

Определение сигнатуры взаимодействующих расстановок морских сейсмических источников в дальней зоне при измерениях в ближней зоне – результаты Дельфтского эксперимента с пневмопушкой. The determination of the far-field signature of an interacting array of marine seismic sources from near-field measurements - results from the Delft Air Gun Experiment

Anton Ziolkowski* (Антон Циолковский)

Данные дельфского эксперимента с пневмопушкой говорят об успехе нового метода определения сигнатуры расстановки морского сейсмического источника в дальней зоне по наблюдениям в ближнем поле.

Метод требует измерения поля волн расстановки в ближней зоне с помощью гидрофонов с известной относительной чувствительностью и известной конфигурацией по отношению к одиночным элементам источника в расстановке. Пусть имеется n таких элементов источника, для определения поля требуется по крайней мере n гидрофонов в ближней зоне.

Результаты работ в Северном море с одним профилем возбуждения с расстановкой пневмопушек разной мощности, рассчитанной на подавление импульсов от пульсирующих пузырей, говорят о том, что деконволюция с использованием формы импульса источника для импульса, рассчитанного по этим измерениям в ближней зоне является по меньшей мере, также эффективной как деконволюция с использованием формы импульса источника для сигнатуры, полученной в дальней зоне. Один и тот же профиль был получен снова с использованием пневмопушек с рассинхронизацией на 100 мс; данные с гидрофонов в ближней зоне позволяют провести детерминистическую деконволюцию с использованием формы импульса источника, и получить разрез очень похожий на разрез, полученный с помощью группы морских источников разной мощности, рассчитанной на подавление импульсов от пульсирующих пузырей. Без этой деконволюции с использованием сигнатуры данных без настройки источников, полученный разрез неприемлем.

Мощность метода заключается в способности определять все поле волн для каждого возбуждения. Таким образом, изменения от источника к источнику и направленность источников может учитываться при обработке. Эта способность не была использована в представленных здесь результатах.

Введение: измерения в дальней зоне

Расстановка морских сейсмических источников длиной D является направленной при длинах волн X , которые невелики по сравнению с D . Для $X < D$ расстановка имеет 'ближнюю зону' в пределах диапазона, менее D^2/X , и 'дальнюю зону' вне этого диапазона (смотрите, например, Stoffa & Ziolkowski 1983). В некотором направлении форма сигнала меняется с расстоянием в ближней зоне. 'Дальняя зона' определяется как область, где форма сигнала не меняется с расстоянием. Более точно, в дальней зоне как амплитудный, так и фазовый спектр сигнатуры с запаздыванием (после вычитания времени пробега) остаются одинаковыми в заданном направлении. Сигнатура естественно, меняется с

направлением в дальней зоне в зависимости от частоты (смотрите Fricke *et al.* 1985).

При сейсмических частотах в диапазоне 10-100 Гц, длины волн в воде достигают 150-15 м при скорости 1500 м с⁻¹. Обычная подрасстановка пневмопушек имеет длину 20 м и имеет направленность при 100 Гц и незначительную направленность при 10 Гц. Дальняя зона одной подрасстановки источников длиной 20 м находится на расстоянии 35 м для полосы частот до 100 Гц, и на 70 м для полосы частот до 200 Гц. Типичная расстановка пневмопушек состоит из нескольких подрасстановок (смотрите Рис. 3). Общий эффект группирования, конечно, гораздо более направленный чем эффект группирования одной подрасстановки.

Типичные измерения в дальней зоне будут выполняться как показано на Рис. 1, при этом гидрофоны в дальней зоне находятся порядка 100 м под расстановкой источников и установлены в воде практически стационарно. Измеренный вертикально под расстановкой сигнал, будет таким как показано на верхней трассе рис. 2. Этот сигнал имеет в длину около 200 мс и не содержит помех-отражений от дна, поскольку глубина воды под гидрофоном в дальней зоне достаточна. Каждые 75 м глубины воды под гидрофоном дает задержку эхо на 100 мс, поскольку звук должен пройти через слой воды дважды. Для измерений нисходящего сигнала 200 мс необходимо, следовательно, иметь по крайней мере глубину воды 150 м под гидрофоном в дальней зоне. Таким образом, для проведения этих измерений требуется глубина воды не меньше 250 м. (Измерения на рис. 2 были выполнены в воде при глубинах более 400 м.)

Большая часть морских сейсморазведочных работ выполняется на малоглубинном континентальном шельфе при глубинах менее 100 м. Добыча нефти из коллекторов в более глубоких водах является не столь близкой задачей. Отсюда следует, что измерения сигнатуры источника в дальней зоне нельзя выполнять при сейсмических работах из-за того, что глубины волны слишком малы. Они должны выполняться путем отдельного эксперимента на глубоких водах вдали от изучаемого района.

Сигнатура источника должна меняться с расстоянием при небольших длинах волн, по сравнению с размерами источника. Также вероятно, что поле группы источников в вертикальном направлении в дальней зоне отлично от измеренного поля в дальней зоне, поскольку пушки двигаются по вертикали при нормальной скорости буксирования в 5 узлов. Что требуется – так это метод определения измерений в дальней зоне при сейсморазведочных работах. Такой метод был впервые предложен Ziolkowski *et al.* (1981).

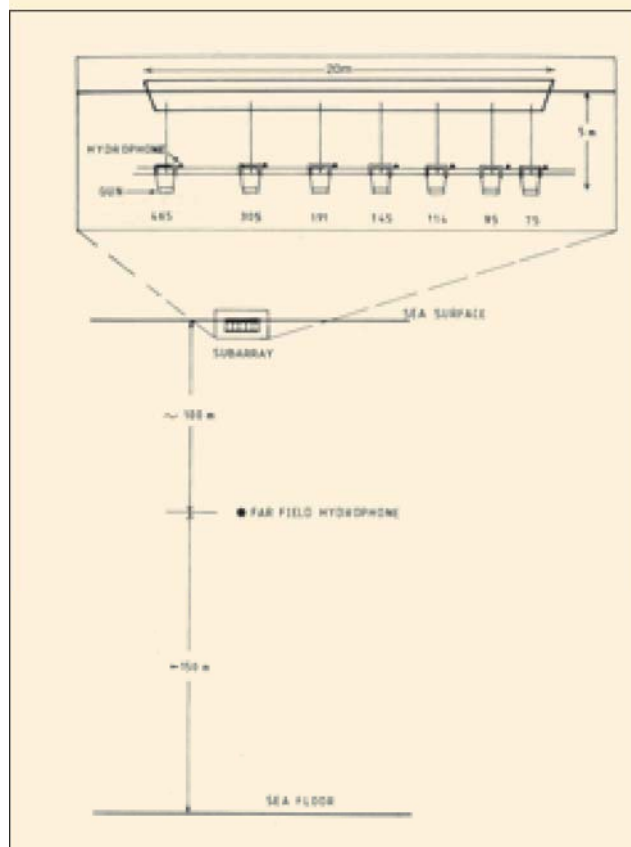
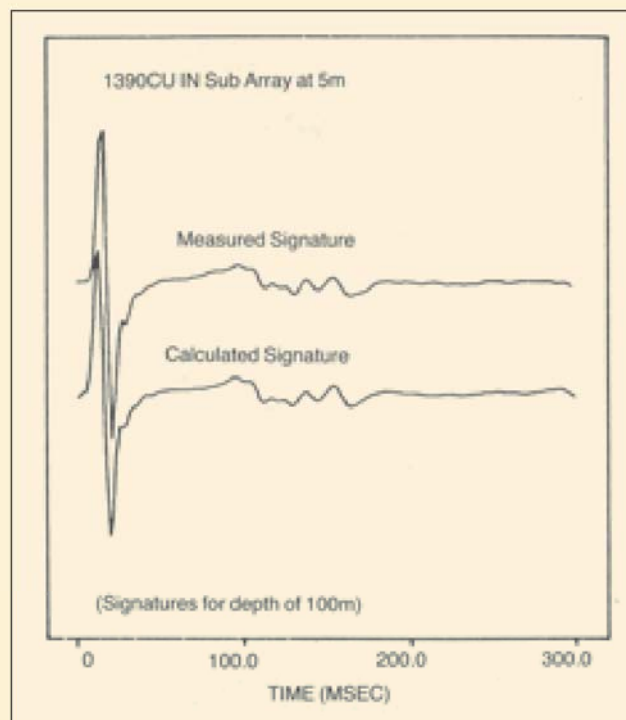


Рисунок 1 Измерения сигнатуры подрасстановки пневмопушки в дальней зоне. Для измерения полного нисходящего сигнала расстановки, вступление эхо от дна должно быть взято с задержкой на глубину воды под гидрофоном в дальней зоне. Также показаны гидрофоны в ближней зоне, важные для метода взаимодействия.

Взаимодействие

Акустическая волна, генерируемая расстановкой морских сейсмических источников, является не просто суперпозицией акустических волн, которые бы выпускались отдельными элементами источника расстановки, действующими независимо. На каждый источник влияют источники, расположенные поблизости. Таким образом, источники взаимодействуют между собой, и их взаимодействие зависит от размеров источников и их геометрии. Это известно уже несколько лет. До того, как был применен метод, названный 'изобретением интерференции' (Ziolkowski *et al.* 1981, 1982, 1984), единственным методом определения сигнатуры группы в дальней зоне был метод измерений в дальней зоне. Изобретение позволило определять *все* поле волн (не только сигнатуру в дальней зоне в одном направлении) по данным измерений в ближней зоне, выполняемых в процессе производственных работ.

