

Будущее низких частот: наземное и морское оборудование (Toward the low

frequencies: land and marine equipment)

Denis Mougenot*

Введение

Значительное увеличение вертикального разрешения наземной сейсморазведки (на один порядок величины от декаметров до метров!) рассматривается нефтяными компаниями как самый важный шаг для более широкого использования сейсмических данных при описании коллектора. Дифференциальное поглощение более высоких частот при распространении отраженного сигнала и невозможность сгенерировать и зарегистрировать широкополосный сигнал мешало сейсмической промышленности решить эту задачу.

Скважинная сейсморазведка может улучшить ситуацию, сокращая траектории лучей и исключая прохождение волн через высокопоглощающую зону малых скоростей. Сейсмические данные с разрешением до метра и преобладающими частотами приблизительно 1 кГц регистрируются межскважинной сейсморазведкой (Sheline, 1998). Однако отсутствие скважин с соответствующим набором данных привело к довольно спорной интерпретации межскважинных сейсмических исследований.

Разрешение по вертикали (то есть возможность выделять каждое отражение) зависит, кроме прочих параметров, от соотношения сигнал-помеха и от частотного спектра. Если мы возьмем нуль фазовый сейсмический сигнал (рис 1), его детальность зависит от ширины центрального пика при отделении пика от вторичных боковых лепестков. Ширина определяется средней частотой сигнала ($F_{av} = (F_{max} + F_{min})/2$), и отделением относительной ширины полосы пропускания, измеренной в октавах n ($2n = F_{max} / F_{min}$). Обычный частотный диапазон наземной сейсморазведки (10-80 гц) представлен тремя октавами, которые являются тремя удвоениями частоты (10-20 Hz/20-40 Hz/40-80 Гц - рис 2). Мы предполагаем, что для улучшения вертикального разрешения, легче добавить одну октаву, делая запись сигнала от 5 до 10 гц чем, делать запись сигнала от 80 до 160 гц.

Что препятствовало промышленности использовать эту возможность? Сначала, мы не хотели регистрировать низкие частоты из-за их чрезвычайного зашумления, мешающего выделять глубинные

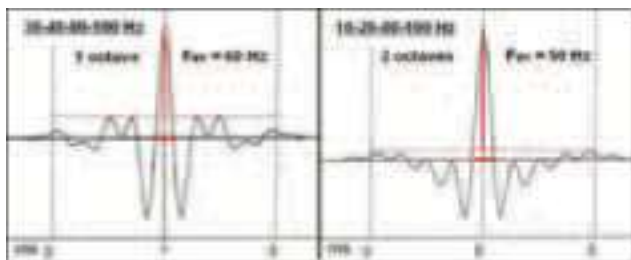


Рис 1 Использование нуль фазового сигнала Butterworth, ширина центрального лепестка определена средней частотой ($F_{av} = (F_{max} + F_{min}) / 2$), он выделен относительной шириной полосы пропускания частот, измеренной в октавах n ($2n = F_{max} / F_{min}$).

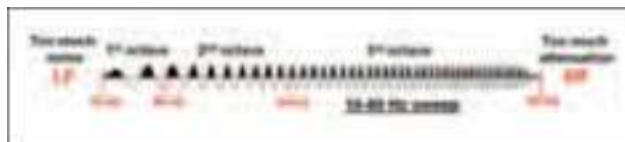


Рис 2 Типично выпускаемые сейсмические частоты обычно содержат 10 - 80 гц.

Кроме того, большинство низких частот отсеиваются в процессе регистрации, для исключения высокоамплитудных поверхностных помех и соответствующей потери в динамическом диапазоне. Это объясняет то, почему мы не сосредотачивали усилия на источниках или на технике регистрации с обработкой данных. Сегодня, мы можем использовать все преимущество нового морского и наземного оборудования для получения данных, которое позволяет генерировать и регистрировать широкополосный сигнал, включающий низкие частоты.

Наземные источники.

Ясно, что первое требование для записи широкополосного сигнала это получение такого сигнала под землей.

