

SEISMIC DATA PROCESSING

ÖZDOĞAN YILMAZ

Stephen M. Doherty, Editor

Society of Exploration Geophysicists
Post Office Box 702740/ Tulsa, OK 74170-2740

Оглавление

ТОМ 1		Стр.
Глава 1		
1.1	Введение	1
1.2	Одномерное преобразование Фурье	2
1.2.1	Появление зеркальных частей	5
1.2.2	Рассмотрение фазы	10
1.2.3	Операции во временной области	13
1.2.4	Частотная фильтрация	18
1.3	Множество выборок ОПВ, полученных по всему миру	27
1.4	Основная последовательность обработки данных	43
1.4.1	Предварительная обработка	44
1.4.2	Деконволюция	45
1.4.3	Сортировка ОСТ	47
1.4.4	Скоростной анализ	49
1.4.5	Поправки за нормальное приращение и суммирование	50
1.4.6	Коррекция остаточной статики	50
1.4.7	Обработка после суммирования	52
1.4.8	Миграция	52
1.5	Применение	52
1.5.1	Программная регулировка усиления	61
1.5.2	АРУ среднеквадратичных амплитуд	62
1.5.3	Мгновенная АРУ	63
1.6.	Двумерное преобразование Фурье	65
1.6.1	Пространственная неоднозначность	69
1.6.2	Пространственная f-k-фильтрация	74
	Упражнения	85
Глава 2		
2.1	Введение	87
2.2	Модель фильтрации	95
2.2.1	Модель фильтрации в частотной области	101
2.3	Обратная фильтрация	102
2.4	Обратная фильтрация по методу наименьших квадратов	104
2.5	Минимально-фазовый импульс	107
2.6	Оптимальный фильтр Винера	110
2.6.1	Деконволюция сжатия	113
2.6.2	Предварительное отбеливание	116
2.6.3	Формирующие фильтры Винера	116
2.6.4	Прогнозируемая деконволюция	119
2.7	Прогнозируемая деконволюция на практике	125
2.7.1	Длина оператора	128
2.7.2	Задержка предсказания	131
2.7.3	Предварительное отбеливание	139
2.7.4	Действие случайных помех на деконволюцию	143
2.7.5	Подавление кратных волн	144

2.7.6	Примеры полевых данных	148
2.7.7	Деконволюция виброрейса	157
2.8	Проблема нестационарности	159
2.8.1	Спектральное отбеливание, изменяющееся во времени	165
	Упражнения	170
ТОМ 2		
Глава 3		
3.1	Введение	1
3.2	Нормальное приращение	5
3.2.1	Нормальное приращение в горизонтально-слоистой среде	8
3.2.2	Растяжение нормального приращения	9
3.2.3	Нормальное приращение для наклонного слоя	12
3.2.4	Нормальное приращение для нескольких слоев с произвольными наклонными	13
3.3	Скоростной анализ	16
3.3.1	Спектр скоростей	19
3.3.2	Факторы, влияющие на оценку скорости	25
3.3.3	Скоростной анализ горизонта	35
3.4	Коррекция остаточной статики	36
3.4.1	Коррекция остаточной статики с учетом изменения поверхностных условий	49
3.5	Коррекция остаточной статики на практике	59
3.5.1	Максимально допустимое смещение	59
3.5.2	Окно корреляции	62
3.5.3	Другие обсуждения	63
3.6	Статика, обусловленная преломлением	77
3.6.1	Коррекция полевой статики	80
3.6.2	Метод преломленных волн (метод плюс-минус)	82
3.6.3	Метод наименьших квадратов	85
	Упражнения	91
Глава 4		
4.1	Введение	1
4.2	Принципы миграции	10
4.2.1	Миграция Кирхгоффа	14
4.2.2	Конечноразностная миграция	23
4.2.3	Пространственная миграция	28
4.3	Миграция на практике	34
4.3.1	Миграция Кирхгоффа на практике	35
4.3.2	Конечноразностная миграция на практике	43
4.3.3	Пространственная миграция	59
4.3.4	Частотно-пространственная миграция	71
4.3.5	Миграция и пространственная неоднозначность	79
4.3.6	Миграция и внешние помехи	84
4.3.7	Миграция и длина профиля	89
4.4	Миграция перед суммированием	90

4.4.1	Частичная миграция перед суммированием (поправка за приращение, вызванное наклоном)	96
4.5	Анализ скоростей миграции	110
	Упражнения	117
	ТОМ 3	
	Глава 5	
	Получение изображения под сложными структурами	
5.1	Введение	1
5.2	Миграция по глубине	2
5.2.1	Морское дно неправильной формы	10
5.2.2	Соляная диапировая структура	12
5.2.3	Чешуйчатые структуры в шарьяжных поясах	15
5.3	Замещение слоя	20
5.3.1	Замещение слоя после суммирования	21
5.3.2	Замещение слоя перед суммированием	24
	Глава 6	
	3-D сейсмическая разведка	
6.1	Введение	34
6.2	Для чего выполняются 3-D съемки	35
6.3	Схема 3-D съемки и сбор данных	37
6.3.1	Апертура миграции	37
6.3.2	Пространственная миграция	41
6.3.3	Другие соображения	42
6.3.4	Конфигурация сбора данных в морских работах	42
6.3.5	Конфигурация сбора данных в наземных работах	44
6.4	Обработка 3-D данных	46
6.4.1	Обработка морских данных	46
6.4.2	Обработка наземных данных	52
6.5	3-D миграция	55
6.5.1	3-D миграция во времени, выполненная за два прогона и за один прогон	55
6.5.2	3-D миграция во времени и по глубине	59
6.5.3	Приведение к поверхности отсчета в 3-D пространстве (datuming)	62
6.5.4	Интерполяция между трассами	65
6.6	Интерполяция 3-D сейсмических данных	71
6.6.1	Временные срезы	71
6.6.2	Сеанс интерактивной интерпретации	72
	Глава 7	
	Наклонная сумма и ее применение	

7.1	Введение	83
7.2	Построение угловых сумм	86
7.2.1	Оптимальный выбор параметров угловой суммы	91
7.3	Анализ канальных волн	94
7.4	Фильтрация наклонов, изменяющаяся во времени	101
7.5	Подавление кратных волн	103
	Глава 8	
	Специальные темы	
8.1	Введение	110
8.2	Подавление кратных волн	111
8.2.1	Селекция скоростей в области f-k	111
8.2.2	Селекция скоростей в области t-x	117
8.3	Разрешающая способность сейсмических данных	124
8.3.1	Вертикальная разрешающая способность	124
8.3.2	Латеральная разрешающая способность	126
8.4	Сейсмическое моделирование	131
8.5	Синтетические кривые	138
8.6	Мгновенные признаки	144
8.7	Вертикальное сейсмическое профилирование	146
8.8	Обработка 2-D сейсмических данных	151
8.8.1	Разделение региональных и остаточных аномалий	153
8.8.2	2-D фильтрация по длинам волн	154
	Упражнения	157
	Приложение А	
	Математическое обоснование преобразования Фурье	159
	Приложение В	
	Математическое обоснование деконволюции	161
В.1	Синтетическая сейсмограмма	161
В.2	Обратная величина импульса источника	163
В.3	Обратный фильтр	164
В.4	Деконволюция в частотной области	166
В.5	Оптимальные фильтры Виннера	168
В.6	Деконволюция с учетом изменения поверхностных условий	175
	Приложение С	
	Математическое обоснование миграции	177
С.1	Экстраполяция и миграция волнового поля	177
С.2	Параболическая аппроксимация	186
С.3	Конечно-разностная миграция для сильных наклонов	190
С.4	F-k-миграция	192
С.5	Остаточная миграция	195
С.6	Скорость миграции для параболического уравнения	196
С.7	Анализ скорости миграции	197
С.8	3-D миграция	199

	Приложение D	
	Экстраполяция волнового поля в области угловых сумм	202
	Приложение E	
	Мгновенные признаки	204
	Приложение F	
	Подбор плоской поверхности	205

1.1 Введение

Преобразование Фурье является фундаментальной составляющей анализа сейсмических данных и применяется почти на всех стадиях обработки. Данный временной ряд, такой как сейсмическая трасса, может быть полностью, однозначным образом описана в виде суммы ряда синусоид, каждая из которых характеризуется своей амплитудой, частотой и задержкой по фазе (относительным выравниванием). Этот процесс выполняется путем прямого преобразования Фурье. И наоборот, сейсмическая трасса может быть синтезирована при данных частотных составляющих. Этот процесс выполняется путем обратного преобразования Фурье. Краткое математическое исследование преобразования Фурье приводится в Приложении А.

Алгоритмы обработки сейсмических данных часто могут быть описаны или реализованы в частотной области проще, чем во временной. В разделе 1.2 вводится одномерное (1-D) преобразование Фурье и рассматриваются некоторые свойства временного ряда во временной и в частотной областях. Многие методики обработки (одно- или многоканальной) включают операнд (сейсмическую трассу) и оператор (фильтр). Простое применение анализа Фурье состоит в разработке нуль-фазовых частотных фильтров, обычно в форме полосовой фильтрации.

В результате 1.3 исследуются 40 выборок ОПВ, записанных в разных частях мира с различными типами источников и регистрирующей аппаратуры (Yilmaz и Cumro, 1983). Введены различные типы сейсмической энергии: отраженные волны, когерентные помехи, такие как кратные волны, боковые волны, поверхностные волны, случайные помехи окружающей среды.

В разделе 1.4 приводится основная последовательность обработки данных и примеры полевых данных. В обработке данных имеются три основные стадии, каждая из которых направлена на улучшение сейсмической разрешающей способности, под которой подразумевается способность разделять два отражения, расположенные близко друг к другу.

1. Деконволюция выполняется по оси времен с целью повышения временной разрешающей способности путем сжатия основного импульса приблизительно до единичного и подавления реверберационных волн.
2. Суммирование сжимает размер выноса, тем самым, уменьшая объем сейсмических данных до плоскости сейсмического разреза с нулевым выносом и повышая отношение сигнал/помеха.
3. Миграция обычно выполняется на суммированном разрезе (который предполагается разрезом с нулевым выносом) с целью повышения разрешающей способности в горизонтальном направлении путем рассеивания (collapsing) преломленных волн и перемещения отражений от наклонных поверхностей в их истинные положения.

Вторичные процессы реализуются на определенных стадиях с целью улучшения рабочих характеристик деконволюции, суммирования и миграции. Когда когерентные помехи устраняются, например, с помощью пространственной фильтрации, можно улучшить деконволюцию и скоростной анализ. Коррекция остаточной статики также улучшает скоростной анализ и, следовательно, качество суммированного разреза.

В разделе 1.5 рассмотрены типы усиления. Усиление представляет собой изменяющееся во времени масштабирование, при котором функция масштаба обычно выводится по данным. Часто усиление применяется к сейсмическим данным с целью отбраковки. Другой пример применения усиления – поправка за расхождение волнового фронта, вводимая на ранних стадиях обработки. Расхождение волнового фронта пред-

ставляет собой уменьшение амплитуды волнового фронта вследствие геометрического расхождения сейсмических волн. Еще один пример усиления – АРУ, которая делает более ясными зоны слабых отражений в сейсмических данных. Однако, усиление типа АРУ может нарушить особенности сигнала и, следовательно, к нему нужно относиться внимательнее.

Двумерное (2-D) преобразование Фурье (раздел 1.6) – это способ разложения сейсмического волнового поля, например, выборки ОВП, на плоскостные составляющие, каждая из которых с определенной частотой распространяется под определенным углом к вертикали. Следовательно, двумерное преобразование Фурье может описывать такие процессы как миграция и (f-k) фильтрация. Общий случай применения последней – это подавление когерентных помех с помощью пространственной фильтрации. Эта процедура показана на примере полевых данных.

1.2 Одномерное преобразование Фурье

Рассмотрим следующий эксперимент. Зафиксируем один конец пружины, а к другому концу подвесим груз. Отведем груз вниз на определенную величину, например, на 0.8 единиц расстояния и отпустим его. Предположим, что пружина является упругой, т.е. она колеблется до бесконечности. В начале движения зададим время равное нулю. Смещение веса в функции времени должно изменяться от амплитуды +0.8 до – 0.8. Если имеется устройство, которое может отслеживать амплитуду смещения в функции времени, оно запишет синусоидальную кривую (см. рис. 1-1, изображение 1). Измерим время между двумя последовательными пиками; вы увидите, что оно равно 0.080с (80мс). Этот временной интервал называется периодом пружины и зависит от константы, которая представляет собой меру жесткости пружины. Мы говорим, что пружина выполнила один цикл движения за один период времени. Сосчитаем количество циклов в одной секунде; должно получиться 12.5 циклов. Это называется частотой, ассоциированной с движением пружины. Один цикл в секунду (cps) – один герц (Гц). Единицу делим на 0.080с и получаем 12.5Гц, т.е. частота – это величина, обратная периоду.

Повторим этот эксперимент, используя более жесткую пружину. Зададим второй пружине максимальное смещение 0.4 единицы. Движение пружины отслеживается в виде другой синусоиды (рис. 1-1, изображение 2). Период и частота пружины – соответственно 0.040с и 25Гц. Чтобы зафиксировать результаты измерений, построим график амплитуды перемещения каждой пружины в функции частоты; получим амплитудный спектр (рис. 1-1, средняя колонка).

Работа с двумя идентичными пружинами, отпустим пружину 1 при максимальном смещении 0.8 единиц и в начале движения зададим время, равное нулю. Когда пружина 1 проходит через положение, соответствующее нулевой амплитуде, приводим в движение вторую пружину при таком же максимальном смещении (0.8). Движение пружины 1 показано на изображении 1, а движение пружины 2 – на изображении 3 рисунка 1-1. Поскольку пружины начали движение при одном и том же смещении, амплитудные спектры обеих синусоидальных функций будут одинаковыми. Однако, между временными функциями на изображениях 1 и 3 можно видеть различие. В частности, когда синусоида на изображении 1 принимает значение, соответствующее максимальной амплитуде, амплитуда синусоиды на изображении 3 равно нулю. Пружина 2 была приведена в движение с задержкой на 20мс, эквивалентной одной четверти полного цикла. Эта задержка представляет собой разность двух синусоид, показанных на изображении 1 и 3. Полный цикл эквивалентен 360° или 2π . Следовательно, временная задержка в одну четверть цикла эквивалентна отставанию по фазе на $+90^\circ$.

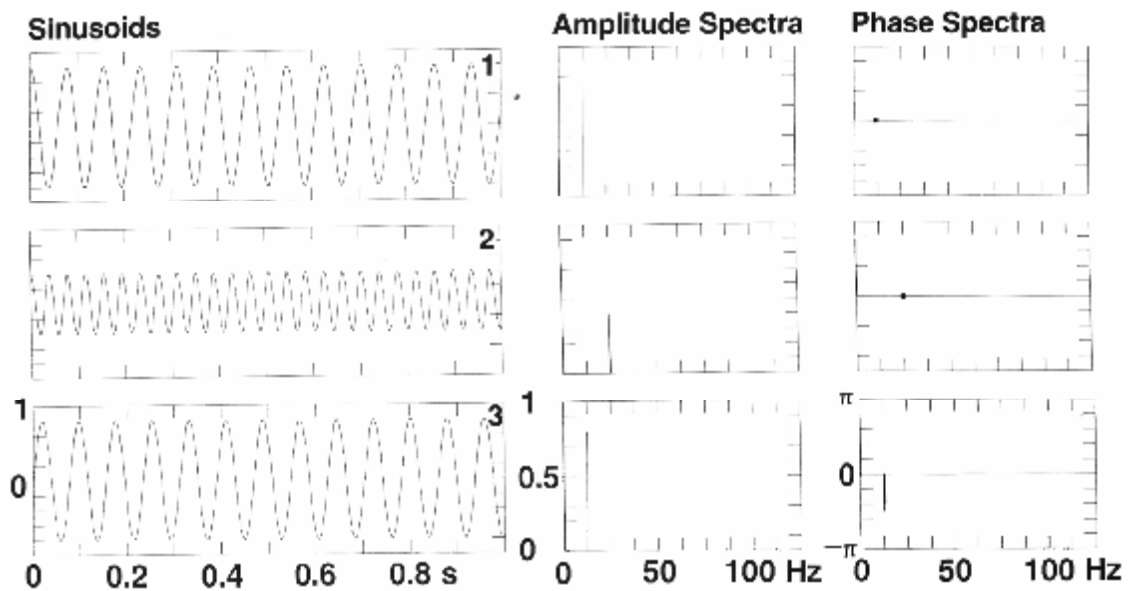


Рис.1-1 При отслеживании движения пружины во времени получается синусоидальная кривая. Максимальная амплитуда представляет максимальное смещение груза от положения, соответствующего нерастянутой пружины. Положительная амплитуда соответствует движению пружины вверх. Время между двумя последовательными пиками – период синусоиды, обратная величина периода – частота. Временная задержка начала движения одной пружины относительно начала движения другой пружины определяется как отставание по фазе. Фазовые спектры (спектры отставания по фазе со знаком минус) различают синусоиды 1 и 3.

Фаза определяется как отставание по фазе со знаком минус (Robinson и Treitel, 1980). Таким образом, отрицательное временное смещение соответствует положительной величине фазы. Если на рис.1-1 мы применим временное смещение, равное одной четверти полного цикла (т.е. 20 мс) к синусоиде на изображении 3 в отрицательном направлении во времени, мы получим синусоиду, представленную на изображении 1. Хотя их амплитудные спектры идентичны, синусоиды можно различить по их фазовым спектрам (рис.1-1, правая колонка).

Эксперимент закончен. Что мы узнали? Во-первых, движение пружины можно описать синусоидальной функцией. Во-вторых (и это более важно), синусоидальное движение полностью описывается частотой, амплитудой и фазой. Этот опыт показывает, как описывать движение пружины как функцию времени и частоты.

Сейчас представим, что имеется группа пружин, каждая из которых совершает синусоидальное движение с определенной частотой, амплитудой и фазой. Синусоидальная характеристика всех движений показана на рис.1-2. Выполним положение движения всех пружин, сложив все трассы; получим зависимость от времени сигнала, обозначенный звездочкой рис.1-2 (первая трасса). Положение (или синтез) позволяет нам преобразовать движение из частотной области во временную. Это преобразование является обратным, т.е. сигнал во временной области может быть разбит (или разложен) на синусоидальные составляющие в частотной области.

Математически этот двусторонний процесс выполняется с помощью преобразования Фурье. На практике стандартным алгоритмом, используемым на цифровых компьютерах, является быстрое преобразование Фурье (БПФ; FFT – Fast Fourier Transformation). Анализ зависящего от времени сигнала на частотные составляющие выполняется посредством прямого преобразования Фурье, а синтез частотных составляющих в сигнал во временной области выполняется путем обратного преобразования Фурье.

На рис.1-3 представлено преобразование Фурье зависящего от времени сигнала на рис.1-2. Амплитудный и фазовый спектры образуют более уплотненное представление в частотной области синусоид на рис.1-2. Можно видеть параллельность между двумя типами изображений. В частности, амплитудный спектр содержит большой и относительно малый пик около 20 и 40Гц соответственно. Более темные полосы соответствуют большим амплитудам на рис1-2 при одних и тех же частотах. С другой стороны, зоны слабых амплитуд около 30Гц и на низко- и высокочастотных концах спектра также заметны в обоих типах представлений. Следует помнить, что кривая амплитудного спектра представляет амплитуды отдельных синусоидальных компонент в функции частоты.

Исследуем фазовый спектр. Из опыта с пружиной вспомним, что отставание во времени какой-либо частотной составляющей было также выражено как задержка по фазе. Чтобы улучшить задержку по фазе трассы как функцию частоты, рисунка 1-2 (см. рис.1-4). Будем следовать максимумам, которые пересекаются нулевой маркой времени. Отметим, что максимумы расположены выше нулевой марки времени (т.е. имеют отрицательные значения времени) на низкочастотном конце спектра. Затем они переходят на положительную сторону временной оси около частоты 20Гц и остаются на этой стороне на протяжении оставшейся части оси частот. Путь, который они проходят на рис.1-4, можно построить в виде фазового спектра рисунка 1-3. Если все максимумы выровнять вдоль нулевой марки времени на рис.1-4, соответствующий сигнал во временной области будет иметь нуль-фазовый спектр. В этом случае все синусоиды будут усиливать друг друга, что обусловит появление максимальной величины при нулевом времени (рис.1-11).

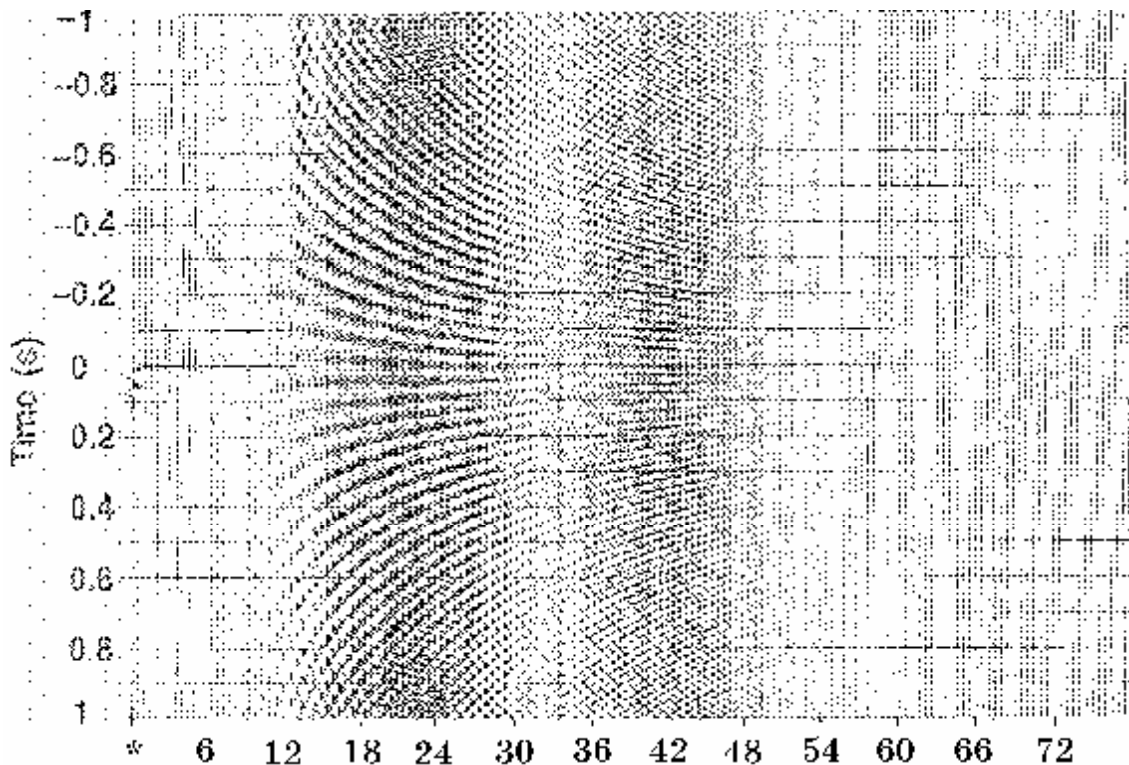


Рис.1-2 Можно выполнить наложение группы синусоидальных движений с различными частотами, амплитудами и задержками по фазе с целью синтеза зависимости от времени формы волны (см. трассу, обозначенную звездочкой).

Физическое значение амплитудного спектра понять проще, чем физическое значение фазового спектра. Оба эти спектра будут рассмотрены в данной главе далее. Основные математические подробности преобразования Фурье даны в Приложении А.

1.2.1 Появление зеркальных частей

Сейсмический сигнал представляет собой непрерывную временную функцию. В цифровой записи непрерывный (аналоговый) сейсмический сигнал выбирается с фиксированным шагом во времени, который называется шагом квантования или частотой квантования. Как правило, для большинства сейсмических работ значения шага квантования изменяются от 1 до 4мс. Высокорастворяющие работы требуют уменьшения шага квантования до 0.25мс. На рис.1-5 показан непрерывный во времени сейсмический сигнал. Дискретные выборки, которые могут быть действительно зарегистрированы, обозначены точками. Дискретная функция называется временным рядом (временной последовательностью). Нижняя кривая на рис.1-5 показывает попытку восстановления первоначального непрерывного сигнала, представленного на этом рисунке вверху. Отметим, что восстановленный сигнал теряет детали, имеющиеся в первоначальном аналоговом сигнале. Эти детали соответствуют высокочастотным компонентам, которые были потеряны при сравнении. Чем меньше шаг квантования, тем точнее восстановленный сигнал будет представлять первоначальный сигнал. При крайнем случае нулевого шага квантования непрерывный сигнал будет представлен точно.

Есть ли это мера восстановимой полосы пропускания частот оцифрованных данных? На рис.1-6 (верхнее изображение) показана временная последовательность (например, сейсмическая трасса) с 2-миллисекундным шагом квантования и соответствующим амплитудным спектром. В общем случае, при данном шаге квантования Δt , максимальная частота, которая может быть восстановлена, равна $1/(2\Delta t)$; она называется частотой Найквиста. Для данного $\Delta t=2\text{мс}$. Следовательно, частота Найквиста равна 250Гц. Первоначальная временная последовательность была выбрана повторно с шагом квантования 4 и 8мс. Соответствующие частоты Найквиста соответственно 125 и 62.5Гц. На рис.1-6 можно также видеть последовательности (восстановленные с шагом 2мс для целей построения) выбранные с шагом 4 и 8мс и их амплитудные спектры. Обратите внимание, что чем больше шаг квантования, тем более сглаженной получается последовательность. Сглаженность является результатом потери высоких частот, как видно на амплитудных спектрах. Частотные составляющие от 125 до 250мс, присутствующими на временной последовательности с 2-миллисекундным шагом дискретизации, отсутствуют на последовательности, где шаг дискретизации равен 4мс. Аналогично, частотные компоненты от 62.5 до 250Гц отсутствуют на временной последовательности, выбранной с шагом 8мс. Можно ли восстановить эти частоты? Нет. После того, как непрерывный сигнал дискретизирован, максимальной частотой, которая может быть восстановлена, является частота Найквиста.

Может показаться, что когда временная последовательность, выбранная с шагом 4 или 8мс, интерполируется обратно в 2-миллисекундный шаг, эти высокие частоты должны восстановиться. Как утверждалось выше, временные последовательности на рис.1-6 с 4 и 8-миллисекундными шагами квантования были восстановлены

путем интерполяции к 2-миллисекундному шагу, чтобы получить такое же количество выборок, что и первоначальная последовательность для построения в том же масштабе.

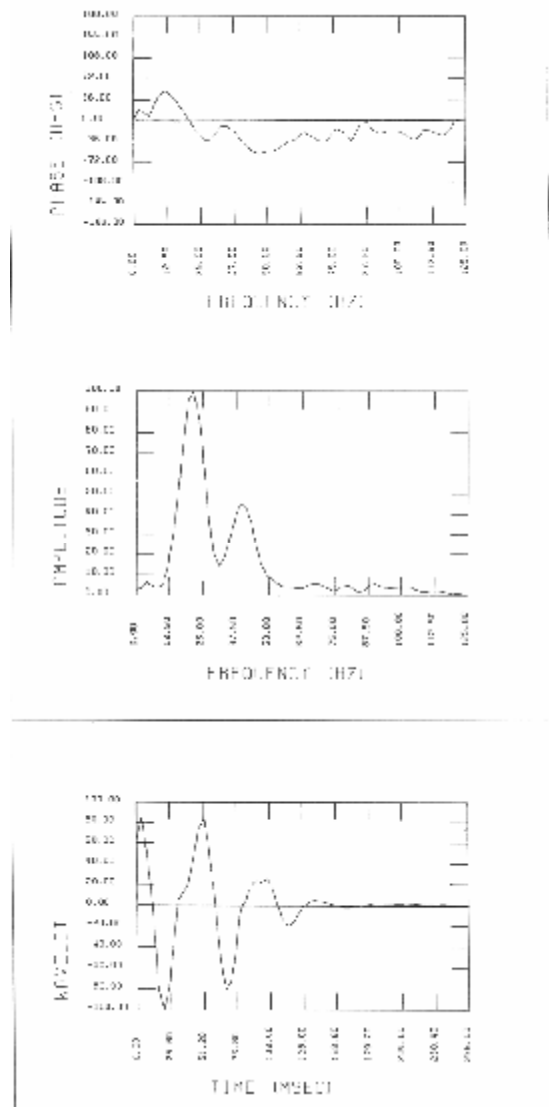


Рис.1-3 Информацию на рис.1-2 можно в уплотненном виде амплитудного и фазового спектров. Каждая точка кривой амплитудного спектра соответствует максимальной амплитуде синусоиды с этой частотой (см. трассу на рис.1-2). Обратите внимание на эквивалентность двух пиков на амплитудном спектре двум высокочастотным зонам на рис.1-2. Каждая точка фазового спектра соответствует временной задержке пика или впадины синусоиды на этой частоте относительно марки времени $t=0$. Отметим эквивалентность фазовой характеристики с трендом пика при переходе от трассы к трассе на рис.1-4.

Интерполяция не восстанавливает частоты, потерянные при квантовании; она только формирует дополнительные выборки.

Важно решить, с каким шагом квантовать непрерывный сигнал в поле. Если сигнал, поступающий из разреза, имеет частоту, например, до 150 Гц, шаг квантования 4мс обуславливает потерю полосы частот от 125 до 150Гц.

Рассмотрим синусоиду на рис.1-7. Этот сигнал выбран повторно с шагом 4 и 8мс. Все три амплитуды спектра показывают наличие одной и той же частоты – 25Гц. С сигналом ничего не произошло после увеличения шага дискретизации. Исследуем более высокочастотную синусоиду (75Гц) на рис.1-8. Она выглядит одинаково при обоих шагах дискретизации 2 и 4мс. Однако, при квантовании с 8-миллисекундным шагом сигнал изменяется и выглядит как низкочастотная синусоида. Как видно на амплитудном спектре, сигнал с измененным шагом квантования имеет частоту 50Гц. Частота Найквиста для шага квантования 8мс равен 62.5Гц. Частота сигнала равна 75Гц. В результате изменения шага квантования сигнала был Потерян, но появляется повторно как сигнал с низкой частотой (50Гц). Мы говорим *folded back* на эффект после пере-квантования спектра. Наконец, 150-Гц синусоида, повторно дискретизированная с шагом 4 и 8мс, показана на рис.1-9. При дискретизации с шагом 4мс сигнал выглядит как 100-Гц, а при дискретизации с шагом 8мс – как 25-Гц.

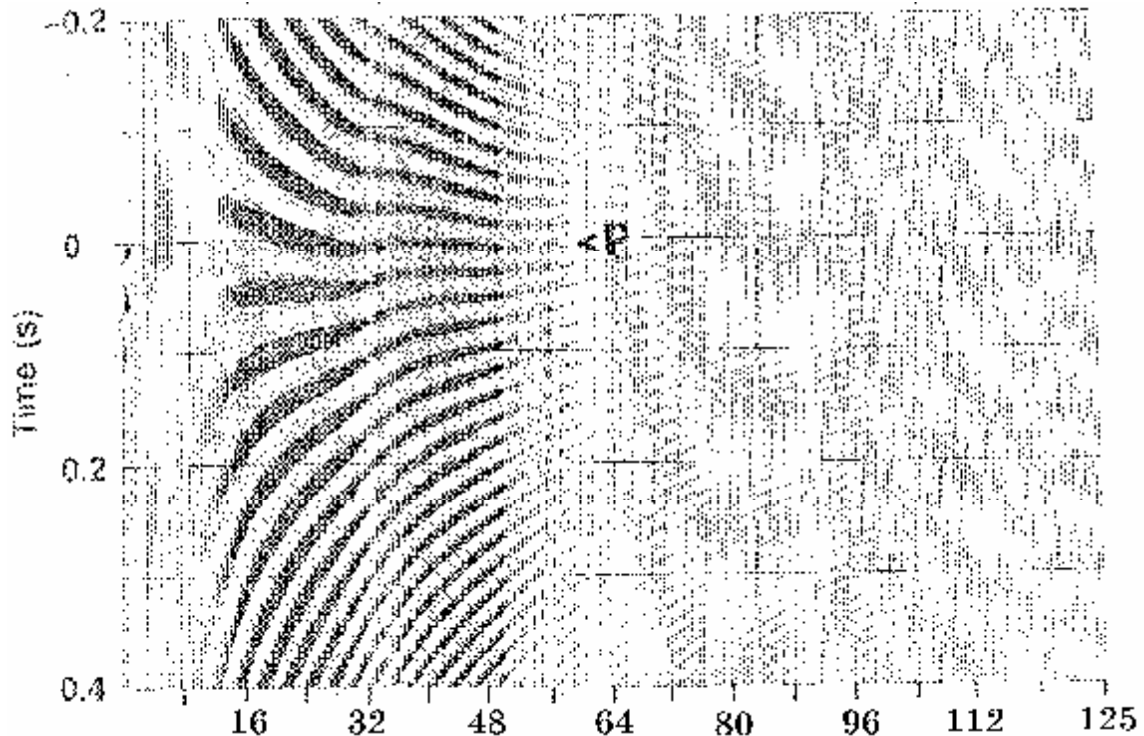


Рис.1-4 Часть рисунка 1-2 увеличена, чтобы можно было лучше видеть тренд фазовой характеристики при переходе от трассы к трассе, т.е. от одной частотной составляющей к другой. Сравните тренд, обозначенный положительным пиком **P** с фазовым спектром на рис.1-3.

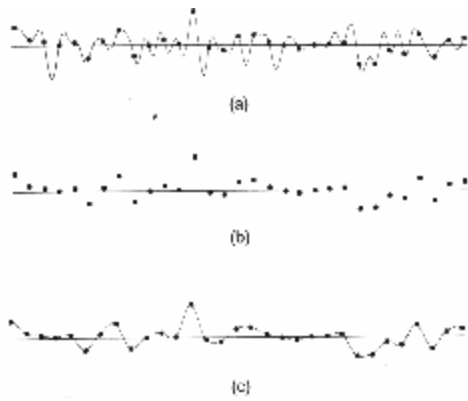


Рис.1-5 При оцифровке непрерывный аналоговый сигнал теряет частоты выше частоты Найквиста: (a) непрерывный аналоговый сигнал; (b) оцифрованный сигнал; (c) восстановленный аналоговый сигнал. (по Rothman, 1981).