Изобретение последовало непосредственно за пониманием механизма взаимодействия. Звуковая волна, генерируемая одной пневмопушкой, вызывается свободными осцилляциями пузырька, выпускаемого пушкой. В расстановке пушек каждая пушка дает отдельный пульсирующий пузырь, Рисунок 2 Измеренная сигнатура в дальней зоне по сравнению с сигнатурой, рассчитанной по измерениям в ближней зоне. Скорость судна порядка 2.5 узлов



(Parkes *et al.* 1984).

который порождает свою волну давления. Таким образом, каждый пузырек осциллирует в воде, в которой внешнее давление флуктуирует из-за волн давления от других пузырей. Разница давлений поперек каждого пузырька в расстановке не одинаково как оно было бы при осцилляции пузырька без внешних воздействий. Поэтому на осцилляцию каждого пузырька влияют другие пузырьки и волна звука, генерируемая этими осцилляциями, также модифицируется. Между тем, каждый пузырек дает звуковую волну и, поскольку каждый пузырек мал по сравнению с длиной этой звуковой волны, пузырек имеет сферическую симметрию.

Если имеется n источников (например, пневмопушек) в расстановке, распространяется n сферических волн, центром каждой из них является осциллирующий пузырек. Каждый из этих пузырьков имеет собственную сигнатуру, известную как 'сигнатура воображаемого источника' (Ziolkowski *et al.* 1982; Parkes *et al.* 1984). В каждой точке поля звуковая волна может быть описана суперпозицией n сигнатур воображаемого источника, у которых имеется задержка времени пробега и коэффициент сферического расхождения для каждой сигнатуры воображаемого источника. Если известны сигнатуры воображаемых источников, в любой точке поля может быть рассчитана звуковая волна путем их суперпозиции. В частности, можно определить сигнатуру расстановки в дальней зоне. Таким образом, ключом к определению поля волн является определение сигнатур n воображаемых источников.

Один гидрофон где-либо в поле волн будет измерять звуковую волну, которую можно описать как суперпозицию этих n сигнатур воображаемых источников. Если мы имеем n гидрофонов, в разных точках, каждый из них измеряет

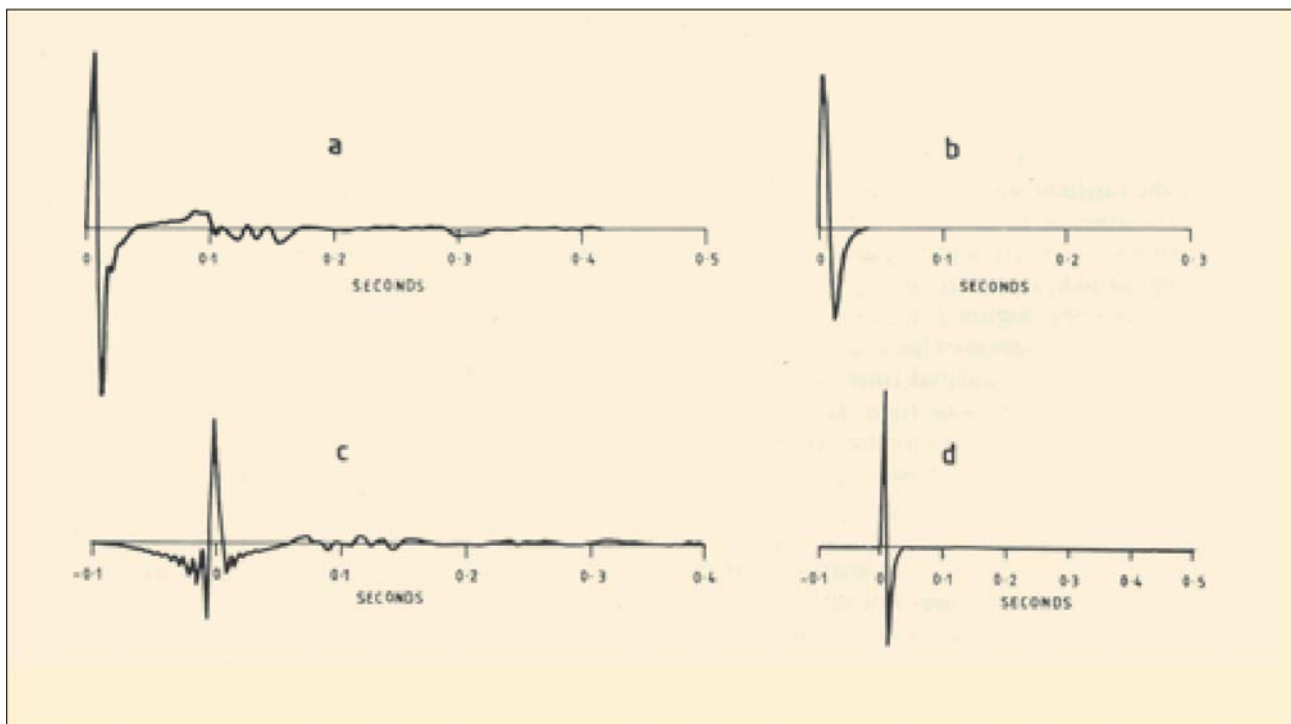


Рисунок 4 Деконволюция с использованием формы импульса источника, измеренной в дальней зоне, тест 1, профиль 1: (a) измеренная сигнатура в дальней зоне; (b) желаемый минимально-фазовый выходной сигнал; (c) формирующий фильтр Винера, для которого желаемый выходной сигнал имеет задержку 100 мс; (d) свертка (a) с (c) (не в том же масштабе времени).

нечто отличное друг от друга, поскольку коэффициенты сферического расхождения и временные задержки различных гидрофонов разные. Поскольку надо найти n сигнатур воображаемых источников, надо выполнить n независимых измерений поля волн. Это даст n линейных уравнений, которые можно решить и найти n неизвестных сигнатур воображаемых источников. Временные задержки и коэффициенты сферического расхождения можно рассчитать, если известны положения этих гидрофонов относительно геометрии расстановки. Чтобы соотнести отклик гидрофонов и поля давлений, должны быть известны относительные чувствительности гидрофонов. Поскольку эта теория применяется всюду для линейных полей, эти измерения можно выполнять очень близко от пушек, даже ближе чем на расстоянии 1 м. Из-за коэффициента сферического расхождения, можно пренебречь отражением от морского дна для глубин воды порядка 20 м и более. (Расстояние 20 м конечно, произвольная. На практике уровень шума на гидрофонов в ближней зоне ограничивает эффективный динамический диапазон и 20 м может быть практичным значением.) Это позволяет использовать метод при сейсморазведке на континентальном шельфе.

Таким образом, изобретение состоит из 3 частей. Первое, измерения поля давлений в n известных точках в ближней зоне расстановки. Эти измерения *определяют* поле волн. Второе, извлечение сигнатур воображаемых источников из измерений. Третье, расчет поля волн, в частности сигнатуры в дальней зоне в вертикальном направлении, путем суперпозиции сигнатур воображаемых источников.

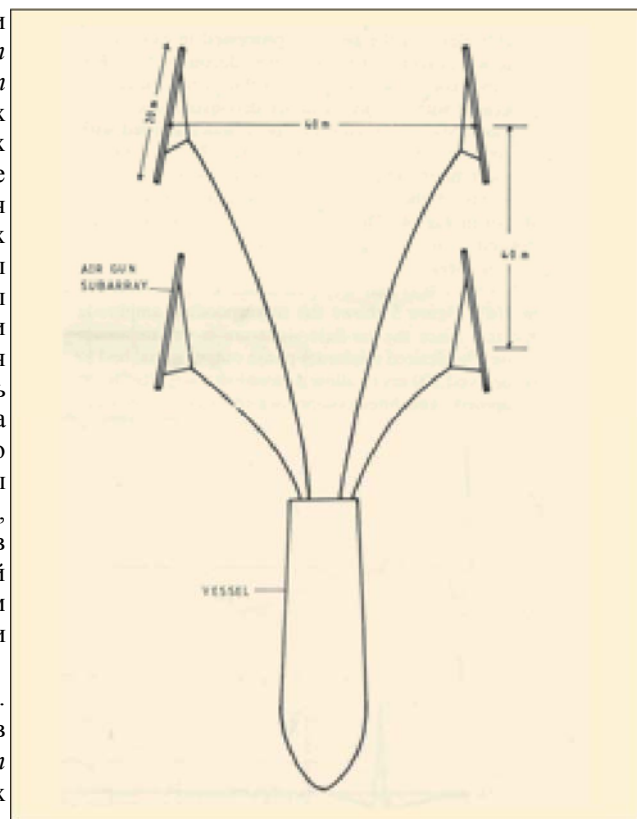


Рисунок 3 План конфигурации подрасстановок пневмо пушек, используемый в эксперименте.

На рисунке 1 показан эксперимент, в котором измеряется вертикальная компонента сигнатуры в дальней зоне, и также показаны n гидрофонов в ближней зоне. На рисунке 2, взятом из Parkes *et al.* (1984), показано сравнение измеренной сигнатуры в дальней зоне и сигнала, рассчитанный по измерениям в ближней зоне в то же время. Можно видеть, что рассчитанная сигнатура в дальней зоне очень похожа на измерения в дальней зоне.

Дельфтский эксперимент с пневмопушкой

Рисунок 2 представляет собой такую убедительную демонстрацию возможностей этого изобретения, что найти спонсоров, которые бы протестировали этот метод в действии, было не трудно. Тесты были проведены в мае 1983 в Северном море и явились частью Дельфтского эксперимента с пневмопушкой. Предпосылки этого проекта описаны Ziolkowski (1984).

