей для акустического диапазона при глубинах кабеля 10 м, 20 м, и 30 м.

Диагностика, недавно полученная при съемках типа «сверху/снизу», указывает на то, что характеристики контроля положения кос в норме и находятся в пределах допуска, необходимого для того, чтобы методика «сверху/снизу» была работоспособна.

Поддержание этой степени управления кабелем на таких малых глубинах буксировки не тривиально, потому, что два существенных фактора окружающей среды влияют на методику «сверху/снизу», которые не воздействуют на традиционную систему наблюдения с одним кабелем. Первый – это изменение течения как функции глубины под уровнем моря. Второй – изменение скорости звука в воде как функция глубины под уровнем моря.

На рисунке 7 показаны вариации в течении как функция глубины за семидневный период в Мексиканском заливе. На верхнем графике отражена сила течения в узлах как функция глубины от 10 м до 30 м; за зарегистрированный интервал, сила течения варьируется от 0 до 1 узла. На центральном рисунке проиллюстрировано то, что направление течения поворачивается на 360° за менее, чем один день. На нижнем рисунке показано различие в силе течения на интервале в 10 м, где вершина интервала 10 м меняется по глубине от 10 м до 30 м (ось Y). В этом примере, дифференциальная сила течения меняется от 0 до 0.4 узла на каждый интервал в 10 м. Это показывает дифференциальную силу течения между верхним и нижним кабелями, которую нужно учитывать при использовании контроля положения кос. Т.к. дифференциальная сила течения существенно не зависит от глубины, не существует оптимальной глубины для разворачивания нижнего и верхнего кабелей с целью минимизации усилий управления косой.

Многодисциплинарный выпуск

Из рисунка 8, можно видеть, что для градиенте течения 0.1 узла, дальние офсеты кабеля 6000 м будут отстоять по латерали на 133 м (в предположении о том, что скорость судна 4.5 узла). Для градиента течения 0.2 узла, дальние офсеты кабеля 8000 м будут отстоять по латерали на 355 м. Таким образом, даже для благоприятного режима течений, который наблюдается в Мексиканском заливе, где дифференциальный градиент течения не превышает 0.4 узла, методика «сверху/снизу» не будет возможной без помощи регулировки положения косы. Из рисунка 8 также можно видеть, что по мере возрастания длины пары кабелей сверху/снизу, растут также требования к управлению косой.

Рисунок 9 иллюстрирует вариации течения в зависимости от глубины за шестидневный период на акватории Западной Африки. Как и на Рисунке 7, верхний график показывает силу течения, средний - направление течения, нижний - дифференциальную силу течения на интервале в 10 м. Но в отличие от Рисунка 7, все три из показанных атрибутов говорят о значительной вариации как функции времени, и что более важно, глубины. В этом

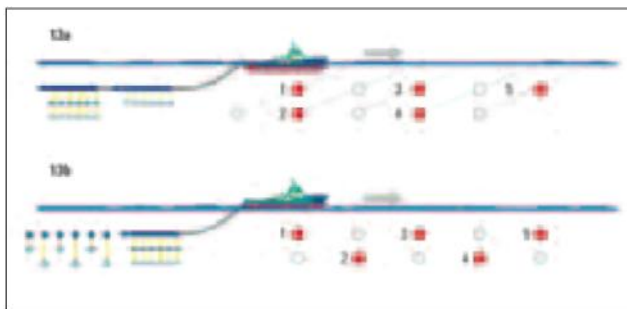


Рисунок 13 Примеры конфигураций источника сверху/снизу: (a) расстановка источников в шахматном порядке по инлайну снизу/сверху, где нижний источник буксируется за верхним источником. Источники подрываются в режиме flip-flop при совпадающих физических положениях источников как показано красными и белыми кружками. (b) двухуровневая расстановка источников снизу и сверху, верхние и нижние источники переменяются в расстановке. Верхние и нижние источники подрываются в режиме flip-flop.

примере, дифференциальная сила течения меняется от 0 до 1.0 узла на интервале глубин 10 м. Поскольку дифференциальная сила течения значительно варьируется как функция глубины,

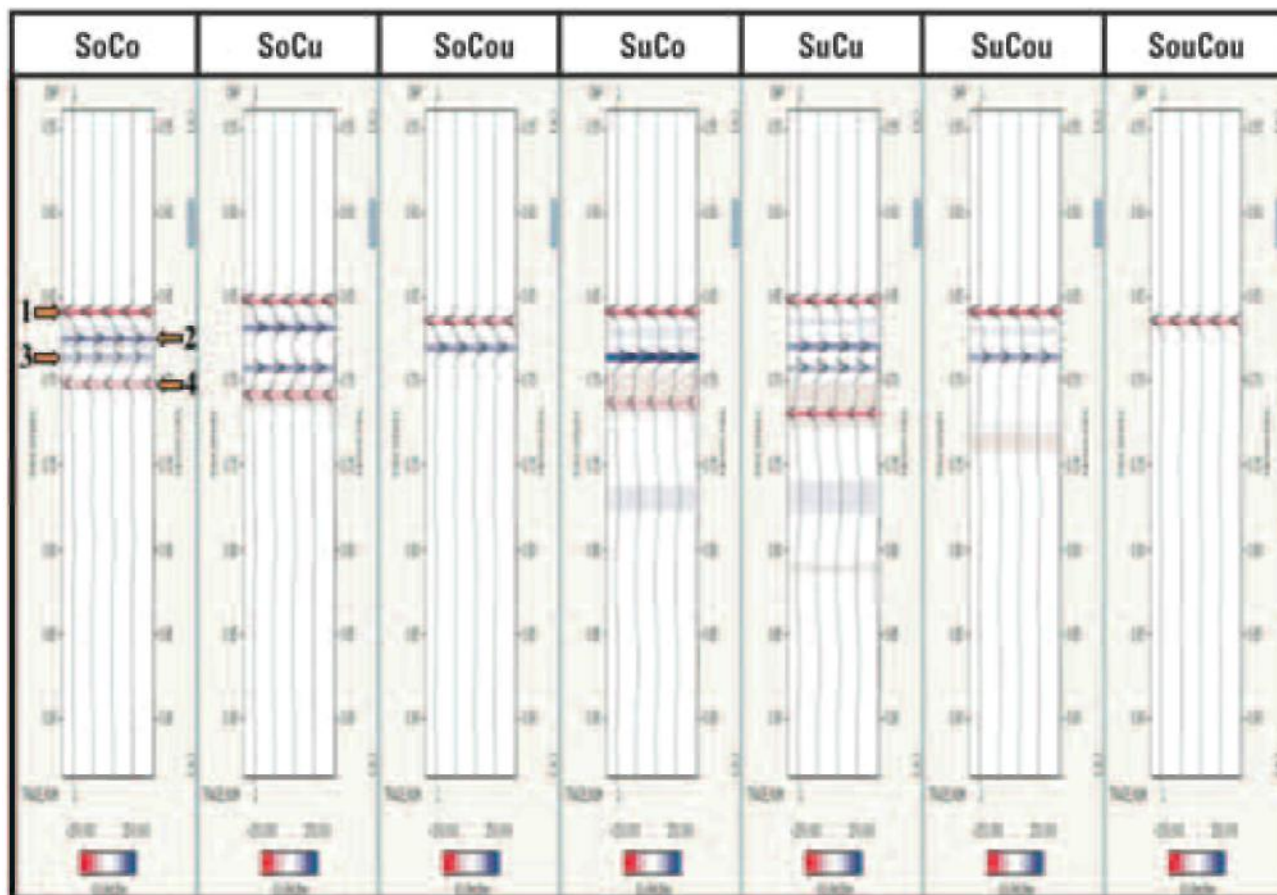


Рисунок 14 1D графическое представление цикла обработки данных, с целью подавления спутников источника и приемника расстановкой типа «сверху-снизу».