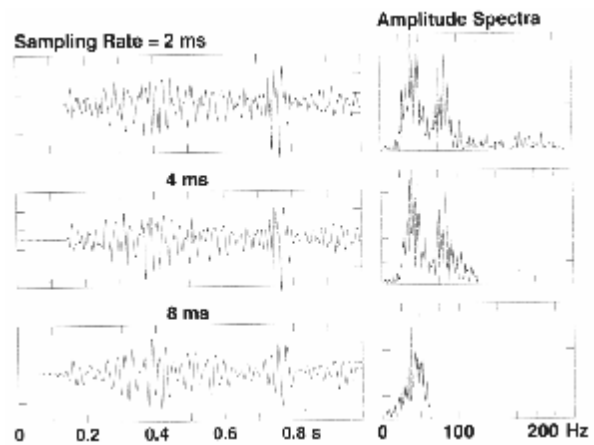


Рис.1-6 Временная последовательность, выбранная с шагом 2мс, имеет частоту Найквиста 250Гц. Изменение шага дискретизации до 4 и 8мс ограничивает полосу частот до 125 и 62.5Гц соответственно. Обратите внимание на потерю высоких частот при увеличении шага дискретизации.

Используя одночастотную синусоиду, мы видим, что частоты выше частоты Найквиста в действительности не теряются после дискретизации, а появляются повторно при частотах ниже частоты Найквиста. Рассмотрим наложение двух синусоид с частотами 12.5 и 75Гц (рис.1-10). Оцифровка с шагом 2 и 4мс не приводит к изменению первоначального сигнала, т.к. его частотные компоненты находятся ниже частоты Найквиста, ассоциируемой с шагами 2 и 4мс (соответственно 250 и 125Гц). Однако, когда сигнал оцифровывается с большим шагом, например, 8мс, амплитудный спектр изменяется. 12.5-герцовая составляющая не затрагивается, т.к. шаг квантования 8мс достаточен для выборки этой низкочастотной составляющей. С другой стороны, 75-герцовая составляющая выглядит как низкочастотная (50Гц). Снова отметим, что эти частоты в первоначальном сигнале выше частоты Найквиста, соответствующей выбранному шагу дискретизации, *folded back* в амплитудном спектре оцифрованной версии сигнала. Этот анализ можно распространить на многие синусоиды с различными частотами. В частности, дискретная временная последовательность, полученная путем дискретизации сигнала со слишком большим шагом, содержит вклады высокочастотных компонент этого непрерывного сигнала. Эти высокие частоты *folded back* на спектр дискретной временной последовательности и проявляются в виде низких частот. Явление, обусловленное слишком большим шагом дискретизации непрерывного сигнала, называется появлением зеркальных частот.

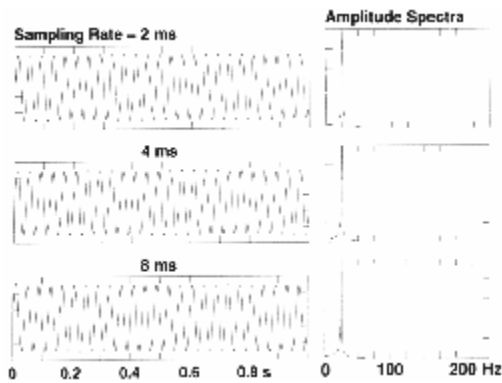


Рис.1-7 25-герцовая синусоида, выбранная с шагом 2мс, остается неизменной при повторной выборке 4 или 8мс.

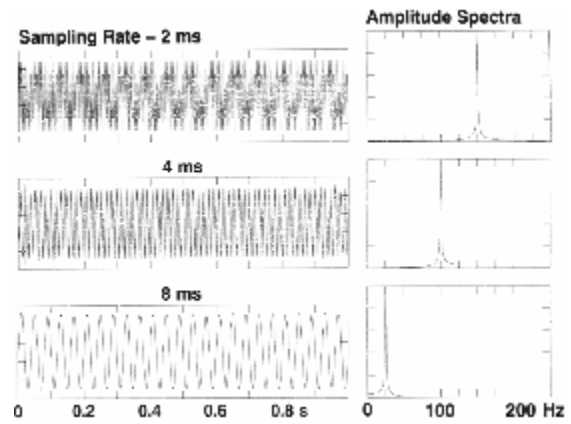


Рис.1-9 150-герцовая синусоида, выбранная с шагом 2мс, выглядит как 100-герцовая при выборке с шагом 4мс и как 25-герцовая при выборке с шагом 8мс, амплитудная модуляция при шаге 2мс обусловлена ограничениями при построении сигнала с очень высокой частотой.

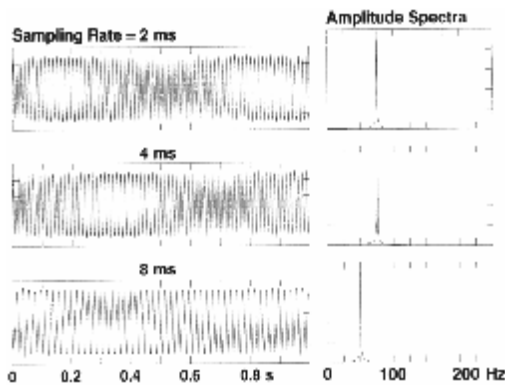


Рис.1-8 75-герцовая синусоида, выбранная с шагом 2мс, остается неизменной при повторной выборке 4мс, но при увеличении шага до 8мс выглядит как 50-герцовая синусоида. Следовательно, шаг 8мс приводит к появлению ложной частоты на первоначальной синусоиде.

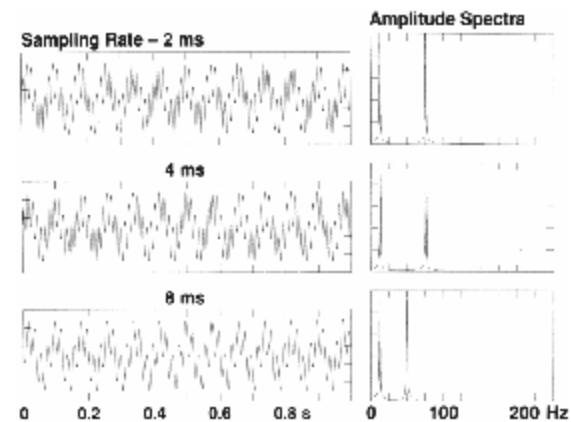


Рис.1-10 Временная последовательность, синтезированная по двум синусоидам 12.5 и 75Гц при шаге дискретизации 2мс остается неизменной при увеличении шага до 4мс. Однако, при шаге 8мс высокочастотная компонента этой последовательности смещается от 75 к 50Гц, тогда как ее низкочастотная компонента не изменяется.

Для расчета зеркальной частоты f_a воспользуемся соотношением

$f_a = |2mf_N - f_s|$, где f_N – половина частоты кодирования, f_s – частота сигнала, m – целое число, при котором $f_a < f_N$. Допустим, например, что

$f_s = 65$ Гц, $f_N = 62.5$ Гц, что соответствует шагу квантования 8мс. Отсюда зеркальная частота равна $f_a = |2 \cdot 5 \cdot 62.5 - 65| = 60$ Гц.

Слишком большой шаг дискретизации дает два эффекта:

(а) спектр непрерывного сигнала ограничивается максимальной частотой, которая представляет собой частоту Найквиста;

(b) спектр цифрового сигнала осложняется высокими частотами за пределами частоты Найквиста, которая могла присутствовать в непрерывном сигнале. Если с первой проблемой ничего нельзя сделать, вторая проблема представляет практическую важность. Чтобы сохранить полосу восстановимых частот между нулем и частотой Найквиста свободной от зеркальных частот, в поле перед преобразованием сигнала из аналоговой формы в цифровую применяется антиалиасный ФНЧ (high-cut antialiasing filter). Этот фильтр устраняет те частотные составляющие, которые при оцифровке могут дать зеркальные частоты. Обычно антиалиасный ФНЧ имеет частоту среза, которая равна 0.75 или 0.5 частоты Найквиста. Этот фильтр обеспечивает ослабление частот выше частоты Найквиста.

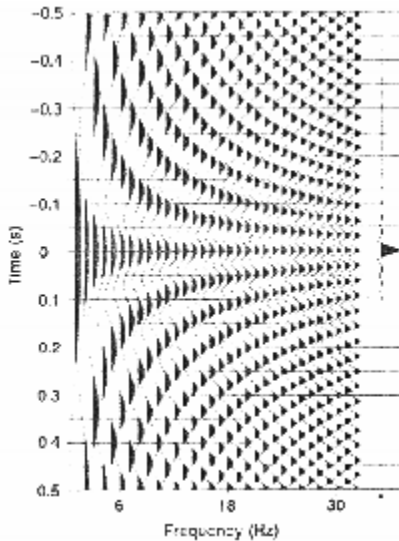


Рис.1-11 Суммирование дискретного количества синусоид без задержек по фазе с одной и той же максимальной амплитудой дает симметричный импульс в ограниченной полосе пропускания, который представлен в виде трассы справа (обозначена звездочкой). Это нуль-фазовый импульс.

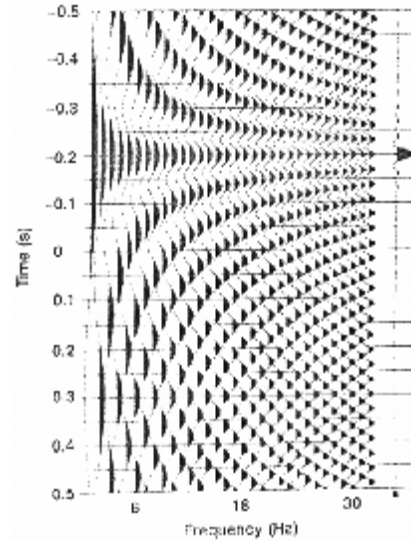


Рис.1-12 Те же синусоидальные составляющие, что на рис.1-11, но с постоянной временной задержкой, равной – 0.2мс. При суммировании они дают симметричный импульс в ограниченной полосе пропускания, который представлен в виде трассы справа (обозначена звездочкой). Это смещение во времени относится к линейному фазовому спектру, который ассоциируется с суммированными частотными компонентами.

1.2.2 Рассмотрение фазы

В разделе 1.2 был синтезирован зависящий от времени сигнал из его частотных составляющих. Рассмотрим сигнал с нуль-фазовым спектром. На рис.1-11 показаны синусоиды с частотами от 1 до 32Гц. Все эти синусоиды имеют нулевую задержку по фазе, поэтому пики выровнены по линии $t=0$. Сигнал во временной области на трассе, обозначенной звездочкой на рис.1-11, получен путем суммирования всех этих синусоид. Это суммирование называется обратным преобразованием Фурье. Сигнал во временной области называется импульсом. Обычно импульс считается переходным сигналом, т.е. сигналом конечной длительности. Сигнал имеет начальное время, конечное время и его энергия ограничена двумя этими временами. Полученный импульс симмет-

ричен относительно $t=0$ и имеет положительную амплитуду (амплитуду пика) при $t=0$. Такой импульс называется нуль-фазовым. Фактически он был синтезирован из нуль-фазовых с одинаковыми амплитудами максимума.

Нуль-фазовый импульс симметричен относительно времени, равного 0. На рис.1-12 показан результат применения линейного смещения по фазе к синусоидам, изображенным на рис.1-11. Линейное смещение по фазе определяется следующим образом: фаза = константа 5 частота. Импульсы обозначенный звездочкой, смещен во времени на -0.2с , но его форма не изменилась. Следовательно, линейное смещение по фазе эквивалентно постоянному смещению во времени. Угол наклона линии, описывающей фазовый спектр, пропорционален смещению во времени.

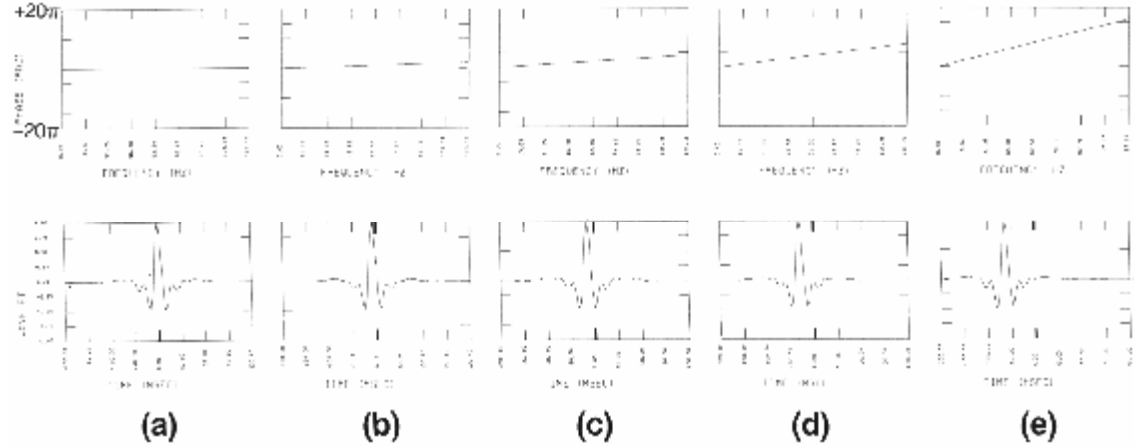


Рис.1-13 Начиная с нуль-фазового импульса (а), применяются линейные смещения по фазе с целью сдвига импульса во времени без изменения его формы; угловой коэффициент линейной функции фазы относится к смещению во времени.

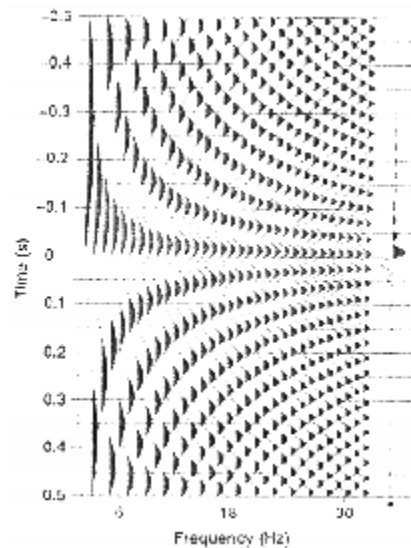


Рис.1-14 Те же самые синусоидальные составляющие, что на рис.1-11, но к каждой из них применено постоянное смещение по фазе на 90° . Переходы через 0 выровнены по линии $t=0$. Суммирование этих синусоид дает несимметричный импульс, который представлен трассой справа (обозначена звездочкой).

Импульс может быть смещен на любое время; для этого нужно просто изменить угол наклона линии, описывающей фазовый спектр (рис.1-13). Изменяя знак углового

коэффициента на фазовом спектре, импульс можно сместить во времени в противоположном направлении.

Если к каждой из синусоид на рис.1-11 применить смещение по фазе, равное 90° (см. рис.1-14), переходы через нуль будут выровнены по линии $t=0$. В результате суммирования таких синусоид получен импульс, который показан на трассе, обозначенной звездочкой. Получится антисимметричный импульс. Два импульса на рис.1-11 и 1-14 имеют одинаковые амплитудные спектры, т.к. их частотный состав один и тот же. Разовые спектры этих импульсов различаются. Импульс на рис.1-11 имеет нуль-фазовый спектр, а импульс на рис.1-14 имеет постоянно-фазовый спектр (constant-phase spectrum) (90°). Следовательно, различие форм импульсов обусловлено различием их фазовых спектров.

На рис.1-15 показано действие на нуль-фазовый импульс смещения по фазе на различную величину. Смещение по фазе на 90° преобразует нуль-фазовый импульс в антисимметричный импульс. Смещение по фазе на 180° изменяет полярность нуль-фазового импульса. Смещение на 270° изменяет полярность нуль-фазового импульса, преобразуя его в антисимметричный импульс. При смещении на 360° сохраняется первоначальная форма импульса. *Постоянный фазовый сдвиг изменяет форму импульса. В частности, сдвиг фазы на 90° преобразует симметричный импульс в антисимметричный, а сдвиг на 180° изменяет полярность импульса.*

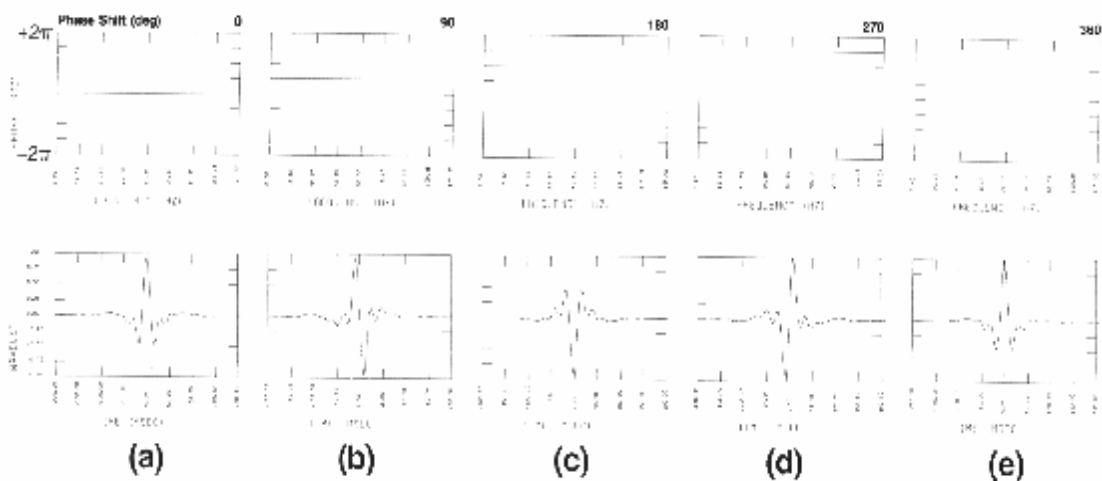


Рис.1-15 Начиная с нуль-фазового импульса (а), его форма изменяется путем применения постоянных фазовых сдвигов. Сдвиг на 90° преобразует нуль-фазовый импульс в антисимметричный (b), а сдвиг на 180° приводит к обращению его полярности (с). Сдвиг на 270° обращает полярность импульса и делает его антисимметричным (d). Сдвиг на 360° не приводит к изменению импульса.

Итак, исследованы два основных фазовых спектра: линейного и постоянного фазового сдвигов. Рассмотрим их комбинированное действие. Фазовый спектр представляет собой функцию, определенную как $a+b \cdot \text{частота}$, где a – постоянный фазовый сдвиг; b – угловой коэффициент линейного фазового сдвига. На рис.1-16 показаны результаты применения постоянного фазового сдвига на 90° плюс линейной фазовой составляющей на синусоиды, показанные на рис.1-11. Нуль-фазовый импульс таким же амплитудным спектром, как на рис.1-11, был смещен во времени на -0.2с , поскольку применен линейный фазовый сдвиг, и преобразован в антисимметричный импульс вследствие применения постоянного фазового сдвига на 90° .

Другие изменения фазового спектра показаны на рис.1-17. Нуль-фазовый импульс (рис.1-17а) может быть модифицирован в различные формы путем изменения фазового спектра. Модифицирование может быть таким, что форма импульса не будет походить на первоначальную (рис.1-17d). Сохраняя амплитудный спектр неизменным, можно получить импульс другой формы путем модифицирования фазового спектра.

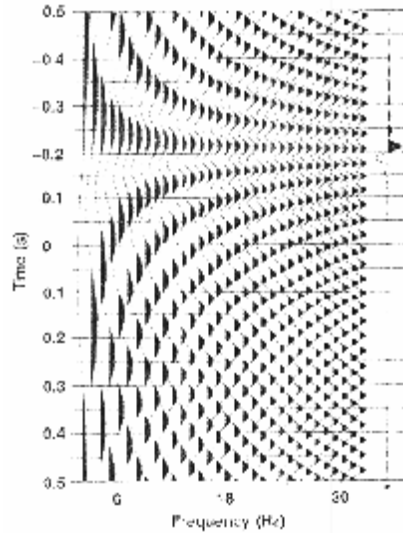


Рис.1-16 Сочетание линейного (рис.1-12) и постоянного фазового сдвига (рис.1-14) дает антисимметричный импульс, смещенный во времени. Импульс представлен трассой, обозначенной звездочкой (справа).

1.2.3 Операции во временной области

Рассмотрим последовательность коэффициентов отражения, представленную временным рядом $(1, 0, \frac{1}{2})$. Рассмотрим также импульсный источник, который дает взрыв на время $t=0$ с амплитудой 1. Отклик последовательности коэффициентов отражения на импульс называется импульсным откликом (*impulse response*). Этот физический процесс может быть описан следующим образом:

Время начала последовательности	Последовательность коэффициентов отражения	Источник	Отклик
0	1 0 $\frac{1}{2}$	1	1 0 $\frac{1}{2}$

Через одну единицу времени предположим, что источник формирует импульс (impulsion) с амплитудой $-\frac{1}{2}$. Этот процесс описывается следующим образом:

Время начала последовательности	Последовательность коэффициентов отражения	Источник	Отклик
1	1 0 $\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$ 0 $-\frac{1}{4}$

Обратите внимание, что отклик представляет собой последовательность коэффициентов отражения, масштабированную интенсивностью импульса. Поскольку функция источника рассматривается как последовательность взрывных импульсов и импульсов, вызванных резким уменьшением давления в ограниченном объеме (implosive impulses), отдельные импульсные отклики складываются с целью получения комбинированного отклика. Этот процесс называется линейной суперпозицией и описан в таблице 1-1.

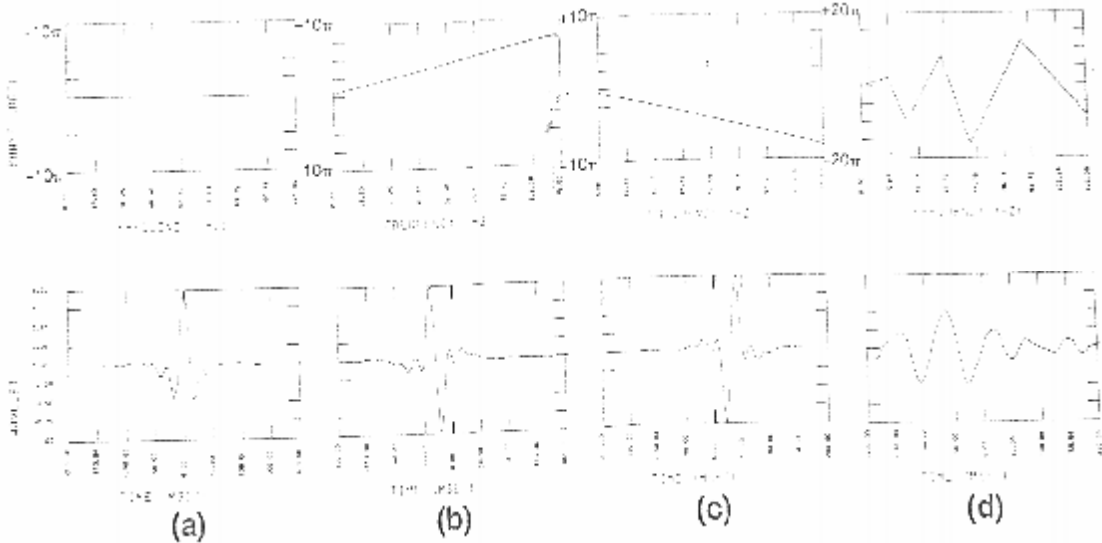


Рис.1-17 Форма нуль-фазового импульса (а) может быть модифицирована путем введения не нуль-фазового спектра любой формы (изображения b, c, d).

В таблице 1-1 звездочка обозначает свертку. Отклик последовательности коэффициентов отражения $(1, 0, \frac{1}{2})$ на импульс источника $(1, \frac{1}{2})$ был получен путем свертки двух последовательностей. Это выполняется путем расчетов, как показано в таблице 1-2.

Фиксированный ряд задан по последовательности коэффициентов отражения. Импульс источника обращается (складывается) и перемещается (задерживается) на одну выборку за один раз. При каждой задержке выровненные элементы перемножаются и полученные произведения складываются. Механизм сверки показан в таблице 1-3. Количество элементов выходного ряда $c(k)$ задается как $m + n - 1$, где m и n – длины соответственно ряда операндов $a(i)$ и ряда операторов $a(j)$.

Когда функции рядов в таблице 1-2 меняются местами, получается ряд, показанный в таблице 1-4. Выходная характеристика получается такая же, как в таблице 1-2. Следовательно, не имеет значения, какой ряд при свертке является фиксированным, а какой – скользящим.

Сейсмическая обработка часто требует измерения сходства или выравнивания времен двух трасс. Корреляция представляет собой другую операцию во временной области, которая используется для импульса:

Импульс 1: (2, 1, -1, 0, 0)

Импульс 2: (0, 0, 2, 1, -1)

Хотя эти импульсы идентичны по форме. Импульс 2 смещен на 2 выборки относительно импульса 1. Можно определить временную задержку, при которой импульсы

будут иметь наибольшее сходство. Для этого выполним операцию на импульсе 1, как описано в таблице 1-3, не обращая импульс 2 (т.е. шаг 0 пропускается). Это называется взаимной корреляцией, результат которой показан в таблице 1-5. Взаимная корреляция измеряет степень сходства двух последовательностей. Взаимная корреляция временной последовательности с ней самой называется автокорреляцией.

Из таблицы 1-5 видно, что максимальная корреляция наблюдается при задержке, равной -2 . Это предполагает, что импульс 2 был смещен на две выборки назад во времени, эти два импульса (импульс 1 и импульс 2) будут иметь максимальное сходство.

Таблица 1-6 показывает значения взаимной корреляции. Являющиеся результатом перестановки рядов местами. Теперь максимальная корреляция наблюдается при задержке равной 2. Следовательно, если импульс 1 смещается во времени на две выборки вперед, эти два импульса будут характеризоваться максимальным сходством. Отметим также, что, в отличие от свертки, взаимная корреляция не обладает свойством коммутативности, т.е. результат зависит от того, какой ряд является фиксированным, а какой – скользящим (сравните результаты в таблицах 1-5 и 1-6).

В таблице 1-7 показаны задержки автокорреляции импульса 1. Отметим, что максимальная корреляция имеет место при нулевой задержке – это важное свойство автокорреляции. Более того функция автокорреляции является симметричной: это свойство действительной временной последовательности. Следовательно, необходимо рассчитывать только одну сторону ФАК.

В разделе 1.2.4 показано с эвристической точки зрения, что свертка во временной области эквивалентна умножению в частотной области (Bracewell, 1965). Поскольку корреляция представляет собой свертку без обращения скользящего ряда (см. таблицу 1-3), к корреляции также применяется сходная операция в частотной области. На рис.1-18 в обобщенном виде дается описание свертки и корреляция в частотной области.

Таблица 1-1 Линейная суперпозиция.

Время начала последова- тельности	Последовательность коэффициентов отражения			Источник	Отклик			
	1	0	$\frac{1}{2}$		1	0	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{4}$
0	1	0	$\frac{1}{2}$	1	1	0	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{4}$
1	1	0	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{4}$
				1	$-\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{4}$

Суперпозиция:

$$\text{В другом виде: } (1, 0, \frac{1}{2}) * (1, -\frac{1}{2}) = (1, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{4})$$

Таблица 1-2 Свертка импульса источника $(1, -\frac{1}{2})$ с последовательностью коэффициентов $(1, 0, \frac{1}{2})$.

Последовательность коэффициентов отражения					Отклик
	1	0	$\frac{1}{2}$		
$-\frac{1}{2}$	1				1
	$-\frac{1}{2}$	1			$-\frac{1}{2}$
		$-\frac{1}{2}$	1		$\frac{1}{4}$
			$-\frac{1}{2}$	1	$-\frac{1}{8}$

Таблица 1-3 Механика процесса сверки.

Фиксированный ряд:

$a(1) a(2) a(3) a(4) a(5) a(6) a(7) a(8)$

Скользящий ряд:

$b(1) b(2) b(3)$

При двух данных рядах $a(i)$ и $b(j)$:

Шаг 0 = обратить скользящий ряд $b(j)$.

Шаг 1 = выполнить умножение по вертикали.

Шаг 2 = сложить произведения и записать в виде результирующей точки $c(k)$.

Шаг 3 = сместить ряд $b(j)$ на одну выборку вправо и повторить шаги 1 и 2

Таблица 1-4 Свертка последовательности коэффициентов отражения $(1, 0, \frac{1}{2})$ с импульсом источника $(1, -\frac{1}{2})$.

Импульс источника					Отклик
		1	$-\frac{1}{2}$		
$\frac{1}{2}$	0	1			1
	$\frac{1}{2}$	0	1		$-\frac{1}{2}$
		$\frac{1}{2}$	0	1	$\frac{1}{4}$
			$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{8}$

Таблица 1-5 Взаимная корреляция импульса 1 с импульсом 2.

										Результат		Задержка	
0	0	2	1	-1	0	0	0	0	0	-2	4	1	-3
	0	0	2	1	-1					6	-2	1	-1
		0	0	2	1	-1				2	0	0	1
			0	0	2	1	-1			0	2	0	3
				0	0	2	1	-1		0	4		

Таблица 1-6 Взаимная корреляция импульса 2 с импульсом 1.

										Результат		Задержка	
2	1	-1	0	0	0	2	1	-1		0	-4	0	-3
	2	1	-1	0	0					0	-2	0	-1
		2	1	-1	0	0				-2	0	1	1
			2	1	-1	0	0			6	2	1	3
				2	1	-1	0	0		-2	4		

Таблица 1-7 Автокорреляция импульса 1.

										Результат		Задержка	
2	1	-1	0	0	0	2	1	-1	0	0	-4	0	-3
	2	1	-1	0	0					-2	-2	1	-1
		2	1	-1	0	0				6	0	1	1
			2	1	-1	0	0			-2	2	0	3
				2	1	-1	0	0		0	4		



Рис.1-18 Описание свертки и корреляции в частотной области.

Из рис.1-18 видно, что свертка и корреляция дают результат, спектральная полоса пропускания которого является общей для обеих входных последовательностей. Примером может служить процесс полосовой фильтрации. Отметим также, что фазы являются аддитивными при свертке и субтрактивными при корреляции (Gracewell, 1965). Для автокорреляции это означает, что выходная последовательность является нуль-фазовой. Этот факт уже был проверен примером в таблице 1-7, где показано, что ФАК является симметричной относительно нулевой задержки. Взаимная корреляция широко используется в качестве меры сходства на различных стадиях обработки данных.

Например, рассчитывается ФВК трасс в выборке ОСТ (общих средних точек) с опорной трассой с целью расчета смещений, вызванных остаточной статикой (см. Раздел 3.4). Основой для расчета скоростного спектра также является взаимная корреляция.

“Компновочные блоки” фильтра Винера (раздел 2.6) представляют собой взаимную корреляцию желательного импульса на выходе со входным импульсом и корреляцию входного импульса.

Другим важным процессом является корреляция вибросейса. Сюда входит взаимная корреляция частотно-модулированного сигнала источника (свип-сигнал) с зарегистрированной трассой вибросейса. Свип-сигнал представляет собой частотно-модулированный сигнал вибросейса, подаваемый в разрез. Модуль фильтрации для вибросейсмических данных рассмотрен в разделе 2.7.7. На рис.1-19 показан свип-сигнал, зарегистрированная выборка ОПВ и коррелированная выборка. Длина свип-сигнала равна 10с, полоса частот – от 6 до 60Гц. 15-секундная некорректированная запись вибросейса дает 5-секундную коррелированную запись. Отметим, что верхняя часть некоррелированной записи содержит низкочастотную энергию; в нижней части записи повышается содержание высоких частот. Это связано с тем, что в этом примере данных было использовано свипирование в направлении роста частот.

1.2.4 Частотная фильтрация

Что случается с импульсом, когда его амплитудный спектр изменяется при сохранении нуль-фазового характера? Рассмотрим импульс (суммированную трассу 1), являющийся результатом наложения двух весьма низкочастотных компонент (рис.1-20). Затем в Фурье-синтез добавим частотные компоненты с возрастающей частотой (суммированные трассы 2-5). Обратите внимание, что импульс во временной области сжимается по мере расширения полосы пропускания частот. В конечном счете, если в обратное преобразование Фурье включены все частоты, результирующий импульс становится единичным, как видно на рис.1-21 (суммированная трасса 6). Следовательно, единичный импульс характеризуется как синфазный синтез всех частот – от нуля до частот Найквиста. Для всех частот амплитудный спектр единичного импульса также является единичным, а фазовый спектр равен нулю.

На рис.1-22 представлены 5 нуль-фазовых импульсов, синтезированных так, как показано на рис.1-20. Все эти импульсы имеют амплитудные спектры в ограниченной полосе частот. Нуль-фазовый импульс в ограниченной полосе частот может быть использован для фильтрации сейсмической трассы. Выходная трасса содержит только те частоты, которые образуют импульс, используемый при фильтрации. Представление импульса во временной области называется оператором фильтра. Отдельные временные выборки этого оператора называются коэффициентами фильтра. Процесс, описанный здесь, представляет собой нуль-фазовую частотную фильтрацию, т.к. он не модифицирует фазовый спектр входной трассы, а просто ограничивает полосу пропускания ее амплитудного спектра.

Фильтрация в частотной области включает умножение амплитудного спектра входной сейсмической трассы на амплитудный спектр оператора фильтра. Эта процедура описана на рис.1-23. С другой стороны, процесс фильтрации во временной области включает свертку оператора фильтра со входным временным рядом. На рис.1-24 в обобщенном виде представлена конструкция фильтра и его применение во временной области. Формулировки процесса фильтрации в частотной и временной областях (рис.1-23 и 1-24) основаны на следующей важной концепции анализа временных рядов: *свертка во временной области эквивалентна умножению в частотной области. Аналогично, свертка в частотной области эквивалентна умножению во временной области* (Bracewell, 1965).