Для изучения взаимодействия мы сделали 2 теста. Первый тест включал 20-км сейсмический профиль в Северном море с использованием квадратной расстановки пушек из четырех идентичных подрасстановок, как показано на Рис. 3. Каждая подрасстановка имела вид как на Рис. 1. Для каждого возбуждения подрасстановок в цифровом виде на ленту были записаны отклики семи гидрофонами в ближней зоне, при этом аналоговые фильтры были такими же, как для приемных каналов. При каждом возбуждении залп пушек был одновременным, использовался контроллер пушек LRS 100 для поддержания синхронизации. Интервал возбуждения составлял 25 м, интервал между приемными группами был 25 м, всего было 100 приемных групп. Глубина приемного кабеля была $7.5 \text{ м} \pm 1 \text{ м}$.

Данные записывались с ФВЧ 3.5 Гц и ФНЧ 128 Гц, с шагом дискретизации 2 мс. Второй тест (тест 5 в эксперименте) был для того же профиля, с теми же параметрами возбуждения, за исключением того, что пушки не стреляли одновременно.

Тест 1: профиль 1 (tuned air gun source)

В первом тесте было определено дает ли метод взаимодействия столь же хорошие результаты как традиционный метод, основанный на измерениях в дальней зоне. Данные были обработаны для того, чтобы обеспечить возможность сравнения между традиционным методом и новым методом с помощью изобретения взаимодействия. Обработка до суммирования включала: (1) приведение сигнатуры к минимально-фазовому виду; (2) экспоненциальная коррекция усиления (e^{at}) для того, чтобы сделать данные почти стационарными; (3) предсказывающая деконволюция для избавления от кратных в водном слое (используя оператор 180-мс с 60-мс интервалом); (4) устранение регулировки усиления (e^{-at}).

В этой последовательности единственной процедурой, которая зависит от сигнатуры, является деконволюция. В этой процедуре можно использовать любые две сигнатуры в дальней зоне: сигнатура в дальней зоне, измеренная в дальней зоне (верхняя сигнатура на рис. 2), и сигнатура в дальней зоне, рассчитанная по измерениям в ближней зоне, выполненным в процессе разведки. Для сравнения данные были скопированы после демультимплексации и два набора были обработаны одним и тем же способом, за исключением деконволюции с использованием формы сигнатуры. Для дальнейшего сравнения мы сделали

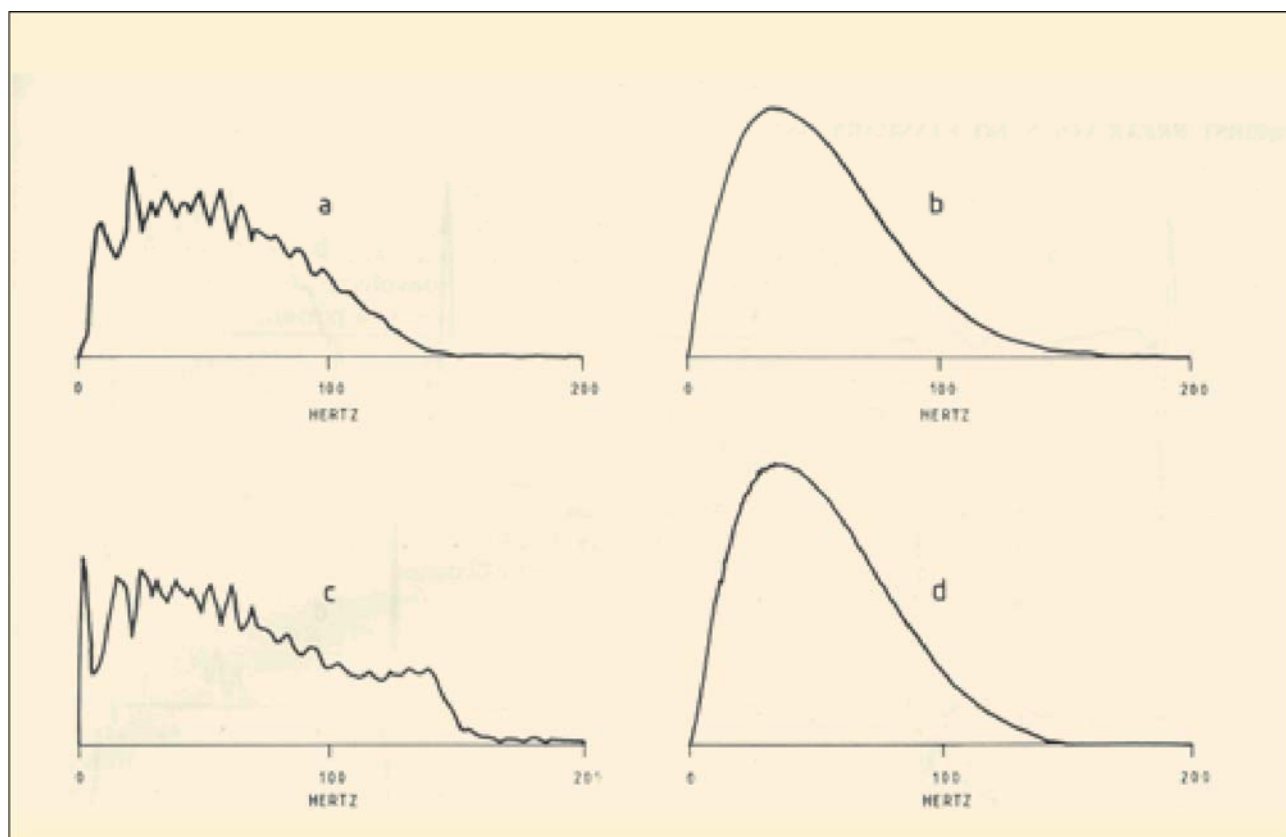


Рисунок 5 Амплитудный спектр, соответствующий сигнатурам во временной области с Рис. 4, отображенным в линейном масштабе: (a) спектр сигнатуры в дальней зоне; (b) желаемый выходной спектр; (c) спектр формирующего фильтра Винера; (d) произведение спектра (a) и (c).

третью копию, которая была обработана без деконволюции с использованием формы сигнатуры.

Сигнатура в дальней зоне на Рис. 2 была записана без фильтрации ФВЧ и с фильтром ФНЧ 128 Гц, 72 дБ октаву⁻¹. Шаг дискретизации был равен 2 мс. Элементы процесса деконволюции с использованием формы сигнатуры показаны на Рис. 4. Сигнатура показана на 4(а), желаемый выходной минимально-фазовый сигнал показан на 4(б), фильтр Винера на основе наименьших квадратов показан на 4(с) и свертка 4(а) и 4(с) (выходной сигнал) показан на 4(д). На рисунке 5 показаны соответствующие амплитудные спектры. Поскольку сигнатура в дальней зоне не является минимально-фазовой, желаемый минимально-фазовый выходной сигнал должен иметь задержку 100 мс для того, чтобы было возможно рассчитать формирующий фильтр. Фильтр очень хорошо сжимает сигнал, при этом во временной или частотной области остается незначительный шум.

Каждая трасса каждого возбуждения в традиционном обротанных данных была свернута с фильтром, показанным на Рис. 4(с). На Рисунке 9 изображена часть получившегося суммированного сейсмического разреза.

Для расчета сигнатуры в дальней зоне по измерениям в ближней зоне имеется много возможностей. Для каждого возбуждения имеется различные наборы измерений в ближней зоне, таким образом, в принципе, для каждого возбуждения можно рассчитать различные сигнатуры, для компенсации любых изменений от возбуждения к возбуждению. Поскольку сигнатура в дальней зоне может быть рассчитана в любом направлении, было принципиально возможно использовать сигнатуру отличную от вертикальной. Даже возможно, с этим набором данных, учитывать изменения сигнатуры с расстоянием. Для Дельфтского эксперимента с пневмопушкой мы рассчитывали только одну вертикальную сигнатуру в дальней зоне и это было основано только на одном наборе измерений одной поддвассановки пневмопушек.

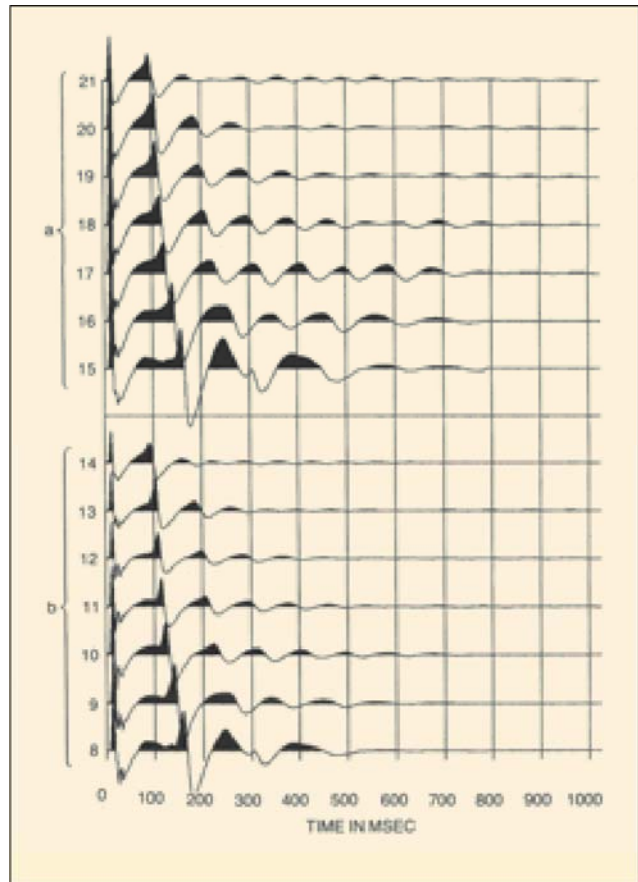
Рисунок 6(а) отображает измерения гидрофоном в ближней зоне для одного возбуждения, и 6(б) показывает сигнатуры воображаемого источника, рассчитанные по этим измерениям. Затем вертикальная сигнатура в дальней зоне рассчитывается из этих сигнатур воображаемых источников путем их суперпозиции и с включением отражения от поверхности моря. Эта сигнатура показана на Рисунке 7(а). Она слегка отличается от расчета сигнатуры в дальней зоне на Рис. 2, поскольку для разведочного профиля был использован ФВЧ 3.5 Гц.

