

## Морская Сейсморазведка

# Высокая разрешенность морских многоканальных сейсмических данных: получение оптимальных результатов

## High resolution of streamer seismic data: obtaining optimal results

Эндрю Лонг из PGS Marine Geophysical определяет требования для успешной высокоразрешающей 3D морской сейсмической съемки и пути их реализации.

## B

ысокая разрешенность сейсмических данных – это когда можно четко разделить близкорасположенные геологические объекты, при этом без артефактов или шума (т.е. при высоком отношении сигнал/шум).

В общем, важным фактором для высокой вертикальной разрешенности является диапазон частот, а плотная 3D сетка наблюдений важна для пространственной разрешенности. Вертикальная и горизонтальная разрешенности связаны с высоким качеством фокусировки и картирования. Не вдаваясь в теоретические подробности, в следующих разделах говорится о геофизических принципах, на которых основывается высокоразрешающая сейсморазведка.

Высокая разрешенность 3D сейсмических данных достигается за счет применения строгих геофизических правил. В частности, систематическое соблюдение 1) равномерного покрытия целевого объекта, 2) высокой плотности пространственных наблюдений отраженного волнового поля и 3) аккуратной обработки данных. Все это вместе обеспечит оптимальный результат. Обратите внимание, что никогда не получится выполнить последнее требование, если целевой объект неправильно покрыт съемкой, и неверно выбраны параметры наблюдений волнового поля. Здесь приведены примеры нескольких 3D съемок для демонстрации того факта, что гибкое проектирование съемки и ее реализация могут стабильно обеспечить очень высокую разрешенность изображения целевого объекта для всех глубин и по всем направлениям.

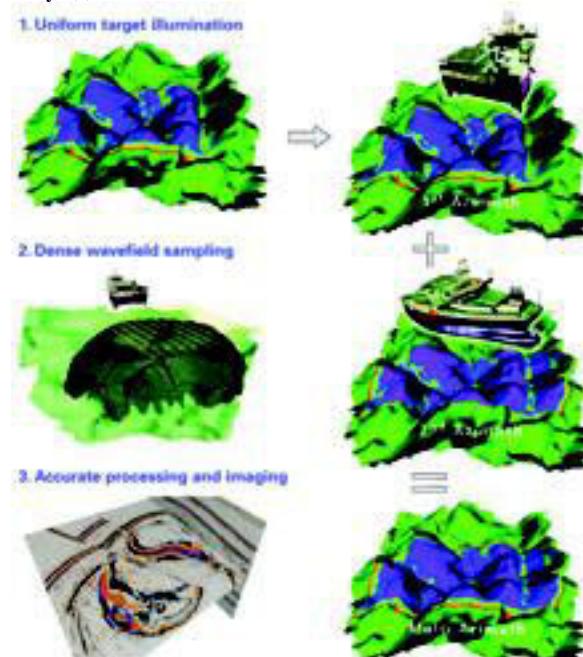
### Система наблюдений и обработка для высокой разрешенности данных

Три фундаментальных составляющих «идеальной» морской многоканальной съемки, как показано на Рис. 1, могут в дальнейшем рассматриваться в контексте «высоко разрешенной съемки». Каждая точка целевого объекта должна быть покрыта съемкой во время наблюдений, также необходимо, чтобы сейсмические волны равномерно отразились от целевого объекта, при этом распределение выносов и азимутов должно быть равномерным. Если это выполнено, то миграция до суммирования приведет к фокусировке сейсмической энергии без потери в разрешенности и без артефактов, вызванных несимметричным шагом наблюдений. В общем, верным техническим критерием высокой разрешенности данных является то, что «протяженная апертура отражения в каждой точке изображения дополнена полным покрытием съемкой в пространстве» (также см. далее). В реальности, покрытие по глубине всегда неравномерно, и также может характеризоваться большими «дырами» при сложной геологической обстановке.

Рис. 1 содержит результаты двух ортогональных направлений сейсмической разведки из 3D моделирования покрытия целевой поверхности под сложной покрывающей толщей. Цветами обозначена

плотность покрытия на целевом объекте для каждого направления возбуждения. Два верхних результата различны, идеальных нет. Суммирование результатов приведено на нижней части рисунка, оно приводит к гораздо более равномерному покрытию. Это является основой многоазимутальной 3D сейсморазведки, которая здесь тщательно не разработана.