Частотная фильтрация может принимать форму полосового фильтра ФВЧ, ФНЧ или полосового режекторного фильтра. Все эти фильтры основаны на одном принципе: построение нуль-фазового импульса с амплитудным спектром, который отвечает одной из четырех спецификаций. Полосовой фильтр используется чаще всего, т.к. сейсмиче-

ская трасса некоторое количество низкочастотных помех, таких как поверхностная волна, и некоторое количество низкочастотных помех, таких как поверхностная волна, и некоторое количество высокочастотных помех окружающей среды. Полезная отраженная сейсмическая энергия обычно ограничена полосой 10-70Гц с преобладанием частот около 30Гц.

Полосовая фильтрация выполняется на различных стадиях обработки данных. При необходимости она может быть выполнена деконволюцией с целью подавления остаточной энергии поверхностной волны и высокочастотных помех окружающей среды, которая в противном случае будет осложнять ФАК сигнала. Узкополосная фильтрация может быть необходимой перед взаимным коррелированием трасс в выборке ОСТ с опорной трассой с целью использования в оценке смещений, вызванных остаточной статикой (Раздел 3.4). Полосовая фильтрация может быть также выполнена перед расчетом ФВК при построении скоростного спектра для улучшенного пикинга скорости (Раздел 3.3). Наконец, стандартным является применение изменяющегося во времени полосового фильтра к суммированным данным (см. в этом разделе).

Практические аспекты конструкции фильтра

Применение фильтра в частотной или временной области (рис.1-23 и 1-24) дает в основном идентичные результаты. На практике предпочтительнее фильтрация во временной области, т.к. свертка, которая использует короткий ряд (оператор фильтра) более экономична, чем преобразование Фурье.

Основываясь на рис.1-22, можно утверждать, что основным свойством частотных фильтров является следующее: чем шире полоса пропускания, тем больше сжат оператор фильтра; следовательно, тем меньше требуется коэффициентов фильтра. Это свойство так же следует из следующей фундаментальной концепции: эффективный диапазон временного ряда обратно пропорционален его эффективной спектральной полосе пропускания (Bracewell, 1965).

При разработке полосового фильтра цель состоит в пропускании определенной полосы частот с минимальными изменениями (или без изменений) и в максимальном подавлении оставшейся части спектра (пока это –будет практично). С начала, представляется, что этой цели можно достичь, определив желательный амплитудный спектр для оператора фильтра следующим образом:

$$A(f) = \begin{cases} 1, & f_1 < f < f_2 \\ 0, & \text{При других} \\ & \text{условиях} \end{cases}$$

f_1 и f_2 – частоты среза (граничные частоты). Такой спектр известен как прямоугольный (boxcar) амплитудный спектр. Чтобы проанализировать свойства каждого фильтра, выполним следующую последовательность операций:

Определение прямоугольного
амплитудного спектра и
нуль-фазового спектра



Обратное БПФ



Оператор фильтра



Усечение



Прямое БПФ



Расчет действительного
амплитудного спектра

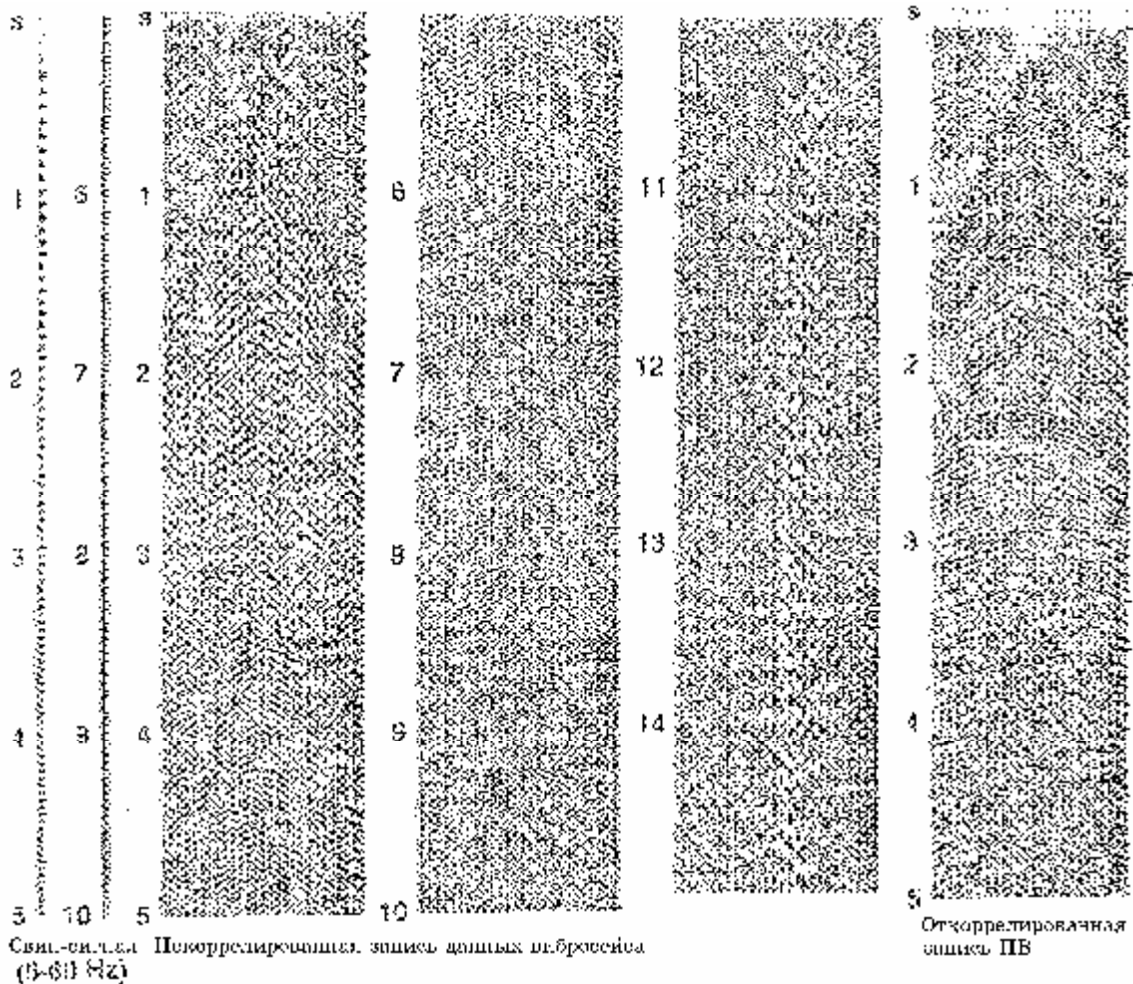


Рис.1-19 Корреляция данных вибросейса для получения коррелированных полевых данных. Свип-сигнал длиной 10с и запись данных длиной 15с дают коррелированную запись длиной 5с.

На рис.1-25а показаны результаты этой последовательности операций. Оператор показан сверху; действительный и желательный (прямоугольный) амплитудный спектр наложены друг на друга внизу. Действительный спектр имеет осциллирующий (ringy) характер; это известно как явление Гиббса (Gibbs, 1965) и является результатом представления прямоугольной функции конечным числом коэффициентов Фурье. С практической точки зрения осциллирование нежелательно, т.к. некоторые из частот в

полосе пропускания усиливаются, а остальные ослабляются. Кроме того, пропускаются некоторые частоты в зонах подавления по обеим сторонам прямоугольной функции. Как можно поправить положение? Вместо определения полосы пропускания в виде прямоугольной функции определим наклон обеих сторон (рис.1-25b), т.е. полоса пропускания имеет вид трапеции. Сейчас между действительным и желательным амплитудными спектрами имеется большее сходство и оператор является более сжатым (он имеет меньше ненулевых коэффициентов). Однако, при получении более сжатого оператора относительно формы спектра был принят компромисс и полоса пропускания стала шире. Чтобы получить удовлетворительные результаты, такие как на рис.1-25с, где действительный и желательный спектры приблизительно одинаковы, а оператор сжат, наклоны боковых сторон трапеции должны быть достаточно пологими. Это лучше с практической точки зрения, т.к. предпочтительнее работать с короткими операторами. Рекомендуется задавать более пологий наклон на высокочастотной стороне полосы пропускания. Наконец, при определении полосы пропускания в форме трапеции на частотах излома (А, В, С, D –рис.25с) необходимо применить сглаживание, т.к. преобразование Фурье существует только для непрерывных функций (Bracewell, 1965).

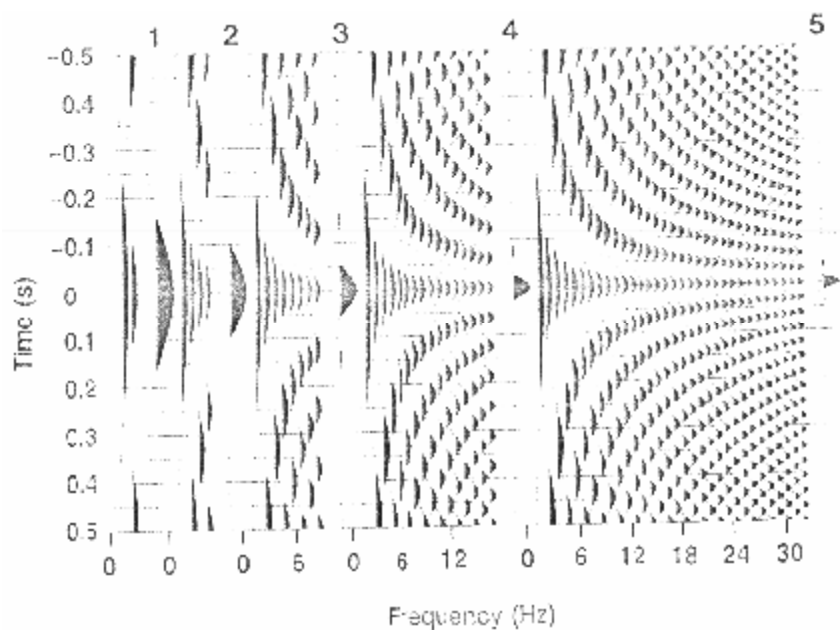


Рис.1-20 Суммирование нуль-фазовых синусоид с идентичными амплитудами пиков. Результаты каждого суммирования пронумерованы от 1 до 5. По мере расширения полосы пропускания частот происходит сжатие синтезированного нуль-фазового импульса.

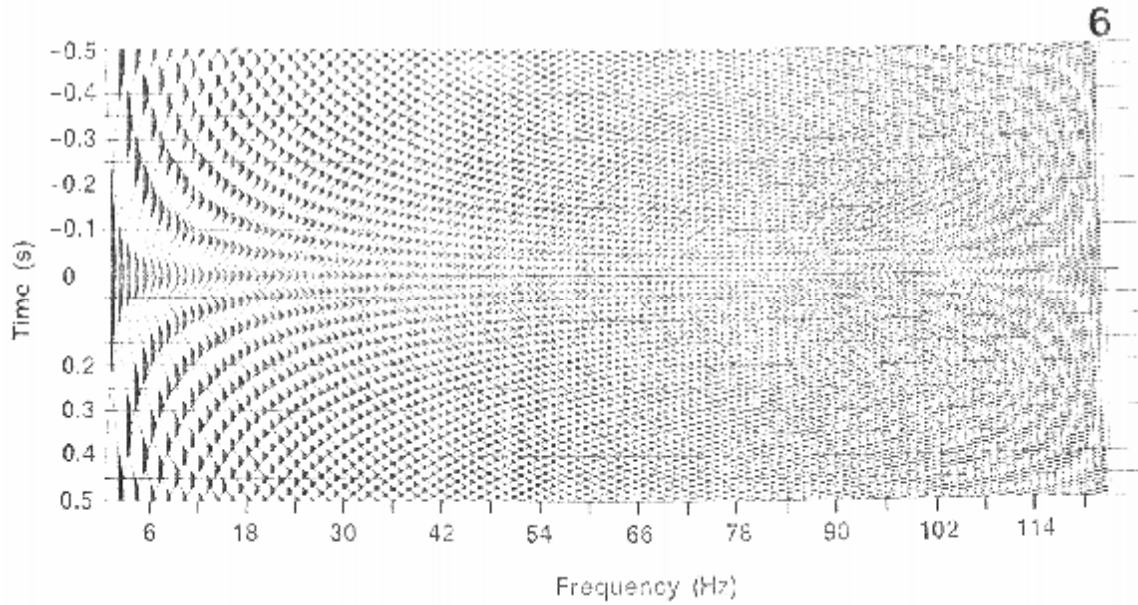


Рис.1-21 Результирующий импульс превратился в единичный (трасса 6) при суммировании синусоид на всех частотах до частоты Найквиста. Сравните с трассами 1-5 на рис.1-20. Что обусловило специфический характер амплитудной модуляции выше 84Гц?

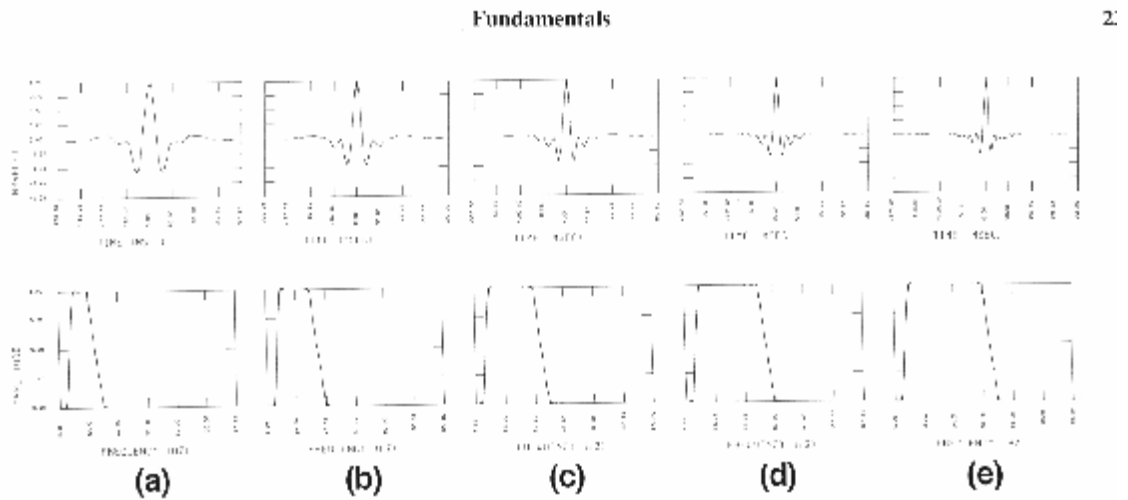


Рис.1-22 Последовательность нуль-фазовых импульсов (верхний ряд) и их амплитудные спектры (нижний ряд). По мере расширения полосы пропускания импульс сжимается во времени.

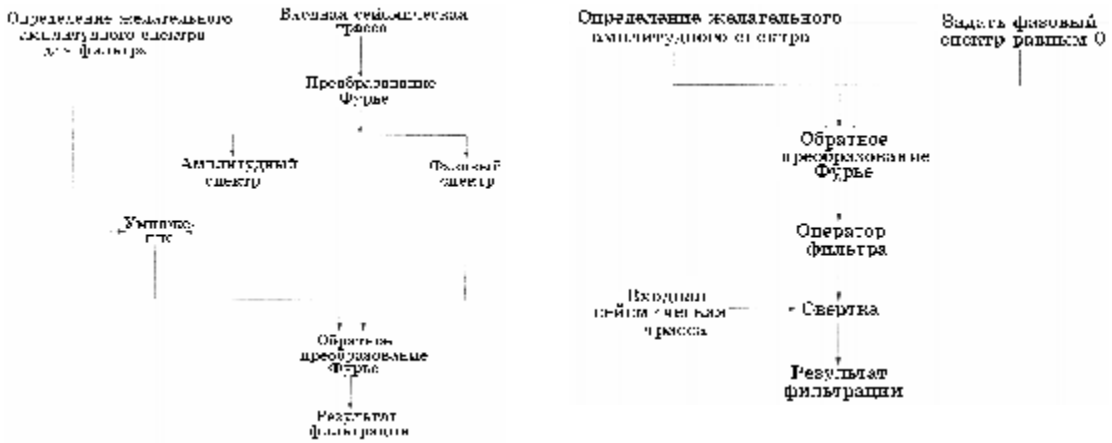


Рис.1-23 Конструкция и применение нуль-фазового импульса в частотной области.

Рис.1-24 Конструкция нуль-фазового и его применение в частотной области.

Насколько коротким может быть оператор? На рис.1-26 показана последовательность операторов с увеличивающейся длиной. Избыточное усечение обуславливает большее отклонение амплитудного спектра от желательной формы, хотя для полосы пропускания определены достаточные углы наклона. Это можно видеть на рис.1-26, где длина оператора обозначена утолщением линиями. Удлинение оператора сближает формы желательного и действительного спектров, но имеется определенная длина, при превышении которой к оператору добавляются почти нулевые коэффициенты. Полоса пропускания частот обратнопропорциональна эффективной длине оператора (рис.1-22) и этот критерий используется для выбора длины оператора.

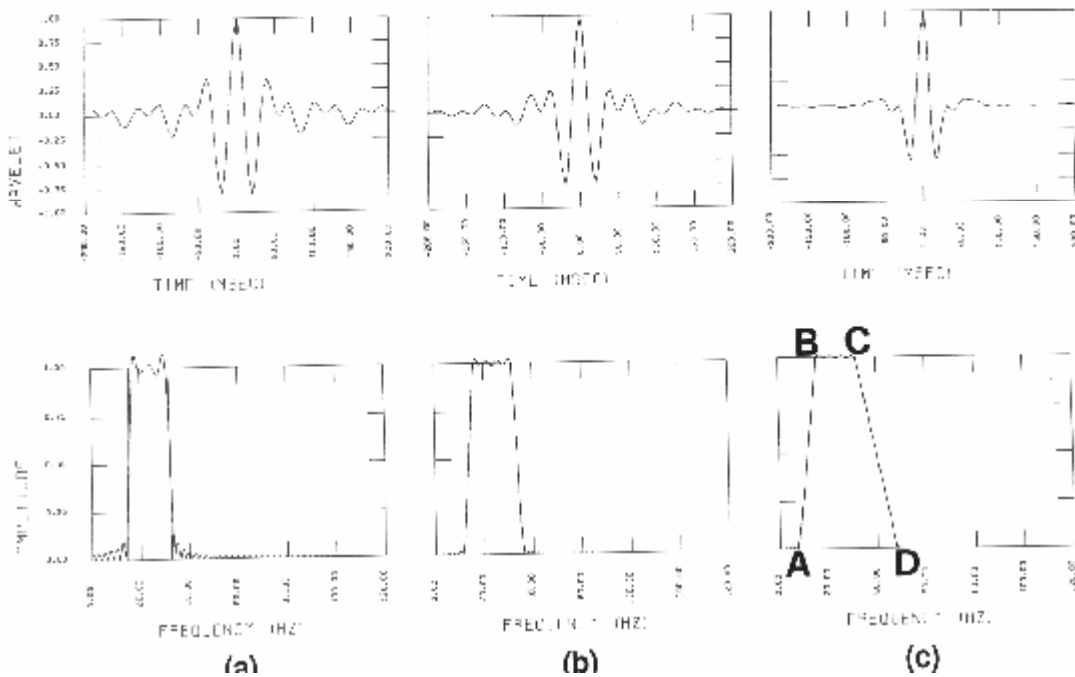


Рис.1-25 Три нуль-фазовых импульса (верхний ряд) и их амплитудные спектры (нижний ряд). (а) Если полоса пропускания характеризуется крутым наклоном, в импульсе и в действительном амплитудном спектре появляется пульсация. (б) В случае умеренного и (с) пологого наклона пульсация устраняется. О точка А, В, С, D см. в тексте.

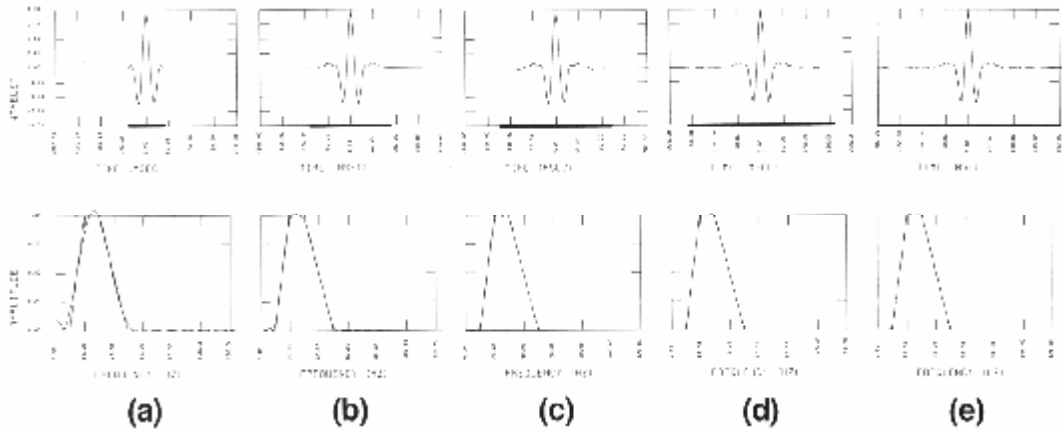


Рис.1-26 Утолщенные линии обозначают действующую длину (т.е. коэффициенты не равны нулю) оператора полосового фильтра. Сильное усечение (а) обуславливает значительное отклонение действительного амплитудного спектра от желательного (в форме трапеции).

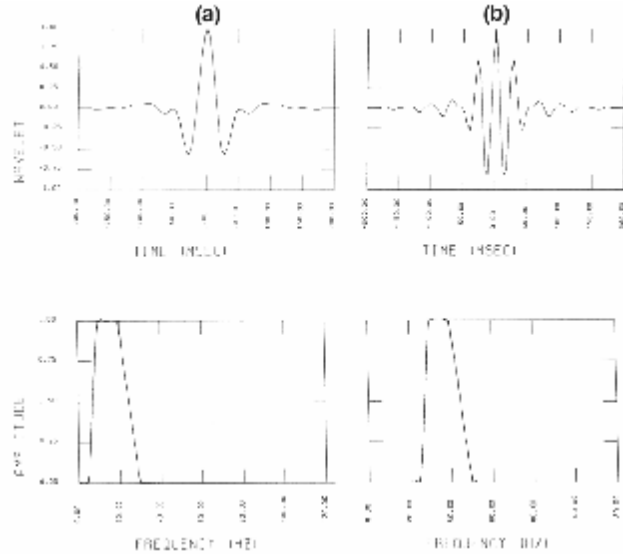


Рис.1-27 Два импульса (верхний ряд) с одной и той же шириной полосы пропускания (нижний ряд); центр полосы пропускания левого импульса находится на 15Гц, а правого – на 35Гц. Оба импульса характеризуются наличием пульсации, но в одном случае пульсация является низкочастотной, а в другом – высокочастотной. Одно только наличие низких или высоких частот недостаточно; в том и в другом случае необходимо повышение разрешающей способности.

Ширина полосы пропускания и вертикальная разрешающая способность

Частотная фильтрация тесно связана с вертикальной (временной) разрешающей способностью сейсмических данных. Рассмотрим операторы фильтров на рис.1-27. Оба фильтра имеют одинаковую ширину полосы пропускания (разность между верхней и нижней частотами среза); следовательно, ожидающие двух операторов идентичны. Большая склонность к осцилляции второго оператора (рис.1-27b) обусловлена его

меньшим коэффициентом пропускания (bandwidth ratio), т.е. отношением верхней частоты среза к нижней части среза.

Распространенным ошибочным мнением является то, что для повышения временной разрешающей способности необходимы только высокие частоты. Это неправильно. На верхнем изображении рис.1-28 показана одна отражающая поверхность и три набора отражающих поверхностей, разнесенных на 48,24 и 12мс. Как показано на нижних изображениях, к этим данным применена последовательность узкополосных фильтров. Отражающие поверхности, разнесенные на 48мс, разрешаются достаточно хорошо с помощью полосы пропускания 10 – 20Гц, но поверхности, расположенные ближе друг к другу, этот фильтр не различает. В полосе 20 – 30Гц поверхности, разнесенные на 48мс, слова хорошо разделяются. Тем не менее, ни один из узкополосных фильтров не обеспечивает хорошей разрешающей способности. Следовательно, одних лишь низких или высоких частот недостаточно для улучшения временной разрешающей способности; для этого необходимы как низкие, так и высокие частоты. Это показано на рис.1-29. Близко расположенные отражающие поверхности могут быть разрешены при наличии расширяющейся полосы пропускания. Полоса 10 – 30Гц достаточна для разрешения отражающих поверхностей, разнесенных на 48мс. Полоса 10 – 50Гц обеспечивает разрешение поверхностей, разнесенных на 24мс. Для того, чтобы разрешить отражающие поверхности, разнесенные на 12мс, необходима полоса пропускания шириной 10 – 100Гц. Между величиной, характеризующей удаление отражающих поверхностей друг от друга, и требуемой шириной полосы пропускания имеется тесная взаимосвязь (см. Раздел 8.3).

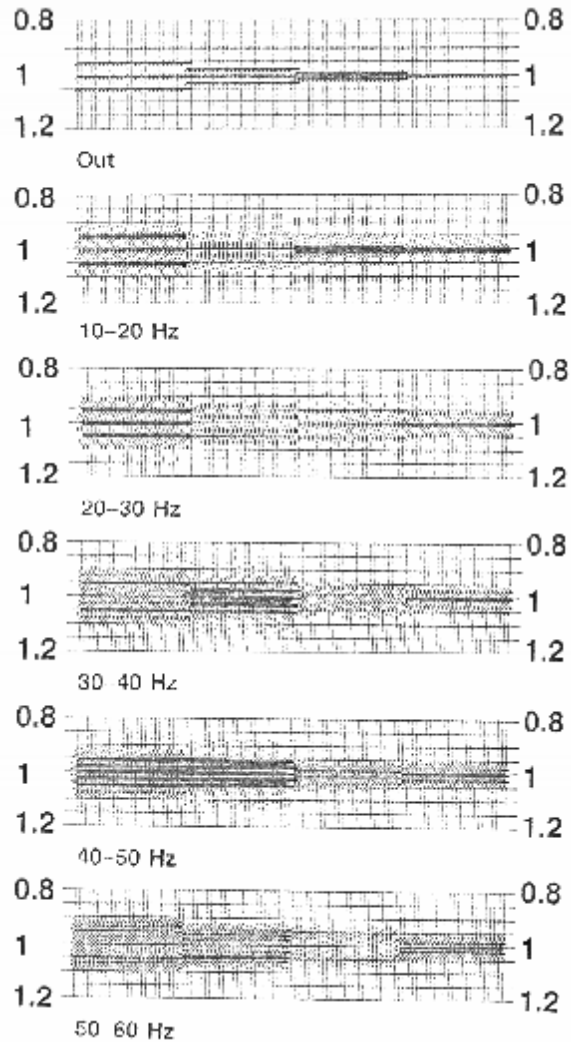


Рис.1-28 Вверху – модуль отражательной способности, которая состоит их (слева на право): трех отражающих поверхностей, разнесенных на 48мс, трех отражающих поверхностей (ОП), разнесенных на 24мс, трех ОП, разнесенных на 12мс и одной ОП на времени 1с. Отклик в ограниченной полосе пропускания (ширина полосы, центрированной на различных частях, равна 10Гц) не обеспечивает хорошей разрешающей способности.

Фильтрация, изменяющаяся во времени

Спектр сейсмических волн, особенно его высокочастотная часть, подвержен поглощению по пути распространения вследствие затухания, присущего разрезу (Раздел 1.5). Рассмотрим часть суммированного разреза и изображения, каждое из которых соответствует узкополосной фильтрации (рис.1-30). Сигнал присутствует в полосах (сверху в низ): 10 – 20Гц, 20 – 30Гц, 30 – 40Гц. Помехи отмечаются ниже 3.2с в полосе 40 – 50Гц. В случае более высокочастотных полос эти помехи быстро нарастают до меньших времен. Например, полоса 50 – 60Гц содержит полезный сигнал до времени 2.6, тогда как в полосах 60 – 70Гц и 70 – 80Гц полезный сигнал содержится только до времени 1.8с. Более высокочастотные полосы полезного сигнала ограничены верхней частью разреза. Следовательно, временная разрешающая способность значительно снижена в глубоких частях разреза. С практической точки зрения изменяющаяся во времени ширина полосы пропускания сигнала требует применения частотных фильтров, которые также изменяются во времени. Такие фильтры обеспечивают устранение помех окружающей среды, которые начинают преобладать над сигналом

на поздних временах, и получение более четкого разреза. По рис.1-30 выбраны следующие параметры фильтров, изменяющихся во времени (TVF):

Время мс	Полоса пропускания Гц
0	10-70
1800	10-70
2600	10-60
3200	10-50
4000	10-40

На практике выполняют смешивание фильтров по прилегающим временным окнам, чтобы получить плавный переход участков полосы пропускания. Для некоторых данных поддерживается широкая полоса пропускания по всей протяженности. Для суммированного разреза на рис.1-31 допустима широкополосная фильтрация во всем временном диапазоне. Вторая последовательность полосовых фильтров (рис.1-32) позволяет подобрать ширину полосы пропускания для данного временного окна. Здесь

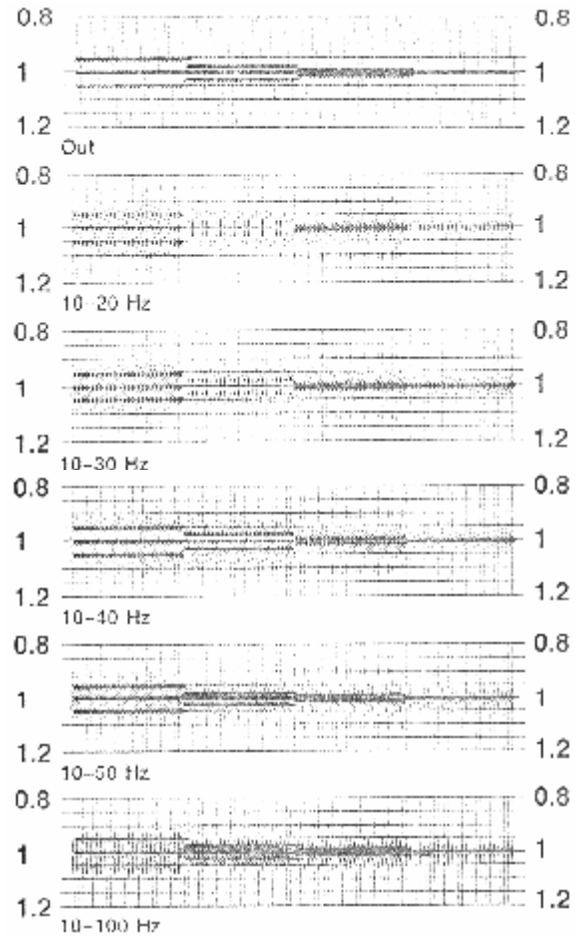


Рис.1-29 Верхний разрез – та же самая модель отражательной способности, что и на рис.1-28. Сильно разнесенные ОП (48мс) разрешаются с помощью полосы пропускания 10-30Гц. Для разрешения ОП, разнесенных на времена 24 и 12мс требуются более широкие полосы пропускания.

мы начинаем с узкополосного фильтра в низкочастотном конце спектра и постепенно расширяем полосу пропускания, включая более высокие частоты.

Обычно фильтры, изменяющиеся во времени применяются на суммированных данных. При фильтрации двух наборов данных, полученных в различные годы, с помощью различных источников или с различными уровнями помех необходимо установить равномерную полосу пропускания. Это особенно важно при попытке увязки двух профилей и отслеживания по ним отражающей поверхности. Интерпретатор использует частотную характеристику маркирующего горизонта в качестве опорной в процедуре отслеживания. Следовательно, два пересекающихся профиля должны быть отфильтрованы так, чтобы при переходе с одного профиля на другой сохранялся характер отражения.

1.3 Множество выборок ОПВ, полученных по всему миру

На рис.1-33 представлены 40 выборок ОПВ наземной и морской съемки, полученные Северной и Южной Америки, в Европе, на Среднем Востоке, в Северной Африке и на Дальнем Востоке. В качестве источников использовались вибросейс, Гео-флекс (Geoflex), динамит, воздушная пушка, Максипульс (Maxipulse), Аквапульс (Aquapulse) и Аквасейс (Aquaseis). Параметры регистрации, такие как количество трасс, количество выборок на трассу, шаг дискретизации, интервал между трассами, вынос показан в таблице 1-8.

Таблица 1-8. Параметры выборок ОПВ, полученных по всему миру.

Номер выборки	Площадь	Количество выборок на трассу	Количество трасс	Шаг дискретизации, мс	Интервал между трассами, футы или метры	Вынос футы или метры	Источник
1	East Texas	1775	3	3	30 F	500 F	Geoflex
2	West Texas	1775	17	4	30 F	400 F	Geoflex
3	California	2000	24	4	30 F	500 F	Geoflex
4	Ontario	1775	28	1	30 M	250 M	Geoflex
5	South America	1775	28	2	30 M	200 M	Geoflex
6	East Bay	200	18	3	30 M	150 M	Geoflex
7	South America	2000	28	2	30 M	300 M	Geoflex
8	Central Australia	1000	30	1	30 M	300 M	Geoflex
9	Alaska	1000	36	3	30 F	500 F	Geoflex
10	North Africa	1025	120	4	30 M	100 M	Geoflex
11	Alaska	1000	36	3	30 F	900 F	Geoflex
12	Mid Canada	1775	28	4	30 F	300 F	Geoflex
13	Offshore Norway	1775	28	4	30 F	800 F	Geoflex
14	Offshore Texas	1775	28	4	30 F	600 F	Geoflex
15	Offshore Canada	2000	28	2	30 M	300 M	Geoflex
16	South America	1775	28	1	30 M	250 M	Geoflex
17	South America	2000	28	4	30 M	300 M	Geoflex
18	Offshore Louisiana	1000	36	4	30 F	200 F	Geoflex
19	Offshore Louisiana	1250	28	4	30 M	300 M	Geoflex
20	South America	1775	28	4	30 F	900 F	Geoflex
21	East Bay	1000	28	2	30 F	200 F	Geoflex
22	Offshore Brazil	1000	36	1	30 F	100 F	Geoflex
23	Offshore Brazil	1000	36	1	30 F	200 F	Geoflex
24	East Texas	1775	28	1	30 F	200 F	Geoflex
25	Alaska	1000	36	1	30 M	300 M	Geoflex
26	Alaska	1500	28	2	30 M	100 M	Geoflex
27	Alaska	1775	28	4	30 M	300 M	Geoflex
28	Canada	2000	28	1	30 M	100 M	Geoflex
29	Offshore Spain	2000	28	4	30 M	200 M	Geoflex
30	California Offg	1775	36	4	30 M	250 M	Geoflex
31	North Sea	1775	28	4	30 M	200 M	Geoflex
32	North Sea	1850	36	4	30 M	150 M	Geoflex
33	North Sea	1775	36	4	30 M	200 M	Geoflex
34	Offg. Sea	1775	28	4	30 M	200 M	Geoflex
35	Offg. Sea	1775	28	2	30 M	100 M	Geoflex
36	Middle East	1025	36	1	30 M	200 M	Geoflex
37	Offg. Sea	1000	36	4	30 M	100 M	Geoflex
38	North Africa	2000	36	1	30 M	100 M	Geoflex
39	Offg. Sea	2000	36	1	30 M	100 M	Geoflex
40	North Africa	2000	36	1	30 M	100 M	Geoflex

Исследуем полевые записи, чтобы узнать, как распознавать различные типы волн. С целью отображения по всем 40 записям, была применена АРУ (Раздел 1.5). В следующем далее обсуждении, ссылки на записи делаются по их номерам.