Многодисциплинарный выпуск

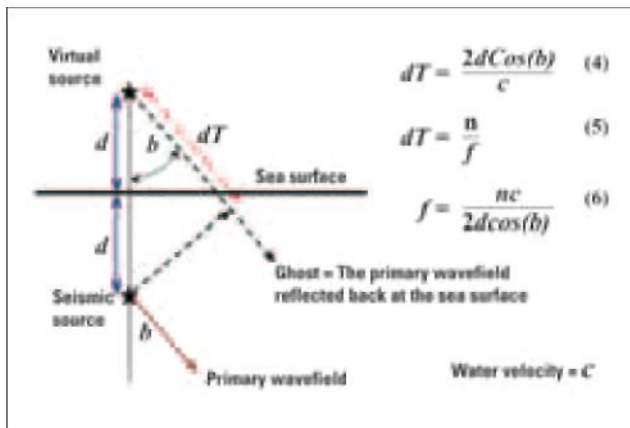


Рисунок 15 Простое образование 1D волны-спутника источника из рисунка 2, расширенное до более общего 2D случая.

Не существует оптимальной глубины, на которой можно развертывать верхний и нижний кабели для минимизации работы системы управления косой.

Как можно видеть из Рисунка 10, почти вся информация о глубине для трех кабелей попадает в ± 0.5 м желаемых глубин кабеля. Это как раз в пределах стандартных требований традиционных систем регистрации с буксируемыми косами и демонстрирует то, что латеральное управление кабелем при этих режимах течений, зависящих от глубины, не достигается за счет управления глубиной кабеля. На рисунке 10 также показано увеличение длины кабеля как функция глубины кабеля.

Способность регулировать кабель основывается на знании положения кабеля в трех направлениях. Определение позиции кабеля зависит от точности акустической сети, используемой для определения положения кабеля. Это, в свою очередь, является функцией точности акустических диапазонов между акустическими передатчиками и приемниками, развернутыми вдоль кабеля, а диапазоны зависят от скорости звука в воде. К сожалению, эта скорость не постоянна как функция глубины воды. Вариация скорости с глубиной называется профилем скорости звука (SVP) и широко изучалась моряками всего мира в целях сделать подводные лодки недоступными для обнаружения радаром. SVP имеет три слоя: 1) поверхностный или сезонный слой, 2) основной термоклин, и 3) глубокий изотермальный слой; они проиллюстрированы на рисунке 11. Благодаря тому, что буксировка проходит на нескольких глубинах, траектории лучей акустической сети в конфигурации сверху/снизу, испытывают гораздо больший диапазон скорости звука в воде по сравнению с традиционной однокабельной конфигурацией.

На левом графике на рисунке 12 показан SVP с акватории Западной Африки. В сезонном слое, градиент скорости растет как функция глубины под поверхностью моря, и следовательно, акустическая энергия распространяется вверх. В основном термеклине, градиент скорости уменьшается как функция

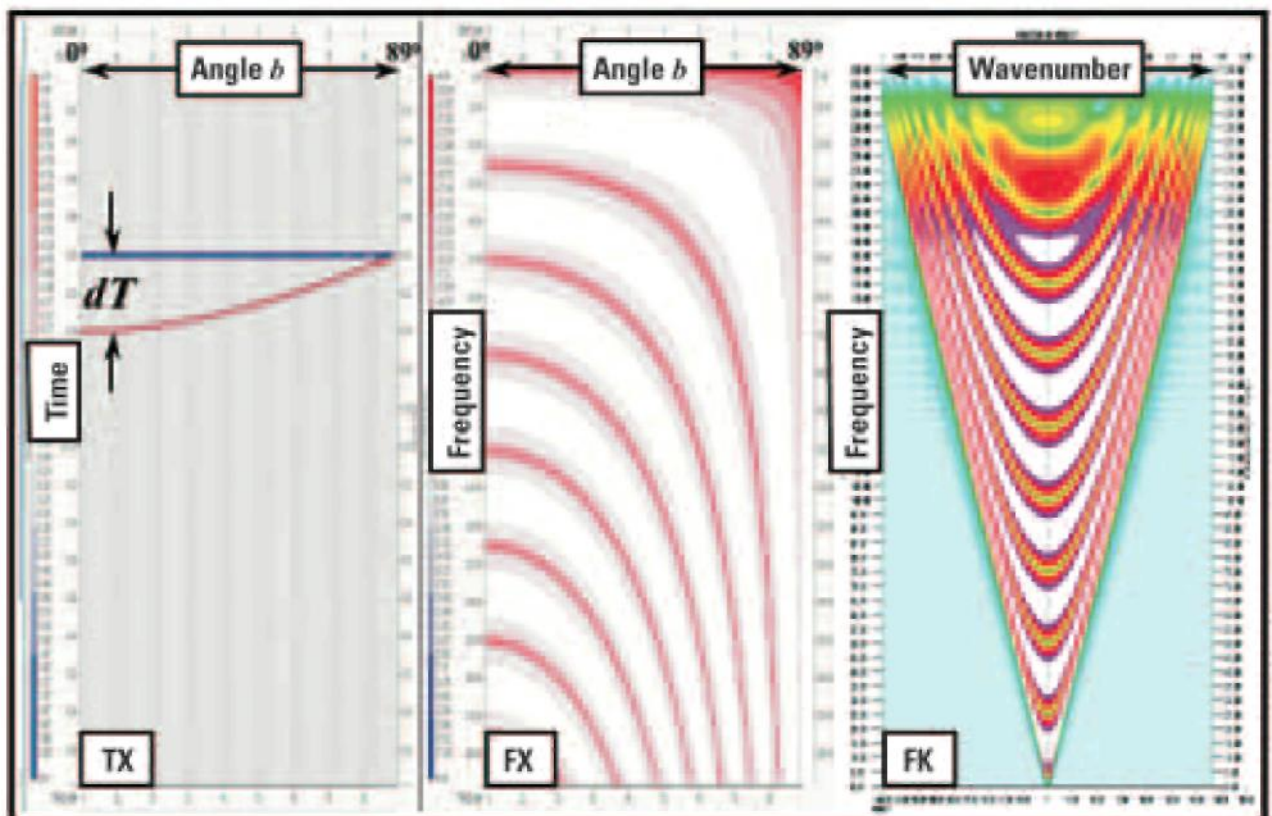


Рисунок 16 2D отклик волны-спутника, полученной на рисунке 15, отображенный в трех областях обработки данных.