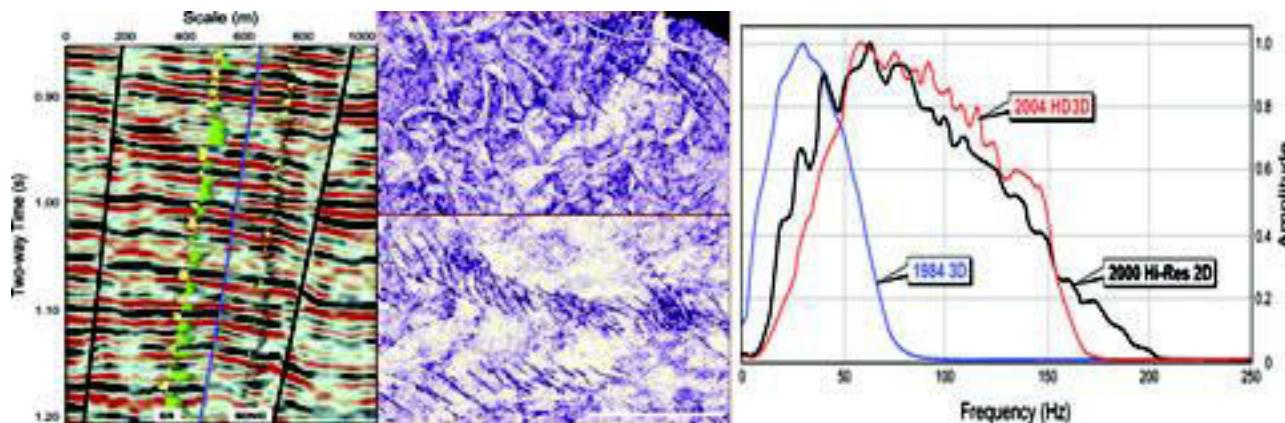
Принцип взаимности источника и приемника можно выполнить, если длина расстановок приемника и источника одинакова, и также при равном шаге между точками возбуждения и приемниками (2D симметрическая расстановка Вермера (Vermeer')). Это почти никогда невозможно достичь на практике, так как шаг между точками возбуждения большой, а длина расстановок источников очень велика. Симметричная расстановка поможет избежать потерь в частотном диапазоне и в разрешенности из-за направления линий возбуждения.



**Рис. 1** Три основных компонента «идеальной 3D морской сейсмической съемки». Аккуратная обработка и миграция невозможны без равномерного освещения объекта и плотной сетки наблюдений волнового поля без альянсинга полезных волн, шума и кратных волн. Для правой колонки использовалась 3D трассировка лучей для иллюстрации того факта, что многоазимутальная съемка значительное улучшит равномерность покрытия целевого объекта под сложно-построенной покрывающей толщей.

\*andrew.long@pgs.com

## Морская Сейсморазведка



**Рис. 2** Сейсмический разрез по данным съемки HD3D в Тайландском заливе вдоль наклонной скважины (слева) иллюстрирует хорошее соответствие между сейсмикой и синтетикой. Гамма-каротаж и ультразвуковой каротаж показывают, что по сейсмике можно выделить кровлю и подошву отдельных песчаных тел. Временные срезы на 494 мс двойного времени пробега (вверху слева) и 958 мс (внизу слева) куба Подобия, полученного по данным HD3D в 2004 году, также демонстрируют выдающуюся разрешенность канала сложного строения и системы разломов. Правый рисунок показывает сопоставление частотного состава HD3D данных и данных съемки 2D, которая была проведена с помощью источника объемом 160 дюймов<sup>3</sup> с глубиной погружения 1.5 м, а глубина погружения кос составляла 2.5 м. Благодарим Pearl Energy за возможность представить рисунки.