Основная цель обработки сейсмических данных – усиление действительного отраженного сигнала путем подавления ненужной энергии в форме когерентных и случайных помех окружающей среды. В последующих параграфах исследуются выборки ОПВ с целью выявления различных типов сейсмической энергии.

Запись 1 представляет собой откорректированный набор данных выброса (о корреляции вибросейсмических данных см. Раздел 1.2.3). В этом рекорде присутствует ряд отражений с достаточно хорошим отношением сигнал/помеха. Действительное отношение распознается на выборках ОПВ по гиперболической форме. На выборках ОСТ отражения ведут себя аналогичным образом. Плоский горизонт без наклона дает симметричную гиперболу на выборках ОПВ и ОСТ, полученных с помощью центральной системы наблюдений, т.е. источник расположен в центре приемной косы. Накопленный горизонт дает асимметричную гиперболу на выборке ОПВ; гипербола остается симметричной на выборке ОСТ. Симметричность обеспечивается взаимностью источников и сейсмоприемников. По гиперболам отражения в рекорде 1 можно видеть, что разрез состоит из почти горизонтальных плоских слоев. Любое нарушение формы гиперболы может быть отнесено за счет приповерхностных эффектов и изменений скорости в горизонтальном направлении.

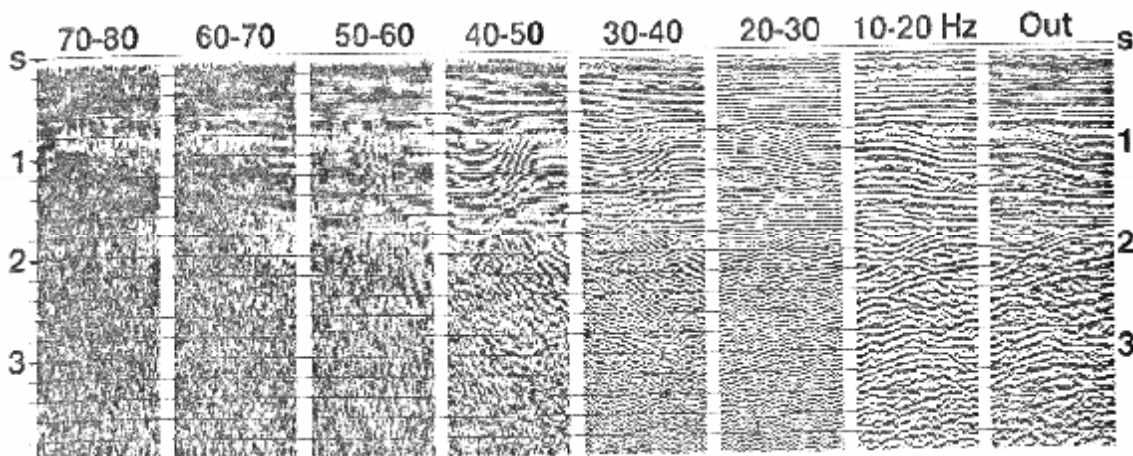


Рис.1-30 Крайнее правое изображение – часть суммы ОСТ без фильтрации. Остальные изображения представляют эти же данные с различными узкополосными фильтрами.

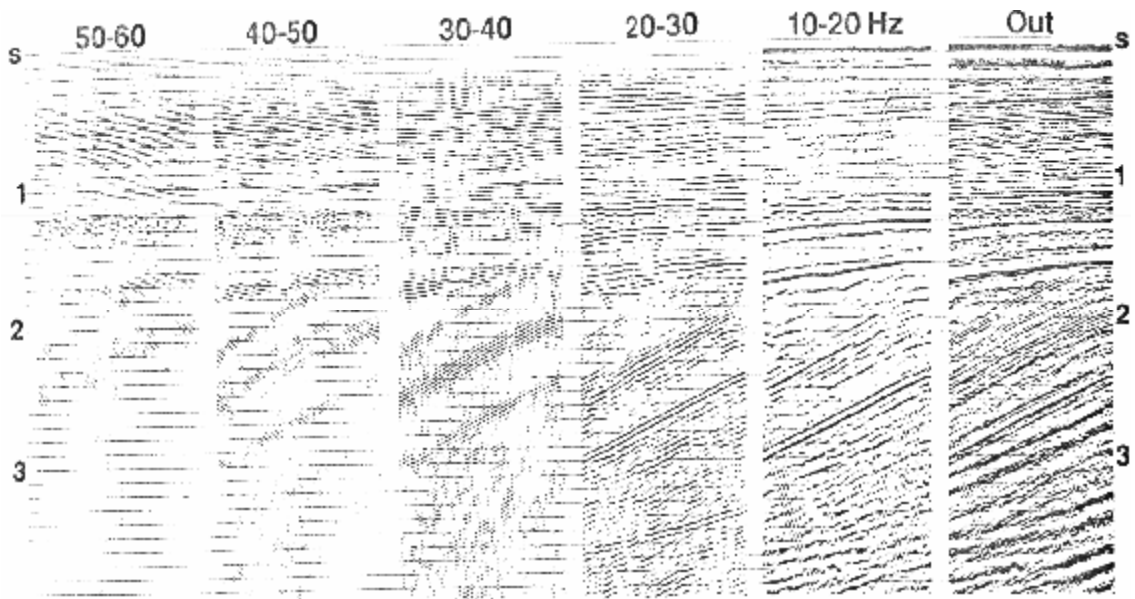


Рис. 1-31 Крайнее правое изображение – часть суммы ОСТ без фильтрации. Остальные изображения представляют эти же данные с различными узкополосными фильтрами.

Рекорд 2 представляет собой асимметричную выборку ОПВ. Обратите внимание на энергию отраженных волн между 1 и 2с, где приращение носит более неравномерный характер. Рекорд 3, полученный с помощью взрывного источника, содержит последовательность отражений, которые характеризуются отражений, которые характеризуются почти совершенным гиперболическим приращением, особенно между 1 и 3с. Этот рекорд относится к периоду аналоговой регистрации. Часто старые аналоговые данные оцифровываются и обрабатываются по современным методикам.

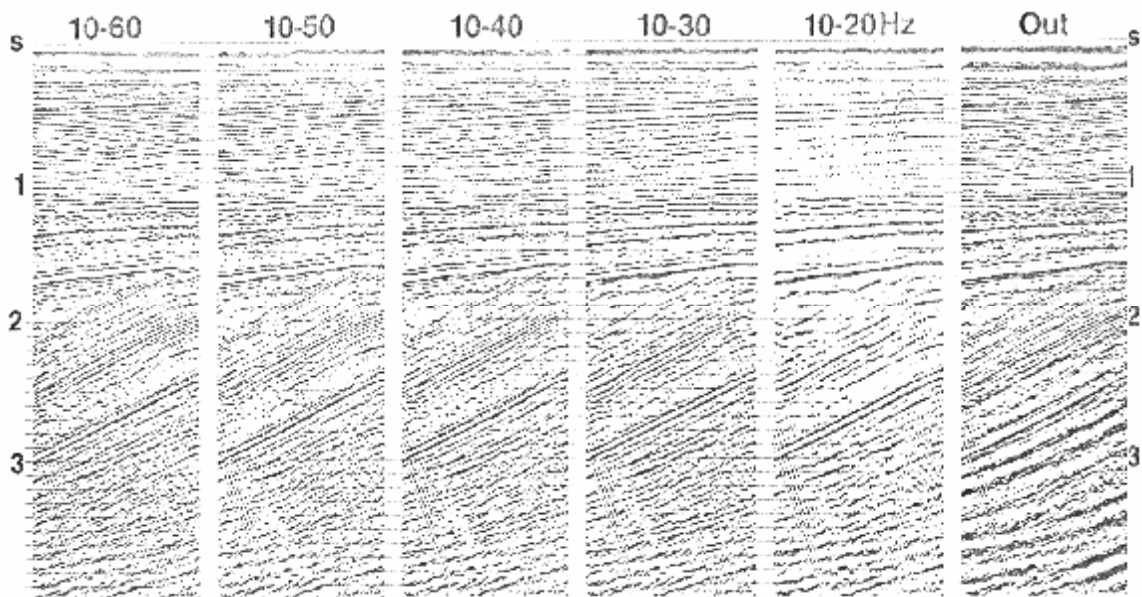
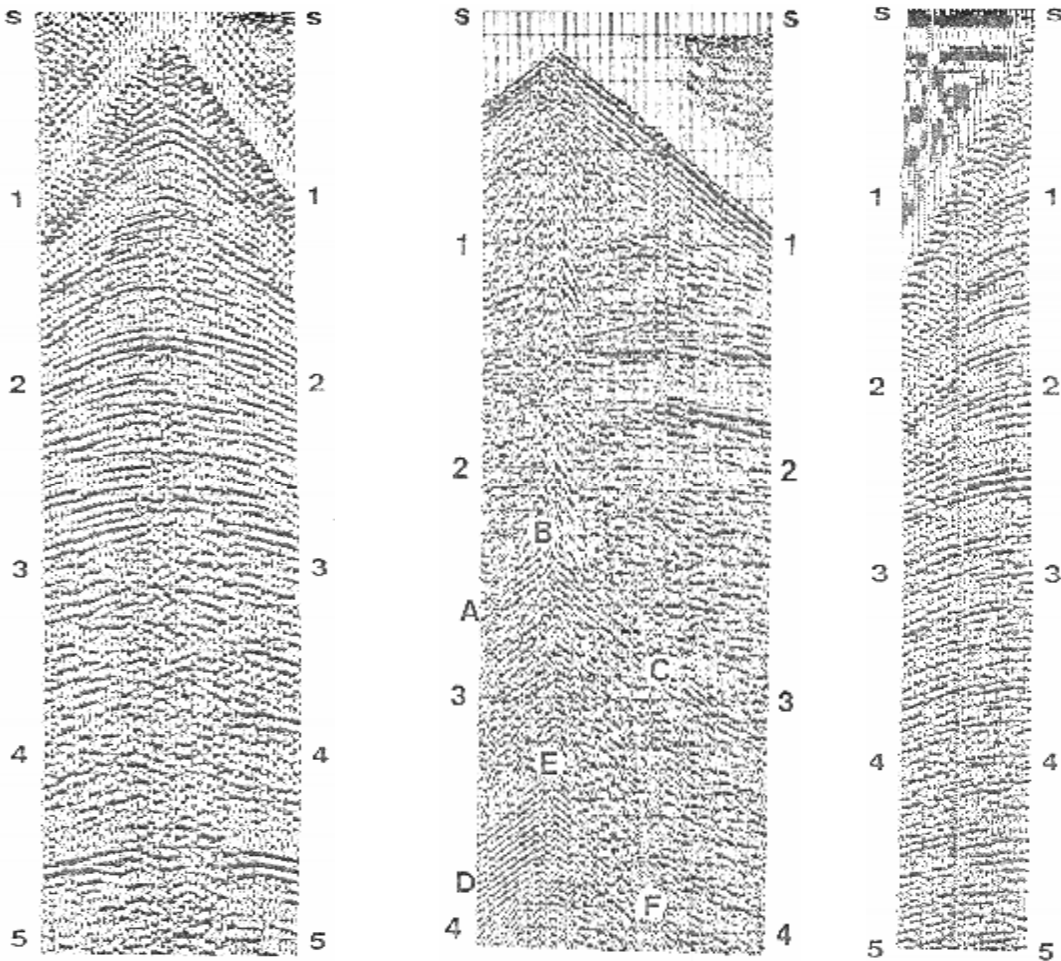


Рис.1-32 Крайнее правое изображение – часть выборки ОСТ без фильтрации. Остальные изображения представляют те же самые данные с различными полосовыми фильтрами с расширяющейся полосой пропускания.



Рекорд 1 Параметры регистрации этого и последующих рекордов см. в таблице 1-8.

Рекорд 2 Идентифицируйте отражения ABC иDEF.

Рекорд 3

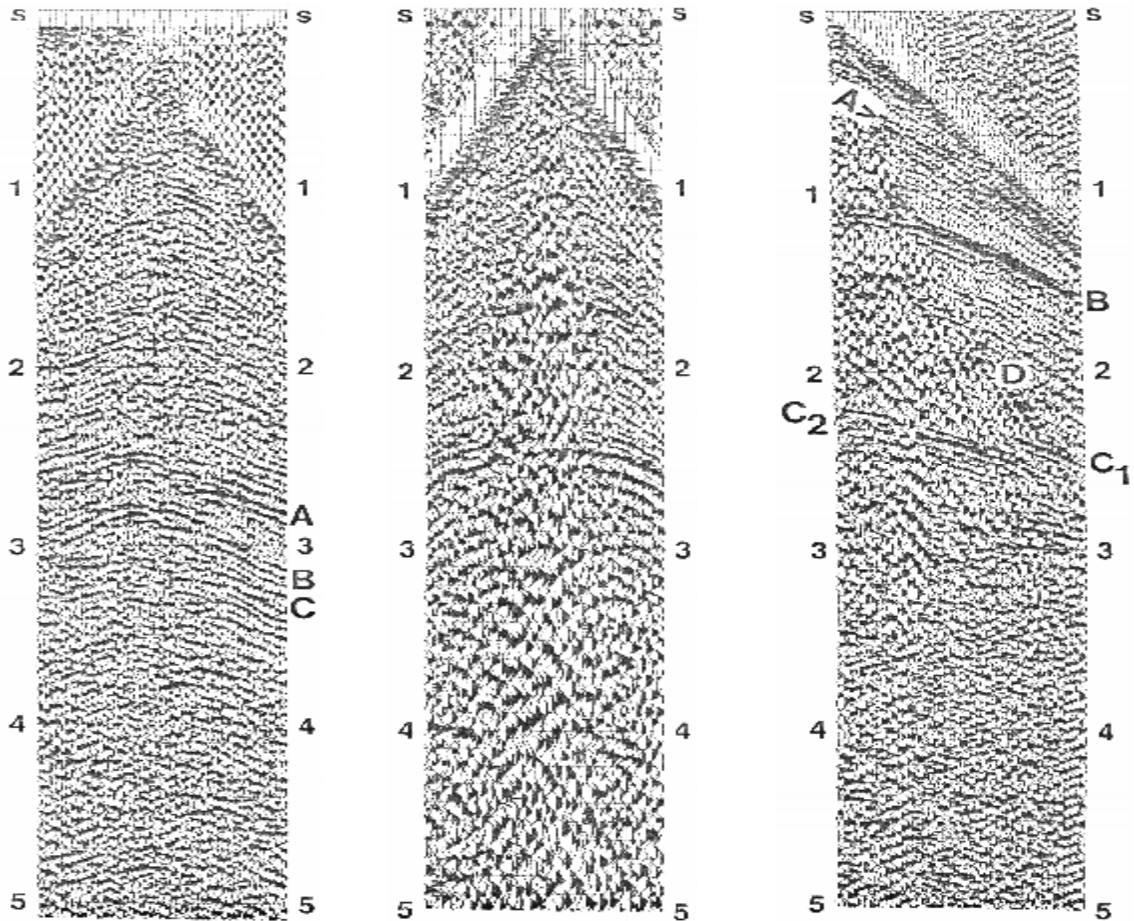
Рекорд 4 содержит отражения, характеризующиеся сложными приращениями между 2.5 и 3.5с. Отражения А, В, С характеризуются несимметричными гиперболическими приращениями, которые в данном случае предполагают восстание отражающей поверхности влево. Отметим также искажения времени пробега по приращению, обусловленные, вероятнее всего, приповерхностными условиями.

Рекорд 5 содержит некоторое количество энергии поверхностной волны, которая характеризуется низкими частотами и высокими амплитудами, особенно на трассах с коротким выносом. Этот вид энергии обычно подавляется в поле с помощью подходящей расстановки сейсмоприемников. Рекорд 6 содержит слабые и сильные, почти плоские ОП (А и В). Разрыв гиперболы C_1C_2 предполагает наличие сброса (C_1 – на взброшенном крыле, C_2 – на сброшенном крыле). Снова отметим энергию поверхностной волны с рассеянными низкими частотами на внутренних трассах (отражение D).

Рекорд 7 содержит три пересекающихся отражения. Отражение А – несимметричная гипербола, которая предполагает восстание ОП влево; отражение В почти симметричное, что предполагает пологую ОП. Отражение С характеризуется нарушением F вдоль кривой приращения, что указывает на присутствие разлома.

Рекорд 8 показывает сигнал очень хорошего качества. Он получен от взрывного источника и содержит ряд отражений и ассоциированные многократные отражения в тонком слое. На больших временах отношение сигнал/помеха уменьшается. Это действительно почти для всех сейсмических данных. Отражение А имеет большое прираще-

ние, т.к. оно вызвано поверхностью, занимающей на малой глубине, а отражение В характеризуется малым приращением, т.к. соответствующая ему поверхность залегает на большой глубине. Линейная энергия С упоминается в упражнении 1.21.



Рекорд 4 Какова причина энергии, предшествующей первым вступлениям?

Рекорд 5

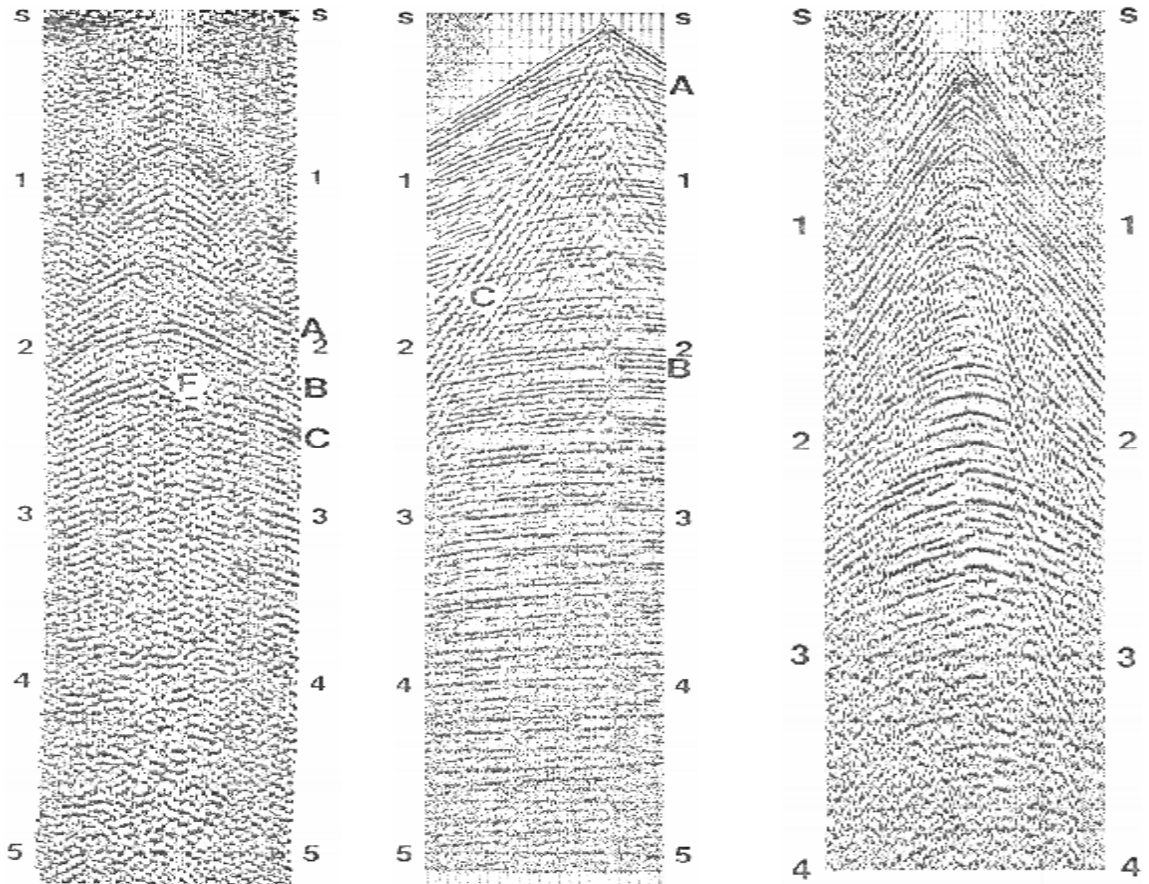
Рекорд 6

Рекорд 9, который представляет собой набор откоррелированных вибросейсмических данных, имеет ряд отражений и поверхностную волну. В отличие от данных, полученных от импульсных источников, таких как взрыв, первые вступления в вибросейсмических данных могут оказаться неразличимыми (сравните, например, рекорд 8 и 9). Это связано с тем, что откоррелированный вибросейсмический рекорд содержит некоторые из боковых лепестков ФАК свип-сигнала. Ниже 3с наблюдается возрастание случайной помехи.

Рекорд 10 содержит два интенсивных отражающих поверхности А и В, которые залегают на малых глубинах, и энергию поверхностной волны С. Кроме того, между 2.5 и 5с (D_1 - D_2) отмечается порция энергии с чрезвычайно большим приращением. Эта когерентная помеха может быть обусловлена энергией, рассеивающейся в боковом направлении вследствие неоднородностей вблизи поверхности (особенно на дне водоема); эти неоднородности ведут себя как точечные источники.

Рекорд 11 содержит выраженные отражения; он получен на Аляске, где мощность ММП может быть неравномерной. Размеры таких приповерхностных неоднородностей в горизонтальном направлении могут изменяться от величины, меньшей расстояния между группами до длины волн, в несколько раз превышающих длину ко-

сы. Как видно на правой ветви гипербола (отражения A, B, C, D) эти неравномерности обуславливают существенные смещения во времени вступлений отраженных волн. Такие искажения приращения могут быть динамическими (зависящими от времени) или статическими (не зависящими от времени). Перед суммированием эти искажения должны быть исправлены. За исключением искажений все отражения выглядят как характеризующиеся симметричными гиперболическими приращениями, которые свидетельствуют о почти горизонтальном залегающих слоях.



Рекорд 7

Рекорд 8

Рекорд 9

Рекорд 12 – полевой рекорд с низким отношением сигнал/помеха. Между 2 и 3.5с можно делать вывод о сложном строении разреза.

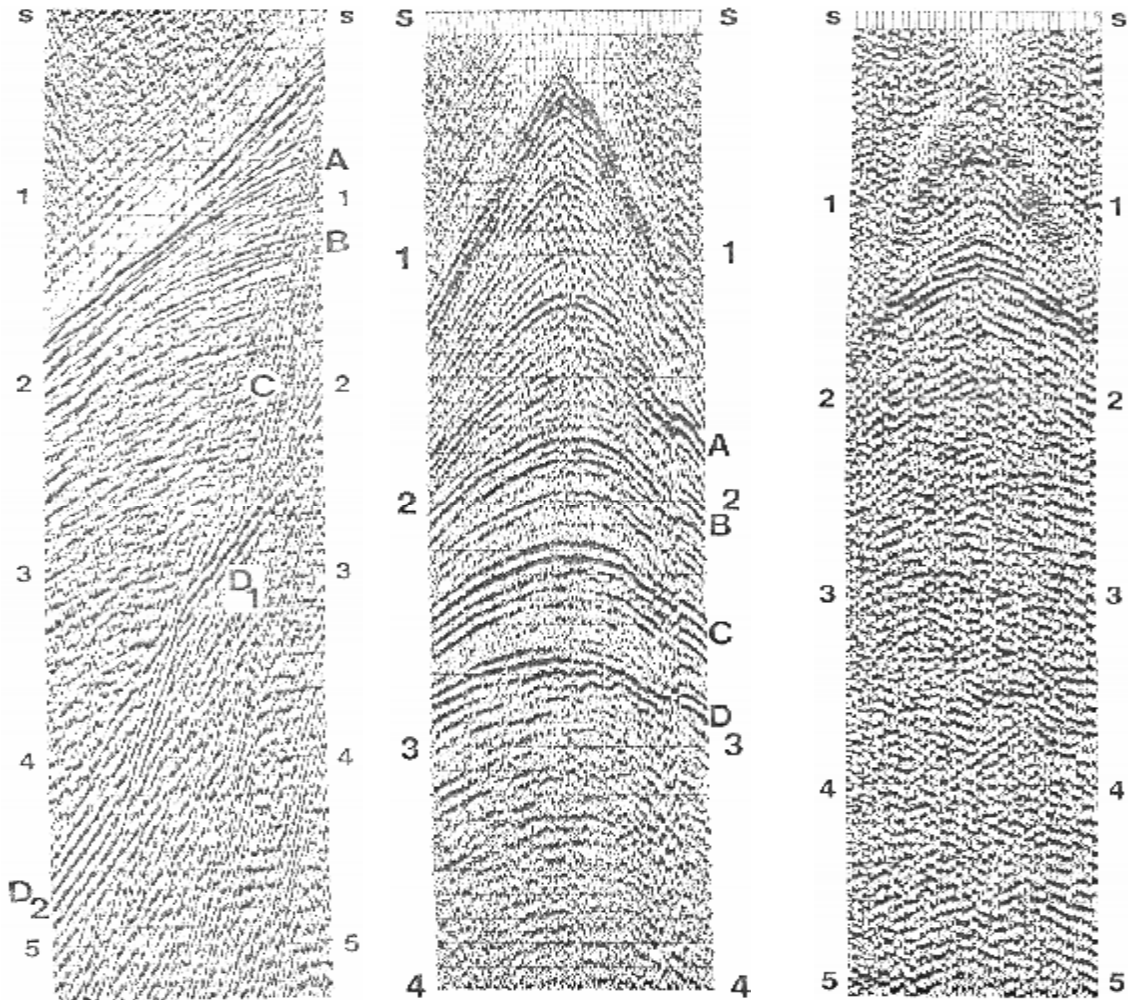
В рекорде 13 обратите внимание на высокочастотную энергию (гипербола S), ассоциированную с боковым рассеивающим объектом, расположенным, возможно, на дне водоема.

Рекорд 14 имеет три хорошо идентифицируемых отражения: A, B и C. Реверберационные и кратные волны также образуют значительную часть данных.

Рекорд 15 получен в море. Вступление преломленной волны A обусловлено твердым морским дном. Эта выборка ОПВ содержит, главным образом, каналные волны, которые проявляются в виде линейных трендов B, C, D. Истинное отражение E характеризуется малым приращением.

Канальные волны захватываются в водном слое и проходят в горизонтальном направлении. Это дисперсионные волны, т.е. каждая частотная составляющая распространяется со своей скоростью, которая называется *горизонтальной фазовой скоростью*. Их поведение изменяется в первую очередь в зависимости от условий дна и мощности водного слоя. Канальные волны являются важным источником когерентных

помех и ограничены в основном за критической областью распространения, где прохождение в разрез отсутствует. Природа канальных волн анализируется в Разделе 7.3.



Рекорд 10

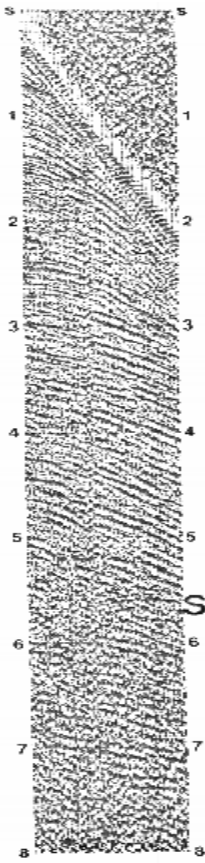
Рекорд 11

Рекорд 12

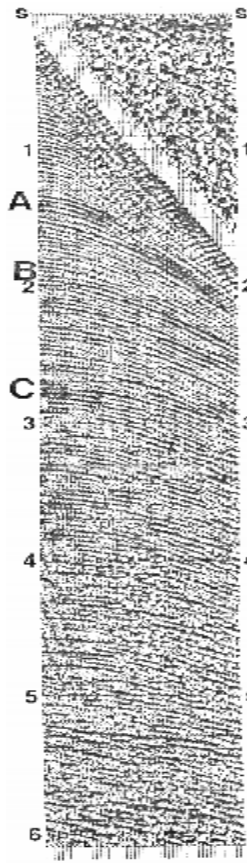
В основном пакет А на рекорде 16 состоит полностью из канальных волн. Вступления прямой волны В несут высокочастотные составляющие, тогда как низкие частоты С появляются раньше. Умеренные частоты D образуют более глубокую часть дисперсионного волнового пакета. Этот рекорд имеет отражение Е и длиннопериодные кратные отражения М1-М4. Отражение и соответствующие ему кратные отражения также сопровождаются цугом реверберационных волн длиной около 300мс.

Рекорд 17 имеет большую длину, чем, которая обычно используется при сборе сейсмических данных (4-6с). После 4с явный сигнал отсутствует, хотя суммирование иногда может открыть очень слабые сигналы.

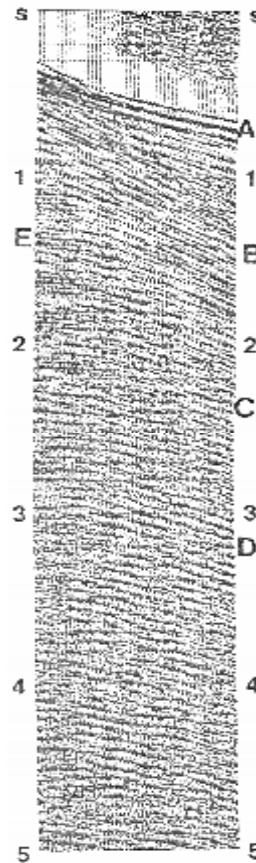
Рекорд 18 содержит некоторые отражения, заслуживающие внимания. Дисперсионные волны А, которые выключают головную волну и вступления прямой волны, образуют верхнюю часть рекорда. Некоторые отражения В, С, D сопровождаются короткопериодными реверберационными волнами. В более глубокой части обратите внимание на отражение Е с чрезвычайно большим приращением, которое несвойственно данным на такой глубине. Эти отражения представляют когерентные помехи, рассеивающиеся в горизонтальном направлении.



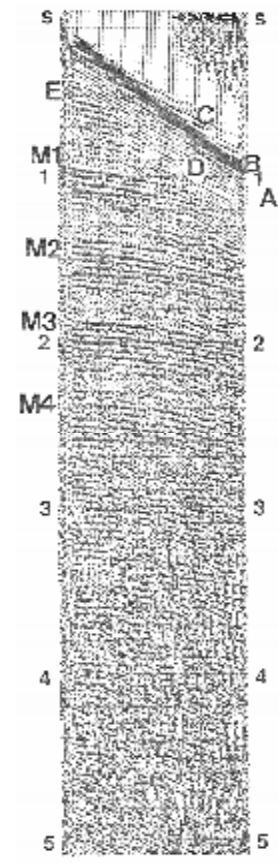
Рекорд 13



Рекорд 14

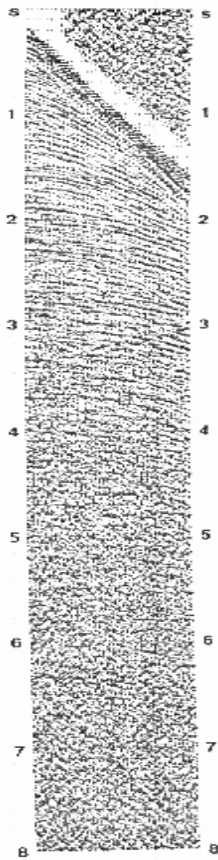


Рекорд 15

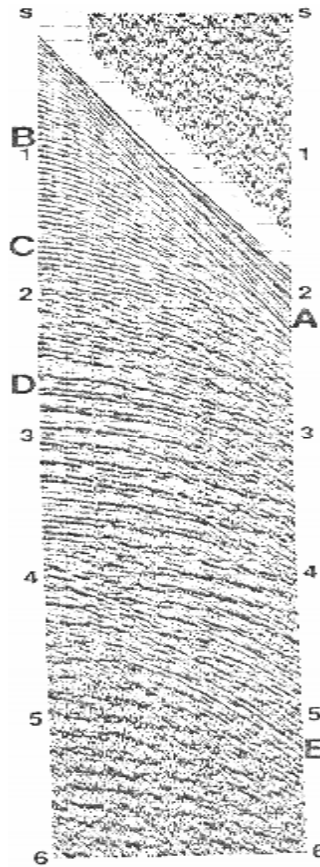


Рекорд 16

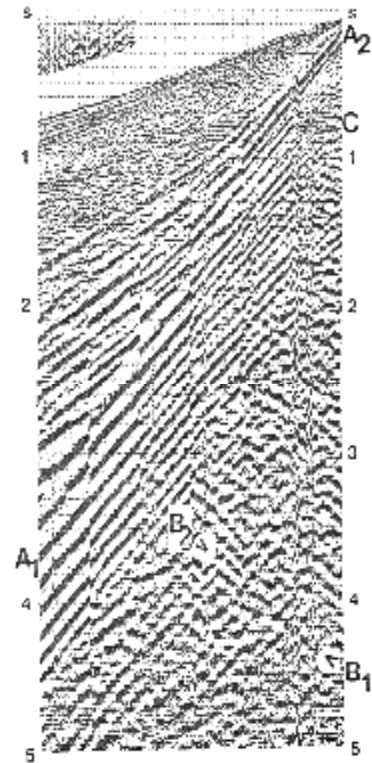
Рекорд 19 представляет собой исследование помех, связанных с удалением ПВ (walk-away noise) и в действительности состоит из шести рекордов ОПВ. Коса оставалась на месте, а ПВ удалялись без перекрытия. Шаг между группами сейсмоприемников равен 10м. Сейсмоприемники в каждой группе были объединены в связке образования расстановки. Это позволило регистрировать все кажущиеся длины волн сигналов и помех. Кажущаяся длина волны определяется путем измерения преобладающей частоты (величины, обратной времени между последовательными пиками или впадинами) и горизонтальной фазовой скорости (обратная величина разности времен вступления Dt/Dx поверхностной волны). Затем кажущаяся длина волны используется для подбора длины расстановки сейсмоприемников, используемой для подавления этой энергии (см. Упражнение 1.2). Волновой пакет A_1A_2 (между 1.7 и 4.6с на крайней левой трассе) представляет собой хороший пример поверхностной волны. Линейная когерентная энергия с противоположным наклоном B_1B_2 представляет собой компоненту рассеянную в обратном направлении (backscattered component). Отражение с разорванной энергией поверхностной волны.