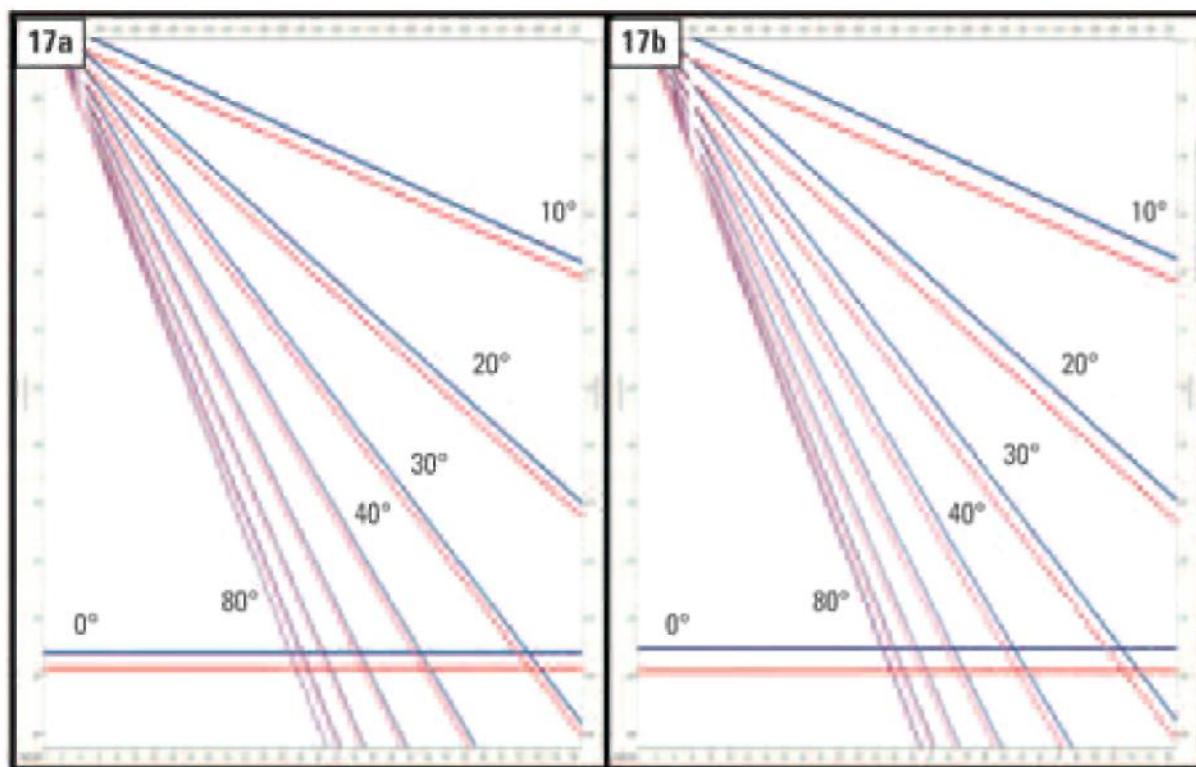


Рисунок 17 Модель типа клин с девятью отражающими границами под углом от 0° до 80° с инкрементом 10° . Рисунок 17a отображает отклик волны-спутника 2D для кабеля на глубине 20 м, свернутый с моделью. На рисунке 17b отображен 2D отклик волны-спутника для глубины кабеля 30 м, свернутый с моделью. Как можно видеть из обоих графиков, по мере того как возрастает наклон, задержка волн-спутников 'dT' на Рисунках 15 и 16 уменьшается.

глубины под поверхностью моря, и, следовательно, акустическая энергия распространяется вниз. Верхний, средний и нижний графики в правой части рисунка 12 отображают траекторию акустического луча при глубинах кабеля 10 м, 20 м, и 30 м, соответственно. На правом верхнем рисунке показана траектория распространения акустического луча от источника, расположенного на нулевом удалении для глубины кабеля 10 м. Из траекторий лучей ясно видно, что прямой акустический сигнал от источника при нулевом удалении будет принят в диапазоне 350 м; диапазон распространения вдоль оси X. Для кабеля на глубине 20 м, траектория распространения говорит о том, что будут регистрироваться только отражения от морской поверхности при удалениях более 300 м. Однако, для глубин кабеля 30 м, сильный прямой акустический сигнал будет записан при удалениях до 100 м, при этом сила акустического сигнала будет быстро уменьшаться по мере возрастания удаления, будут регистрироваться только отражения от морской поверхности при удалениях свыше 500 м. Следовательно, для точного определения положения кабеля на глубине, и таким образом, для того, чтобы работала схема наблюдений типа «сверху/снизу», требуется плотная сеть акустических источников и приемников.

Принципы конфигурации источников схемы «сверху/снизу» такие же, как и для кабеля. Две расстановки источников буксируются за сейсмическим судном на

разных глубинах. В идеале две расстановки источников располагаются в шахматном порядке по инлайну таким образом, чтобы при возбуждении в режиме floor-floor нижний источник срабатывал в положении предыдущего ПВ верхнего источника, смотрите Рисунок 13a. Альтернативный метод возбуждения при получения сейсмических данных типа «сверху/снизу» проиллюстрирован на Рисунке 13b. Здесь верхний и нижний источники являются частью одной и той же расстановки источников при положении пневмопушек в четной и нечетной последовательностях, буксируемых на разных глубинах. Снова, два источника возбуждают в режиме flip-floor.