Вибраторы дают преимущество контроля ширины полосы пропускания и излучаемой энергии в пределах каждого частотного диапазона. Стандартный вибратор имеет опорный сигнал с началом в 10 гц с 0.5 тапером (рис 2). Форма стремится к более высокой частоте, когда поверхностная волна имеет простую форму, или возможно, структурное нарушение. Замечено что при большинстве технических характеристик вибратора, отражения опорного сигнала начинаются на 5 гц, но эта частота не стабильна и не достигается при полном приводе. Это ограничение нижнего предела низких частот связано со смещением D (при ударе) массы вибратора M , которая ограничена возможным гидравлическим потоком. От $D = HPF/M\omega^2$ ($\omega = 2\pi f$), смещение массы вибратора увеличивается к более низким частотам и соответствует наибольшему максимальному гидравлическому усилию (HPF). Однако использование большей массы ограничивает необходимое смещение для эмиссии низких частот. В то же время, такая большая масса улучшает весовое соотношение массы-к-опорной-плите и увеличивает способность вибратора генерировать высокие частоты.

У мощных современных тяжелых вибраторов (97 350 lbf), нижний порог частот с приводом 75% - 5 гц. Длина ударного хода поршня - 10 см и соотношение массы-к-опорной-плите составляет 3.2 (7.1 T/2.2 T). Эта модель вибратора дает возможность высокоразрешающей сейсморазведки, при помощи широкополосного опорного сигнала. Диапазон значений от низких до высоких частот такого вибратора - приближается к 6 октавам (5-250 гц). Его толкающее

*E-mail: d.mougenot@sercel.fr.
© 2006 EAGE

техническая статья

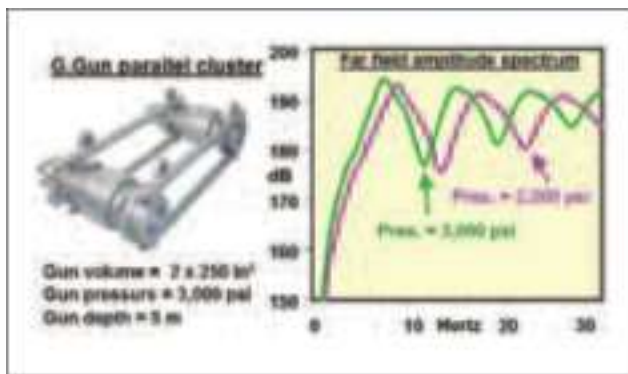


Рис 5 Амплитудный спектр связки параллельно расположенных пневмопушек и его изменение с давлением. (Данные M. Gros).



Рис 3 Тяжелый вибратор (97 350 lbf) имеет самое высокое соотношение массы-к-опорной-плите ($3.2 = 7.1 \text{ T} / 2.2 \text{ T}$).

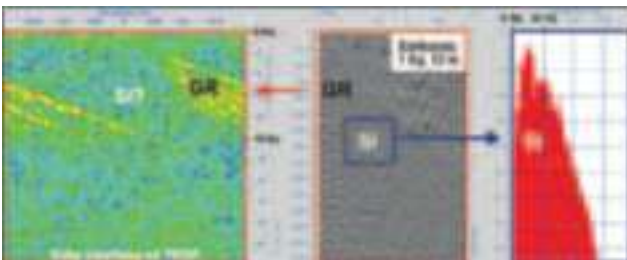


Рис 4 Точка взрыва, зарегистрированная от взрывчатого вещества вертикальной компонентой цифрового датчика (в центре). Спектр FK (слева) от общего пункта взрыва показывает очень низкочастотное содержание поверхностной волны (GR). Амплитудный спектр (справа) от маленького окна в пределах отраженного сигнала (Si) показывает нехватку низких частот.

усилие (90 000 lbf) является достаточно большим, чтобы использовать такой вибратор как точечный источник.

Взрывчатые источники, как известно, порождают широкополосный сигнал, включающий самые низкие частоты. Однако было мало публикаций, показывающих соотношение между типом взрывчатого вещества, зарядом, глубиной источника, и частотным спектром. Персонал часто полагается на эмпирические правила (большой и более глубокий заряд, снижение частотной энергии), более или менее подтвержденные работами в полевых условиях. Как можно увидеть на рисунке 4, в полученной цифровым акселерометром записи традиционного заряда, используемого в сейсморазведке (1-10 кг в глубине на 10-30 м.), малая часть низкочастотной энергии присутствует на отраженном сигнале находится между 10-30 гц.