На Рисунке 7 показана деконволюция с использованием сигнатуры, рассчитанной для дальней зоны таким способом: 7(а) отображает сигнатуру; 7(б) отражает минимально-фазовую 'желаемую выходную сигнатуру', такую же как 4(б); 7(с) показывает формирующий фильтр на основе наименьших квадратов; 7(д) показывает свертку 7(а) с 7(с) (реальный сигнал на выходе). Рисунок 8 показывает амплитудный спектр четырех импульсов на Рис. 7. Снова сигнатура не является минимально-фазовой и временная задержка порядка 250 мс должна была быть введена в желаемый выходной сигнал, чтобы фильтр был причинный. Главное отличие между фильтром 7(с) и показанным на рисунке 4(с) вызван тем, что ФВЧ был введен для измерений в ближней зоне. Этот фильтр не обязательный для этих измерений, конечно, но он был использован для подавления низкочастотного шума в данных МОВ.

© 2007 EAGE

Результат использования деконволюции с использованием формы сигнатуры на Рис. 7(с) данных показан на Рис. 10. Сравнение Рис. 9 и 10

Рисунок 6 (а) Трассы 15-21: набор измерений в ближней зоне поддвассановки пневмопушек показан на Рис. 1, для настроенной расстановки, тест 1, профиль 1; (б) трассы 8-14: сигнатуры воображаемых источников, полученные



в процессе измерений (а).

говорят о незначительной разнице. Полные возможности метода суперпозиции должны быть выявлены на этих данных: все еще есть возможность учесть направленность источника и изменения сигнатуры от ПВ к ПВ. Из этого простого сравнения ясно, что суперпозиция позволяет обрабатывать данные с разрешением по крайней мере, таким же как при тщательных измерениях в дальней зоне во временной области.

Для сравнения, на Рис. 11 показан результат пропуска этапа деконволюции с использованием формы сигнатуры. Сигнатура источника настолько хороша, что, даже без деконволюции, разрез является приемлемым. Однако, деконволюция на основе сигнатуры увеличивает разрешение особенно по глубине, как и ожидается.

Нет ничего удивительного в том, что Рис. 9 и 10 отличаются. Как только тест изобретения на рис. 2 был принят, ожидается сравнение между Рис 9 и 10. Т.о. мы решили подвергнуть изобретение более суровому тестированию.

Тест 5: профиль 1R (несинхронный пневмоисточник)

Четкая сигнатура была получена путем контроля одновременного возбуждения пневмопушек, и в целях синхронизации 1 мс был использован контроллер.

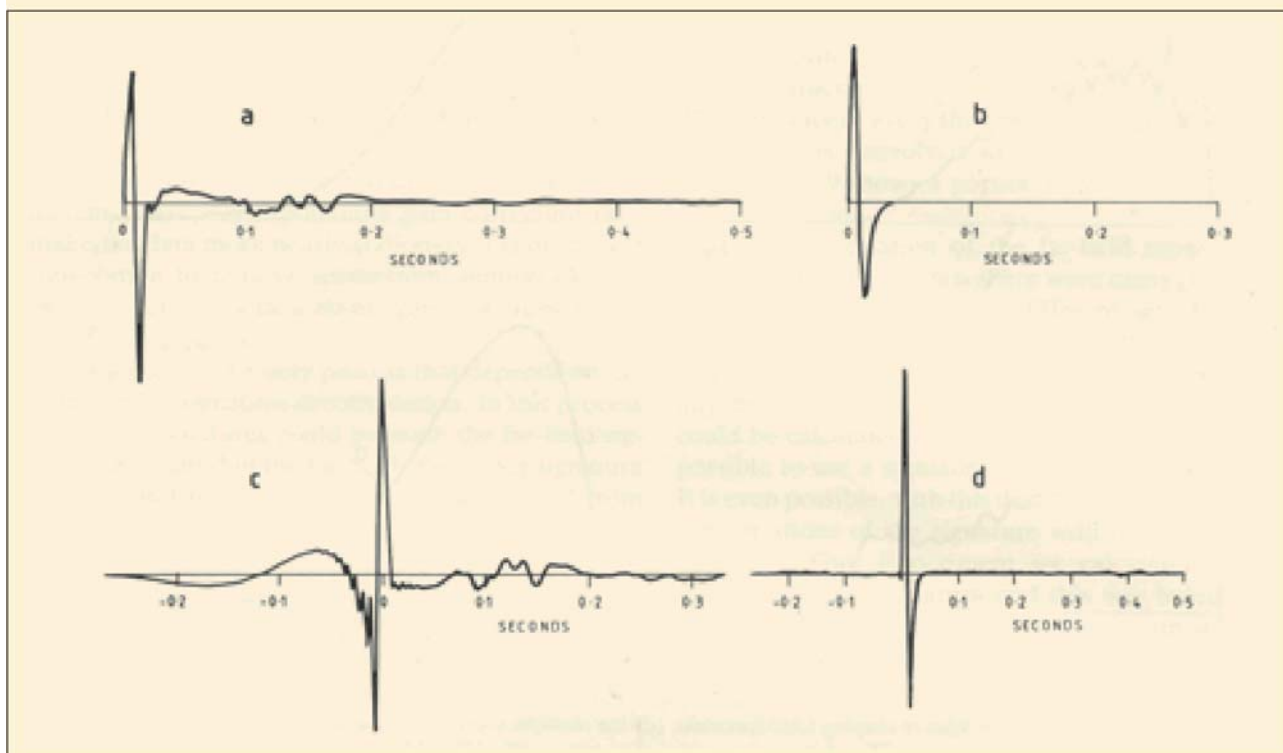


Рисунок 7 Деконволюция на основе формы импульса, с использованием сигнатуры в дальней зоне, рассчитанной по измерениям в ближней зоне, тест 1, профиль 1: (а) сигнатура в дальней зоне; (b) минимально-фазовый 'желаемый' выходной сигнал, такой же как 4(b); (c) Винеровский формирующий фильтр для задержки в 300-мс в желаемом выходном сигнале; (d) свертка (а) и (с) (не в том же временном масштабе).

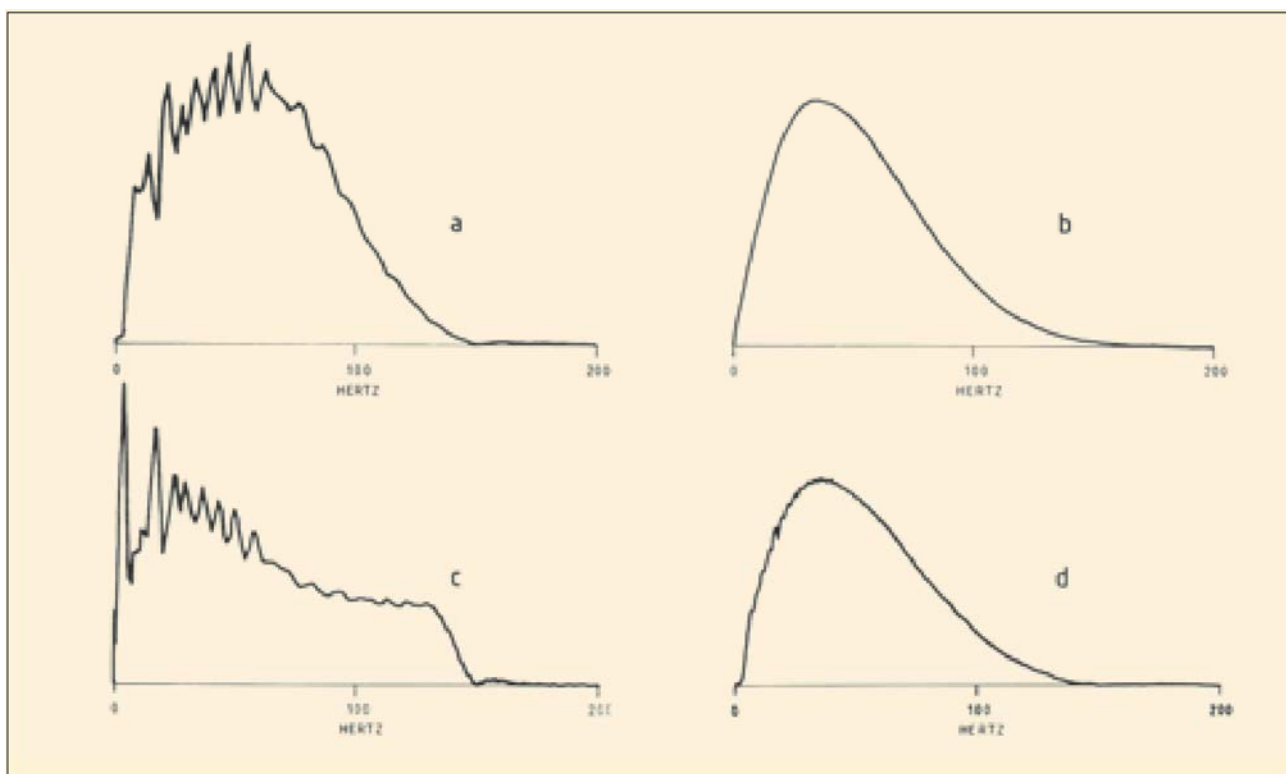


Рисунок 8 Амплитудный спектр, соответствующий сигнатурам во временной области на Рис. 7 отображенным в линейном масштабе: (а) спектр рассчитанной сигнатуры в дальней зоне; (b) желаемый выходной спектр; (с) Спектр Винеровского формирующего фильтра; (d) перемножение спектров (а) и (с).