Обработка данных

Для того чтобы пояснения к обработке данных расстановки «сверху/снизу» были лаконичными, будем использовать следующие акронимы:

- So: верхний источник
- Si: нижний источник
- SuCo: нижний источник, верхний кабель
- SuCou: нижний источник, комбинация кабелей верхнего/нижнего
- SouCou: комбинация источников верхнего/нижнего, комбинация кабелей верхнего/нижнего

Обычная схема обработки данных для расстановки сверху/снизу приведена ниже. Детали процедур будут меняться в зависимости от географического положения, в зависимости от

Многодисциплинарный выпуск

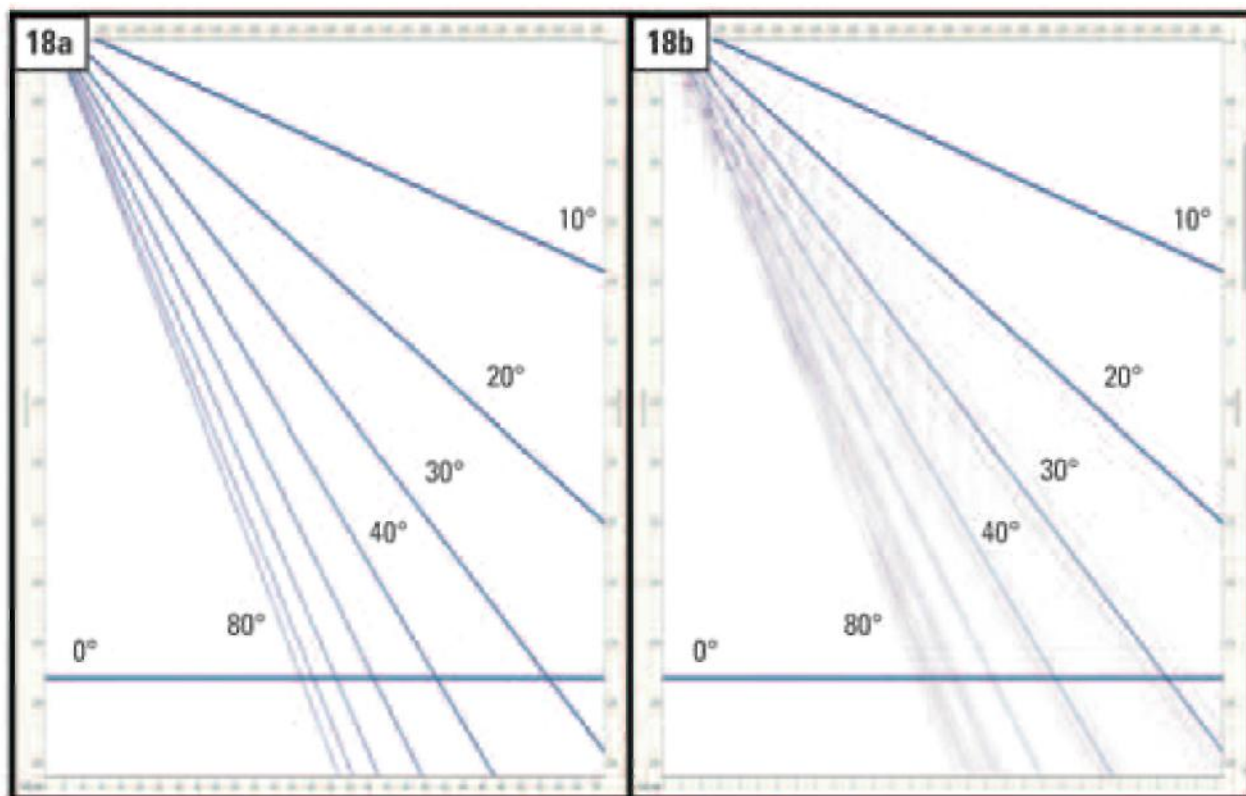


Рисунок 18 Сравнение 2D и 1D подавления волн-спутников. Рисунок 18a - результат комбинирования 17a и 17b используя методику подавления волн-спутников 2D Posthumus (1993). Рисунок 18b результат применения методики подавления волн-спутников 1D, которая обычно применяется к традиционным данным с буксируемыми косами.

целей геофизических работ. Между этими шагами можно вставить другие процедуры, но основные процедуры для комбинации сверху/снизу включены. Комбинирование данных «сверху/снизу» выполняется на данных до суммирования для корректной компенсации 2D свойств волн спутников источника и кабеля, и обычно выполняется на самых ранних этапах обработки данных.

Обычная процедура обработки данных сверху/снизу

1. Полевые данные записываются при интервале
2. группирования 3.125 м. Регуляризация данных
 - для выравнивания приемников верхнего кабеля с приемниками нижнего кабеля.
3. Изменение формы импульса для верхнего источника.
 - Для устранения всех вариаций по возбуждениям в форме импульса верхнего источника.
4. Изменение формы импульса для нижнего источника.
 - Для устранения всех вариаций по возбуждениям в форме импульса нижнего источника.
5. Комбинация верхнего источника, верхнего/нижнего кабелей = SoCou.
 - В этом наборе данных So остаются волны-спутники источника, но волна-спутник приемника была устранена.

6. Комбинация нижнего источника, верхнего/нижнего кабеля = SuCou.
 - В Su остается волна спутник источника, но была устранена волна-спутник кабеля.
7. Интерполяция между источниками для увеличения шага дискретизации в области общих приемников.
 - Будет изменена форма импульса источника по направлению и произведено комбинирование источников «сверху/снизу» в области общих приемников.
8. Сортировка всех данных для приведения к области
9. общих приемников. Изменение формы импульса источника для верхнего источника.
 - Для нормализации свойств направленности верхнего источника и получения сигнатуры источника независимой от угла выхода из источника.
10. Изменение формы импульса источника для нижнего источника.
 - Для нормализации свойств направленности нижнего источника и получения сигнатуры источника независимой от угла выхода из источника.
11. Свертка фильтра 1D с верхним источником для подавления остаточной энергии газового пузыря.
12. Свертка фильтра 1D с нижним источником для подавления остаточной энергии газового пузыря и для компенсации различий сигнатур источников как функции глубины.

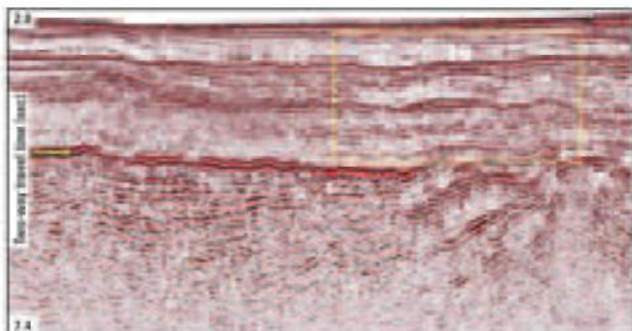


Рисунок 19 Данные, записанные верхним источником при глубине 12 м и верхним кабелем на глубине 20 м и мигрированные до суммирования методом Кирхгофа во временной области. Кровля базальтов выделена желтой стрелкой.

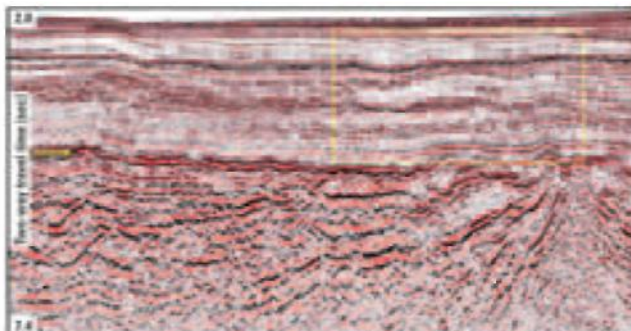


Рисунок 20 Изображение, полученное после миграции Кирхгофа во временной области до суммирования данных с полным устранением волн-спутников комбинации «сверху/снизу» источника и кабеля. Кровля базальта выделена желтой стрелкой.