генерируемые частоты (стремящиеся к 2 гц) – есть главным образом поверхностные волны (GR). Амплитудный спектр отраженного сигнала (Si) показывает, что низкие частоты чрезвычайно ослаблены (-18 децибелов) от максимальной амплитуды, которая находится между 10-30 гц.

Вероятно, большинство химической энергии взрывчатого вещества идет на получение трещин, газовый разогрев, и поверхностные волны. Фактически, преобразование энергии в упругие волны сильно зависит от пород, окружающих ствол скважины и от характера взрывчатого вещества (скорость, давление, и газообразование). Более длиннопериодные взрывы, в соответствии с новым двойным составом взрывчатого вещества, разработанным для сейсмического применения, улучшают передачу энергии в породу. Из анализа отраженного сигнала видно, что при низко и высокочастотных увеличениях энергии (+12 децибелов) максимальная амплитуда стремится к более низким частотам (Quigley, 2004).

Морские пушки

При стандартной расстановке пневмопушек (три кабеля по 10 пушек, 3500 cu) – нижняя полоса пропускания ограничена на 10-12 гц. Эта характеристика для создания более низких частот может быть улучшена, увеличением давления воздуха, используемого в пушке (рис 5). В то время как промышленность использует пушки и компрессоры со стандартным давлением 138 бар (2000 фунтов на квадратный дюйм), некоторые пушки разработаны для стандартного использования при давлении 207 бар (3000 фунтов на квадратный дюйм).

Нижний частотный порог (F_{min}) также зависит от индивидуального объема пушек. При доминирующем периоде пульсации (T) характеристика пушки изменяется кубическим корнем от объема и доминирующая частота сигнала, которая соответствует минимальной частоте $F_{min} = 1/T$, уменьшается с ростом объема пушки. Поскольку большие пушки трудны в обращении, возможно применить группирование идентичных пушек, чтобы увеличить период пульсации пузырька. Для 2x250 cu в параллельно расположенных кластерах пушек на глубине 5 м. и 3000 фунтов на квадратный дюйм, доминирующая частота может быть столь же низкой, около 6 гц (рис 5).

Эффект погружения пушки не так заметен на низкочастотном спектре, как непосредственно на низкочастотной границе пропускания, которая зависит только от узкого диапазона, созданного волной - спутником, обусловленной поверхностью. Эта волна имеет разрушительный эффект на первый пузырь, где сконцентрированы более низкие частоты (Lunnon и др., 2003A). Увеличение глубины погружения пушки может изменить выбор момента времени главного и спутниковых пузырьков противоположной полярности, потенциально увеличивая количество низкочастотной энергии. Однако период пульсации пузырька уменьшается с глубиной из-за большего гидростатического давления, таким образом, соответствующая доминирующая/минимальная частота увеличивается значительно, чем убывает (Mayne и Quay, 1971).

Был проверен другой способ расширить спектр низкочастотного сигнала. Он использовал запаздывание с других пушек расстановки, чтобы синхронизировать пузырьки вместо усиления первых пиков давления (Lunnon и др., 2003B). Эта техника - хороший способ для усиления низких частот и оказалась полезным для изучения глубинных пород коры и описания пород под базальтами (Maresh and White, 2005).

Однако это негативно влияет на высокочастотный спектр, и это ухудшает сейсмическое разрешение в верхних осадочных слоях.

Цифровые акселерометры

За последние несколько лет совершенствовались новые, базирующиеся на MEMS, цифровые акселерометры для сейсмической промышленности (рис 6). Они предлагают широкополосную линейную фазовую и амплитудную характеристику, которая может начинаться от 0 гц (постоянный ток) до 800 гц (рис 7). Эти акселерометры позволяют регистрировать частоты ниже 10 гц без ослабления, включая постоянный ток (ПТ), который связан с ускорением силы тяжести. Этот вектор силы тяжести является полезным отношением для контроля чувствительности и измерения наклона.