Рекорд 17



Рекорд 18

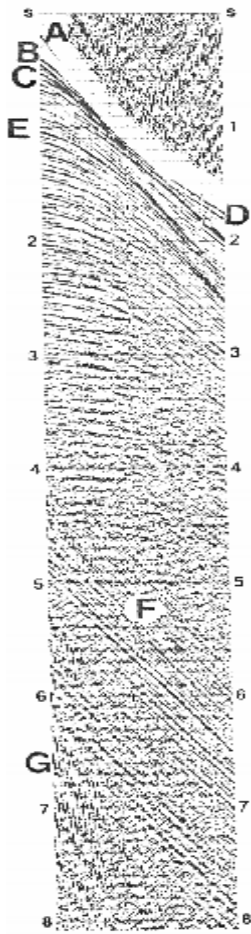


Рекорд 19

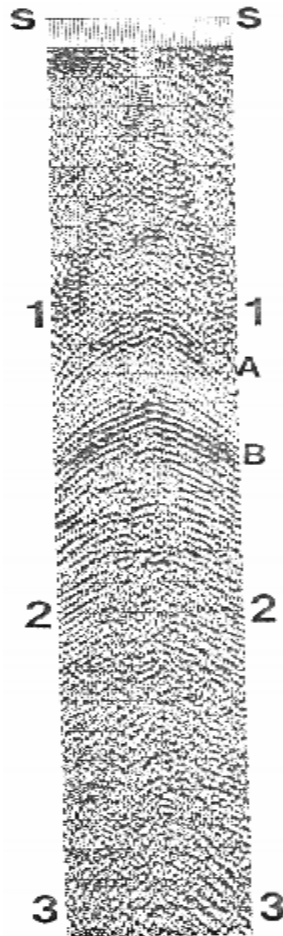
Поверхностная волна отличается от канальных волн, хотя обе являются дисперсионными. Поверхностная волна – это один из типов волны Рэлея, который возникает вследствие согласования предельных волн (P) и вертикальной составляющей поперечных волн (SV), распространяющихся вдоль свободной поверхности (Grant и West 1965). С другой стороны, канальные волны – это один из видов продольных волн, которые распространяются в слое подобно тому, как звуковые волны распространяются в органической трубе.

Рекорд 20 (морские работы) показывает разнообразие типов волн. Вступления прямой волны А в значительной степени подавляются приемными расстановками в поле. На трассах, соответствующих малым выносам, можно видеть отражение В от дна. Обратите внимание на отражающую поверхность С на малой глубине и ассоциированные вступления преломленной волны D. На времени 1с можно видеть другую отражающую поверхность Е. Большая часть энергии между 1 и 3с, скорее всего, кратные отражения, ассоциированные с В, С и Е. В нижней части рекорда после 4с появляется линейная помеха (вероятно от косы) F и низкочастотная помеха G, вызванная вращением винта.

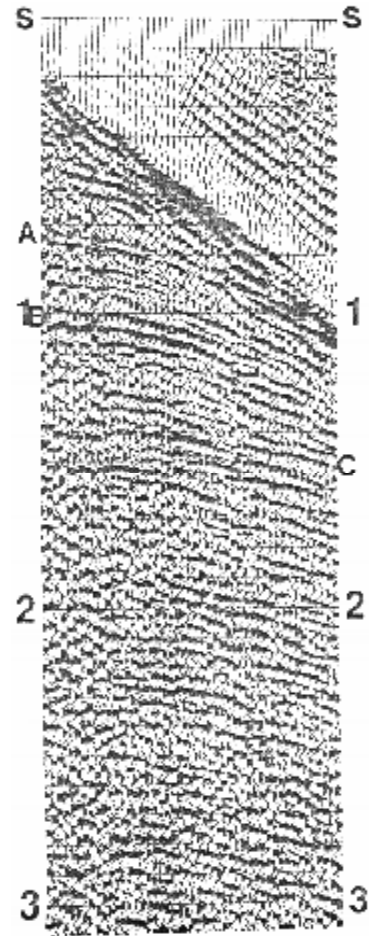
Рекорд 21 (вибросейс) характеризуется слабой А и интенсивной В отражающими поверхностями. Ниже 2с преобладают внешние помехи. Рекорд 22 также получен с помощью вибросейса; обратите внимание на вступления отраженных волн А, В и С. Хотя эти отражения характеризуются вполне гиперболической формой, имеются некоторые отклонения времен пробега, которые могут быть вызваны сложными или поверхностными условиями, на что указывают первые вступлениями. Рекорд 23 показывает сходные характеристики.



Рекорд 20



Рекорд 21

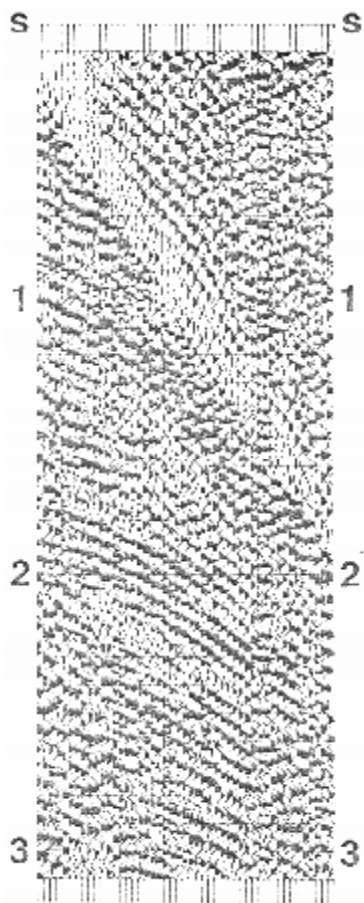


Рекорд 22

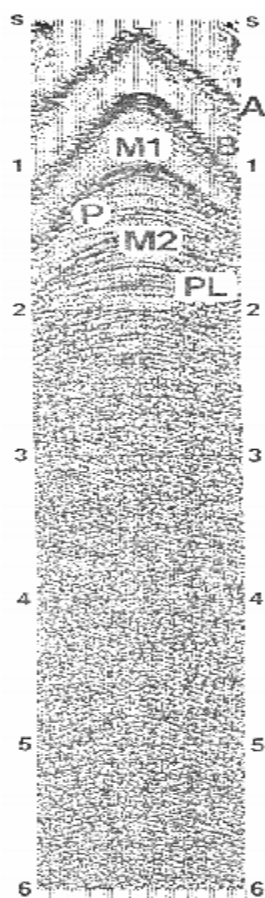
Рекорд 24 представляет собой выборку ОПВ, полученную в ходе морских работ с применением источника Аквасейс. Легко распознаются вступления прямых волн А, отражение от дна В и кратные отражения первого порядка M_1 и M_2 . Можно также различить первое отражение Р и многократные отражения в тонком слое PL.

Рекорд 25 (наземная съемка) характеризуется очень хорошим качеством сигнала. Помимо нескольких первичных отражений имеется поверхностная волна А, энергия которой содержит преимущественно низкие частоты и распространяется с малой групповой скоростью (это скорость, с которой распространяется энергия в волновом пакете). Отметим также приповерхностные эффекты, обуславливающие искажения времени пробега на правом фланге отражений В, С, D и E. В рекорде 26, который получен от взрывного источника, отсутствует хорошо развитая энергия поверхностной волны; однако, этот рекорд выделяется своим низкочастотным характером А. Траектории распространения, который соответствуют отражениям, например, В, С и D, разорваны поперечной волной и, возможно, искажены неравномерностями в близи поверхности.

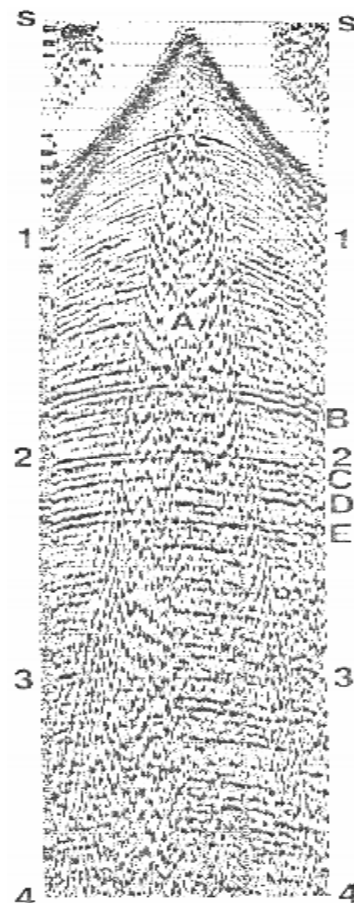
Представляет интерес рекорд 27 (морские работы). Обратите внимание на изменение геометрии косы А (Табл. 1-8). Имеется хорошо развитый дисперсионный волновой пакет В между временами 1.9 и 8.9с на трассе, соответствующей дальнему выносу. Пакет включает головную волну и вступления прямой волны. Также обратите внимание на заметное различие между вступлениями С и D. Вступление С с большим приращением принадлежит цугу короткопериодных волн, ассоциированному с отражениями от дна. Вступление D – первичное отражение со своей собственной последовательностью F многократных отражений в тонком слое.



Рекорд 23



Рекорд 24

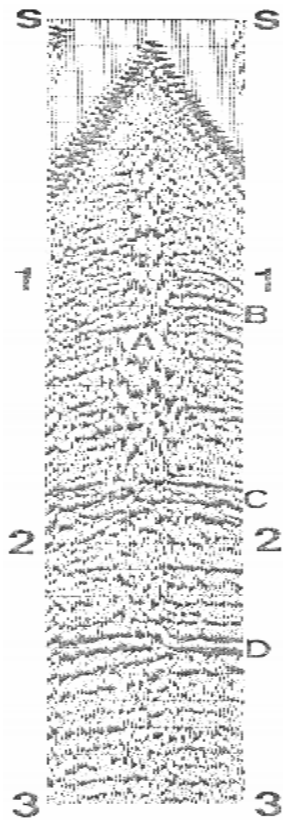


Рекорд 25

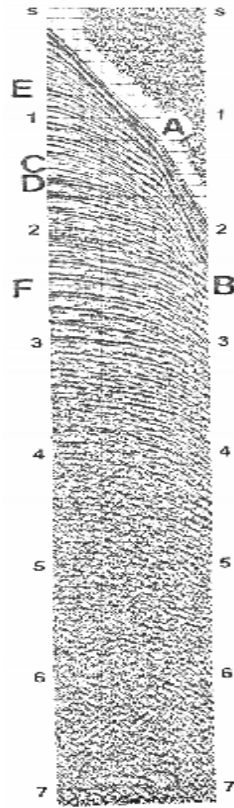
Данные рекорда 28, полученного от воздушной пушки, содержат высокоскоростные отражения с малым приращением. Обратите внимание на пакет С канальной волны между 0.7 и 1.9с на данной трассе, причиной которого является интенсивная преломляющая поверхность D (дно водного слоя).

Представляет интерес рекорд 29 (см. упражнение 1.4); несимметричность гипербол отражения В, С, D, E возрастает с глубиной.

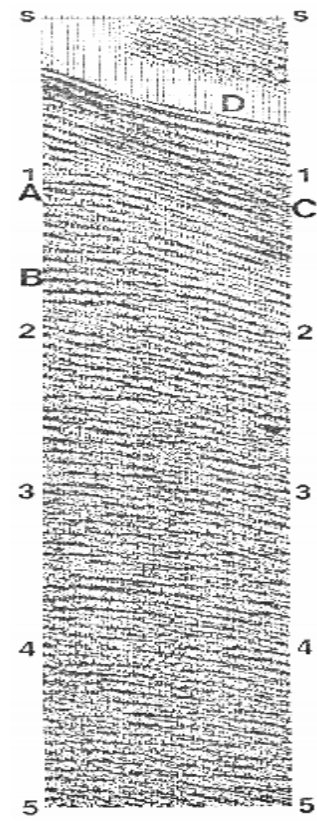
Рекорд 30 получен в условиях большой толщины водного слоя. Можно легко идентифицировать вступление прямой волны А, отражение В от дна и отражение С от поверхности на малой глубине. Можно также выделить кратные отражения первого порядка от дна М и многократные отражения в топком слое PL, ассоциируемые с отражающей поверхностью С.



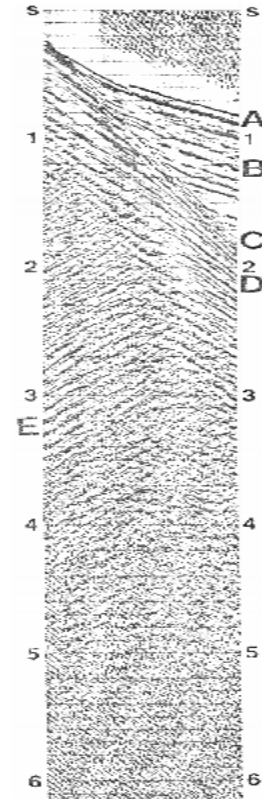
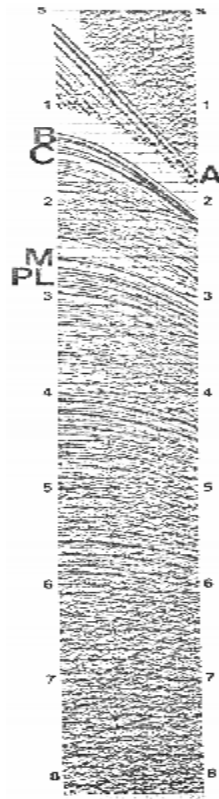
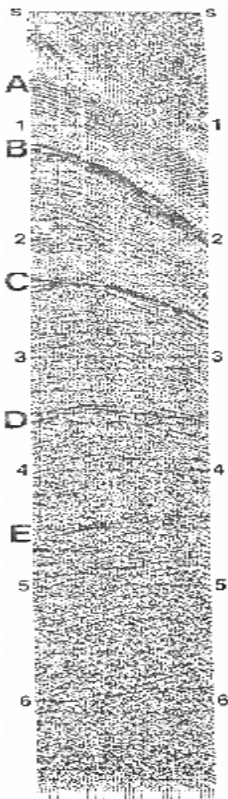
Рекорд 26



Рекорд 27 Идентифицируйте прямую волну.

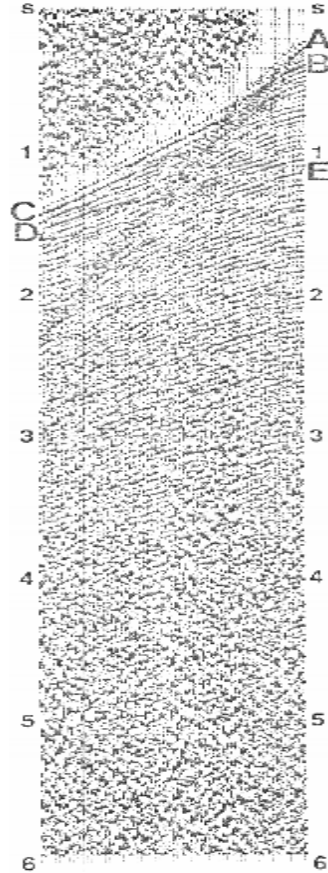
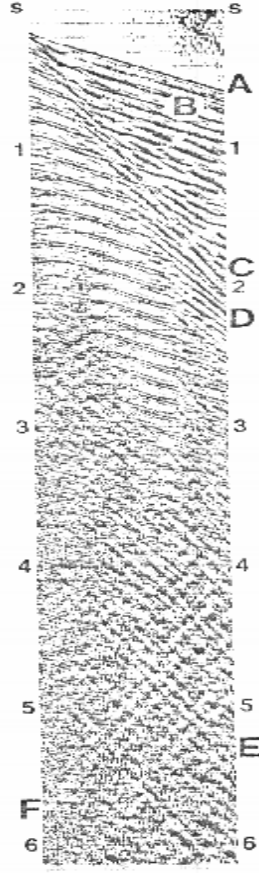
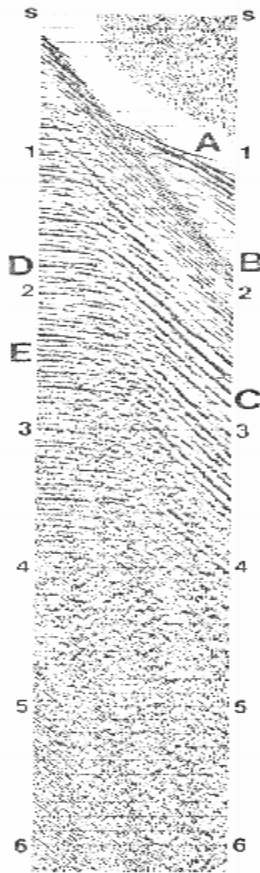


Рекорд 28



Рекорд 29**Рекорд 30****Рекорд 31**

Рекорд 31 состоит, в первую очередь, из канальных волн. Идентифицируются следующие элементы: А – вступление преломленной волны; В – связанные с ним кратные волны; С – вступление прямой волны; D – дисперсионная среднечастотная компонента канальных волн между 1.8 и 3с на дальней трассе; Е – энергия, рассеянная в обратном направлении (backscattered energy).

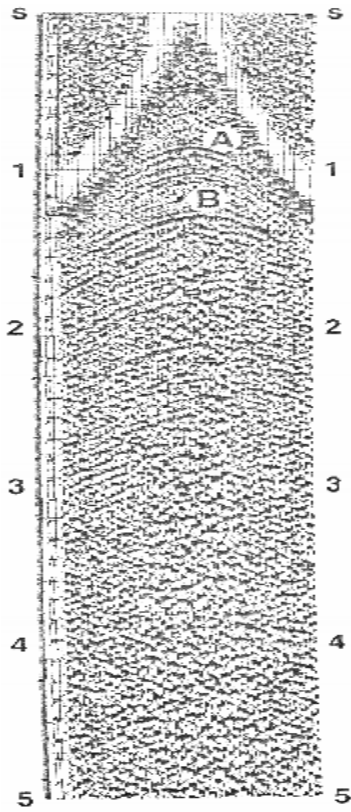
**Рекорд 32****Рекорд 33****Рекорд 34**

Рекорд 32 также получен при морских работах и содержит канальную волну А высокой энергией. Между 1.3 и 4с на данной трассе можно видеть рассеянный волновой пакет С, а также преломляющую поверхность А и вступления прямой волны В. Это также энергия закритического отражения, большая часть которой представляет собой реверберационные волны D и E.

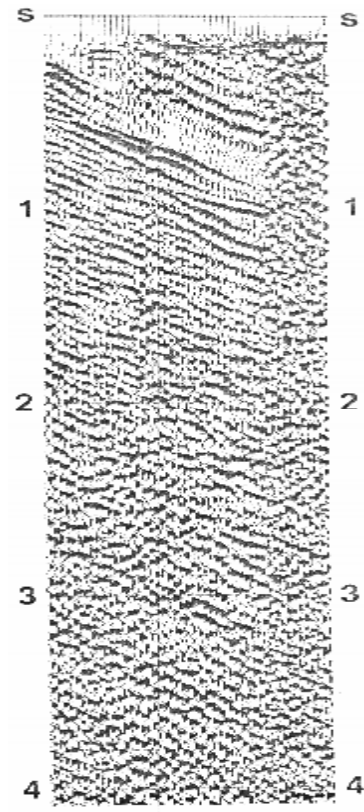
Вступления на рекордах 33, 34 и 35 упоминаются в упражнении 1-7, 1-8, 1-9. Четыре трассы слева на рекорде 35 ассоциированы с каналами, используемыми для записи вспомогательной информации.

В рекорде 36, похоже, что отсутствуют вступления с гиперболическим приращением. Рекорд 37 имеет несколько отражений AD, BE и CF; однако, они скрыты интенсивными внешними помехами. Рекорд 37 имеет несколько отражений Ad, BE и CF; однако, они скрыты интенсивными внешними помехами. Рекорд 38 не содержит отражений. Интенсивная дисперсионная (поверхностная) волна образует верхнюю часть, а остальная часть рекорда содержит, главным образом, случайные помехи. Обработка не позволяет получить сигнал из полевых данных, которые не содержат сигнал. В лучшем случае, она подавляет помехи и восстанавливает энергию отраженных волн, скрытую

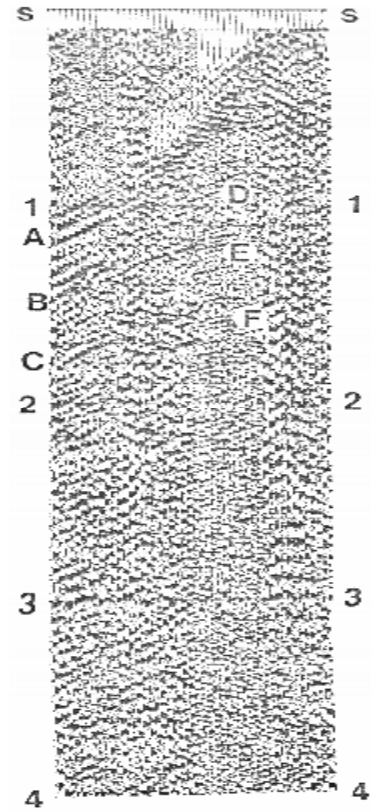
помехами. При сборе сейсмических данных нельзя исходить из положения: "Не волнуйтесь, обработка выявит сигнал".



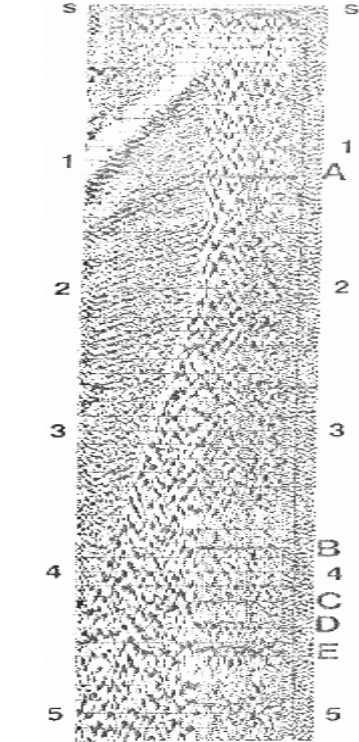
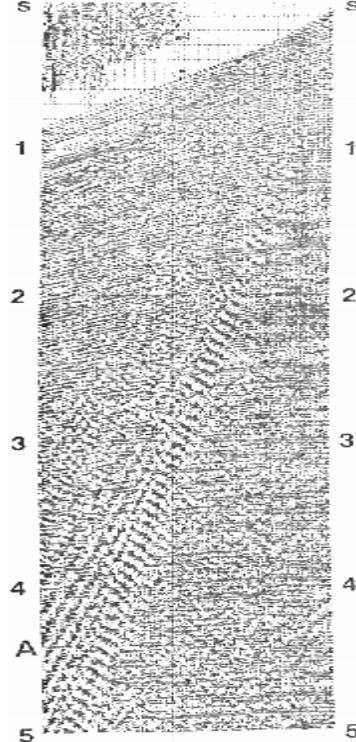
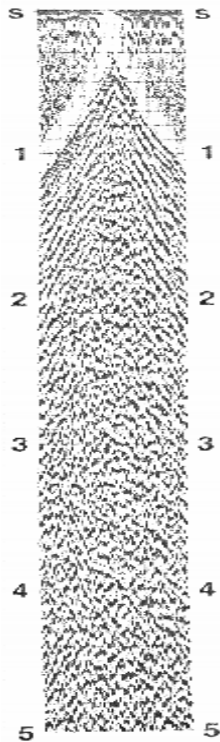
Рекорд 35



Рекорд 36



Рекорд 37



Рекорд 38**Рекорд 39****Рекорд 40**

Рекорд 39 получен от Геофлекса и содержит поверхностной волны А, а также цуг высокочастотных волн и короткопериодные кратные волны, ассоциированные с дном и, возможно, с несколькими отражающими поверхностями на малых глубинах. Рекорд 40 характеризуется низким содержанием информации: это дальние трассы в левой части между 1 и 4с. Оставшаяся часть рекорда содержит интенсивные помехи и неустановившиеся (transient) помехи А, В, С, D, Е, которые можно отнести за счет шумов электронного оборудования, вызванных, возможно, погодными условиями.

Подведем итоги. Полевые рекорды содержат: (а) отражения, (b) когерентные помехи, (с) случайные внешние помехи. Одним из важных аспектов обработки данных является выявление действительных отражений путем подавления помех различных типов.

Отражения распознаются по гиперболическим временам пробега. Если отражающая поверхность горизонтальная, вершина гиперболы находится на нулевом выносе. С другой стороны, если отражающая поверхность наклонная, гипербола становится асимметричной и наклоняется в сторону восстания поверхности.

В категории помех имеются несколько типов волн:

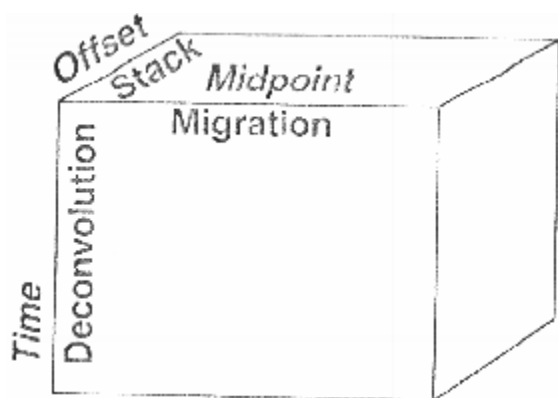
1. Поверхностная волна распознается по низкой частоте, большой амплитуде и низкой групповой скорости; она представляет собой вертикальную составляющую дисперсионных поверхностных волн. В полевых условиях для устранения поверхностной волны используются расстановки сейсмоприемников. Поверхностная волна содержит интенсивные рассеянные назад компоненты, причиной которых являются неоднородности в приповерхностном слое.
2. Канальные волны являются преобладающими, особенно в рекордах, полученных в мелководных условиях с твердым дном. Водный слой образует сильный контраст скорости с разрезом, что обуславливает захват и распространение в водном слое в горизонтальном направлении большей части энергии. Дисперсионный характер этих волн позволяет легко распознавать их на рекордах. Канальные волны также образуют ранние вступления. Чем больше различие по скорости между водным слоем и разрезом, тем меньше критический угол; следовательно, больше энергии канальных волн захватывается в закритической области. При наличии сильного различия по скорости энергия преломленной волны распространяется в форме головной волны. Канальные волны присутствуют и в рекордах наземной съемки; они в значительной степени ослабляются при суммировании ОСТ. Канальные волны характеризуются выраженным линейным приращением и поэтому, в принципе, их можно подавить с помощью методик пространственной фильтрации. Одна из таких методик основана на двумерном преобразовании Фурье записи ПВ. Это рассмотрено в Разделе 1.6.2. Другой подход основан на наклонном суммировании (slant stacking), которое рассмотрено в Разделе 7.4.
3. Помехи, рассеянные в боковом направлении, обычно имеют место на дне водоема, где отсутствует плоская поверхность. Неоднородности различного размера действуют как точечные рассеиватели, которые обуславливают вступления дифрагированной волны с линейными лучами. Эти вступления могут находиться в вертикальной плоскости приемной косы или вне ее. Они обычно характеризуются разнообразными приращениями, зависящими от положения рассеивателей в разрезе.
4. Помехи, связанные с косой, являются линейными, малоамплитудными и низкочастотными; они проявляются на записях ПВ в виде поздних вступлений.
5. При работе с поверхностными зарядами, такими как Геофлекс, Poulter или воздушной наземной пушкой, может оказаться серьезной проблемой воз-

душная волна, распространяющаяся со скоростью 300м/с. Вероятно, единственно эффективный способ устранения воздушных волн – это обнуление данных на выборках ОПВ вдоль узкого коридора, содержащего эту энергию (режекторное обнуление). Часто бывает невозможно восстановить какие-либо данные, вступившие после воздушной волны при работе с Poulter.

6. ЛЭП также обуславливают помехи в виде одночастотной волны. Частота может быть 50 или 60Гц в зависимости от района проведения полевых работ. В этом случае часто используются режекторные фильтры.
7. Кратные отражения представляют собой вторичные отражения, происходящие между пластами или внутри пластов. Канальные волны включают за- критическую энергию кратных волн. Для борьбы с кратными отражениями используются методы, основанные на различии приращения и теории прогноза, которая использует периодичность кратных отражений. Наиболее эффективной методикой подавления, основанной на приращении, является суммирование ОСТ с обнулением внутри трассы (Раздел 8.2). Прогнозирование должно быть эффективным, по меньшей мере, в области наклонного суммирования (slant-stack domain) (Раздел 7.5).

Случайные помехи имеют различные источники. Плохо закрепленный сейсμο-приемник, ветер, движение вблизи косы, волны в воде, вызывающие вибрацию косы, электрические помехи от регистрирующей аппаратуры – все это может вызвать внешние помехи. Помехи, обусловленные многими рассеивающими объектами в разрезе, также являются частью случайных помех (Larner и др., 1983).

В разделе 1.5 отмечено, что энергия, распространяющаяся в разрезе, затухает по амплитуде вследствие расхождения волнового фронта и по частоте вследствие поглощения породами. Следовательно, интенсивность сигнала уменьшается во времени, а случайная помеха продолжает действовать и, в конечном счете, доминирует. К сожалению, коррекция усиления с целью восстановления интенсивности сигнала на поздних временах, усиливает случайные помехи. С другой стороны, суммирование ОСТ подавляет значительную часть не откоррелированных случайных помех (Раздел 1.4.3).



Offset – вынос.

Stack – суммирование.

Midpoint – средняя точка.

Migration – миграция.

Deconvolution – деконволюция.

Time – время.

Рис. 1-34 Объем сейсмических данных, представленный в координатах обработки (средняя точка – вынос – время). Деконволюция действует по оси времени и повышает временную разрешающую способность. Суммирование сжимает объем данных в направлении выноса и дает плоскость суммированного разреза (передняя грань призмы). Миграция перемещает отражения от наклонной поверхности в их истинные положения в разрезе и разрушает дифрагированные волны, повышая разрешающую способность по горизонтали.

1.4 Основная последовательность обработки данных.

Введение цифровой регистрации привело к развитию обработки сейсмических данных. Опишем основную последовательность обработки, чтобы дать полное представление о каждом шаге.

В обработке сейсмических данных имеются три стадии (в порядке их применения):

1. Деконволюция
2. Суммирование
3. Миграция

На рис. 1-34 представлен объем сейсмических данных в координатах обработки: средняя точка – вынос – время. Деконволюция действует по оси времени и устраняет основной сейсмический импульс (временная функция источника, измененная различными действиями со стороны разреза и регистрирующей системы) из записанной сейсмической трассы и тем самым повышает временную разрешающую способность. Эта цель достигается путем сжатия импульса. Суммирование также представляет собой процесс сжатия импульса. В частности, объем данных на рис. 1-34 сводится к плоскости средняя точка – время при нулевом выносе (это передняя грань призмы) путем применения поправки за нормальное приращение к трассам от каждой выборки ОСТ (Раздел 3.2); затем выполняется суммирование трасс по оси выноса. Результат представляет собой суммированный разрез (термины “суммированный разрез”, “сумма ОСТ” и “сумма” часто используются как синонимы). Сумма ОСТ представляет собой приближение к разрезу с нулевым выносом. Наконец, миграция применяется в общем случае к суммированным данным. Это процесс, который разрушает дифрагированные волны и смещает отражения от наклонных границ в их истинные положения в разрезе. В этом смысле миграция представляет собой процесс пространственной деконволюции, который улучшает пространственную разрешающую способность.

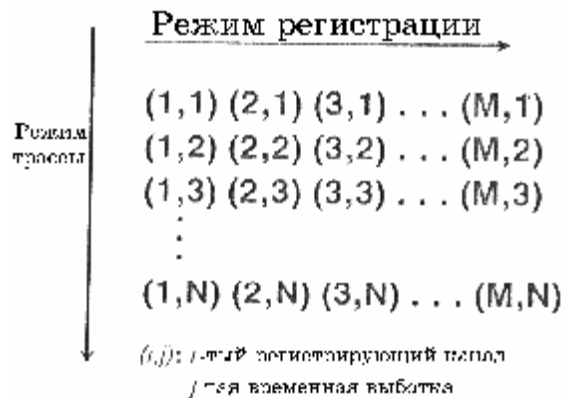


Рис. 1-35 Сейсмические данные регистрируются в строках выборок; выборки расположены на тех же временах, что и последовательные каналы. Демультимплексация включает сортировку данных в колонки выборок: временные выборки одного канала сопровождаются временными выборками следующих каналов.

Все остальные методики обработки могут рассматриваться как вторичные в том смысле, что они помогают повысить эффективность первичных процессов. Например, пространственная фильтрация может быть применена перед деконволюцией для устранения когерентных помех; следовательно, оценка автокорреляции основывается на энергии отраженных волн, свободных от таких помех. Для удаления очень низко- и высокочастотных помех может потребоваться также широкополосная фильтрация. Перед деконволюцией необходимо ввести поправку за геометрическое расхождение, чтобы компенсировать потерю амплитуды, обусловленную расхождением волнового фронта.