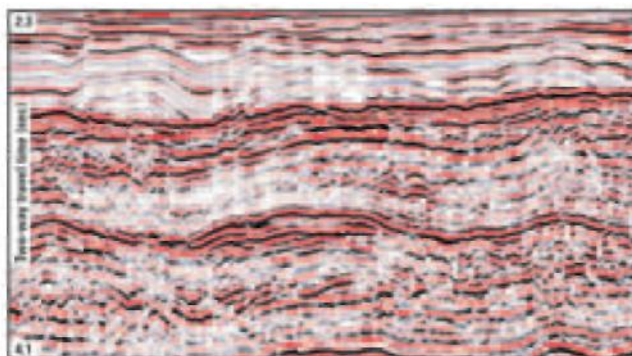


Рисунок 21 Увеличенное изображение верхней части разреза над базальтами, выделенной с помощью желтого прямоугольника на Рисунке 19.

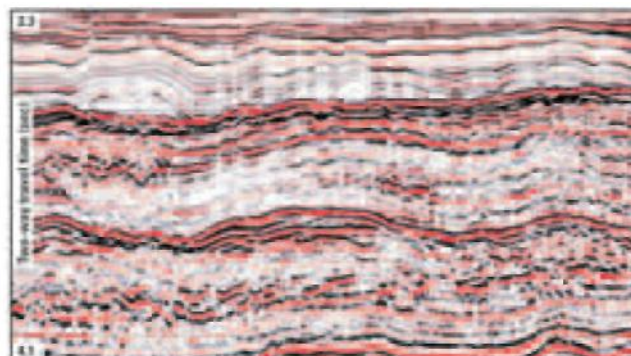


Рисунок 22 Увеличенное изображение верхней части разреза над кровлей базальта, выделенное желтым прямоугольником на Рисунке 20.

13. Комбинирование верхнего источника и нижнего источника= SouCou

- Волны-спутники источника не подавлены.

14. После того, как выполнены комбинирования сверху/снизу, будут подавлены как волны-спутники источника, так и приемника. Поток обработки данных далее пойдет по более традиционному руслу, но будет параметризован таким образом, чтобы максимизировать преимущества расширенной полосы частот, которая получилась в результате этапов комбинирования системы сверху/снизу.

Рисунок 14 отображает шаги последовательности комбинирования сверху/снизу. Для простоты, в этой иллюстрации используется только вертикальный случай 1D; распространение на 2D случай будет рассмотрено позже. Для ясности, трассы в каждом экране увеличены в 5 раз. Слева направо выведены: ■ SoCo:

- Единичный импульс на произвольной глубине, представляющий собой отражение от морского дна, свернутый сигнатурой источника, приведенной к нуль-фазовому виду, вертикальная волна-спутник, соответствующая глубине So, и вертикальная волна-спутник, соответствующая глубине Co. - Вступление 1 – это первичный импульс вдоль траектории от источника (S) до морского дна (WB) до приемника (R).

- Вступление 2 – кода вдоль траектории от S до поверхности моря (FS) до WB до R.
- Вступление 3 – кода вдоль траектории от S до WB до FS до R.
- Вступление 4 кода вдоль траектории от S до FS до WB до FS до R.

■ SoCu

- Схоже с SoCo, но вертикальная волна-спутник приемника соответствует глубине Cu.

■ SoCou

- Комбинации SoCo и SoCu. Волны-спутники приемника были устранены, таким образом импульс представляет собой сигнатуру источника, свернутую с вертикальной волной-спутником источника, соответствующей глубине So.

■ SuCo, SuCu, и SuCou

- Соответствует нижнему источнику, эквивалентно вышеописанным трем шагам

■ SouCou

- Комбинации SoCou и SuCou. Волны-спутники приемника и источника (кода) были полностью устранены, таким образом, импульс теперь представляет собой сигнатуру источника, приведенную к нуль-фазовому виду.