Устойчивость фаз и амплитудных характеристик этого сейсмоприемника (рис 7), представляется как важное преимущество при регистрации низких частот. Однако низкочастотное затухание сейсмоприемника можно компенсировать при обработке, предполагая, что это затухание (и соответствующая резонансная частота) довольно устойчиво (на практике есть несколько процентов отклонения).

Вероятно, самая интересная особенность цифрового акселерометра для регистрации низких частот - его более низкое искажение сигнала (-90 децибелов по сравнению с -62 децибелами для сейсмоприемника), которое помогает сохранять форму импульса, уменьшая интерференцию от сильных гармоник поверхностных помех.

Низкочастотные аналоговые датчики

Катушки сейсмоприемников изготовлены для резонансных частот, с пределами от 2 гц до 35 гц. Их свойства зависят от жесткости пружина/катушка (K) и массы (M) магнита: $F_r = (K/M)^{1/2} / 2\pi$. С амплитудным затуханием ниже этой резонансной частоты при значении 12 децибелов/октаву (рис 7), частота часто берется 10 гц или выше для уменьшения низкочастотных поверхностных помех. Снижение резонансных частот сейсмоприемников, которые обладают большой массой, более трудоемко, дорого и они более чувствительны к отклонению от вертикали. Эти приборы редко используются в полевых условиях за исключением редких съемок для преломленной волны.

Пьезоэлектрические гидрофоны, использующиеся в морских сейморазведочных кабелях, имеют спад низких частот при начальном значении 3 гц (рис 8) с ослаблением 6 децибелов/октаву до значений постоянного тока. Поэтому, эти гидрофоны могут регистрировать низкие частоты, ограниченные областью вблизи источника. Возможности гидрофона могут быть и ниже 0.5 гц, но тогда, вероятно присутствие большего числа электрических помех и помех от морских волн. Такие гидрофоны в состоянии измерить высоту волны, параметр, используемый при подавлении волн-помех на сейсмических данных (Kragh и др., 2004).

Глубоко буксируемая монолитная (полимерная) сейсмоприемная коса

Глубина погружения сейсмоприемной косы от поверхности моря явно влияет на частотный спектр. Увеличение глубины погружения сейсмоприемной косы дает более низкие частотные данные, вся остальная информация остается идентичной. Объяснение этому - то, что морская поверхность является прекрасным отражающим горизонтом на сейсмических частотах. Она создает фазово-инвертированные нисходящие волны помехи, которые интерферируют с прямым

техническая статья

восходящим сигналом с запаздыванием, которое зависит от погружения (о пушках испускающих сигнал, см. выше). Это показывает что, независимо от глубины буксировки, относительная ширина полосы пропускания частот, измеренная при затухании 6 децибелов постоянна - 2.32 октавы (Mareh и White, 2005). Поэтому, чем глубже сейсмоприемная коса, тем ниже высокочастотное

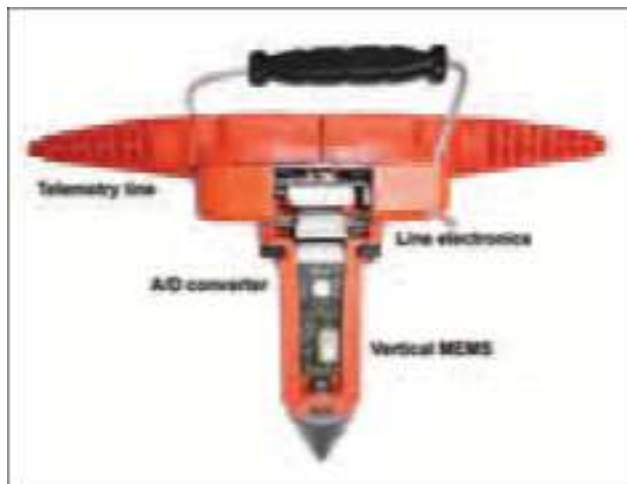


Рис 6 3С цифровой датчик, объединяющий все датчики с полевой электроникой и соединения с линией.