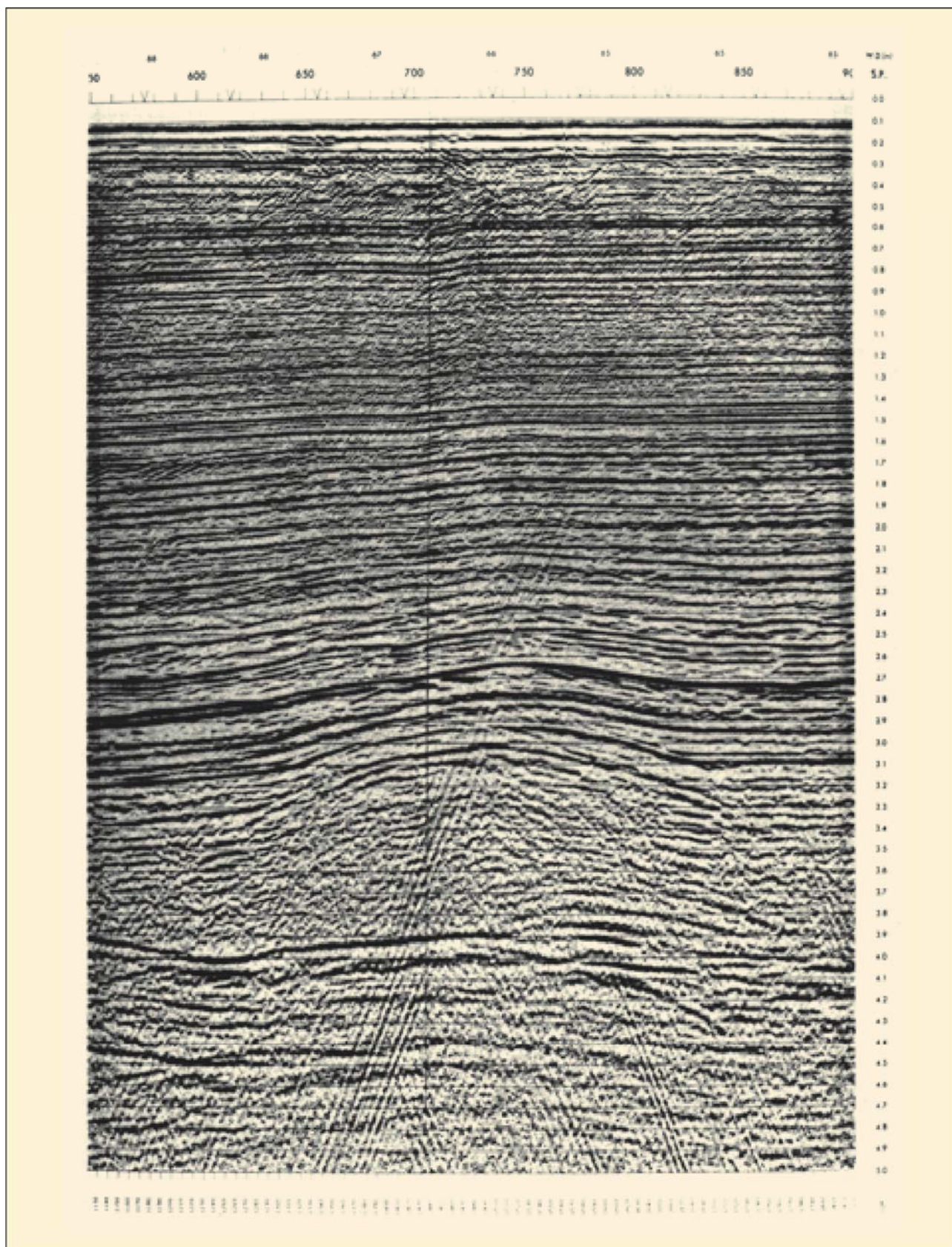


Рисунок 9 Часть обработанных данных профиля 1, тест 1, в которых оператор деконволюции с использованием формы импульса был рассчитан по измерениям в дальней зоне, как описано на Рис 4 и 5. показан разрез длиной 8.75 км.

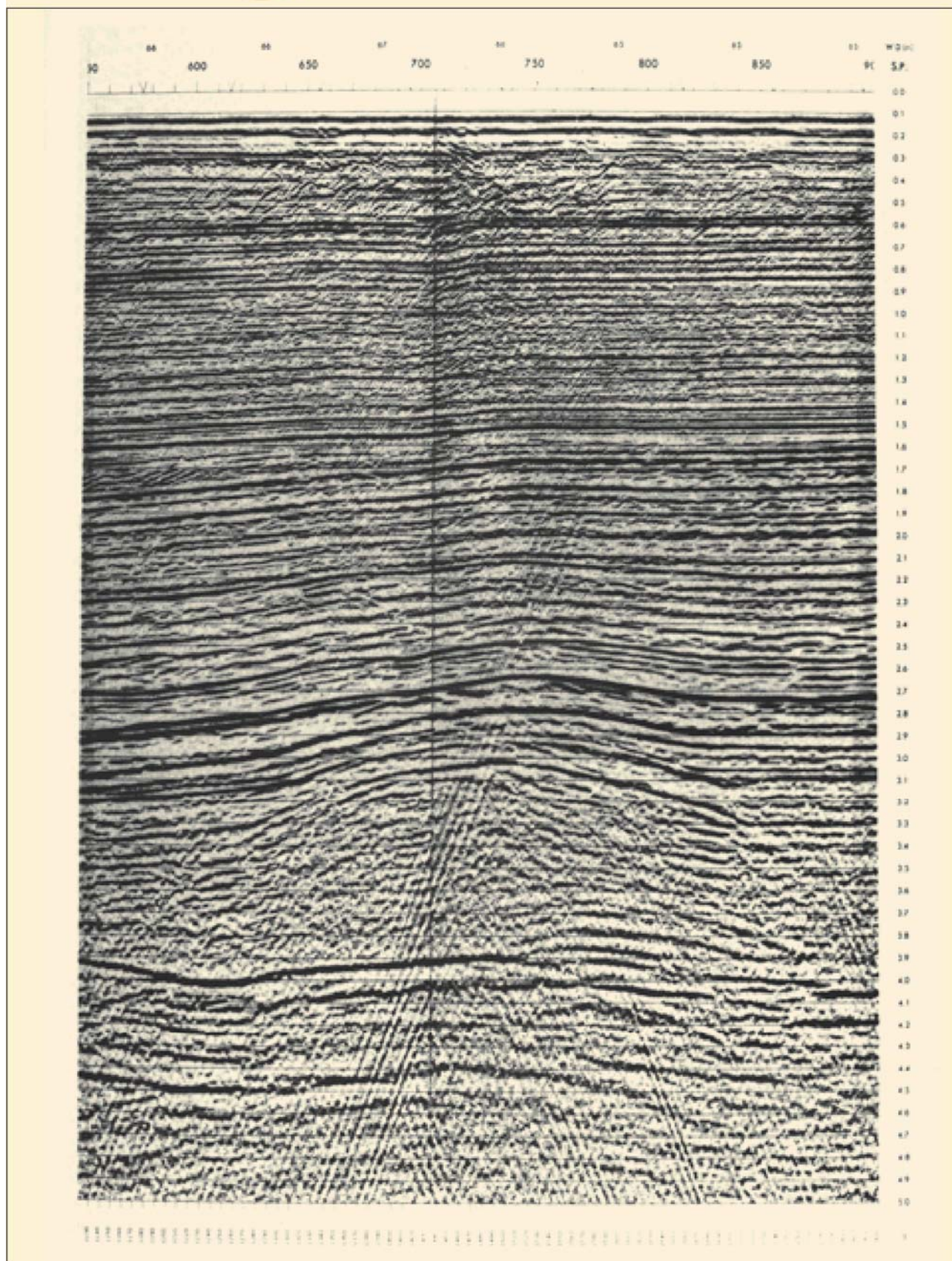


Рисунок 10 Те же данные, что на Рис. 9, за исключением того, что оператор деконволюции на основе сигнатуры был рассчитан по измерениям в ближней зоне как это описано в Рис 6, 7 и 8.