Многодисциплинарный выпуск

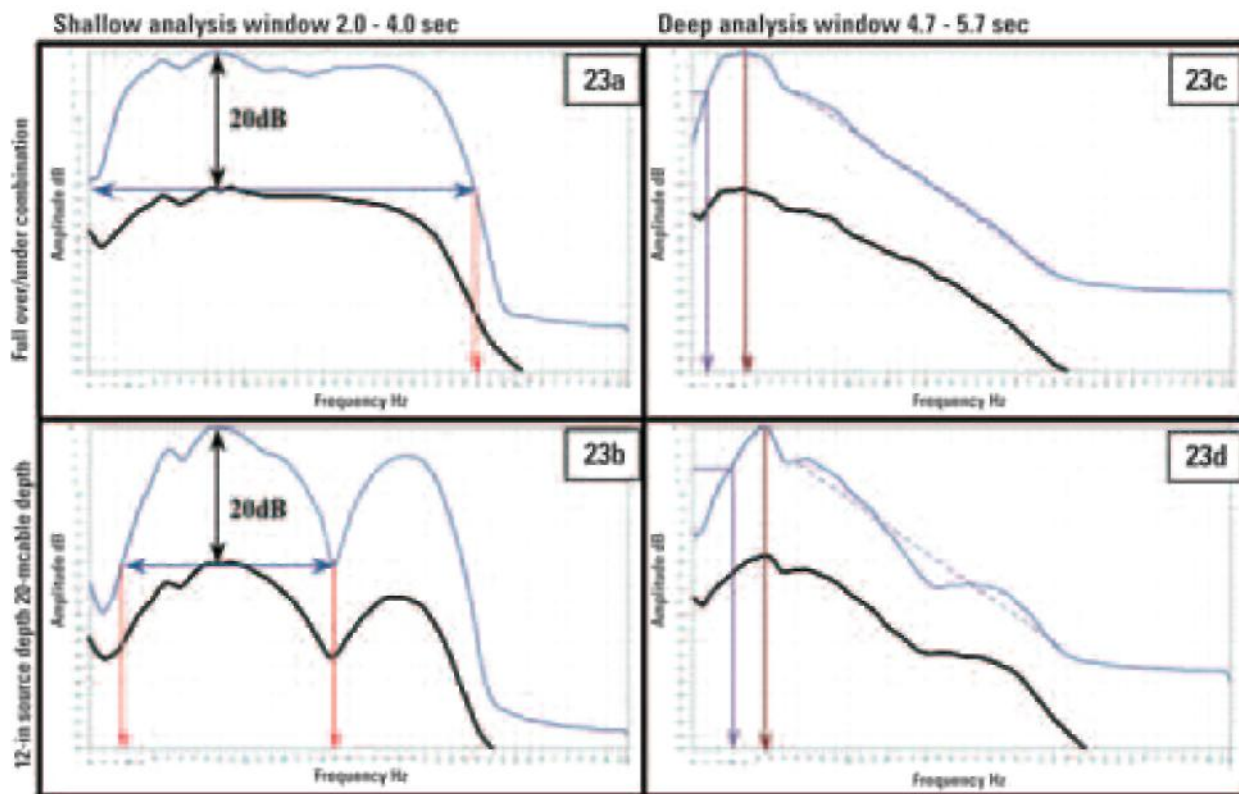


Рисунок 23 Сравнение амплитудного спектра сигнала и шума, извлеченного окна на малой и большой глубине из обеих групп данных на рисунках 19 и 20. Рисунки 23а и 23б представляют собой амплитудные спектры для окна данных на 4.0 с для комбинации сверху/снизу и верхнего источника и верхнего кабеля, соответственно. Рисунки 23с и 23д похожи, но для окна данных от 4.7 до 5.7с. На всех четырех амплитудных спектрах, сигнал показан голубой кривой, а шум черной кривой.

Рисунок 15 отображает задержку волны-спутника источника в 2D, в уравнения 1, 2, и 3 из Рисунок 2 были включены угол выхода луча. Из уравнения 4 м можем сделать вывод, что по мере увеличения угла выхода время задержки волны-спутника уменьшается. Так же, из уравнения 6 следует, что по мере возрастания угла выхода, увеличивается частота режекции волны-спутника.

На рисунке 16 показано графическое представление волны-спутника 2D в областях XT, FX, и FK. График TX отображает уменьшение времени задержки по мере возрастания угла. На FX рисунке показано увеличение частоты режекции волны-спутника с увеличением угла выхода. И на обоих графиках FX и FK показаны гармоники режекции волн спутников на частотах кратных целым частотам первичной режекции, 'n' в уравнениях 3 и 6.

Алгоритмы борьбы со спутниками до суммирования, о которых мы говорили ранее, все работают в 2D; таким образом, достигают практически того же качества подавления спутников, как на рисунке 14, но для всех углов выхода и наклонов. В случае Posthumus (1993), 2D подавление спутников выполняется в FK области и включает шаги:

- Преобразование к нуль-фазовому импульсу данных нижнего и верхнего набора.
- Продолжение поля волн данных нижнего набора к глубине верхнего набора данных.
- Взвешенное суммирование обоих наборов данных в F/K области, где веса, применяемые к каждому набору данных, являются функцией частоты, волнового числа, коэффициента отражения от поверхности моря, глубины кабеля, и скорости в воде.

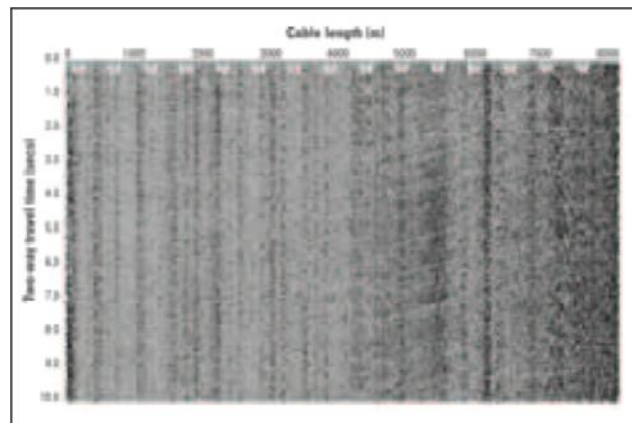


Рисунок 24 Запись шума кабеля на глубине 10 м.

Многодисциплинарный выпуск

Веса максимизируют вклад сигнала от каждого набора данных сверху и снизу в суммирование. В получаемых комбинированных данных уже убраны частоты режекции 2D и удалены коды, до максимальной частоты, задаваемой первой частотой режекции или гармоникой, общей для всех глубин источников и кабелей.

В традиционных данных с буксируемой косой, полученных за последние 25 лет всегда была процедура подавления волн-спутников, применяемая на этапе обработки сигнала. К сожалению, исторический подход к этой проблеме, при использовании к традиционным данным с буксируемыми косами, рассматривает только 1D случай; таким образом, он включает деконволюцию с помощью оператора 1D подавления спутников к данным до суммирования, в которых содержится 2D отклик волн-спутника.

Как можно видеть из рисунка 18, применение оператора подавления спутников 1D к явлению волн-спутников 2D компенсирует только эффект спутников при нулевом падении. Для других падений, отличных от нуля, процедура 1D подавления спутников прогрессивно добавляет все больше код по мере роста падения. Эти добавочные коды проявляются в реальных данных поверхностной сейсмологии в виде 'фантомных осей синфазности', которые идут по одной линии с наиболее крутопадающей осью, что делает интерпретацию неустойчивой и неоднозначной. Методика подавления волн-спутников 2D, описанная здесь, помогает корректно подавлять волн-спутники для всех падений, что приводит к гораздо более надежной интерпретации в сложнопостроенных областях. Кроме того, методика подавления спутников в 2D, применяемая к парам верхнего и нижнего кабеля, помогает добиться меньшего зашумления среды, что достигается при глубокой буксировке кос. Это преимущество не характерно для традиционных буксируемых кос.

В качестве обобщения, в данных, регистрируемых источниками и кабелями на разных уровнях, происходит полное подавление волн-спутников 2D (код), связанных с источником и приемником. При этом убираются спутники, зависящие от углов, идущие после основного сейсмического импульса; таким образом, упрощается вид импульса в данных, особенно для крутого падения. Также можно убрать эффекты полосовой фильтрации на низких и высоких частотах, вызванные конструктивной и деструктивной интерференцией; таким образом, данные обретают более широкую полосу частот. Теперь полосой частот данных получаемых на разных уровнях, управляет сама полоса частот источника, поглощение на высокочастотном участке спектра, и инструментальные фильтры на низкочастотном конце спектра.

Таблица 1

Конфигурация «снизу-сверху» на Западно-Шетландских островах

Глубина верхнего источника	12 м	Глубина верхнего кабеля	20 м
Объем верхнего источника	5085 дюйм ³	Длина верхнего кабеля	11,600 м
Глубина нижнего источника	20 м	Глубина нижнего кабеля	30 м
Объем нижнего источника	5085 дюйм ³	Длина нижнего кабеля	12,400 м

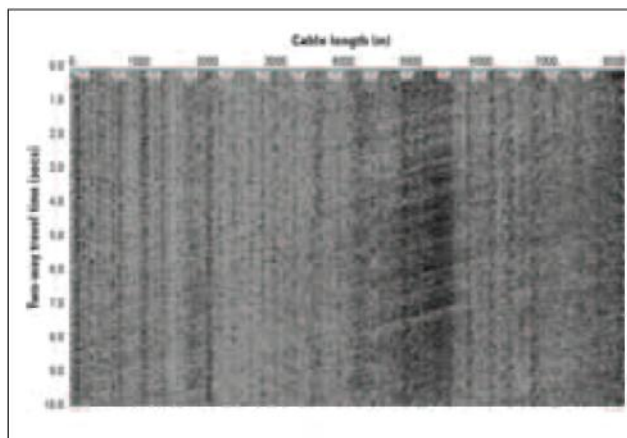


Рисунок 25 Запись шума кабеля на глубине 20 м.