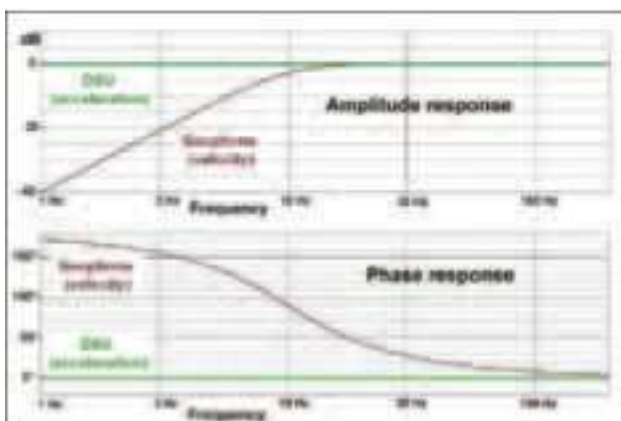


Рис 7 Сравнение фазовой и амплитудной характеристики MEMS-базирующегося цифрового датчика (ускорение) сейсмоприемника на 10 гц (скорость).

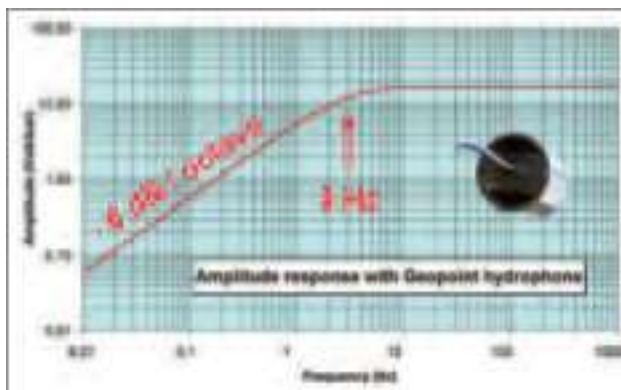


Рис 8 Амплитудный отклик традиционного морского сейсмоприемника

техническая статья

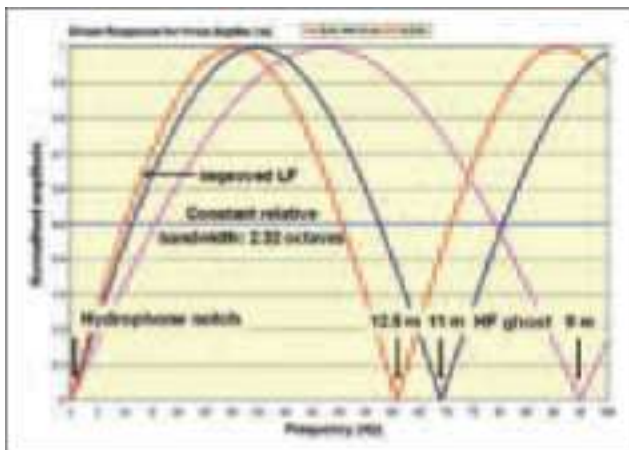


Рис 9 Полосовая фильтрация сигнала зависит от глубины погружения сейсмоприемной косы и влияния волн - спутников, обусловленных поверхностью, чем глубже сейсмоприемная коса, тем больше высокочастотное затухание. В то же время, увеличение глубины меняет нижний предел спектра в область низких частот, так, что относительная ширина пропускания частот постоянна. (Данные от M. Lansley.)

снижение сигнала и более крутой спад низких частот, для постоянной ширины полосы пропускания (рис 9).

Эти характерные амплитудные отклики буксируемой сейсмоприемной косы объясняют возобновленный интерес к конфигурации сверху-снизу, с которой осуществляется буксирование двух сейсмоприемных кос на различных глубинах, одна непосредственно ниже другой, например, 18 м. и 25 м. (Egan и Moldoveanu, 2005). Объединение измерений от этих двух сейсмоприемных кос позволяет дифференцировать восходящие и нисходящие волновые поля. Волна – спутник, которая не дает нам расширять частотный спектр, удаляется, в то время как низкие частоты, регистрируемые более глубоко буксируемой сейсмоприемной косой, сохраняются. Хотя глубоко буксируемые сейсмоприемные косы предлагают необходимый низкочастотный полосовой фильтр, стоит напомнить, что необходимо настроить пневмопушку, для излучения энергии в тех же самых низкочастотных пределах.