Скоростной анализ, являющийся неотъемлемым шагом суммирования, может быть улучшен путем подавления кратных волн и коррекции остальной статики.

Следует помнить, что успех процесса обработки зависит не только от правильного выбора параметров, относящихся к этому конкретному процессу, но и от эффективности предыдущих стадий обработки. Как указывалось выше, общепринятая обработка основывается на определенных допущениях. Многие вторичные процессы разработаны таким образом, чтобы обеспечивалась совместимость данных с допущениями трех первичных процессов. Деконволюция исходит из того, что импульс источника является стационарным, вертикально падающим и минимально-фазовым, а последовательность коэффициентов отражения свободна от помех. Суммирование предполагает гиперболическое приращение, а миграция основывается на волновом поле с нулевым выносом. Могут возразить, что ни одно из этих допущений не является действительным. Это может быть и так, но, будучи применены эти методики все же обеспечивают результаты, которые близки к действительной картине. Это связано с тем, что эти три процесса являются жесткими и их рабочие характеристики не очень чувствительны к допущениям, на которых они основаны.

Рассмотрим основную обработку сейсмических данных.

1.4.1 Предварительная обработка

Полевые данные регистрируются в мультиплексном режиме с применением определенного типа формата. Сначала данные демультиплексируются так, как показано на рис. 1-35. С математической точки зрения мультиплексация выглядит как транспозиция большой матрицы, при которой колонки результирующей матрицы могут быть прочитаны как сейсмические трассы, записанные при различных выносах с общим ПВ (рис. 1-36). На этой стадии данные преобразуются в формат, который удобно использовать в ходе обработки. Этот формат определяется типом системы обработки и конкретной компанией.

Предварительная обработка включает также редактирование трассы. Трассы, осложненные помехами, трассы с неустановившимися всплесками (*transient glitches*) (см. рис. 1-33, рекорд 40) или с одночастотными сигналами (см. рис. 1-33, рекорд 3) удаляются; обращения полярности (см. рис. 1-33, рекорд 2) исправляются.

Функция восстановления усиления применяется на данных с целью корректировки эффектов расхождения (сферического) фронта волны (рис. 1-37). Это равнозначно применению функции геометрического расхождения, которая зависит от времени пробега и средней первичной скоростной функции, которая ассоциируется с первичными отражениями на данном участке съемки (Раздел 1.5). Кроме того, для компенсации потерь, вызванных затуханием, может быть использована экспоненциальная функция усиления. В качестве варианта можно перед деконволюцией пропустить данные через широкополосный фильтр.

Наконец, в состав сейсмических данных включается геометрия полевых работ. Это можно сделать перед коррекцией усиления, которая зависит от выноса. На основе информации о съемке координаты ПВ и ПП для всех трасс заносятся в заголовки трасс. Можно оперировать изменениями координат ПВ и ПП, исходя из информации в журнале оператора. Причина проблем обработки различных типов заключается в неправильном задании геометрии полевых работ. Независимо от того, насколько тщательно подобраны параметры обработки, качество суммированного разреза может существенно ухудшиться из-за неправильной геометрии полевых работ. Для наземных данных на этой стадии применяются поправки за превышение, чтобы привести времена пробега к общему уровню. Этот уровень может быть фиксированным или изменяющимся (плавающим) по профилю.

1.4.2 Деконволюция

Деконволюция следует за предварительной обработкой. Обычно деконволюция перед суммированием направлена на улучшение временной способности путем сжатия эффективного импульса источника, содержащегося в сейсмической трассе, до единичного (деконволюция сжатия).

Прогнозируемая деконволюция (Раздел 2.6 и 2.7) с задержкой предсказания, которая равна первому или второму переходу ФАК через 0, также используется в общем случае. Методики деконволюции, используемые в общепринятой обработке, основаны на оптимальной фильтрации Винера (Раздел 2.6).

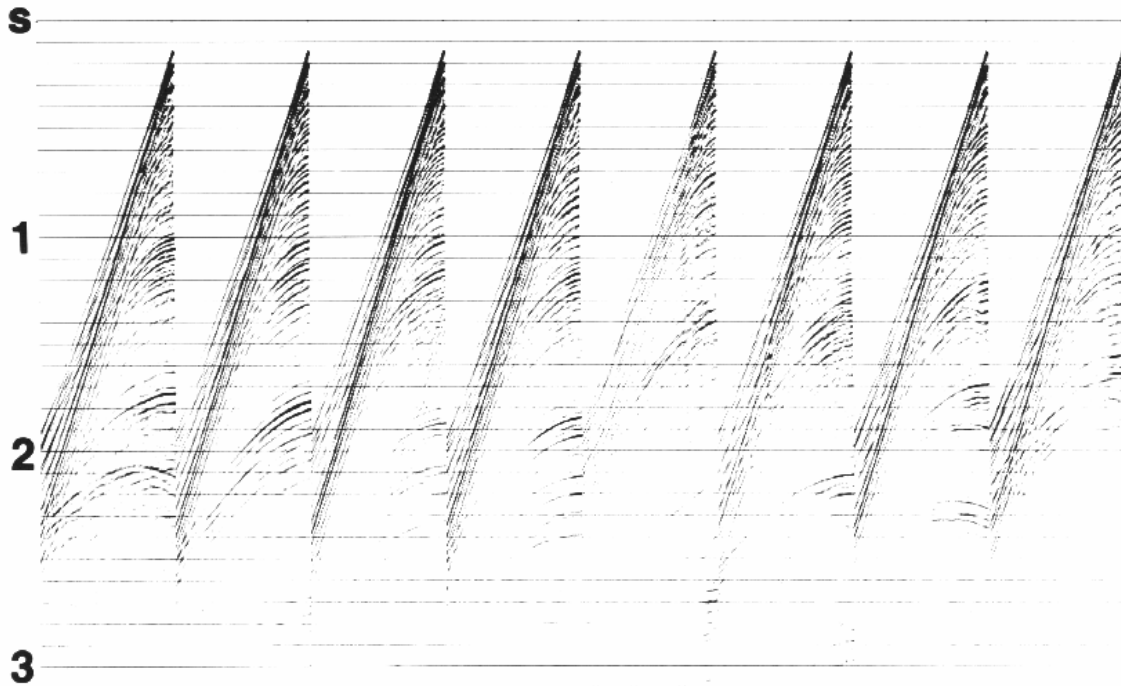


Рис.1-36 Выборки ОПВ сразу после демультимплексации. Они получены при ведении морских работ. Обратите внимание на высокие амплитуды в верхней части рекордов и на относительно слабую энергию в более глубокой части. Такое затухание амплитуды обусловлено в первую очередь расхождением волнового фронта.

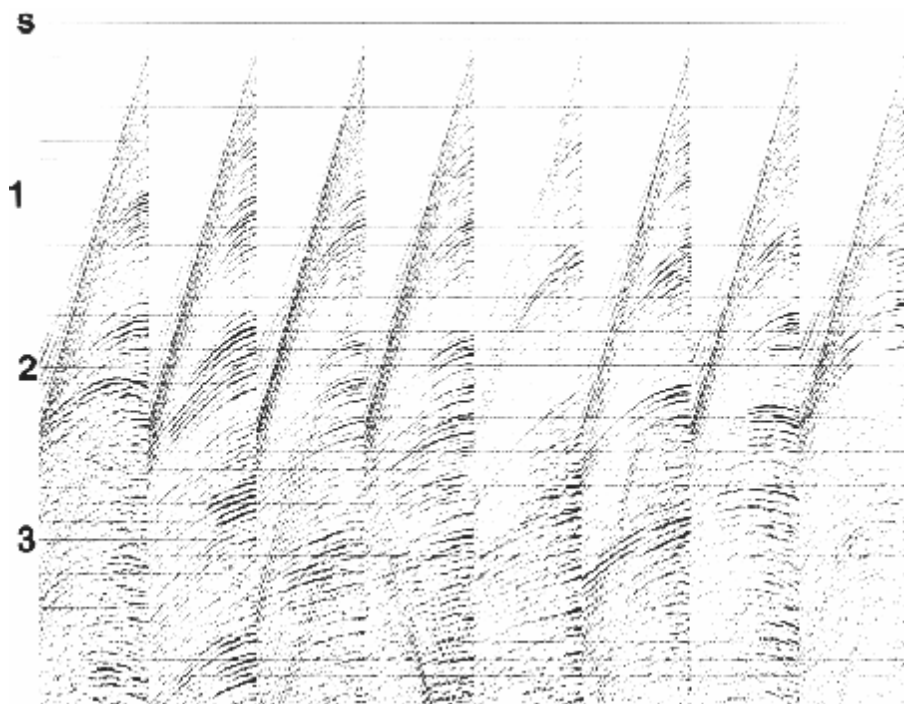


Рис.1-37 Выборки ОПВ на рис.1-36 после ввода поправки за расхождение волнового фронта. На поздних временах рекордов амплитуды восстановлены.

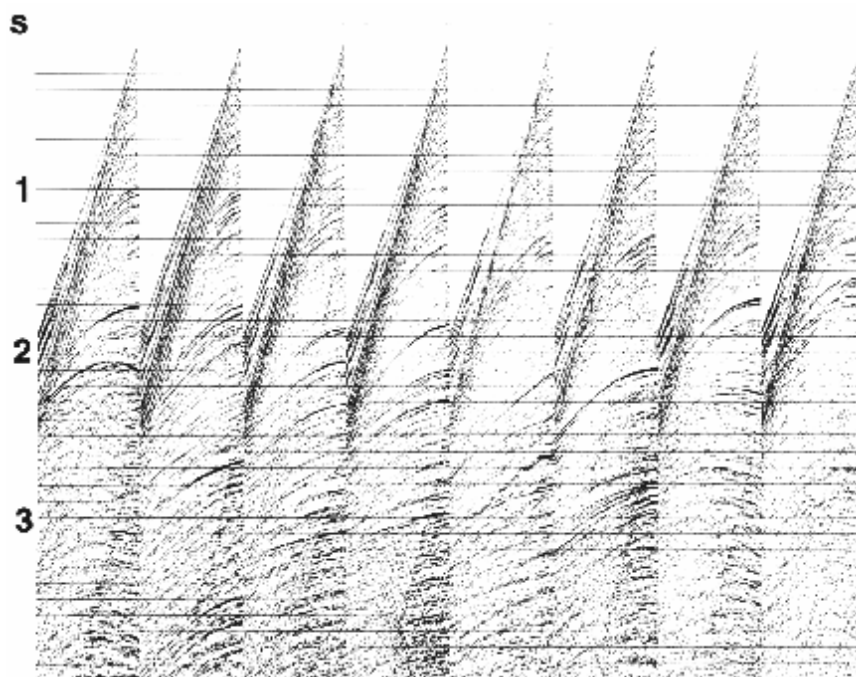


Рис.1-38 Выборки ОПВ на рис.1-37 после деконволюции сжатия. Исследуя некоторые индивидуальные отражения и сопоставляя их с рис.1-37, можно видеть, что деконволюция подавила импульс и энергию реверберационной волны, следующую за каждым отражением.

На рис.1-38 можно видеть выборки ОПВ после деконволюции сжатия. Сжатие импульса лучше всего заметно, если сравнивать этот рисунок с рисунком 1-37. По-

сколькx деконволюция сжатия расширяет спектр сейсмических данных, после деконволюции трасса содержит намного больше высокочастотной энергии. Поскольку усиливаются высокочастотные помехи и сигнал, часто возникает необходимость пропустить данные после деконволюции через широкополосный фильтр. Кроме того после деконволюции используются некоторые виды уравнивания трасс, чтобы привести данные к общему среднеквадратическому (rms) уровню, как показано на рис.1-39. Уравнивание рассмотрено в Разделе 1.5.

1.4.3 Сортировка ОСТ

После начальной области сигнала (см. выше) данные преобразуются из координат “взрыв - сейсмоприемник” в координаты “средняя точка - вынос”. Это сортировка ОСТ, которая требует информации о геометрии полевых работ. Отметим, что термин “общая глубинная точка” (ОГТ) часто используется вместо термина “общая средняя точка” (ОСТ).

Сбор сейсмических данных с многократным перекрытием выполняется в координатах “взрыв – сейсмоприемник” (s, g). На рис.1-40 в схематическом виде представлена геометрия, регистрирующая установки. С другой стороны, обработка сейсмических данных выполняется, как это принято, в координатах “средняя точка - вынос” (y, h). Требуемое преобразование координат достигается путем сортировки данных в выборки ОСТ. Каждая отдельная трасса присваивается средней точке между точками взрыва и приема, ассоциированными с этой трассой. Трассы с одним положением средней точки группируются вместе, образуя выборку ОСТ. На рис.1-41 показана геометрия выборки ОСТ. Выборка ОСТ эквивалентна выборке ОСТ только в том случае, когда отражающие поверхности горизонтальные, а скорости, не изменяются в латеральном направлении. Если в разрезе имеются наклонные отражающие поверхности, эти два выборки не являются эквивалентными и следует использовать только термин “выборка ОСТ”. На рис.1-42 показаны выборки ОСТ, полученные при сортировке выборок ОПВ после деконволюции (рис.1-39).

На рис.1-43 показано положение координат “взрыв- сейсмоприемник” (s, g) и “средняя точка - вынос” (y, h). Координаты (y, h) повернуты на 45% относительно (s, g). Участок с точками представляет перекрытие, используемое при регистрации сейсмического профиля по оси средних точек Oy . Каждая точка представляет сейсмическую трассу; ось времени перпендикулярна плоскости бумаги. На рис.1-43 идентифицируются следующие типы выборок:

1. Выборка ОПВ (запись ПВ, полевая запись)
2. Выборка ОТП
3. Выборка ОСТ (выборка ОСТ, выборка ОГТ)
4. Разрез с общим выносом (разрез с постоянным выносом)
5. Разрез суммированный по ОСТ (разрез с нулевым выносом)

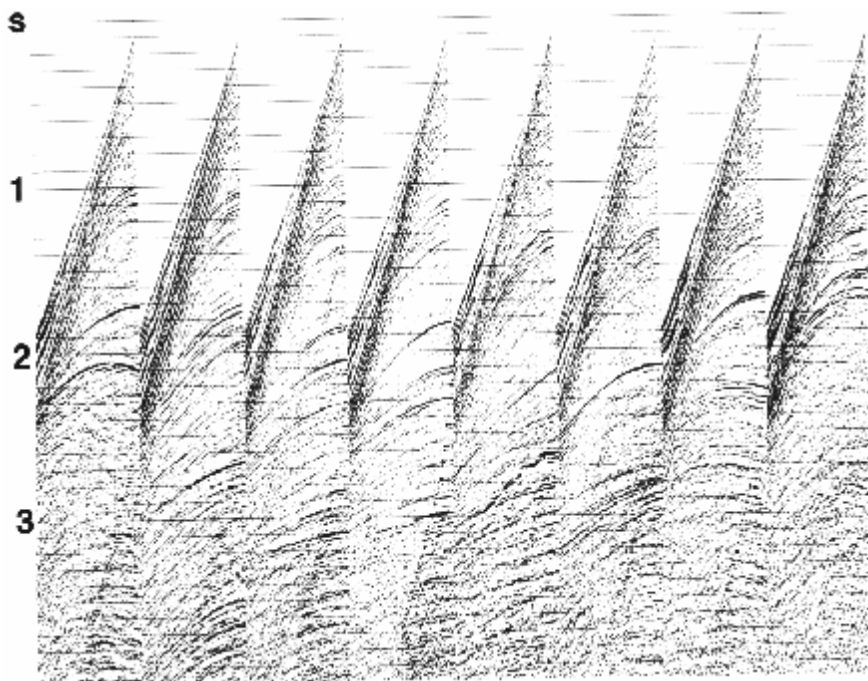


Рис.1-39 Выборки ОПВ на рис.1-38 после уравнивания трасс. Уравнивание представляет собой независимое от времени представление амплитуд к общему среднеквадратическому уровню для всех трасс.

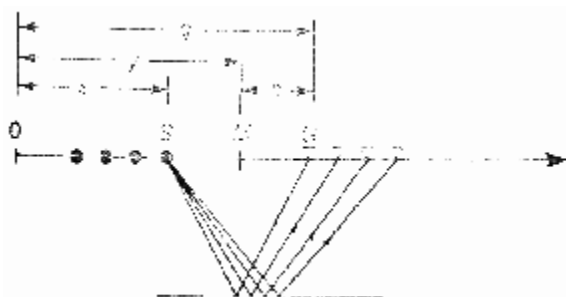


Рис.1-40 Сбор сейсмических данных происходит в координатах “взрыв - прием” (s, g). Показанные лучи ассоциированы с плоской горизонтальной отражающей поверхностью и распространяются от точки взрыва S к нескольким сейсмоприемникам G . Координаты обработки “средняя точка - вынос” (y, h), определяются в единицах (s, g): $y = (g + s)/2$; $h = (g - s)/2$. Здесь ось ПВ указывает в направлении, противоположном профилированию.



Рис.1-41 Обработка сейсмических данных выполняется в координатах “средняя точка - вынос” (y, h). Показанные лучи ассоциируются с одной выборкой ОСТ. Эта выборка идентична выборке ОГТ, если глубинная точка находится на горизонтальной плоской отражающей поверхности, а расположенная над ней среда является горизонтально-слоистой.

Длина регистрирующей косы равна FG , а длина профиля AD . Количество точек вдоль выборки ОСТ (разрез 3) равно кратности ОСТ. На концах профиля кратность уменьшается (участки AB и CD). Полная кратность по профилю наблюдается на средних точках участка BC . Диаграмма, показанная на рис.1-43, известна как схема суммирования и используется при задании геометрии профиля для предварительной обработ-

ки. Если имеется пропущенный ПВ или плохо закрепленный сейсмоприемник, соответствующие средние точки легко идентифицируются (см. упражнение 1.12).

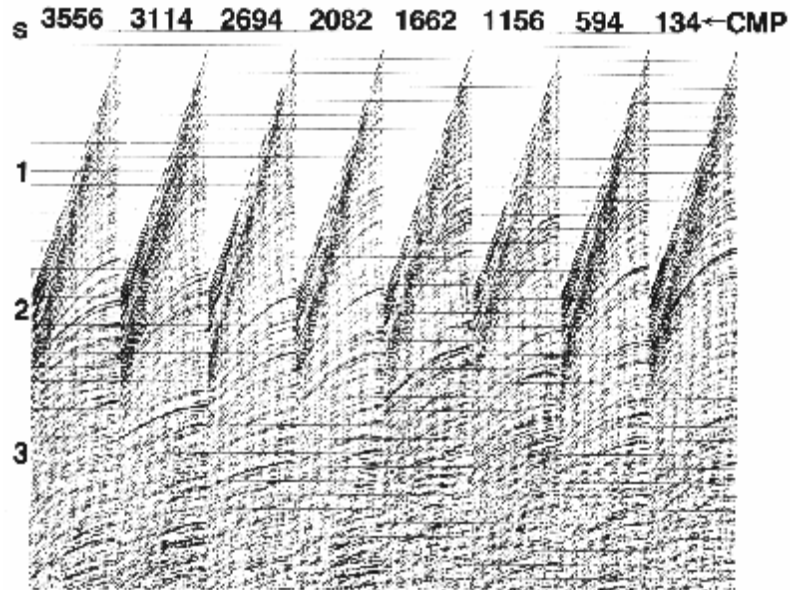


Рис. 1-42 Выборки ОГТ, соответствующие данным на рис.1-39.

Методика регистрации ОСТ, запатентованная в 50-х годах и опубликованная позднее (Maupе, 1962), использует избыточную регистрацию для улучшения отношения сигнал/помеха. Чтобы получить избыточность, используются несколько источников на трассу n_s , несколько сейсмоприемников на трассу n_g и многократное отслеживание одной и той же точки n_f при различных выносах. При данном общем количестве элементов регистрирующей системы, $N = n_s \cdot n_g \cdot n_f$ отношение амплитуды сигнала к среднеквадратической помехе теоретически улучшается на величину \sqrt{N} . В основе этого коэффициента находится допущение, что отраженный сигнал на трассах выборки ОСТ идентичен, а случайная помеха является взаимно некоррелированной от трассы к трассе (Sengbush, 1983). Поскольку эти допущения на практике строго не соблюдаются, улучшение отношения сигнал/помеха, усиленное суммированием, несколько меньше, чем \sqrt{N} . Суммирование по ОСТ также ослабляет когерентные помехи, такие как кратные волны (Maupе, 1962), каналные волны и поверхностную волну, поскольку отраженный сигнал и когерентные помехи обычно имеют различные скорости суммирования.

1.4.4 Скоростной анализ

В дополнение к улучшению отношения сигнал/помеха многократное отслеживание с регистрацией при нулевом выносе характеризует разрез сточки зрения скоростей (Глава 3). Скоростной анализ выполняется на определенных выборках ОСТ или на группах выборок. Результатом одного из типов скоростного анализа является таблица зависимости скорости от полного времени пробега при нулевом выносе (скоростной спектр). Эта зависимость представляет некоторую меру когерентности сигнала по гиперболической траектории, которая определяется скоростью, выносом и временем пробега. На рис.1-44 показаны скоростные спектры в положениях ОСТ, указанных на рис.1-42. Пары “скорость - время” выбираются из этих спектров, исходя из максимальной когерентности. Затем выполняется пространственная информация этих функций

между точками анализа по всему профилю (см. рис.1-45), чтобы обеспечить скоростную функцию для каждой выборки ОСТ по профилю.

На участках со сложным строением скоростные спектры часто не обеспечивают достаточной точности селекции по скорости. В этом случае данные суммируются с диапазоном постоянных скоростей и при пикинге скоростей используются эти суммы (Раздел 3.3).

1.4.5 Поправки за нормальное приращение и суммирование

Поле скоростей (рис.1-45) используется для определения поправок за нормальное приращение (NMO) выборок ОСТ (Раздел 3.2). На рис.1-46 показаны выборки ОСТ, представленные на рис.1-42 после ввода поправок за приращение. Вступления сглажены в диапазоне выносов, т.е. из времен пробега исключено влияние выноса. Однако, в результате применения таких поправок трассы растягиваются в зависимости от времени, что обуславливает смещение частотного состава в низкочастотную часть спектра. Частотное искажение возрастает на малых временах и больших выносах. Чтобы предотвратить ухудшение вступлений на особенно малых глубинах, зона искажений удаляется (обнуляется) перед суммированием (рис.1-47). Сумма ОСТ получается при сложении по выносу. Сумма представляет собой переднюю грань призмы данных, показанной на рис.1-34.

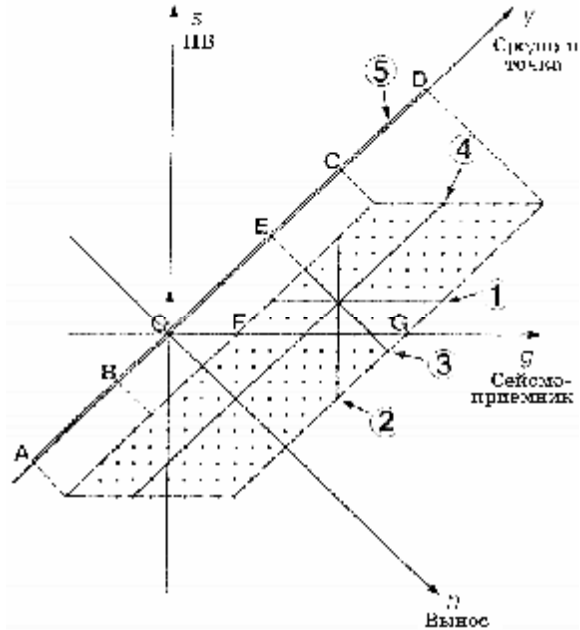


Рис.1-43 Схема суммирования (модификация по Clearbout, 1976). Каждая точка представляет одну трассу с осью времени, перпендикулярной плоскости рисунка. Координаты “взрыв - сейсмоприемник” (s, g) и “средняя точка - вынос” (y, h) наложены друг на друга, причем плоскость (y, h) повернута на 45° относительно плоскости (s, g). Здесь (1) – выборка ОПВ, (2) – выборка ОТП, (3) – выборка ОСТ, (4) – разрез с общим выносом, (5) – разрез, суммированный по ОСТ. Остальные обозначения см. в тексте.

1.4.6 Коррекция остаточной статики

Для большинства наземных и некоторых данных, полученных на мелководных участках, перед суммированием требуется выполнить дополнительный шаг. В выборках, исправленных за нормальное приращение на рис.1-49а обратите внимание, что сигналы не такие гладкие, как в других выборках. Приращение в выборках ОСТ не всегда следует совершенной гиперболической траектории. Часто это можно отнести за счет неоднородностей скоростей вблизи поверхности, которые обуславливают проблему –статического или динамического искажения. Изменения скоростей в латеральном направлении вследствие сложного строения перекрывающихся отражений могут привести к тому, что приращение будет отрицательным, т.е. отражение на данных трассах вступает раньше, чем на ближних. Подробное исследование скоростных спектров показывает, что в некоторых из них селекция выполняется проще (рис.1-50а), чем в других (рис.1-51а). Скоростной спектр, который соответствует ОСТ 297 характеризуется резко

выраженными пиками когерентности, ассоциированными с хорошо различимыми трендами скорости. Скоростной спектр, который соответствует ОСТ 188, осложнен помехами и его сложно интерпретировать.

Чтобы улучшить качество суммирования, на выборках ОСТ, исправленных за нормальное приращение, выполняется коррекция остаточной статики (Раздел 3.4). Это делается с учетом изменения поверхностных условий, т.е. смещения во времени зависят только от положений ПВ и сейсмоприемников, а не от лучей, которые соединяют их. Коррекция остаточной статики применяется к первоначальным выборкам ОСТ, не исправленным за нормальное приращение. Скоростной анализ часто выполняется повторно с целью улучшенной селекции скоростей (рис.1-50b и 1-51b). При этом улучшенном скоростном поле в выборки ОСТ вводятся поправки за нормальное приращение (рис.1-49b). Наконец, выборки суммируются, как показано на рис.1-52b. Для сравнения на рис. 1-52a показана сумма без коррекции остаточной статики. Непрерывность отражения между средними точками 53 и 245 улучшена.

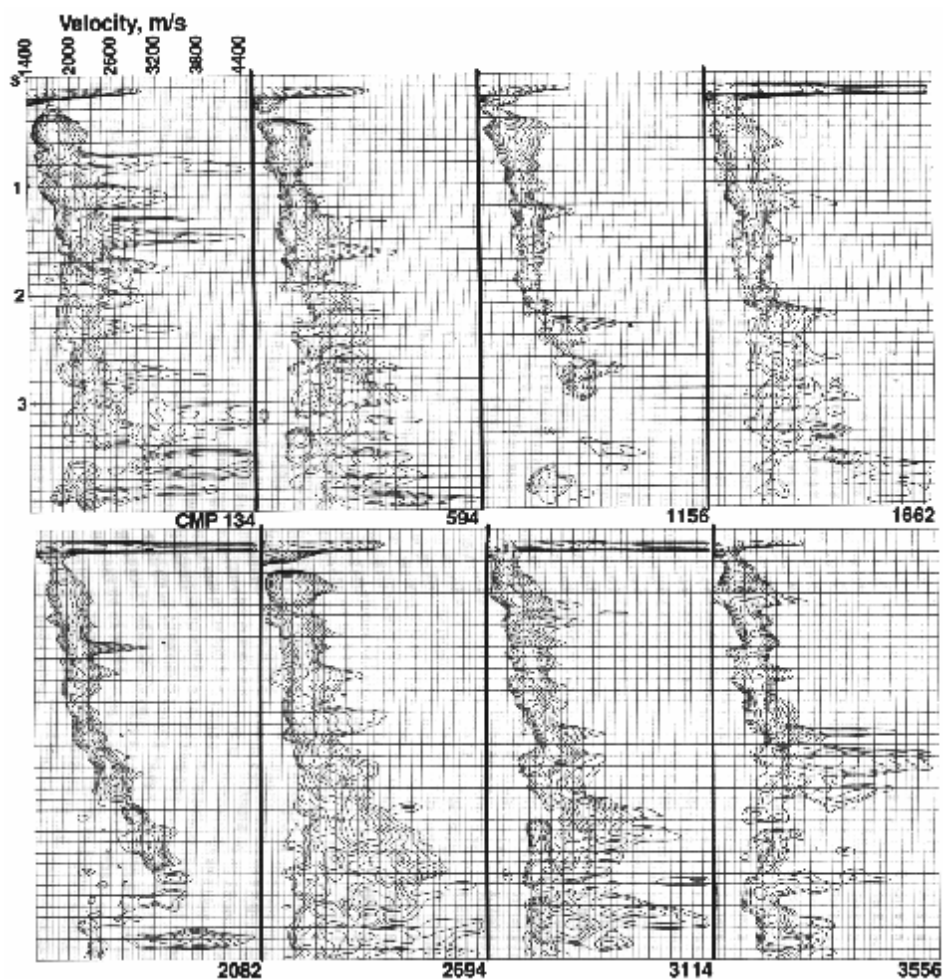


Рис.1-44 Спектры скоростей, выведенные по выборкам ОСТ на рис.1-42. Обратите внимание на тренд, общий для всех скоростных функций и на возрастающую потерю разрешающей способности на поздних временах.

1.4.7 Обработка после суммирования

Прогнозируемая деконволюция (Разделы 2.6 и 2.7) иногда эффективно подавляет реверберационные волны или короткопериодные кратные волны и далее отбеливает спектр. Изменяющаяся во времени полосовая фильтрация (Раздел 1.2.4) применяется для подавления частотных полос, осложненных помехами. Некоторые типы усиления (Раздел 1.5) применяются для подчеркивания слабых отражений (сравните рис. 1-48 и 1-53). Для сохранения истинных амплитуд вместо изменяющегося во времени масштабирования амплитуд суммы применяется функция выравнивания относительных амплитуд, постоянная от трассы к трассе (Раздел 1.5). Это медленно изменяющаяся во времени функция усиления, которая усиливает слабые отражения на поздних временах, не нарушая соотношения амплитуд при переходе от трассы к трассе, которые могут быть обусловлены отражательной способностью разреза.

1.4.8 Миграция

Миграция суммированного разреза с применением средней скорости смещает отражения от наклонных границ в истинные положения и разрушает дифрагированные волны (рис.1-54). Общепринятая последовательность обработки представлена на рис.1-55. Каждый из описанных выше процессов подробно рассматривается в последующих главах.

1.5 Применение

Усиление представляет собой изменяющееся во времени масштабирование; функция масштабирования основана на определенном критерии. Часто усиление применяется к сейсмическим данным для отображения. Другое назначение усиления – коррекция сферического расхождения. Полевой рекорд представляет волновое поле, сформированное одним взрывом.

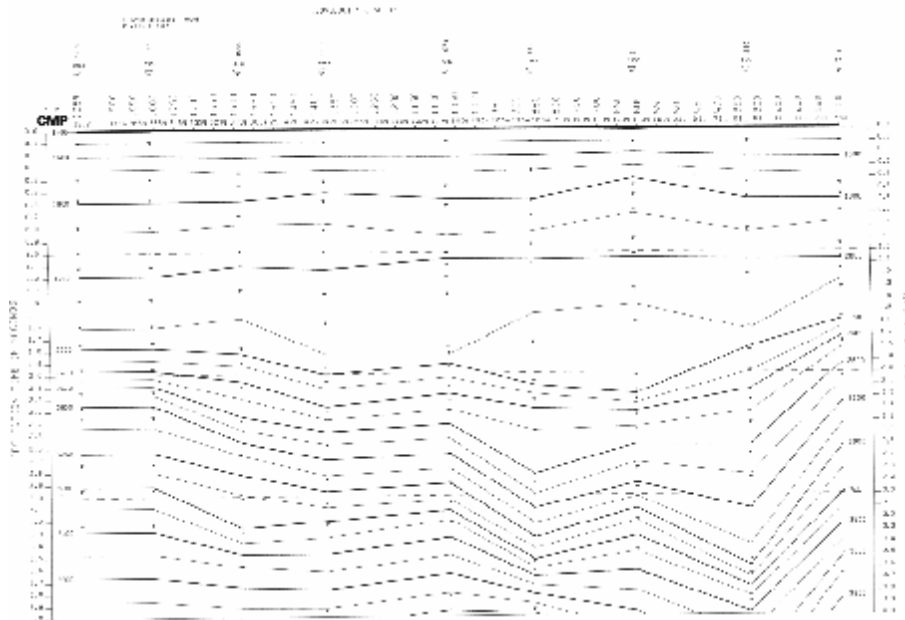


Рис.1-45

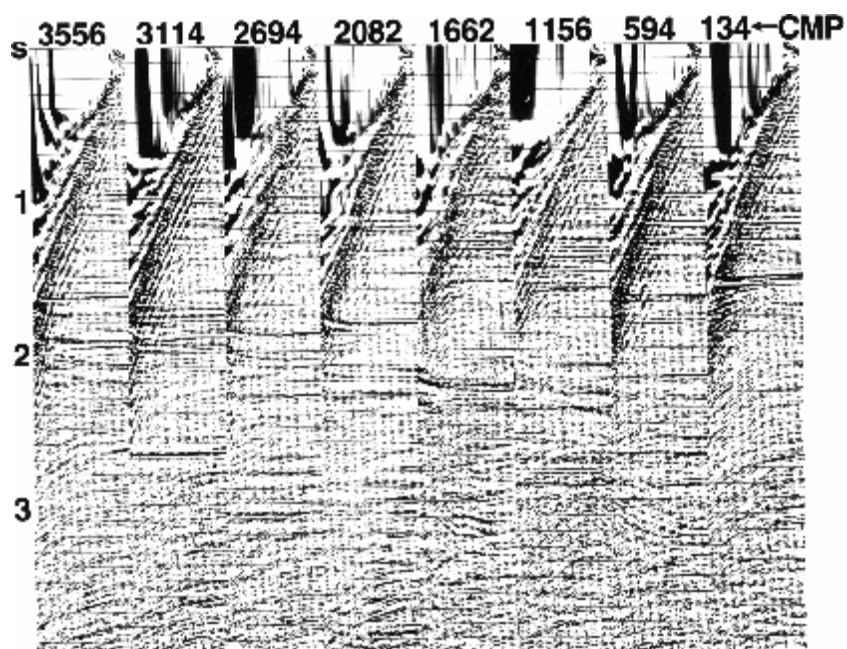


Рис.1-46

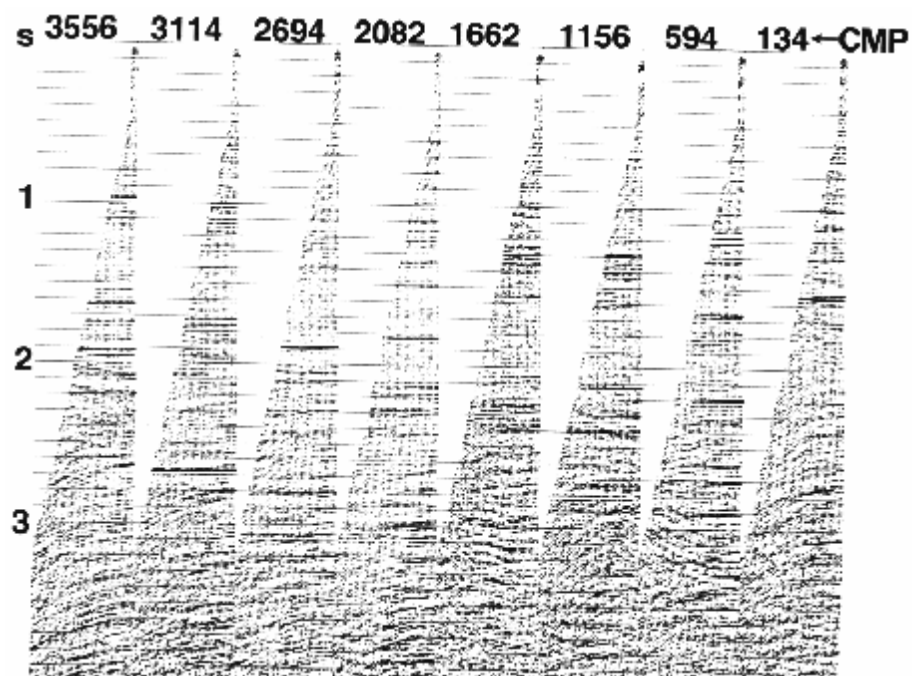


Рис.1-47 Выборки ОСТ на рис.1-46 после обнуления рассеянных зон, которое устраняет ухудшающее действие растянутого сигнала (очень низкие частоты) на качество суммирования.