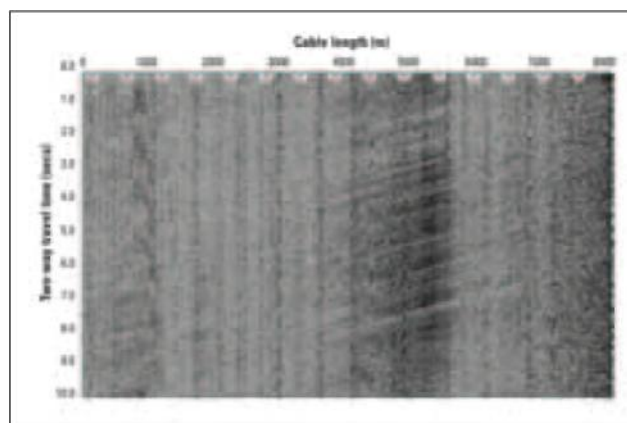


Рисунок 26 Запись шума кабеля на глубине 30 м.

Практический пример

Осенью 2005г., сейсмическое исследовательское судно, *Western Pride*, выполняло большие региональные исследования 2D методом сверху/снизу для компании Chevron. Съемка была выполнена в Северной Атлантике, к востоку от Фарерских островов и западу от Шетландских островов. Целью съемки было обеспечение улучшенного сейсмического картирования среды под базальтами. Поскольку наложенные потоки базальтов обычно мало проницаемы для сейсмических волн (Ziolkowski et al., 2003), успешное картирование под ними зависит от технологий, которые смогут расширить полосу частот в сторону понижения. Одной из таких методов является подавление волн-спутников по методике сверху/снизу, она расширяет используемые частоты до частот, которые ниже, чем можно получить при традиционных исследованиях с одним источником и одним кабелем, при глубокой буксировке. Схема наблюдения, использованная нами, представлена в Таблице 1.

Многодисциплинарный выпуск

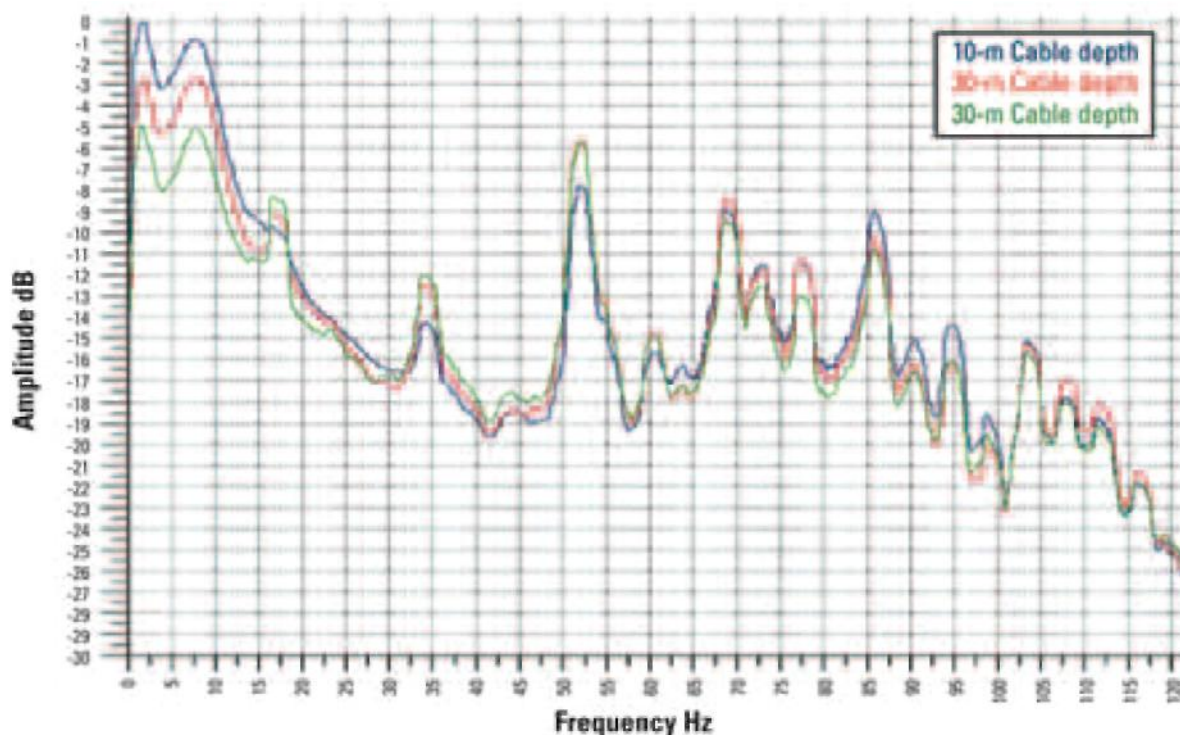


Рисунок 27 Средний спектр амплитуд для каждой из записей шума на рисунках 23, 24, и 25.

Данные были обработаны в цикле обработки в соответствии с общей схемой, приведенной выше, для комбинаций сверху/снизу, с использованием технологии Posthumus (1993). Максимальная частота, которая ожидается в этой конфигурации около 75 Гц, там имеется первая частота режекции волны-спутника. Этот верхний предел более, чем достаточен для целей глубинного картирования этой специальной съемки. Но, если бы потребовалась более высокая верхняя частота в других обстоятельствах, этого легко можно было достичь путем изменения расстояния между глубиной кабеля и источника, так чтобы первая общая частота режекции переместилась в область более высоких частот.

На рисунке 19 приведен мигрированный разрез для верхнего источника на глубине 12 м и верхнего кабеля на глубине 20 м, что эквивалентно тому, что было бы получено традиционной глубоко буксируемой косой. На рисунке 20 показан соответствующий мигрированный разрез после полного удаления спутников из комбинации источников и приемников. Оба набора данных обработаны с использованием идентичных параметров; они мигрированы при использовании одного и того же поля скоростей, суммированы с одной скоростью, к ним применены одни и те же процедуры обработки после миграции. На самом деле, данные до суммирования, используемые для построения мигрированных изображений на Рисунке 19 являются важными компонентами в комбинации сверху/снизу, которая демонстрируется на Рисунке 20.