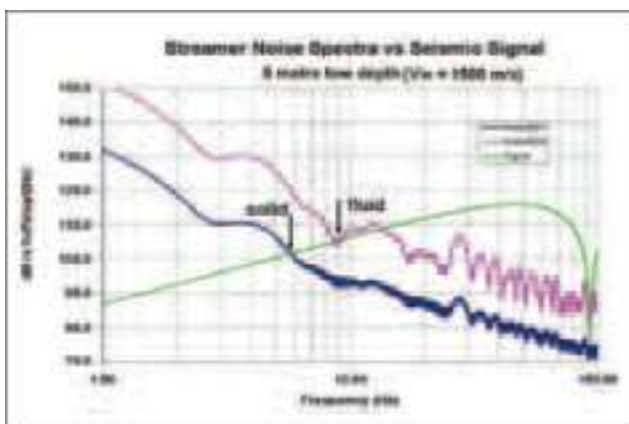


Рис 10 Помехи буксируемой сейсмоприемной косы растут по отношению к области низких частот и перекрывают спектр сигнала на частотах, которые зависят от состояния поверхности моря (SS1, хуже чем SS4) и/или от типа сейсмоприемной косы (стабильный или подвижный).

Помехи, вызываемые буксируемой сейсмоприемной косой, не зависят от источника. Они зависят от состояния морской поверхности и значения стремятся в область низких частот (рис 10). Поэтому, способность возвращать низкочастотный сигнал будет зависеть от погоды. Монолитные сейсмоприемные косы, которые разработаны для минимизирования механических шумов, могут уменьшить буксирный шум (Край и Spackman, 2005) и улучшить отношение сигнал-помеха на низких частотах.

Применение

Пригодность сейсмике с поверхностной расстановкой для глубоких целевых поисково-разведочных работ (ниже 5000 м) ограничена ослаблением и рассеиванием фронта волны. Из-за способности проводить больше энергии глубже в слои с меньшим ослаблением и рассеиванием, низкие частоты менее подвержены этим эффектами распространения волн. Другое ограничение - наша способность восстановить истинный путь луча и должным образом собирать трассы, отраженные от одной общей глубинной точки. Эта способность уменьшается с увеличивающейся глубиной и связанными с ней сложностями разреза. Низкие частоты с большей зоной Френеля являются менее чувствительными к этим проблемам и легче собираются в стэк. Как пример, можно продемонстрировать, что низкие частоты - ключ к отображению осадочных слоев ниже тел с высокими скоростями, таких как базальтовые потоки (Ziolkowski и Hanssen, 2003) и солевые подушки (Кароог и др., 2005).

Заключение

Успех сейсмической регистрации на низких частотах и улучшения вертикального разрешения еще не нашли широкого применения. Для того чтобы это стало нормой, должно быть преодолено много препятствий. Самая трудная задача - поверхностные помехи, которые зашумляют низкие частоты. Решение проблемы требует плотной пространственной дискретизации и перекрытия с высокой кратностью. Но как только найдено решение для регистрации должным образом выбранных данных для широкого диапазона частот, появляются системы регистрации, способные к эффективной обработке очень большого количества каналов. Также важно понять, что не часто разрабатываются стандартные модули обработки, для сохранения низких частот из-за неясных фильтров верхних частот и коротких операторов фильтрации.

Улучшенное вертикальное разрешение облегчает поисково-разведочные работы глубоких объектов и обеспечивает лучшую скважинно-сейсмическую корреляцию. Внося более эффективный вклад в описание резервуара, сейсмика должна быть в состоянии подтвердить эту способность рентабельного инструмента, для увеличения добычи нефти и газа.

Благодарности

Автор благодарен Дэниелу Боукарду, Роберту Доулу, Мишэлю Гро, и Малкому Ланслею от Sercel за их полезные объяснения касательно низкочастотных характеристик сейсмического оборудования.



first break том 24, Июль 2006

техническая статья