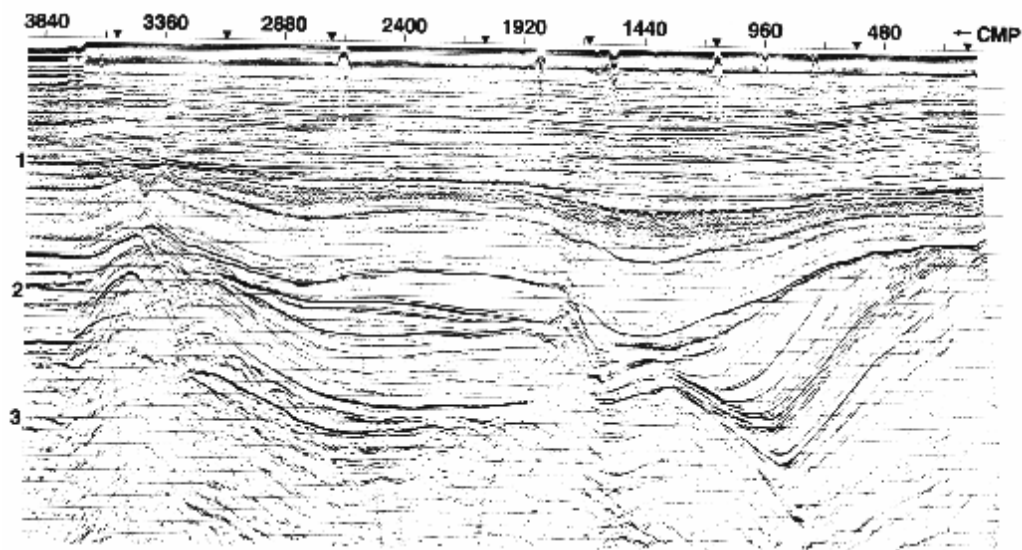
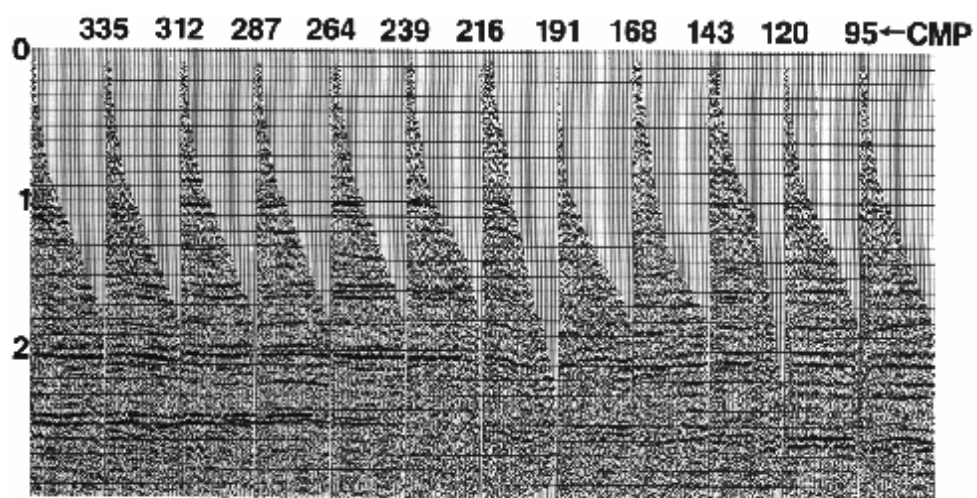
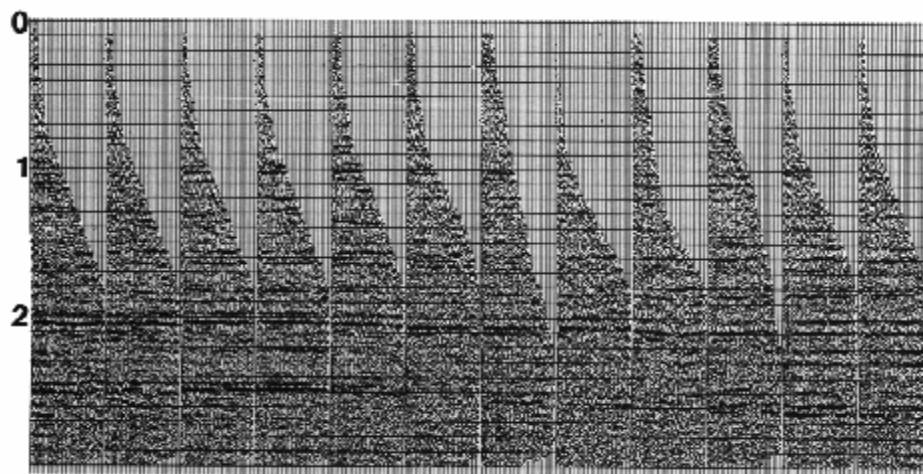


Рис.1-48 Сумма ОСТ, ассоциированная с выборками на рис.1-47. Треугольники указывают точки скоростного анализа на рис.1-44.



(a)



(b)

Рис.1-49 Выборки ОСТ, исправленные за нормальное приращен по наземному профилю (а) до и (b) после коррекции остаточной статик. Искаженные сигналы (ОСТ 191, 216) почти сгладились (b).

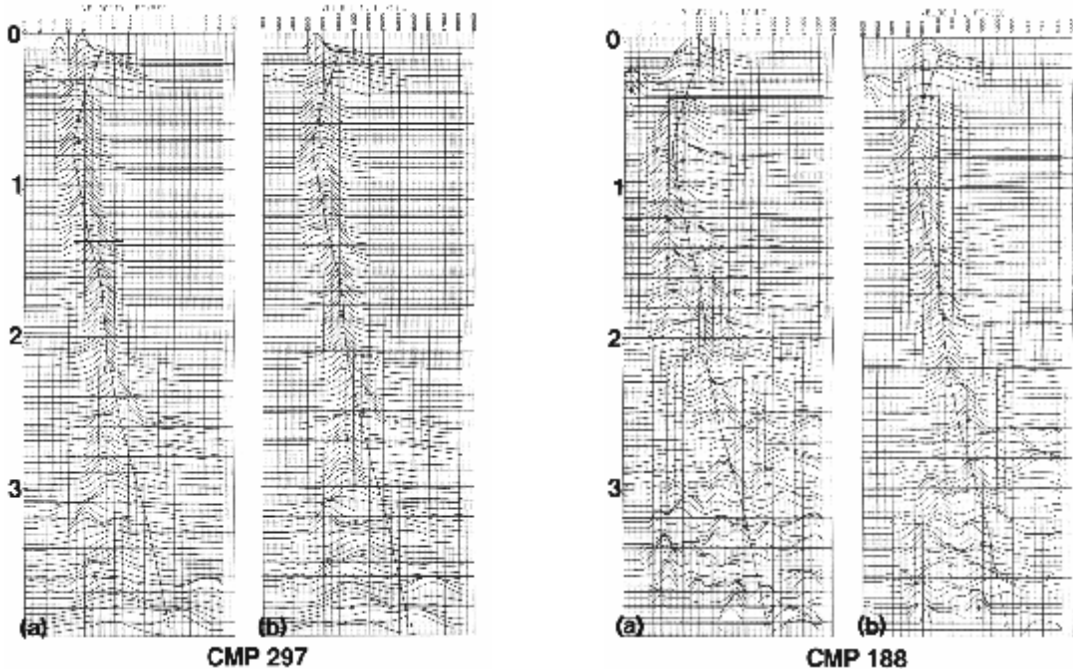
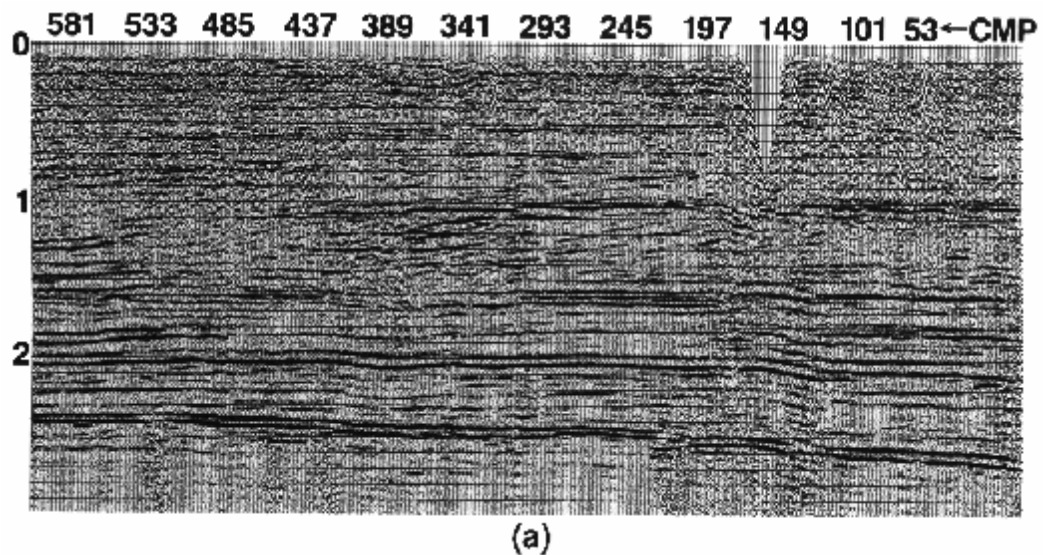


Рис.1-50 Скоростные спектры, выведенные по тем же данным, что и на рис.1-49, (а) до и (b) после коррекции остаточной статик. Между спектрами, выведенными из ОСТ 297 до и после коррекции особого различия нет. Времена отражения в этой выборке не имели существенных сдвигов, вызванных остаточной статикой.

Рис.1-51 Скоростные спектры, выведенные по тем же данным, что на рис.1-49, (а) до и (b) после коррекции остаточной статик. После коррекции произошло улучшение до времени 2.6с.



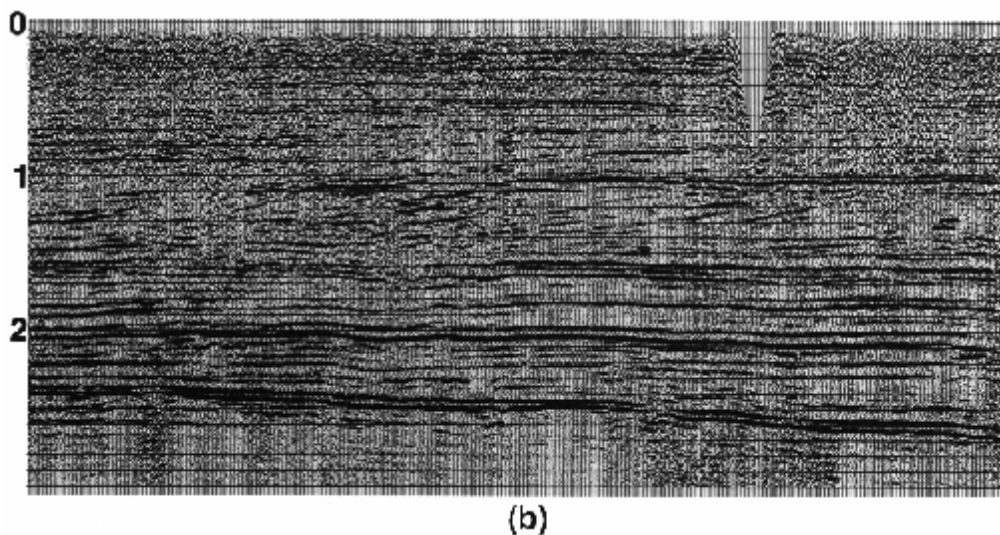


Рис.1-52 Суммы ОСТ, полученные по выборкам на рис.1-49. На сумме (а) без коррекции остаточной статики можно видеть ложную структуру и недостаточную когерентность в окрестности ОСТ 149 – 197. То и другое отсутствует на разрезе (b) после коррекции остаточной статики.

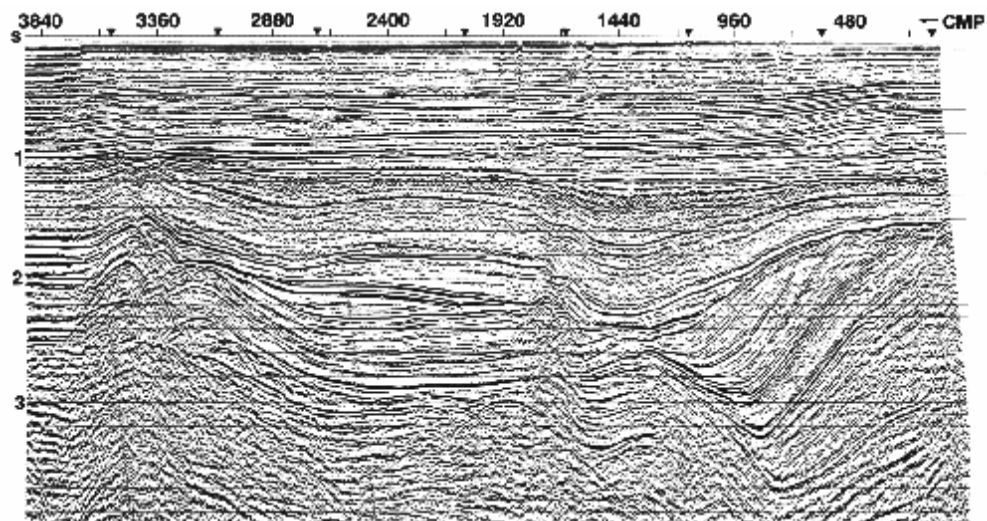


Рис.1-53 Сумма ОСТ, ассоциированная с выборками на рис.1-47. Это та же сумма, что на рис.1-48 с применением изменяющегося во времени фильтра (TVF) с последующим применением среднеквадратичного усиления.

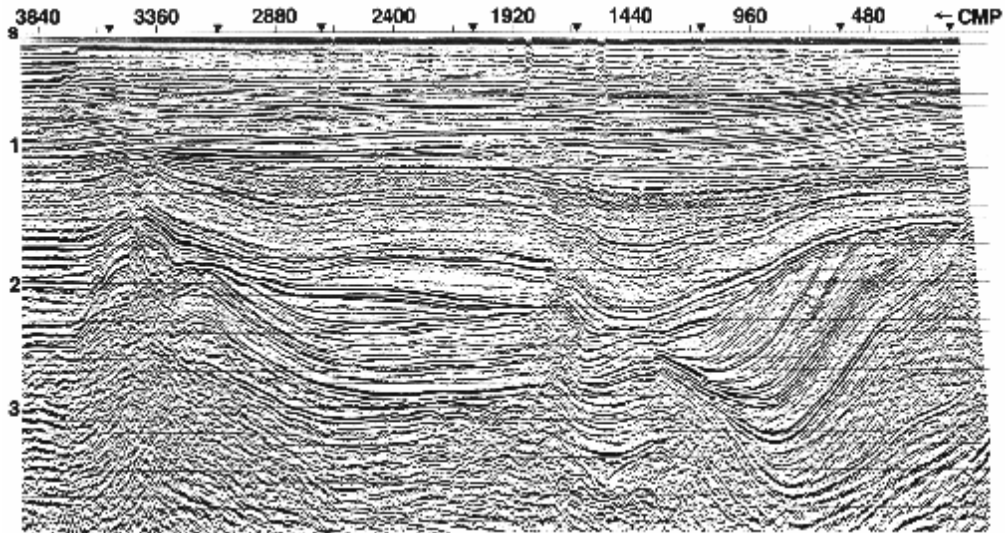


Рис.1-54 Мигрированная сумма ОСТ. Мигрированию подвергается фильтрованный суммированный разрез. К разрезу миграции применено усиление, как на рис.1-53.

Умозрительно, отдельный взрыв рассматривается как точечный источник, формирующий сферическое волновое поле. Разрез оказывает два воздействия на распространяющееся волновое поле. В однородной среде плотность энергии уменьшается пропорционально $1/r^2$, где r – радиус волнового фронта. Амплитуда волны пропорциональна квадратному корню плотности энергии; она затухает как $1/r$. На практике скорость обычно возрастает с глубиной, что приводит к дальнейшему расхождению волнового фронта и более быстрому уменьшению амплитуд с расстоянием. Во-вторых, частотный состав первоначального сигнала источника изменяется в зависимости от времени по мере распространения. В частности, высокие частоты поглощаются быстрее, чем низкие частоты вследствие внутреннего затухания в породах. Механизмы ослабления являются предметом обширных исследований. Один из вероятных механизмов ослабления связан с поровыми

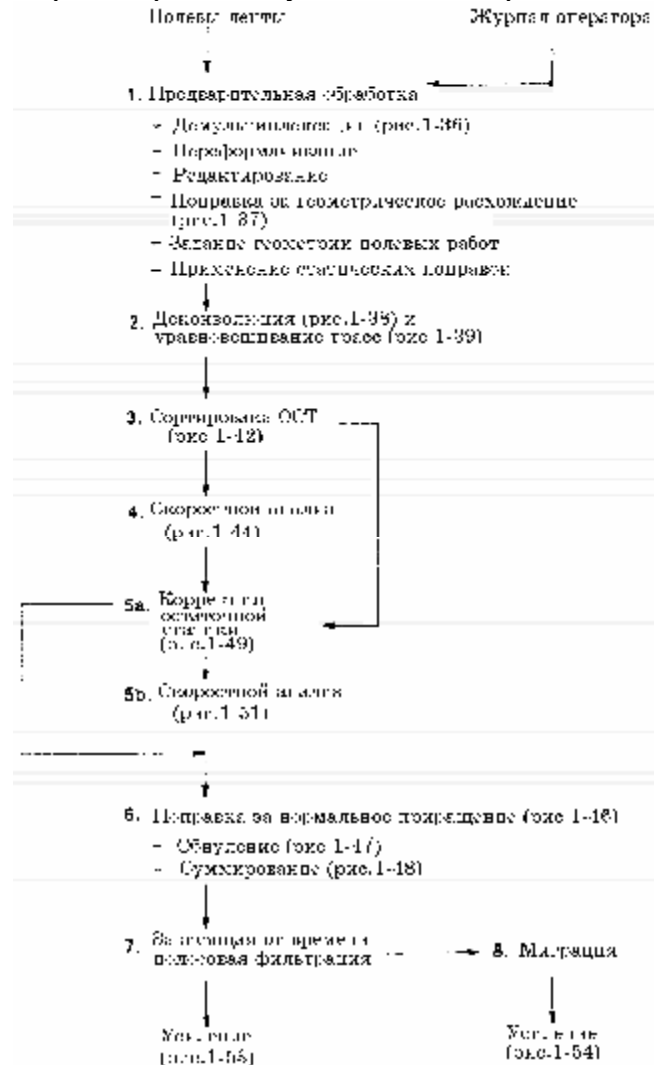


Рис.1-55 Блок-схема общепринятой обработки.

флюидами. По мере прохождения волнового фронта через породы происходит возмущение флюидов, заполняющих поры, причем в породах, насыщенных частично, воз-

мушение сильнее, чем в полностью насыщенных породах. Поровые флюиды расходуют часть энергии распространяющегося волнового поля, что обуславливает зависящее от частоты затухание.

На рис.1-56 обратите внимание на расхождение волнового фронта и поглощение частот на полевой записи. Первое изображение представляет полевые данные без применения какой-либо функции восстановления усиления. На поздних временах происходит постепенное затухание амплитуды. Этот рекорд был пропущен через последовательность полосовых фильтров с шириной полосы пропускания 10Гц. Сигнал на изображении, соответствующем полосе 10-20Гц существует до времени почти 6с. На изображении, соответствующем 20-30Гц сигнал является видимым только до 4с. Просматривая следующие изображения, которые соответствуют более высоким частотам, можно видеть ограничение сигнала на меньших временах. Применим поправку за геометрическое расхождение к первоначальному полевому рекорду (крайнее левое изображение на рис.1-56). Результат показан на крайнем левом изображении на рис.1-57. Уровень амплитуды восстановлен на поздних временах. На этом рисунке показаны изображения, соответствующие различным фильтрам. Если сравнить изображения на рис.1-56 и 1-57, можно видеть, что поправка за геометрическое расхождение восстановила некоторые сигналы на поздних временах. Однако, эта поправка не восстановила амплитуды высоких частот в такой же мере, как низкие частоты, поскольку высокие частоты были подвержены более интенсивному затуханию. Сейчас нужно устранить эффект затухания, модифицируя амплитудный спектр сигнала (т.е. расширяя его). Это позволяет сделать деконволюция. Другой способ устранения эффекта затухания – изменяющееся во времени спектральное отбеливание. Оба процесса рассмотрены в Главе 2.

Как указывалось выше, амплитуды волн затухают по закону $1/r$, где r – радиус сферического волнового фронта. Это действительно для однородной среды без ослабления. Для слоистого разреза затухание амплитуд может быть приблизительно описано как $1/[v^2(t) \times t]$ (Newman, 1973). Здесь t – полное время пробега, а $v(t)$ – среднеквадратическая скорость (Раздел 3.2) первичных отражений (т.е. однократных отражений), осредненная по площади съемки. Следовательно, функция усиления для компенсации геометрического расхождения определяется как $g(t) = [v(t)/v(0)]^2 [t/t(0)]$, где $v(0)$ – величина скорости при определенном времени $t(0)$. Можно также использовать более строгое зависящее от выноса и времени описание функции поправки за геометрическое расхождение.

Ослабление уровня сигнала можно видеть в полевых рекордах на рис.1-58. Обратите внимание на слабо выраженные отражения, в частности ниже 1с. Это не означает, что ниже этого времени отсутствуют интенсивные отражения. Поскольку ослабление амплитуд является следствием расхождения волнового фронта, на поздних временах сигнал не виден. Как утверждалось выше, следует устранить этот эффект с целью восстановления любого сигнала, который может присутствовать на поздних временах рекорда.

Эти же рекорды после поправки за геометрическое расхождение показаны на рис.1-59. Отражения стали более интенсивными, но составляющие помех в данных также усилились. Это один из нежелательных аспектов усиления любого типа. Как показано на рис.1-60, помимо внешних помех могут усиливаться когерентные помехи в данных. При использовании первичной функции скорости в процессе вводе поправки за геометрическое расхождение произошла перекоррекция амплитуд дисперсионных когерентных помех и кратных волн. Другой пример перекоррекции кратных волн показан на рис.1-57. Сравните левые изображения на рис.1-56 и 1-57.

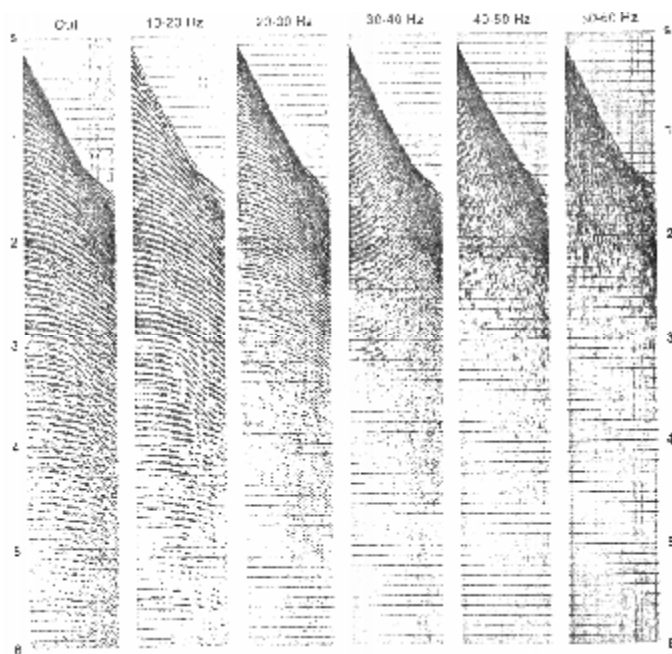


Рис.1-56 Необработанный полевой рекорд без поправки за геометрическое расхождение (левое изображение) и его версии после полосовой фильтрации. По мере увеличения полос пропускания происходит ограничение амплитуд отраженных волн меньшими временами.

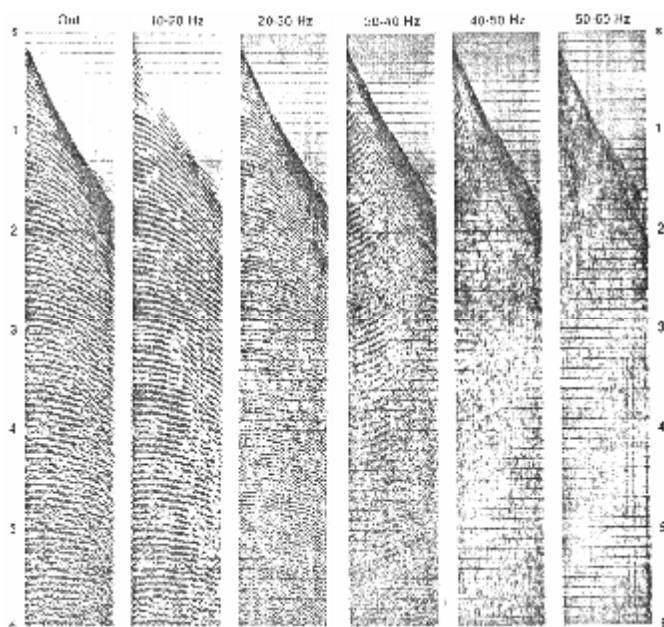


Рис.1-57 Тот же полевой рекорд, что на рис.1-56 (левое изображение) после поправки за геометрическое расхождение. Амплитуды восстановлены, но поглощение частот остается.

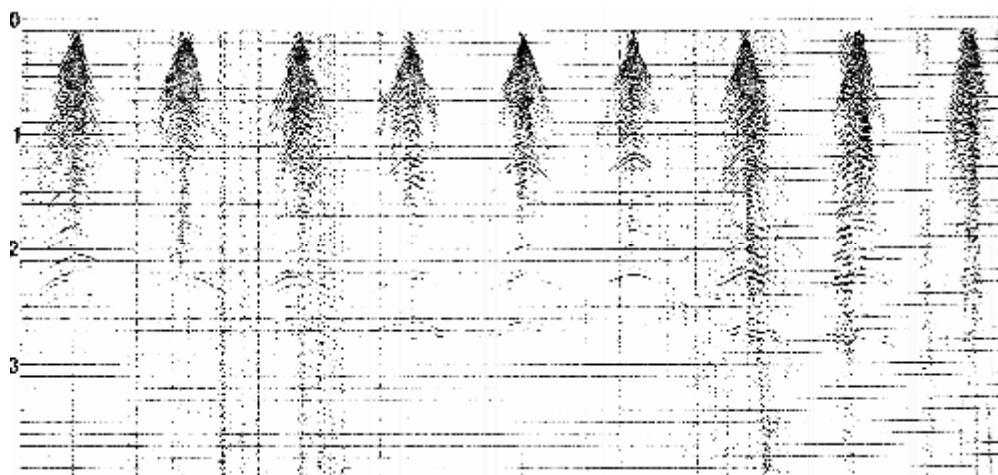


Рис.1-58 Необработанные полевые рекорды наземной съемки. Обратите внимание на быстрое затухание амплитуд на поздних временах.

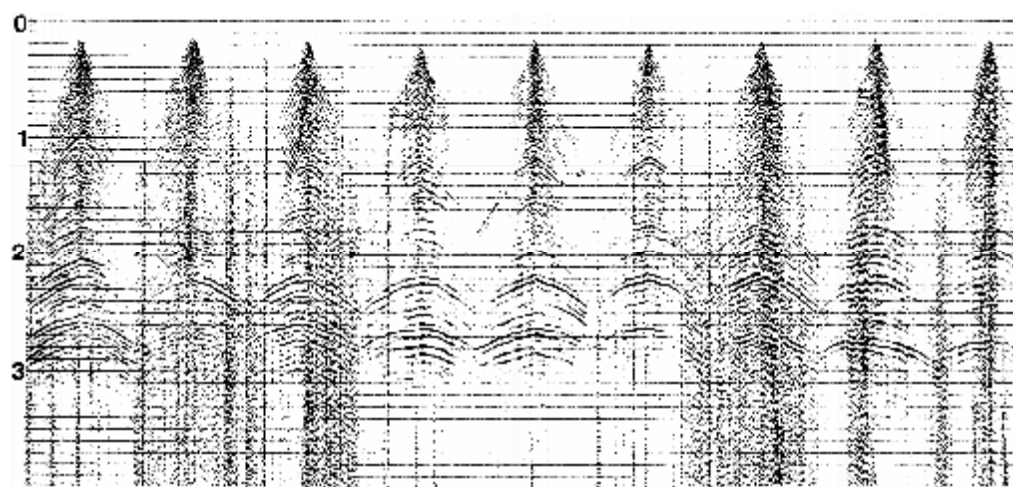


Рис.1-59 Те же полевые рекорды, что на рис.1-58 после поправки за геометрическое расхождение. На поздних временах амплитуды восстановлены, но внешние помехи также усилились.

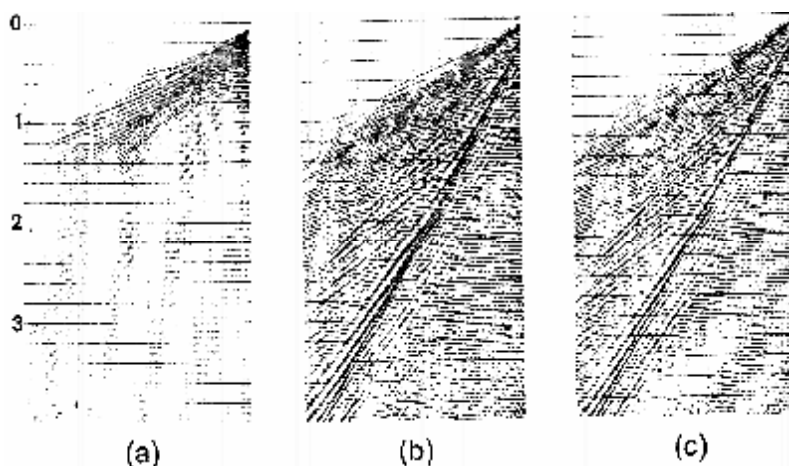


Рис.1-60 (а) Необработанный полевой рекорд морской съемки. До поправки за геометрическое расхождение преобладают преломленные и каналные волны (б) После

поправки за геометрическое расхождение восстановились амплитуды отраженных волн, но кратные волны и когерентные помехи также усилились. (с) Уравновешивание трасс может до некоторой степени снизить уровень этой нежелательной энергии.

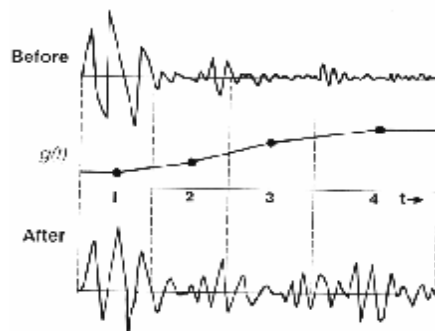


Рис.1-61 Усиление представляет собой изменяющееся во времени масштабирование основанное на функции $g(t)$. Исходя из некоторых критериев, эта функция определяется на временных выборках, обозначенных кружками, которые обычно находятся в центре определенных временных окон вдоль трассы (1, 2, 3, 4). При усилении происходит умножение $g(t)$ на амплитуды входной трассы.

На практике используются типы критериев усиления. Исходя из определенного критерия, функция усиления $g(t)$ выводится из данных; происходит умножение этой функции на амплитуды трассы на каждой временной выборке. Это показано на рис. 1-61. Функция усиления определяется или оценивается на временных выборках, обозначенных точками и интерполируются между этими выборками. В следующих параграфах рассмотрены три общих типа усиления.