Частотный диапазон первых вступлений, записанных на носитель во время съемки, должен быть максимально широким, насколько это возможно. Ширина записанного диапазона является функцией геометрии источника, а также глубины погружения источника и приемника. Уменьшение глубины погружения источника или косы приемников приведет к увеличению диапазона частот, повышению уровня шума и уменьшению величины отношения сигнал/шум. Влияние поглощения в земной коре с увеличением глубины целевого объекта приводит к понижению преобладающей частоты и сужает частотный диапазон сейсмических данных. Необходимо использовать все варианты для всех целевых глубин для увеличения как нижнего, так и верхнего предела в частотном диапазоне.

Записанный диапазон частот должен быть сохранен после всех операций в граfe обработки. На практике, результаты многоканальной фильтрации и миграции до суммирования очень сильно зависят от плотной 3D пространственной дискретизации, что позволяет избежать аляйсинга осей синфазности с крутым кажущимся углом наклона или сильной кривизной. Аляйсинг приведет к потере высокочастотных составляющих и наличию артефактов. Следовательно, размер бина как по инлайн, так и по кросслайн должен быть физически мал, насколько возможно. Длина бина по кросслайну обычно большая, это является сильным препятствием для сохранения высоких частот.

Методика наблюдений для равномерного покрытия целевого объекта и плотная сетка 3D наблюдений позволяют оптимизировать алгоритмы подавления шума и кратных волн в данных. Данные, в которых подавлены шум и кратные волны, являются необходимым условием для оптимального построения скоростной модели. Точные значения скоростей в пространстве требуются в процессе обработки и для миграции, чтобы избежать потери детальности и разрешенности. Плотная дискретизация трассы позволяет провести высокоточную миграцию до суммирования, чтобы оптимизировать точность скоростного спектра для пикировки и построения скоростной модели. Схемы регуляризации данных оптимизируют от плотной сетки 3D данных, они обеспечивают оптимальную основу для таких высокотехнологичных приложений, как

3D SRME (подавление кратных волн, вызванных наличием свободной поверхности) и глубинная миграция до суммирования, основанная на волновом уравнении (PSDM).

Ниже приведены три примера, иллюстрирующих различные стратегии получения высокой разрешенности путем выбора правильного покрытия целевого объекта и плотной дискретизации наблюдений волнового поля. Эти принципы служат основой для проведения съемки и обработки HD3D (3D съемка с высокой плотностью наблюдений).

### Тайландский залив

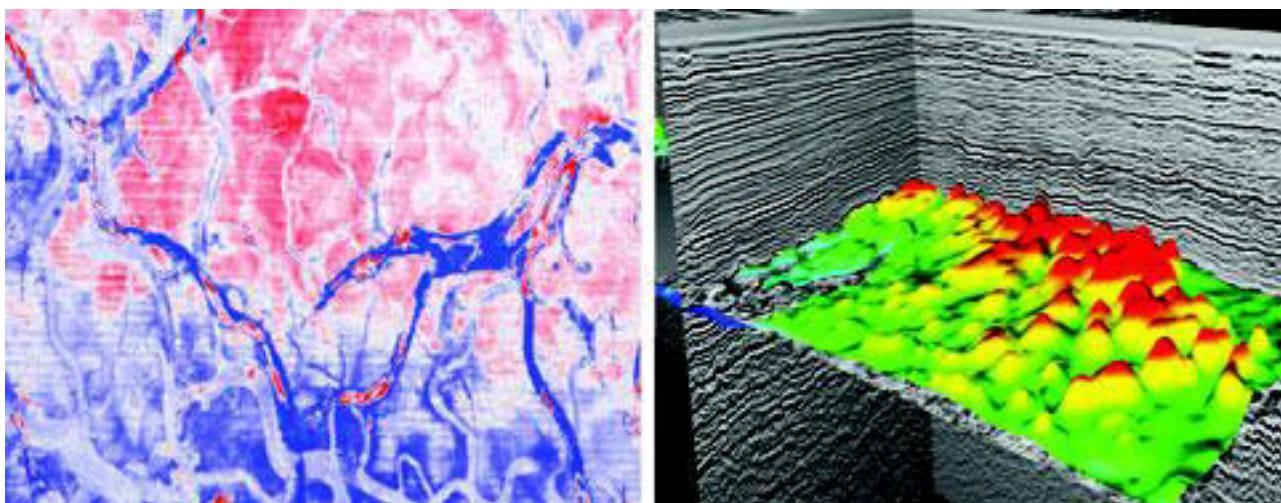
Целью проведения съемки было изучение объектов в интервале двойного времени пробега (TWT) 0.3 - 1.3 с включительно. Нужно было получить очень высокую разрешенность данных, вплоть до полезных частот 150 Гц. Этим требованиям удалось удовлетворить, используя следующие параметры наблюдений: расстояние между косами 50 м, глубина погружения источника и косы 4 м. Был построен специальный источник малых размеров, чтобы оптимизировать диаграмму излучения, при этом были получены высокие частоты излучения для широкого диапазона углов. Далее, чтобы обеспечить одинаковый шаг между точками возбуждения и приема, интервал между источниками 12.5 м дополнялся интерполяцией. Это дало нам симметричную расстановку Вермера.