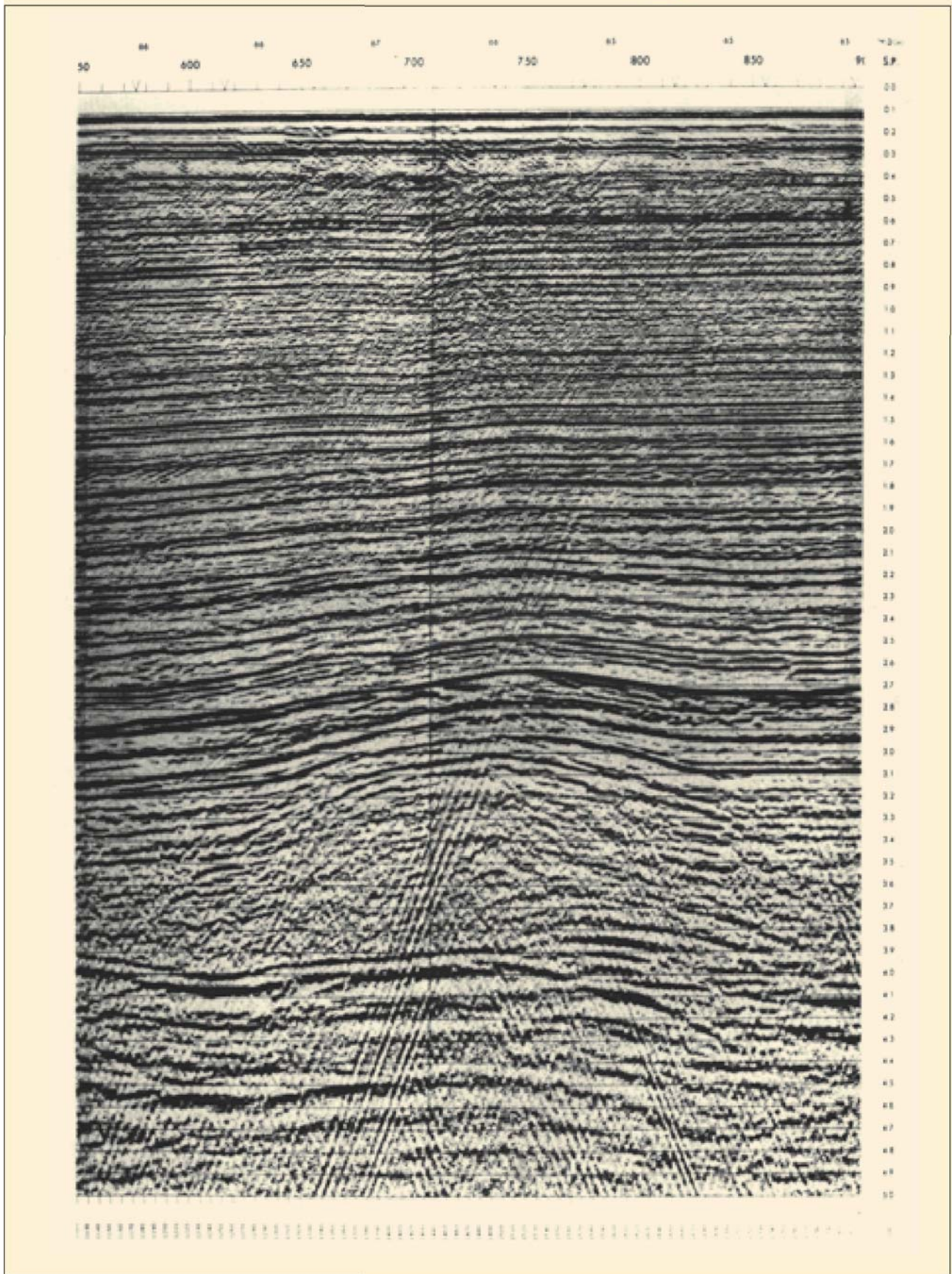


Рисунок 11 Те же данные, что на Рис 9 и 10, без деконволюции на основе формы импульса.

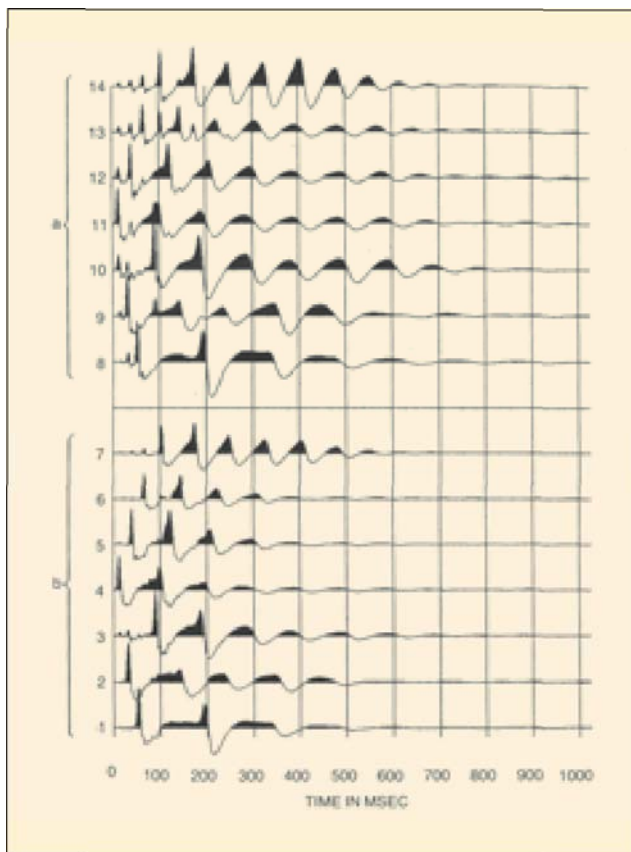


Рисунок 12 (а) трассы 8-14: набор измерений в ближней зоне, полученных с помощью расстановки пневмопушек, показанных на Рис. 1, для теста с несинхронным возбуждением для теста 5, профиль 1R; (б) трассы 1-7: сигнатуры воображаемых источников, полученные в результате измерений (а).

Характеристики регистрации морских данных обычно требуют синхронизации пушек до более чем ± 2 мс. По предложению John Broom из Britoil, мы решили снова отработать профиль с рассинхронизированными пушками со случайными временными задержками между пушками (профиль располагался на том же месте, но возбуждения производились в обратном направлении). Для облегчения обработки, мы использовали контроллер пушки LRS 100 для поддержания плохой синхронизации, и мы сделали, чтобы все подрасстановки источников срабатывали в одной последовательности. Порядок возбуждений был такой: 4, 2, 5, 1, 6, 7. Все пушки номер. 4 срабатывали одновременно, все пушки номер. 2 срабатывали одновременно на 30 мс позже, затем все пушки по. 5, и т.д. Временная задержка между возбуждениями пушек по. 4 и по. 7 была 99 мс.

Рисунок 12(а) показывает измерения гидрофона в ближней зоне от одной из подрасстановок для одного возбуждения. Рисунок 12(б) отображает сигнатуры воображаемых источников, рассчитанные по этим измерениям, и Рис. 13(а) показывает вертикальную компоненту сигнатуры в дальней зоне, рассчитанную по этим воображаемым источникам.

При обработке этого профиля мы хотели показать, что измерения в ближней зоне были существенными для определения сигнатуры в дальней зоне для расчета деконволюции. Т.е., мы копировали данные после демультимплексирования и обрабатывали один набор без деконволюции на основе сигнатуры, а другой набор с использованием деконволюции на основе сигнатуры.

Обработка была идентична той, что выполнялась в тесте 1. Разрез без деконволюции на основе формы сигнала приведен в Рис. 15, разрез с деконволюцией на основе сигнатуры показан на рис. 16.

Детали процедуры деконволюции на основе формы сигнала показаны на рис 13 и 14, и мы видим, что спектр сигнатуры 13(а) имеет много глубоких бороздок, как показано на Рис. 14(а). Фильтру 13(с) предстоит очень трудная работа по сжатию сигнала 13(а) до импульса (13b), и он может это сделать только при введении достаточного уровня шума, как показано на 13(d). Добавлением шума неизбежно из-за большой разницы амплитудного спектра сигнатуры и желаемого минимально-фазового импульса на выходе. Для деконволюции с использованием сигнатуры, каждая трасса профиля была свернута с фильтром 13(с). Результирующий суммарный разрез на Рис. 16 определенно похож на разрез на Рис 9 или 10. Результат неудовлетворителен без деконволюции на основе сигнатуры.

Очевидно, что сигнатура, показанная на рис. 13(а) далека от идеальной, и никто не стал бы сознательно получать сейсмические данные с таким плохим сигналом. Обработка данных, с использованием сигнатуры в дальней зоне, рассчитанной по записям в ближней зоне, явно показывает, что возможно извлекать нечто из явно безнадежной ситуации, и получать приемлемый результат. На практике, конечно, никто не будет ожидать, что параметры разведки будут настолько далеки от общепринятых как это было во втором тесте.

Выводы

Определение сигнатуры в дальней зоне для расстановки морских сейсмических источников путем проведения вертикальных измерений в дальней зоне под расстановкой сталкивается с несколькими проблемами. Первое, ее нельзя проводить на мелководье при глубинах воды менее 250 м, и таким образом, нельзя выполнять при большинстве морских сейсмических съемок, проводимых для нефтяной индустрии. Второе, измерения в дальней зоне обычно должны выполняться с гидрофонами и расстановкой источников, почти стационарными в воде. При нормальных работах скорость судна достигает 5 узлов, и пушки приподняты относительно их положения при стоящем судне. Таким образом, измерения в дальней зоне не могут предоставить сигнатуру, используемую в съемке. Третье, форма сигнатуры варьирует с расстоянием, но нормальные измерения в дальней зоне в вертикальном направлении не отражают измерений этих вариаций. И, в конце концов, вариации от источника к источнику в сигнатуре при съемке измерить нельзя путем отдельных измерений в дальней зоне на глубокой воде.

Метод суперпозиции преодолевает все эти сложности, но требует, чтобы поле давлений от n групп источников было измерено, по крайней мере, в n известных позициях в ближней зоне. Эти измерения определяют поле волн групп источников и, по этим измерениям, можно рассчитывать сигнатуру групп источников в дальней зоне в любом направлении.

В двух тестах этого изобретения, выполненного в Северном море как части Дельфтского эксперимента с пневмопушками, измерения гидрофонами в ближней зоне использовались для расчета вертикальной сигнатуры в дальней зоне для использования в построении оператора деконволюции с использованием формы сигнала.