Как можно видеть из сравнения на Рисунках 19 и 20, комбинированный набор данных сверху/снизу гораздо более богат низкими частотами по сравнению с глубинной буксируемой конфигураций кос. Структурная интерпретация данных комбинации сверху/снизу может выполняться гораздо более уверенно.

Рисунки 21 и 22 являются увеличенным изображением участка верхней части на рисунках 19 и 20. Это сравнение разрезов показывает, что метода сверху/снизу не только дает низкие частоты, необходимые для целей глубинного картирования, но также делает это не жертвуя высокими частотами, необходимыми для картирования малоглубинных объектов.

На рисунке 23а, спектр сигнала данных методики «сверху/снизу» на 20 дБ выше, чем спектр шума. Полоса частот сигнала, на -20 дБ ниже, протягивается от 0 Гц до 60 Гц и на большей части этой полосы частот сигнал разделен от шума двадцатью дБ. На Рисунке 23b, оценка спектра сигнала данных верхнего источника и верхнего кабеля на 20 дБ выше, чем оценка спектра шума только на максимальной частоте. Полоса частот сигнала на -20 дБ ниже частоты максимума ограничена диапазоном от 5 Гц до 37 Гц, и выше этой полосы, минимальное отношение сигнал-шум падает до 10 дБ.

На Рисунке 23с, пиковая частота сигнала 8 Гц и частота на -6 дБ будет 2 Гц, на Рисунке 23d, пиковая частота сигнала 11 Гц и частота на -6 дБ будет 8 Гц.

Крутизна амплитудного спектра сигнала для частот выше, чем пиковая частота на рисунках 23с и 23d почти параллельны, как показывает фиолетовая прерывистая линия. На этих глубинах основным механизмом, управляющим полосой частот у верхнего конца спектра является поглощение; таким образом, общий градиент как функция частоты спектра показан на Рисунках 23с и 23d.

Очевидно, что данные комбинации «сверху /снизу» отличаются большей шириной полосы частот и большим отношением сигнал-шум, чем это достигается с помощью традиционных глубинно-буксируемых кос.

Преимущества технологии

В примере реальных исследований, приведенном выше, основной целью было использование увеличенного низкочастотного содержимого данных сверху/снизу для обеспечения улучшенного глубинного картирования по сравнению с традиционными работами, проводимыми с одним источником, одним кабелем, глубинно-буксируемой конфигурацией. Однако, это является не единственным приложением, где эта технология эффективна.

Как показано в первом параграфе, при традиционной конфигурации с одним кабелем, с буксируемой расстановкой, малоглубинные источники и кабели увеличивают высокочастотную часть данных, необходимую для разрешения, но ослабляют низкие частоты, необходимые для стратиграфической и структурной инверсии. Если пара кабелей сверху/снизу имеет небольшое расстояние по вертикали, равное глубине буксирования традиционной расстановки, и пара кабелей с небольшим расстоянием между ними буксируется на глубине, то комбинирование наборов данных имеет высокие частоты, которые дает

небольшое расстояние между кабелями и низкие частоты, которые дает большая глубина буксирования.

Большие глубины буксировки тоже имеют свои преимущества. На рисунках 24, 25, и 26 приведены записи шума от трех-кабельной конфигурации типа «сверху/снизу», где глубины кабелей 10 м, 20 м, и 30 м. На рисунке 27 показан средний амплитудный спектр для каждой из трех записей шума. Анализ спектра показывает, что низкочастотный шум окружающей среды падает на 2 дБ при каждых 10-метрах увеличения глубины кабеля. Глубокое буксирование имеет также преимущества в расширении диапазона погодных условий, как это показано на примере работ программы «сверху/снизу» на Западных Шетландских островах.

Заключение

Методика получения данных сверху/снизу была введена в середине 1980х, но только с развитием последних технологий в сборе данных этот метод стал жизнеспособным. Преимущества этой технологии по сравнению с традиционной однокабельной методикой с одним источником были детально описаны и некоторые из преимуществ проиллюстрированы на примере реальных работ. Первая коммерческая программа на основе одного источника и системы кабелей на двух глубинах была выполнена в декабре 2004. В 2005, свыше 3500 км данных методики сверху/снизу было получено, при этом большой процент данных получен с использованием как источников, так и кабелей на разных глубинах. В 2006 эволюция методики продолжилась путем коммерческого применения методики, которая расширилась до 3D модификации.

Многодисциплинарный выпуск

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить Kevin Davies и Gary Hampson из Chevron; Chevron за предоставленное разрешение на публикацию некоторых примеров данных; и John Sansom, Philip Christie, Alan Strudley, Steve Pickering, и Ed Kragh из WesternGeco.

Ссылки

Amundsen, L. [1993] Wavenumber-Based Filtering Of Marine Point-Source Data. *Geophysics*, **58**, 1335-1348.

Federation of American Scientists/Military Analysis Network/United States Navy/Introduction to Naval Weapons Engineering/ Sonar Propagation: http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/SNR_PROP/snr_prop.htm.

Posthumus, B.J. [1993] De-ghosting Using A Twin Cable Configuration. *Geophysical Prospecting*, **41**, 267-286.

Singh, S.C., Hobbs, R.W., and Snyder, D.B. [1996] Broadband Receiver Response From Dual-Cable Data And Applications. In Deep Reflection Seismology. *Geophysics*, **61**, 232-243.

Sønneland, L. and Berg, E., [1985] A New Method For Separating Wave Fields Into Up- And Down-Going Components. *47th Meeting, European Association of Exploration Geophysicists*, Extended Abstract B-46.

Sønneland, L., Berg, E., Eidsvig, P., Haugen, B.F., and Vestby, J. [1986] 2D De-ghosting Using Vertical Receiver Arrays. *56th Meeting, Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstract, 516-519.

Weglein, A.B., Shaw, S.A., Matson, K.H., Sheiman, J.L., Stolt, R.H., Tan, T.H., Osen, A., Correa, G.P., Innanen, K.A., Guo, Z., and Zhang, J. [2002] New Approaches To De-ghosting Towed-Cable And Ocean-Bottom Pressure Measurements. *72nd Meeting, Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstract, 2114-2117.

Ziolkowski, A., Hanssen, P., Gatliff, R., Jakubowicz, H., Dobson, A., Hampson, G., Li, X., and Liu, E. [2003] Use of low frequencies for sub-basalt imaging. *Geophysical Prospecting*, **51**, 169-182.

Рекомендуемая литература

Parkes, G. and Hatton, L. [1986] *The Marine Seismic Source*. D. Reidel, ISBN 90-277-2228-5 SEG 4.

Kragh, E., Robertsson, J., Laws, R., Amundsen, L., Rsten, T., Davies, T., Zerouk, K., and Strudley, A. [2004] Rough-sea de-ghosting using wave heights derived from low-frequency pressure recordings: A case study. *74th Meeting, Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstracts, 1309-1312.