Нам удалось получить гиперболы дифрагированных волн без аляйсинга. Это позволило успешно применить в обработке процедуры подавления линейного и параболического шума и подавления кратных волн. Высоко-разрешающая временная миграция Кирхгофа (PSTM) была дополнена плотной пространственной сеткой 3D наблюдений и высокой плотностью трасс, что позволило получить высокую разрешенность и большое значение отношения сигнал/шум (Рис. 2). В 2005 было пробурено несколько успешных разведочных скважин, вскрывших мощные интервалы нефти и газа.

### Восточно-яванское море

Для изучения целевого объекта в интервале 0.7 - 1.5 с была достигнута очень высокая разрешенность и получено четкое изображение. Исследуемая область осложнена

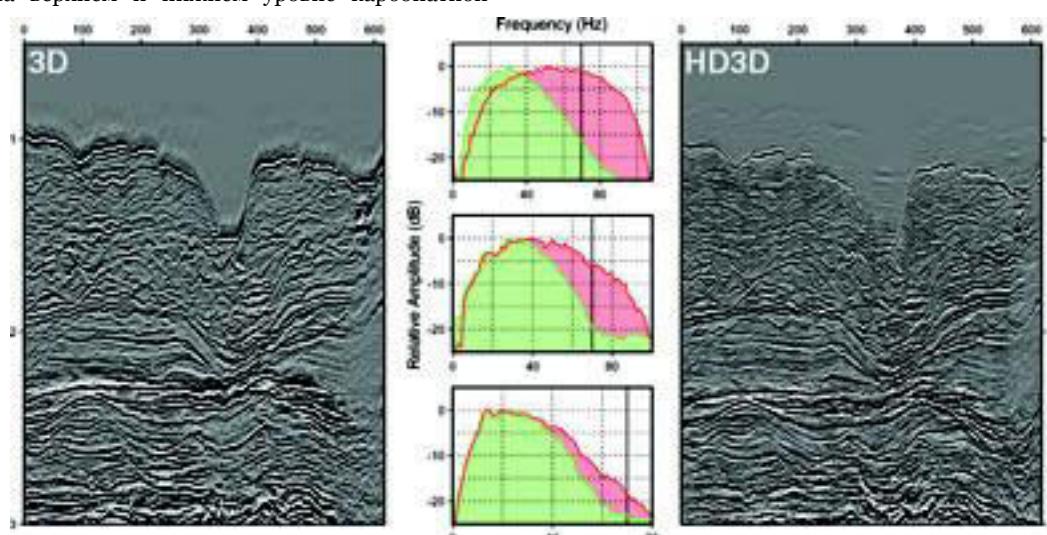
## Морская Сейсморазведка



**Рис. 3** (Слева) Временной срез по данным съемки HD3D в Восточно-Яванском море на 0.15 с двойного времени пробега. разрешенность сложного меандрирующего канала просто великолепная. масштаб по горизонтали 1 см:15 км. (Справа) Перспективный вид данных 3D, визуализирован в системе интерпретации *holoSeis*. Здесь представлена кровля карбонатного коллектора Kijung (~ 1.0 с двойное время пробега), показаны плотность и сложность распределения карбонатов по району съемки HD3D.