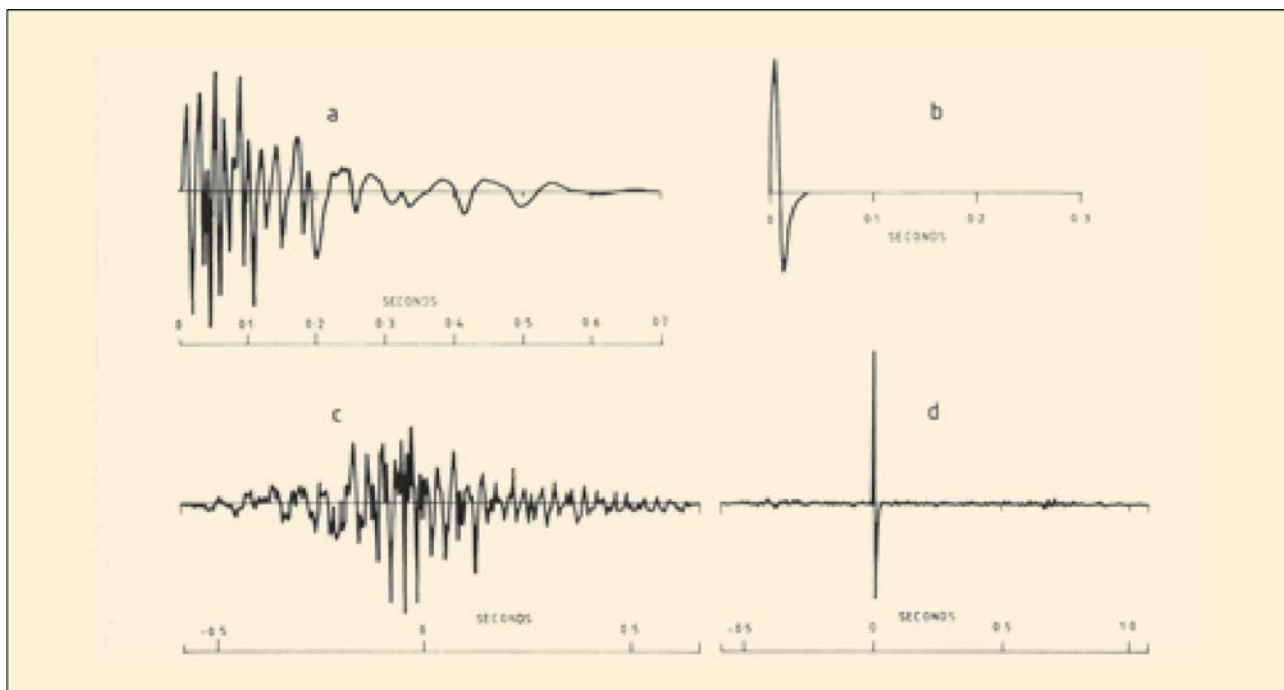


Рисунок 13 Деконволюция с использованием формы импульса при использовании сигнатуры в дальней зоне, рассчитанной по измерениям в ближней зоне, тест 5, профиль 1R: (a) сигнатура в дальней зоне; (b) минимально-фазовый желаемый выходной сигнал, то же что и 4(b) и 8(b); (c) формирующий фильтр Винера для задержки 500-мс в желаемом выходном сигнале (для стабилизации расчетов было добавлено 0.5% белого шума); (d) свертка (a) и (c) (не в том же временном масштабе).

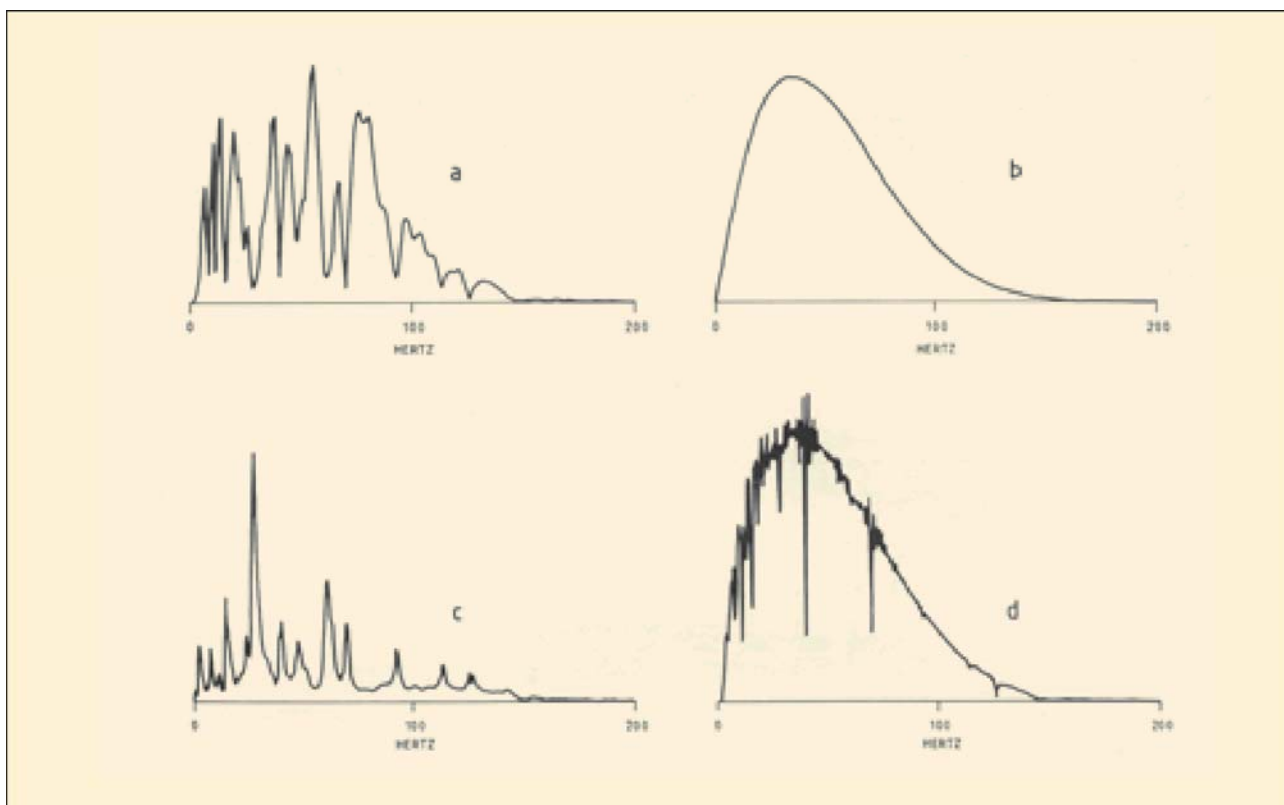


Рисунок 14 Амплитудный спектр, соответствующий сигнатурам во временной области на Рис. 13, отображенный на линейной шкале: (a) спектр сигнатуры в дальней зоне; (b) желаемый выходной спектр; (c) Винеровский формирующий спектр; (d) умножение спектров (a) и (c).

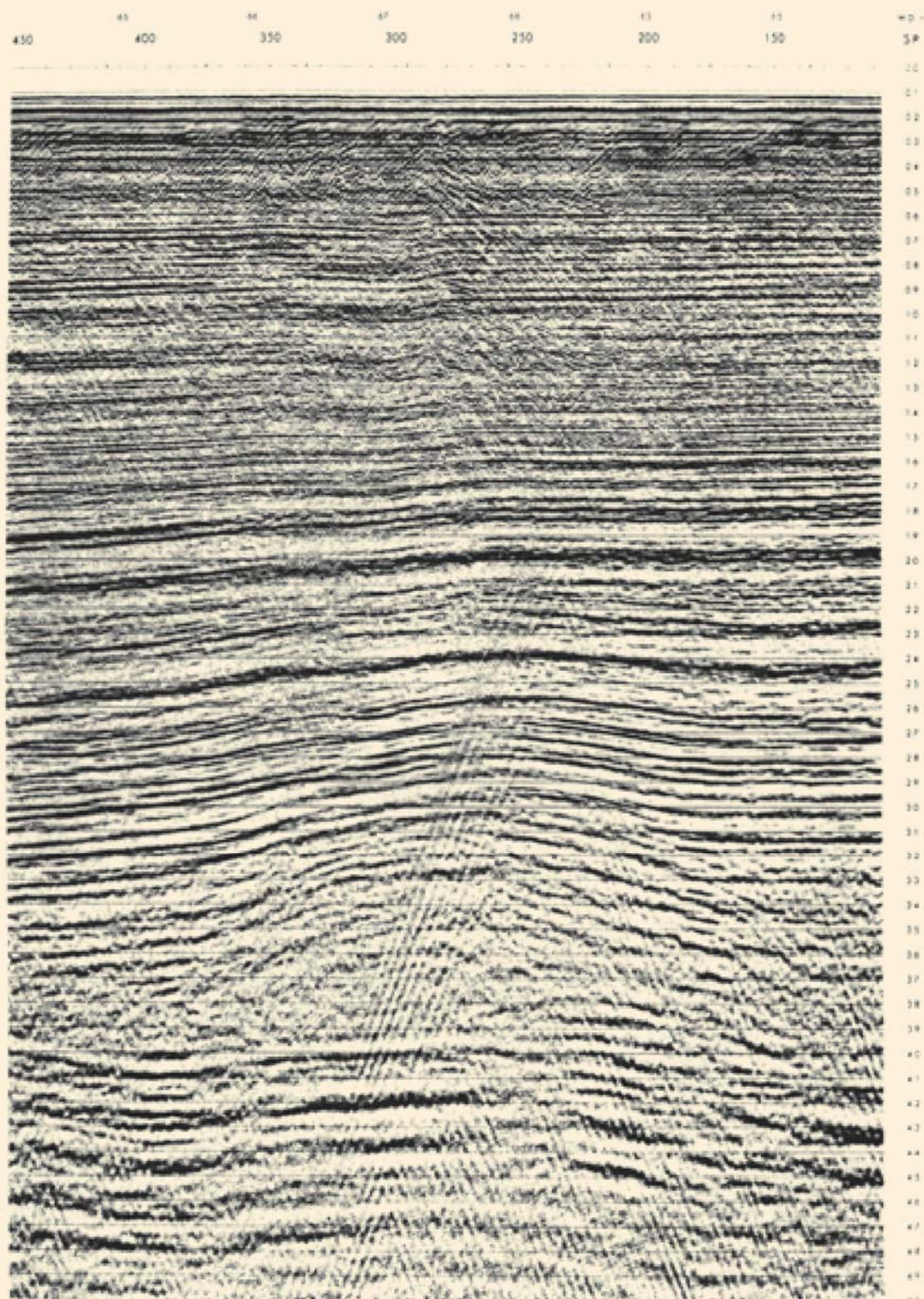


Рисунок 15 Часть обработанных данных с профиля IR, тест 5, полученных с помощью рассинхронизированной расстановки пневмопушек, деконволюция на основе сигнатуры не выполнялась.

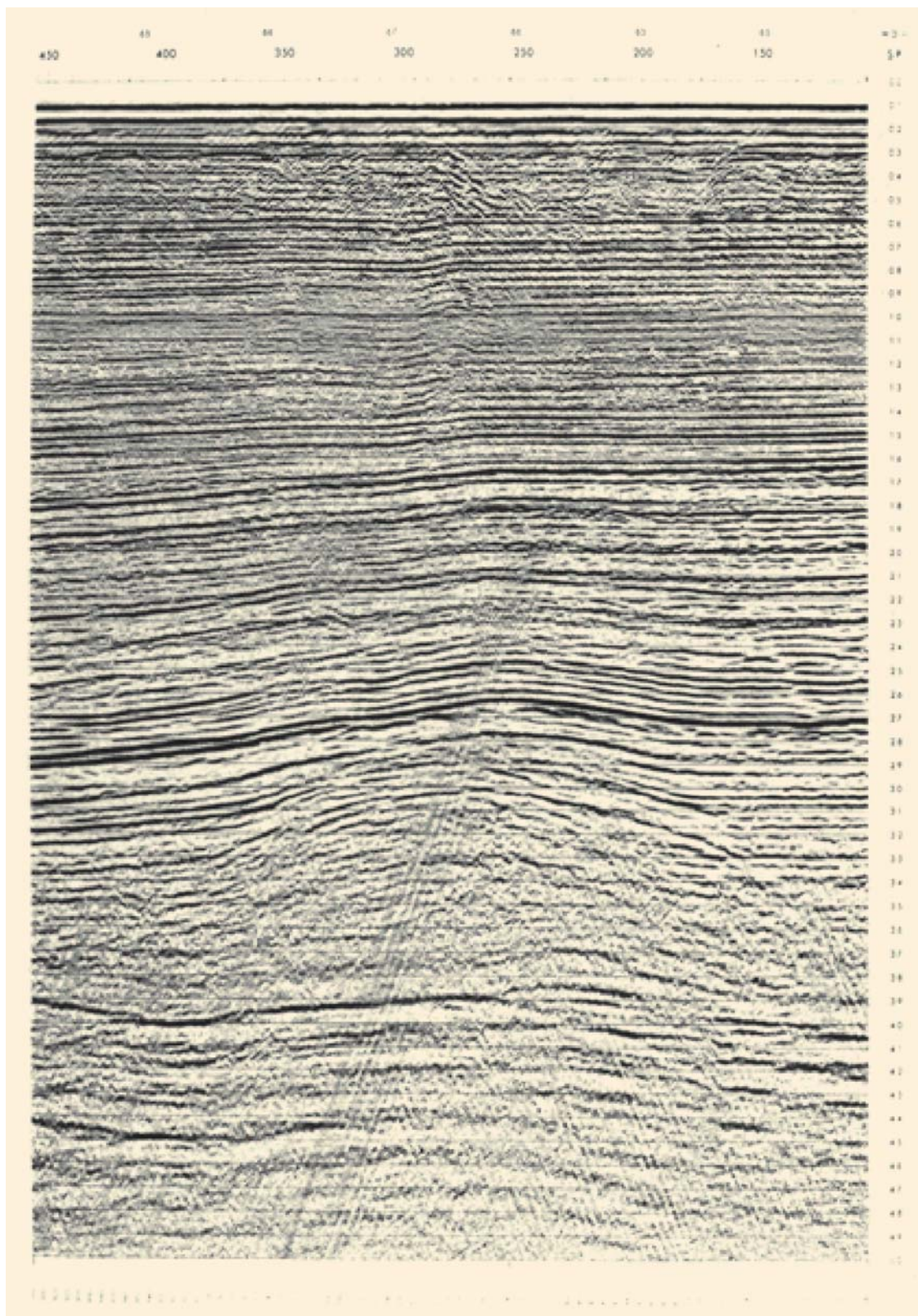


Рисунок 16 Те же данные, что на рис. 15. Деконволюция использованием формы импульса применена с использованием фильтра, показанного на Рис. 13 (с), рассчитанного по измерениям в ближней зоне КА кописано на Рис 12, 13, и 14. Сравните этот рисунок с Рис 9 и 10 с синхронной расстановкой пневмопушек.

В первом тесте был отстрелян 20-км профиль с синхронизированной расстановкой пушек, для которой были известны вертикальные измерения в дальней зоне. Результат деконволюции с использованием сигнатуры, на основе измерений в ближней зоне был, по крайней мере, таким же хорошим, как на основе измерений в дальней зоне. Во втором тесте профиль был отстрелян снова с расстановкой пушек без синхронизации, в которой все пушки были рассинхронизированы на 100 мс. Деконволюция с использованием сигнатуры, на основе измерений в ближней зоне помогла привести сейсмический разрез к приемлемому виду, сравнимому с разрезом, полученным синхронной расстановкой источников. Разрез, полученный без деконволюции с использованием сигнатуры на рассинхронизированных данных был неприемлемым.

Было четко продемонстрировано, что измерения в ближней зоне можно использовать для определения поля волн группы источников и деконволюции с использованием формы импульса. Измерения в дальней зоне теперь стали ненужными для этих целей. В тестах, описанных выше, измерения в ближней зоне позволяют учитывать как вариации от ПВ к ПВ поля волн, так и направленность источника. В приведенных результатах, эти вариации не были учтены. Однако, имеются возможности для дальнейшего улучшения разрешения данных путем учета этих факторов.

Благодарности

Результаты, представленные здесь, были получены при сотрудничестве со многими людьми. Прежде всего, я благодарю Tor Haugland из Western Geophysical (ранее Seismic Profilers), Andrew Stacey из Britoil, Les Hatton из Merlin Geophysical и Peter Taylor из Ensign Geophysics (ранее Merlin Geophysical), без чьей поддержки Дельфтский эксперимент с пневмопушкой никогда бы не состоялся. Еще, я благодарен Nico de Voogd из Delft Geophysical (ранее TNO-DGV) за понимание ответственности управления проектом. Данные были получены на борту судна Seismic Profilers' *Liv Profiler*. Капитана, Gunnar Starvik, начальника группы, Chris Poundall, и команду за профессионализм и желание помочь даже в суровых временных рамках. John Broom из Britoil отвечал в проекте за контроль качества данных и сделал блестящее предложение,

которое быстро и с энтузиазмом было внедрено позже Steve Levey, ответственным за оборудование, отстрела профиля с рассинхронизированной расстановкой источников.

Alek Gorski из Merlin Geophysical обработал все данные и внес ценный вклад на каждом этапе обработки, особенно при выполнении деконволюции с использованием импульса. Мои бывшие студенты рассчитали сигнатуры воображаемых источников при измерениях в ближней зоне и рассчитали сигнатуры в дальней зоне (Cees van der Schans из Shell) и построили желаемую выходную минимально-фазовую сигнатуру (Wietze Eckhardt из Jason Geosystems).

Существенное финансирование эксперимента и поддержка участников Дельфтского эксперимента с пневмопушкой: Amoco, British Petroleum, Britoil, Chevron, Merlin Geophysical, Mobil, Seismic Profilers, Statoil, TNO-DGV, и Western Geophysical. Я благодарю их всех.

В заключение, я благодарен Neil Goulty и Klaus Helbig за конструктивную критику этой статьи.

Литература

- Fricke, J.R., Davis, J.M. & Reed, D.H. 1985. A standard quantitative calibration procedure for marine seismic sources. *Geophysics* 50, 1525-1532.
- Parkes, G.E., Ziolkowski, A., Hatton, L. & Haugland, T. 1984. The signature of an air gun array: computation from near field measurements including interactions - practical considerations. *Geophysics* 49, 105-111.
- Stoffa, P.L. & Ziolkowski, A. 1983. Seismic source decomposition. *Geophysics* 48, 1-11.
- Ziolkowski, A. 1984. The Delft Air Gun Experiment. *First Break* 2 (6), 9-19.
- Ziolkowski, A.M., Parkes, G.E., Hatton, L. & Haugland, T. 1981. British Patent Application No 8116527.
- Ziolkowski, A., Parkes, G.E., Hatton, L. & Haugland, T. 1982. The signature of an air gun array: computation from near field measurements including interactions. *Geophysics* 47, 1413-1421.
- Ziolkowski, A.M., Parkes, G.E., Hatton, L. & Haugland, T. 1984. U.S. Patent No 4476553.