карбонатными постройками и высоким уровнем сейсмического шума. Параметры системы наблюдений были следующие: расстояние между косами 62.5 м, глубина погружения источника 5 м и глубина погружения косы 6 м, интервал между точками возбуждения 12.5 м. Буксировалось 12 кос, что позволило ежедневно проводить съемку 50 км<sup>2</sup>/день, совокупно 3963 км<sup>2</sup> съемки HD3D. Высокое значение сигнал/шум и отличная разрешенность данных съемки HD3D в Восточно-Яванском море позволили выявить наличие многочисленных, иногда сложно-построенных структур на верхнем и нижнем уровне карбонатной формации,

и на уровне фундамента. Высокая плотность наблюдений волнового поля без аляйсинга позволяет проводить обработку для подавления шума всех типов; проведение миграции Кирхгофа до суммирования позволило получить разрез с очень высокой разрешенностью и высоким качеством на всех целевых глубинах (Рис. 3). Этот пример демонстрирует преимущество съемки HD3D в областях с высоким уровнем шума.



**Рис. 4** Глубоководная область вблизи Филиппин. Сравнение данных и частотного спектра (окно 800 мс) 3D данных, полученных при размере бина 13.33 x 26.66 м (слева: 95,000 трасс/км<sup>2</sup>) и данных съемки HD3D при размере бина 6.25 x 12.5 м (справа: 691,000 трасса/км<sup>2</sup>). Исходные 3D данные были переобработаны, подвергнуты глубинной миграции до суммирования и скорректированы для построения изображения. Новые данные съемки HD3D были обработаны вплоть до временной миграции. Частотный состав новых данных HD3D по глубине значительно ограничен поглощением, когда старые данные ограничены пространственной частотой Найквиста.

## Морская Сейсморазведка

### Глубоководная область вблизи Филиппин

Съемка и обработка данных HD3D смогли преодолеть исторически сложившиеся проблемы с построением модели карбонатного коллектора со сложной структурой, примерно на ~ 3.2 с двойного времени пробега под очень шероховатым дном и стратиграфически сложной зоной малых скоростей. Наблюдения проводились при расстоянии между косами 50 м, глубиной погружения кос 6 м, при количестве кос 12. Антипараллельное возбуждение использовалось для улучшения покрытия целевого объекта под шероховатым дном и сложно-построенной покрывающей толщей.

При частоте 70 Гц новые данные, полученные по методике HD3D, на 15 дБ интенсивнее, чем существовавшие ранее данные 3D – даже без применения отбеливания спектра или компенсации поглощения (Рис. 4). Временная миграция до суммирования по HD3D данным дает улучшенную разрешенность по разломам, чем для более ранних данных.

### Заключение

Высокая разрешенность сейсмических данных 3D достигается путем соблюдения строгих геофизических принципов. В частности, систематическое соблюдение следующих аспектов: 1. Равномерное покрытие целевого объекта, 2. Плотная пространственная сетка наблюдений волнового поля отраженных волн и 3. Аккуратная обработка и миграция – все это вместе позволит получить оптимальный результат. Обратите внимание, что последний этап никогда не удастся успешно преодолеть, если не будут соблюдены правильное покрытие объекта и сетка наблюдений.

В этой статье было представлено три примера съемки и обработки данных HD3D, было продемонстрировано, как съемку HD3D можно легко адаптировать к различным сложным обстановкам, чтобы обеспечить наилучшую основу для последующей обработки. При правильном планировании проведения съемки всегда учитывается следующее:

- Конструкция источника, которая позволяет максимально расширить частотный диапазон для всех целевых глубин, при этом импульс должен быть устойчивым.
- Глубины погружения источника и косы выбираются для целевого диапазона частот, также необходимо учитывать совместимость с геологическими, геофизическими факторами и с окружающей средой.
- Четкое выполнение критерия симметричной сетки 2D наблюдений, где это возможно, это позволит минимизировать шум и артефакты в процессе обработки, повысить отношение сигнал/шум.
- Использование плотной пространственной сетки 3D наблюдений, подходящего диапазона частот, включая наблюдения всех дифракционных осей синфазности и шума без алийсинга, для последующего их удаления в процессе обработки.
- Специализированный граф обработки 3D данных, включая регуляризацию, подавление шума, подавление кратных волн и миграцию до суммирования, должен использовать все преимущество набора 3D данных с правильной сеткой наблюдений.