1.5.1 Программная регулировка усиления.

Программная регулировка усиления (ПРУ) представляет собой простейший тип усиления. Обратимся к части суммированного разреза на рис.1-62; функцию усиления можно определить путем интерполирования между некоторыми скалярными величинами, которые определены на некоторых временных выборках. На поздних временах следует присвоить большие величины. На изображениях 1-4 на рис.1-62 примененная ПРУ, определяется числами в кружках на соответствующих временах. При перемещении от изображения 1 к изображению 4 происходит усиление амплитуд. Вместо того, чтобы выбирать скалярные величины качественным способом, можно рассчитывать и сгладить сгибающую не усиленной трассы. Огибающая, которая представляет собой кривую, построенную путем соединения соседних пиков (или впадин) вдоль трассы, представляет собой достоверный признак, характеризующий скорость затухания амплитуд. Функция ПРУ представляет собой обратную величину огибающей трассы. Одна функция ПРУ применяется ко всем трассам выборки или суммированного разреза с целью сохранения изменения относительных амплитуд в латеральном направлении.

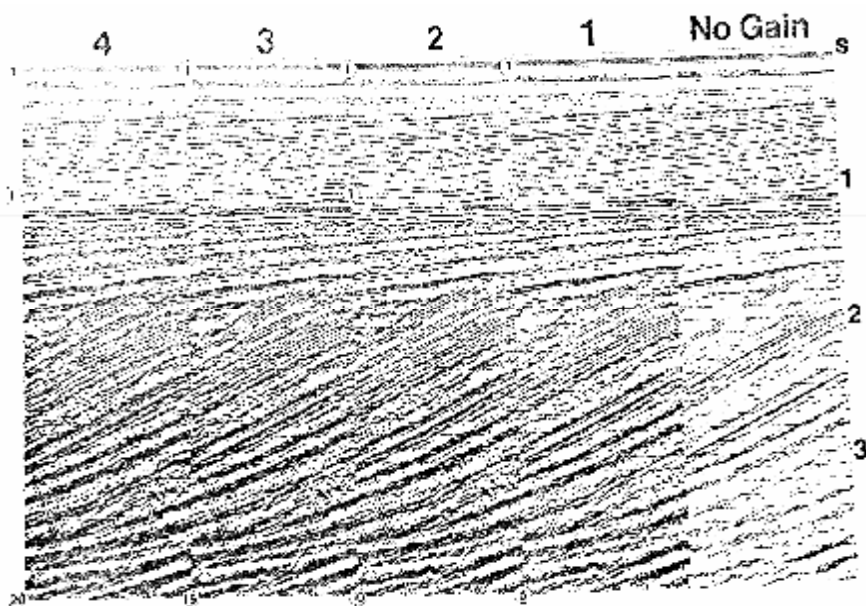


Рис.1-62 Часть суммы ОСТ до и после применения четырех различных функций ПРУ. Масштабные коэффициенты, использованные при построении функций усиления, обозначены числами в кружках на временах применения.

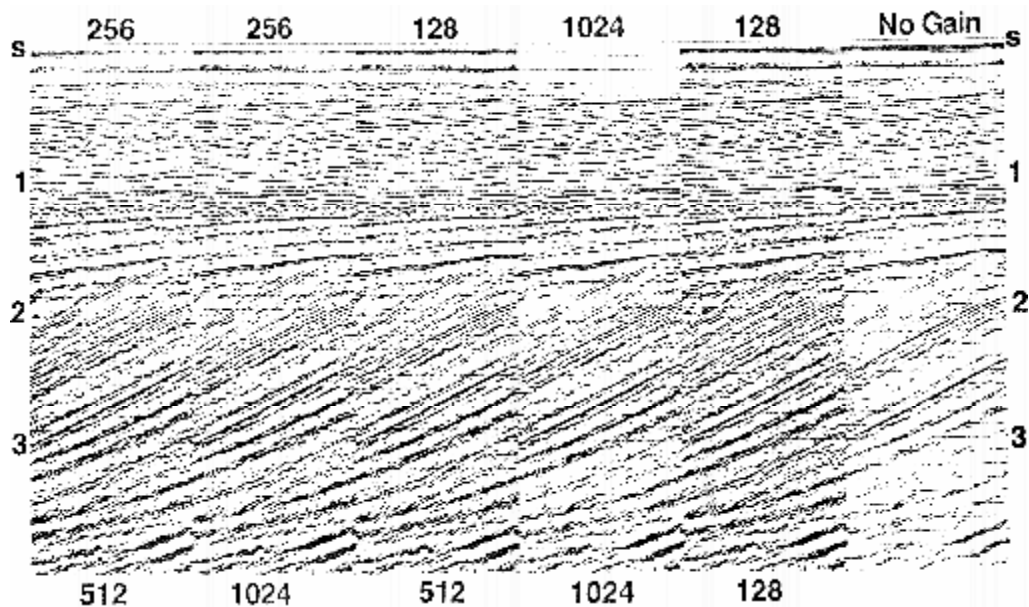


Рис.1-63 Часть суммы ОСТ до и после применения пяти различных среднеквадратичных функций АРУ. Числа сверху и внизу указывают размеры окон (в мс), начального и конечного усиления.

1.5.2 АРУ среднеквадратичных амплитуд

Функция АРУ среднеквадратичной амплитуды основывается на среднеквадратичной амплитуде в пределах временного окна на входной трассе. Эта функция усиления рассчитывается следующим образом. Входная трасса подразделяется на шесть временных окон. Сначала рассчитывается амплитуда каждой выборки в окне. Затем рассчитывается среднее этих значений и берется квадратный корень этого среднего. Это и

есть среднеквадратичная амплитуда в этом окне. Обычно мы начинаем с определенной длины окна, например, 256мс в верхней части трассы. Длина окна может поддерживаться постоянной, или систематически увеличиваться вниз по трассе. В центре каждого окна рассчитывается значение функции усиления, как описано выше. Затем функция $g(t)$ интерполируется между центрами окон. Временные окна являются стационарными, т.е. они не перемещаются вниз по трассе.

На рис.1-63 показаны данные без усиления и последовательность разрезов после усиления среднеквадратичных амплитуд. Выше и ниже каждого изображения указаны минимальная и максимальная длины окон. Когда поддерживается малая длина окна, используемого в режимах, например, 128/128мс (т.е. минимальная длина равна максимальной длине), интенсивные отражения становятся менее различимыми.

1.5.3 Мгновенная АРУ

Мгновенное АРУ – это один из наиболее используемых типов усиления. Данная функция усиления рассчитывается следующим образом. Сначала рассчитывается средняя абсолютная величина амплитуд в определенном временном окне. Затем в качестве значения функции усиления берется отношение желательного среднеквадратичного уровня к этой средней величине. В отличие от АРУ среднеквадратичных амплитуд эта величина присваивается любой временной выборке функции усиления во временном окне, например, n -ной выборке трассы (а не выборке в центре окна). Следующий шаг – перемещение временного окна на одну выборку вниз по трассе и расчет значения функции усиления для $(n + 1)$ временной выборки, и т.д. Следовательно, для определения этой функции усиления интерполяции не требуется.

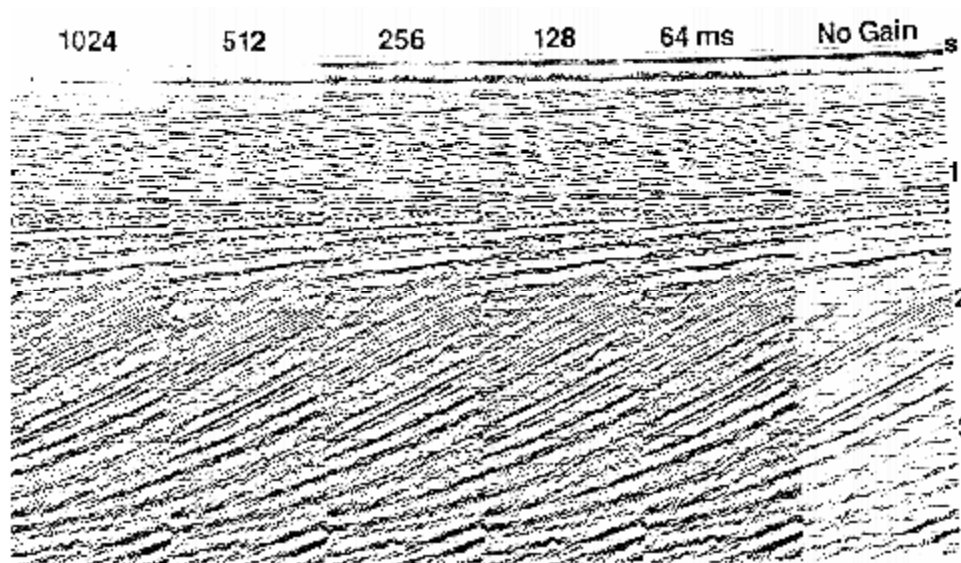


Рис.1-64

На рис.1-64 показаны данные без усиления и последовательность разрезов после применения мгновенной АРУ. Длины окон указаны под каждым изображением. Очень малые временные окна могут вызвать значительную потерю характера сигнала путем усиления зон, которые содержат малые амплитуды. Это имеет место при 64-миллисекундном окне АРУ. В обработке это называется быстродействующей АРУ (fast AGC). Если взять другой крайний случай (большое временное окно), эффективность процесса АРУ становится меньше. На практике обычно выбираются окна от 256 до 1024мс.

Все вышеперечисленные операции усиления модифицируют амплитуды трасс в зависимости от времени. В обработке истинных амплитуд необходимо отобразить данные без применения изменяющейся во времени зависящей от данных функции усиления. Однако, для отображения всегда необходимо некоторое усиление амплитуд, поскольку для плоттеров требуется, чтобы амплитуды входных данных попадали в определенный диапазон. Для этого типа масштабирования используется уравнивание (выравнивание трасс). Коэффициент равновесия определяется как отношение желательной среднеквадратичной амплитуде, рассчитанной по определенному временному окну. Отдельный коэффициент равновесия рассчитывается и

применяется к каждой трассе. В качестве альтернативы может быть рассчитан коэффициент равновесия, основанный на выбранной трассе в группе трасс, который может быть применен ко всей группе. Это называется относительным уравниванием трассы (relative trace balancing). Отметим, что уравнивание трассы равносильно масштабированию трассы одним коэффициентом, не изменяющимся во времени (эквивалентно АРУ среднеквадратичной амплитуды в одном окне). На рис.1-60 показано уравнивание среднеквадратичной трассы полевых данных, следующее после поправки за геометрическое расхождение. В общем случае уравнивание трассы применяется сразу после деконволюции (рис.1-39) и на конечных суммах, которые используют большие окна.

Итак, усиление применяется к данным по различным причинам. Поправка за геометрическое расхождение применяется с целью компенсации расхождения волнового фронта на ранних стадиях обработки перед деконволюцией. Также перед деконволюцией может быть применено экспоненциальное усиление для компенсации потерь, вызванных

затуханием. Функции усиления типа АРУ применяются к сейсмическим данным для подчеркивания слабых сигналов. Эти функции усиления изменяются во времени. Уравнивание трасс в действительности не является усилением; скорее оно выравнивает каждую трассу в группе трасс так, что они все имеют один и тот же уровень среднеквадратичной амплитуды. Усиление нужно использовать осторожнее, т.к. оно может разрушить особенности сигнала. Например, быстродействующее АРУ делает интенсивные отражения неотличимыми от слабых отражений.

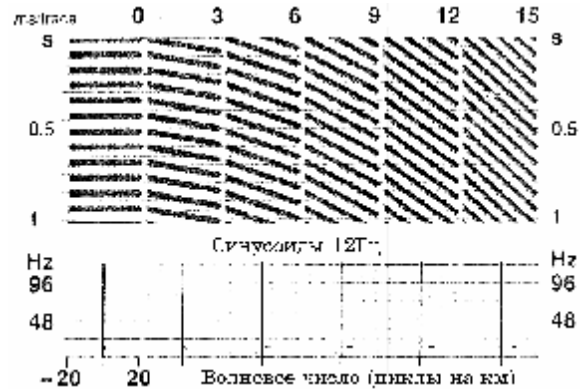


Рис.1-65 Верхний ряд: шесть выборок, каждая из которых содержит 12-герцовые одночастотные сигналы с различными наклонами от 0 до 15мс на трассу. Шаг между трассами равен 25м. Нижний ряд: соответствующие амплитудные спектры. Небольшие горизонтальные штрихи на спектрах представляют положение сигналов на выборках. Сплошные вертикальные линии – оси частот. Если положительные наклоны определяются как наклоны слева направо, все сигналы попадают в положительный квадрат плоскости “частота – волновое число” ($f-k$). Это первый в последовательности из шести рисунков, которые описывают распределение одночастотных сигналов в области ($f-k$).

1.6 Двумерное преобразование Фурье

Операции многоканальной обработки могут быть определены как операции, которые должны работать одновременно на нескольких трассах. Многоканальные процессы могут быть полезными для различения сигнала на фоне помех и улучшения сигнала на основе критерия, который может измениться от трассы к трассе (например, наклон или приращение). Двумерное преобразование Фурье представляет собой основу для анализа и реализации многоканальных процессов.

Рассмотрим шесть разрезов с нулевым выносом на рис.1-65. Расстояние между трассами равно 25м; на каждый разрез приходится 24 трассы. Все разрезы содержат монохроматические сигналы с частотой 12Гц и с наклонами, которые изменяются от 0 до 15мс на трассу. Из Раздела 1.2, где рассматривается одновременное преобразование Фурье, мы знаем, что частота – это количество циклов в единицу времени. Это двойное преобразование Фурье для функции времени. Однако, сейсмическое волновое поле – это не только функция времени, но и пространственная переменная (ось выноса или средних точек). Двойное преобразование Фурье для пространственной переменной определяется как пространственная частота, которая представляет собой количество циклов на единицу расстояния или волновое число. Так же как временная частота данной синусоиды определяется путем подсчета количества пиков в единицу времени, предположим, в 1с, волновое число наклонного сигнала определяется путем подсчета пиков в единицу расстояния, например, в 1км. в горизонтальном направлении. Так же как временная частота Найквиста определяется как $[1/(2 \cdot \text{шаг дискретизации})]$, волновое число Найквиста определяется как $[1/(2 \cdot \text{шаг между трассами})]$. Для всех разрезов на рис.1-65 – 1-70 волновое число равно 20 циклов на км, т.к. шаг между трассами равен 25м. Чтобы рассчитать волновое число, которое ассоциировано с разрезом, соответствующим наклону 15мс на трассу на рис.1-65, будем следовать пику или впадине по разрезу. Сначала рассчитаем полный временной наклон по разрезу:

$$(23 \text{ трассы на разрез}) \cdot (15\text{мс на трассу}) = 345\text{мс на разрез}$$

Затем преобразуем результат в циклы, разделив его на период:

$$(345\text{мс на разрез}) / [(1000\text{мс/разрез}) / (12 \text{ циклов/с})] = 4.14 \text{ циклов/разрез}$$

Пространственная протяженность разреза равна 575м; следовательно, волновое число, ассоциированное с этим наклоном (15мс на трассу) и с частотой 12Гц, равно:

$$(4.14 \text{ циклов/разрез}) / (0.575\text{км/разрез}) = 7.2 \text{ циклов/км}$$

Чтобы продолжить это обсуждение, перенесем разрез на плоскость зависимости временной частоты от пространственного волнового числа и посмотрим на два квадранта этой плоскости. Воспользуемся следующим положением: сигналам, падающим влево, присваивается положительный наклон, а сигналам, восстающим вправо, присваивается отрицательный наклон. Положительные наклоны попадают в правый квадрант, который соответствует положительным волновым числам, а отрицательные наклоны попадают в левый квадрант, который соответствует отрицательным волновым числам.

Плоскость частот и волновых чисел (плоскость $f-k$) показана под каждым разрезом на рис.1-65. Разрез с горизонтальными сигналами попадает в одну точку на оси частот при 12Гц. Нулевой наклон эквивалентен нулевому волновому числу. Величина всплеска соответствует амплитуде пика синусоид, которые образуют

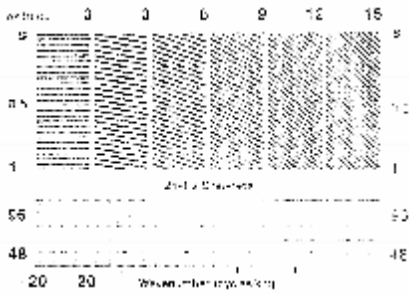


Рис.1-66 То же самое, что на рис.1-65, но используются 24-герцовые одночастотные сигналы.

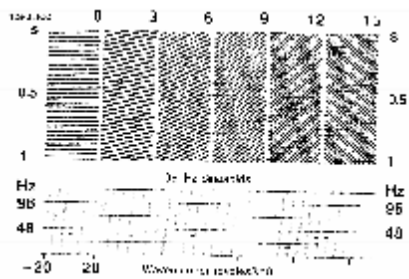


Рис.1-67 То же самое, что на рис.1-65, но используются 36-герцовые одночастотные сигналы.

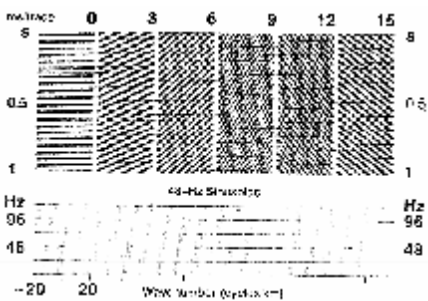


Рис.1-68 То же самое, что на рис.1-65, но используются 48-герцовые одночастотные сигналы.

ваются более высоким волновым числом, как видно на графиках $f-k$.

На рис.1-65 – 1-70 рассмотрим один и тот же наклон, но при разных частотах. Разместим каждый отдельный разрез на плоскости $f-k$. Ничего необычного не происходит, пока не дойдем до разреза с наклоном 15мс на трассу при 36Гц (рис.1-67). Здесь нет положительного наклона. В целом разрез выглядит как шахматная доска и поэтому сложно определить, является наклон положительным или отрицательным.

трассы в разрезе. Следовательно, плоскость $f-k$ в действительности представляет двумерный амплитудный спектр разреза (t, x) . Эти данные преобразованы из пространственно-временной области в область частот и волновых чисел. Математически этот процесс описывается двумерным преобразованием Фурье.

Между четырьмя переменными: пространство – время (t, x) и их двойным преобразованием Фурье (f, k) имеется взаимосвязь. Измерим обратную величину смещения во времени на разрезе 15 мс/трассу (рис.1-65), следуя пику, впадине или переходу через 0 от трассы к трассе. Смещение во времени определяется как угловой коэффициент dt/dx . В этом случае обратная величина смещения во времени имеет вид:

$$dx/dt = 575 \text{ м}/0.345\text{с} = 1/67\text{км/с}$$

Сейчас рассчитаем отношение:

$$f/k = (12 \text{ циклов/с})/(7/2 \text{ циклов/км}) = 1.67\text{км/с}$$

Отсюда обратная величина углового коэффициента dt/dx , измеренного в пространстве (t, x) вдоль постоянной фазы, равна отношению частоты к волновому числу, ассоциированному с сигналом. Следовательно, при фиксированном смещении во времени dt/dx удваивание частоты означает удваивание волнового числа.

Все разрезы на рис.1-65 имеют один и тот же частотный состав; однако, в интервале 0-15мс на трассу количество пиков возрастает в горизонтальном направлении для каждого разреза. Для данной частоты более сильные наклоны присваи-

При частоте 48Гц (рис.1-68) направление наклона можно видеть на первых четырех раз-

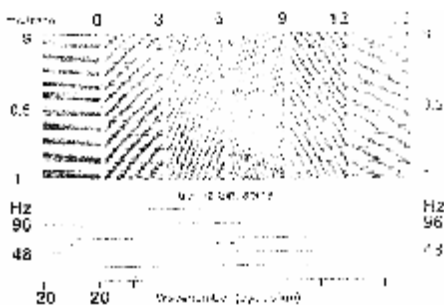


Рис.1-69 То же самое, что на рис.1-65, но используются 60-герцовые одночастотные сигналы.

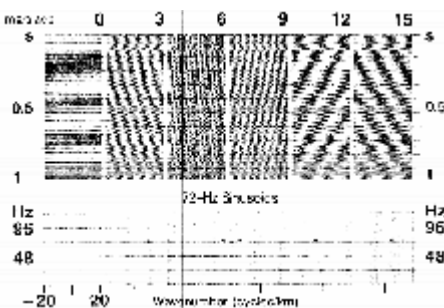


Рис.1-70 То же самое, что на рис.1-65, но используются 72-герцовые одночастотные сигналы.

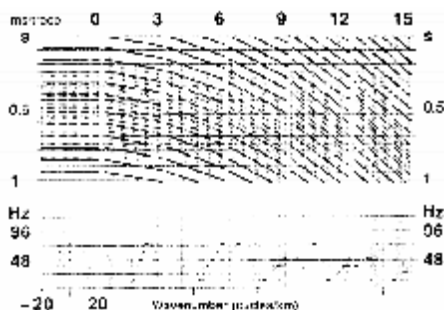


Рис.1-71 Верхний ряд: шесть выборок, каждая из которых образована путем суммирования выборок с одинаковыми наклонами на рис.1-65 – 1-70. Шаг между трассами – 25м. Нижний ряд: спектры относительных амплитуд.

Фурье, т.к. это способ наложения волнового поля на плосковолновые составляющие.

Зарегистрированное волновое поле представляет собой сочетание большого количества наклонов и частот таких как на рис.1-65 – 1-70. Предположим, что мы выполнили наложение разрезов с одним и тем же наклоном, но с разными частотами. Составные разрезы вместе с составными амплитудами показаны вместе с соответствующими амплитудными спектрами. Для данного наклона все частотные составляющие занимают положение не плоскости $f-k$ вдоль прямой линии, проходящей через начало. Чем больше наклон, тем ближе радиальная линия в $f-k$ области к оси волновых чисел. Ком-

резах. Пятый разрез, который соответствует положительному наклону 12мс на трассу, показывает отрицательный наклон. Следовательно, он попадает на отрицательный квадрант – не на тот, который должен быть для этого разреза. Данный наклон (12мс на трассу) при частоте 48 Гц является пространственно неоднозначным. Фактически любой наклон больше 12мс на трассу при данной частоте является пространственно неоднозначным.

В следующем наборе разрезов на рис.1-69 пространственная неоднозначность имеет место при 60Гц для наклона 9мс на трассу. Пространственная неоднозначность не только обуславливает попадание не в “свой” квадрант, но и дает неправильный наклон. Одним из примеров этого является распределение наклона 15мс на трассу при 60Гц (рис.1-69). При 72Гц (рис.1-70) наклон 6мс на трассу находится на грани пространственной неоднозначности. Наклон 15мс на трассу дважды пространственно неоднозначен: он переходит в квадрант с положительным наклоном и выглядит как меньший наклон.

Этот же анализ можно использовать для отрицательных наклонов. Из рис.1-65 – 1-70 можно видеть, что каждый разрез в целом можно расположить на одной точке в области частот и волновых чисел. Каждый разрез имеет ассоциированную уникальную частоту и волновое число, присвоенные ему. Эти разрезы с нулевыми выносами можно рассматривать как представления плоских волн, которые распространяются под одним углом к вертикали и несут монохроматический сигнал. Волновой фронт определяется как линия постоянной фазы; направление распространения перпендикулярно волновому фронту. Поскольку сейсмическое волновое поле представляет собой суперпозицию большого количества наклонов и частот, оно эквивалентно синтезу нескольких плосковолновых составляющих. В этом смысле важен физический смысл двумерного преобразования

понента, представляющая собой нулевой наклон, располагается вдоль оси частот. По наклонам 9, 12 и 15 мс на трассу видно, что пространственно неоднозначные частоты расположены вдоль линейных участков, которые переходят в противоположный квадрант в амплитудном спектре. Чем больше наклон, тем меньше частота, на которой возникает пространственная неоднозначность.

Был рассмотрен дискретный ряд частот. Для непрерывной среды частотных составляющих, ассоциированных с одним наклоном, что они будут распределяться вдоль прямой линии в области $f-k$. Это показано на рис.1-72. Наклонный сигнал на рис.1-73 является пространственно неоднозначным начиная приблизительно с 12 Гц.

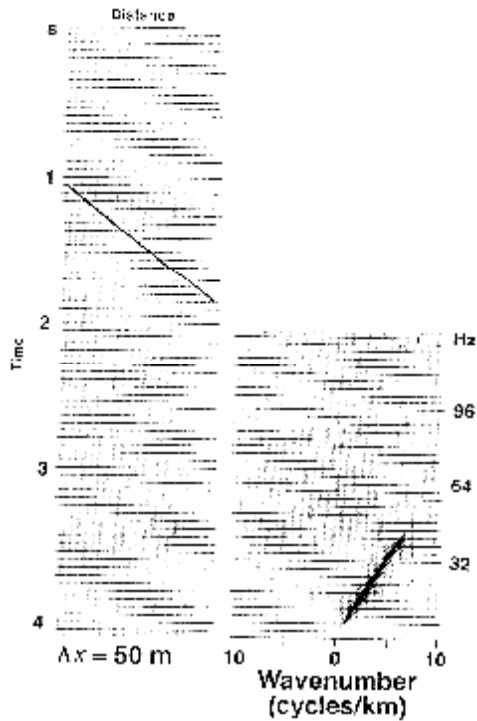


Рис.1-72 Отдельный изолированный наклонный сигнал и его двумерный амплитудный спектр. Пространственно неоднозначная частота отсутствует. Что такое наклон сигнала в мс на трассу?

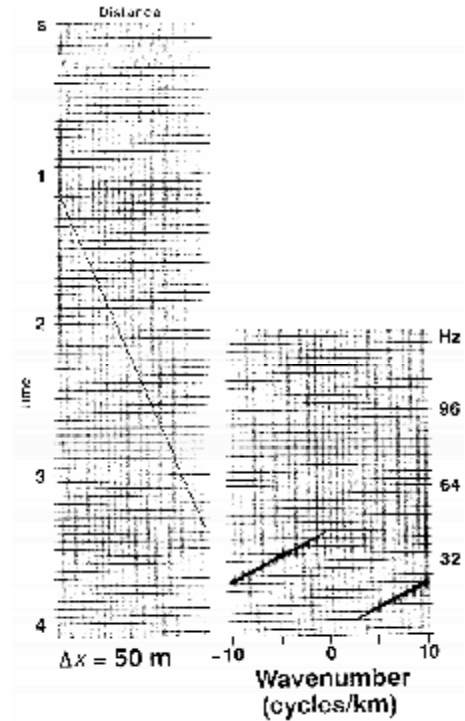


Рис.1-73 Отдельный изолированный наклонный сигнал и его двумерный амплитудный спектр. Частоты 21 Гц являются пространственно неоднозначными.

Исследование монохромных разрезов с одним наклоном на рис.1-65 – 1-70 показывает, что каждый разрез попадает в одну точку в области (f, k) . Это наблюдение продолжено на рис.1-74. Сигналы с одним и тем же наклоном в пространстве (t, x) независимо от их положения попадают на одну радиальную линию в пространстве (f, k) . Когда сигналы являются пространственно неоднозначными, радиальная линия совершает переход при волновом числе Найквиста (рис.1-75). Эти концепции имеют важное практическое значение, т.к. они ведут к пространственной $f-k$ -фильтрации (Раздел 1.6.2). Сигналы с различными наклонами, которые могут интерферировать в области (t, x) , могут быть изолированы в области (f, k) .

Числовой расчет двумерного преобразования Фурье включает два одномерных преобразования Фурье. На рис.1-76 показаны шаги преобразования. Кратная математическая формулировка двумерного преобразования Фурье приводится в Приложении А.

1.6.1 Пространственная неоднозначность

При исследовании плоскости (f, k) обсуждалась пространственная неоднозначность. Она оказывает сильное влияние на производительность многоканальных процессов, таких как пространственная фильтрация (Раздел 1.6.2) и миграция (Раздел 4.3.5). Вследствие пространственной неоднозначности эти процессы могут воспринимать сигналы с большими наклонами при высоких частотах не такими, какими они являются на самом деле (например, наклоны 15мс на трассу на рис.1-68 – 1-70). Следовательно, они не обрабатываются надлежащим образом. Например, миграция смещает пространственно неоднозначные частоты в неправильном направлении и формирует рассеивающие помехи, что ухудшает качество мигрированного разреза. Эта проблема рассмотрена в Разделе 4.3.

Как избежать пространственной неоднозначности? Сравним модели на рис.1-72 и 1-73. Обе модели имеют один и тот же частотный состав, 6-42Гц. Данные на рис.1-73 являются пространственно неоднозначными, т.к. наклон сигнала больше, чем на рис.1-72. Некоторые приемы, которые позволяют избежать пространственной неоднозначности:

1. Примените временные сдвиги так, чтобы сигнал с сильным наклоном выглядел как сигнал с малым наклоном. Это, может изменить незначительные наклоны до больших, сделав их пространственно неоднозначными. Все же это дает приемлемое решение в определенных ситуациях.
2. Если к трассе на рис.1-73 был применен ФНЧ, так что частоты до 21Гц сохранились, участок, который переходит в отрицательный квадрант амплитудного спектра, будет удален. С одной стороны, устранена пространственная неоднозначность, с другой – потеряна значительная часть зарегистрированной полосы частот. Следовательно, этот подход нежелателен.
3. На рис.1-77 показан один наклонный сигнал, зарегистрированный при трех различных интервалах между трассами. Амплитудные спектры предлагают третий подход к решению задачи пространственной неоднозначности. Чем больше шаг между трассами, тем больше частот являются пространственно неоднозначными. Во всех трех случаях используется одна и та же ширина полосы пропускания. Шаг между трассами 12.5м обеспечивает полосу частот, свободную от пространственной неоднозначности. При 25-метровом шаге частоты выше 36Гц являются пространственно неоднозначными, а при 50-метровом шаге таковыми являются частоты более 19Гц. В этом последнем случае пространственная неоднородность является настолько жесткой, что зеркальные частоты дважды оборачиваются вокруг оси волновых чисел. Отсюда мы видим, что пространственной неоднозначности можно избежать выбрав достаточно малый шаг между трассами. Этот подход требует смены интерполяции, зависящей от данных для формирования избыточных трасс или модифицирования регистрирующей расстановки. В последнем случае требуется больше ПВ и/или регистрирующих каналов.

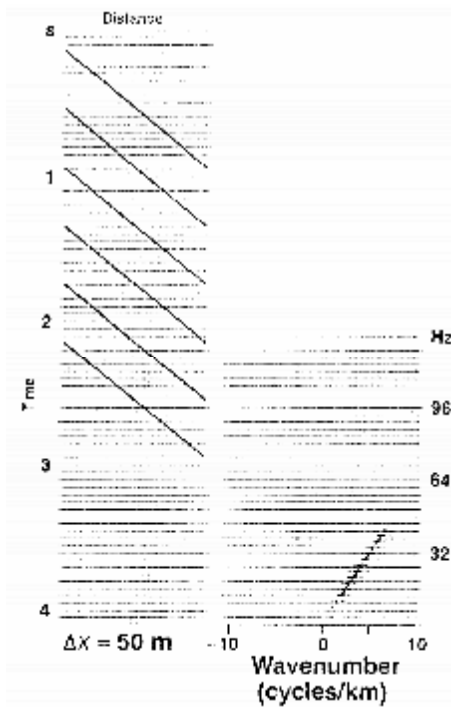


Рис.1-74 Шесть сигналов с одним и тем же наклоном попадают на одну и ту же радиальную линию в области (f, k) . Пространственно неопределенные частоты отсутствуют. Наклон этих сигналов такой же, как у одного сигнала на рис.1-72. Чем отличается этот спектр от спектра на рис.1-72?

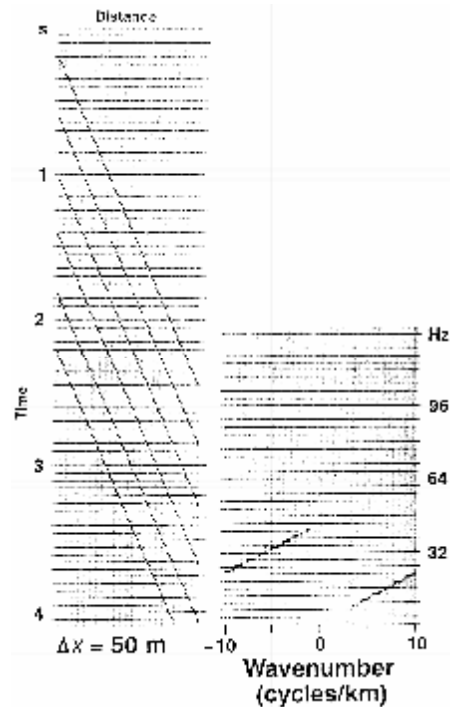


Рис.1-75 Шесть сигналов с одним и тем же наклоном попадают на одну и ту же радиальную линию в области (f, k) . Частоты более 21Гц являются неоднозначными. Наклон этих сигналов такой же, как у одного сигнала на рис.1-73.

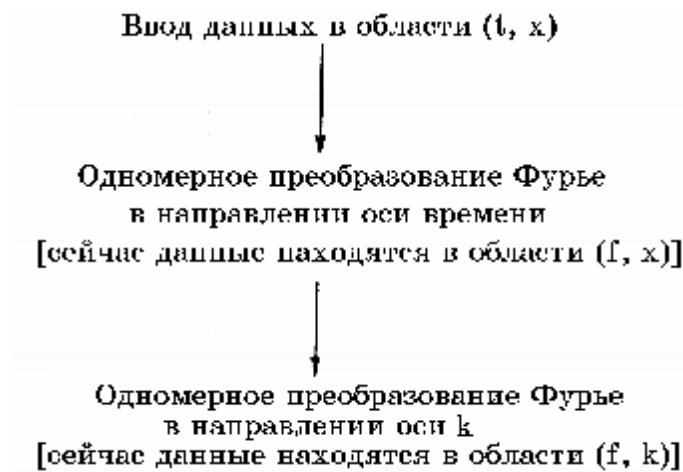


Рис.1-76 Расчет преобразования Фурье

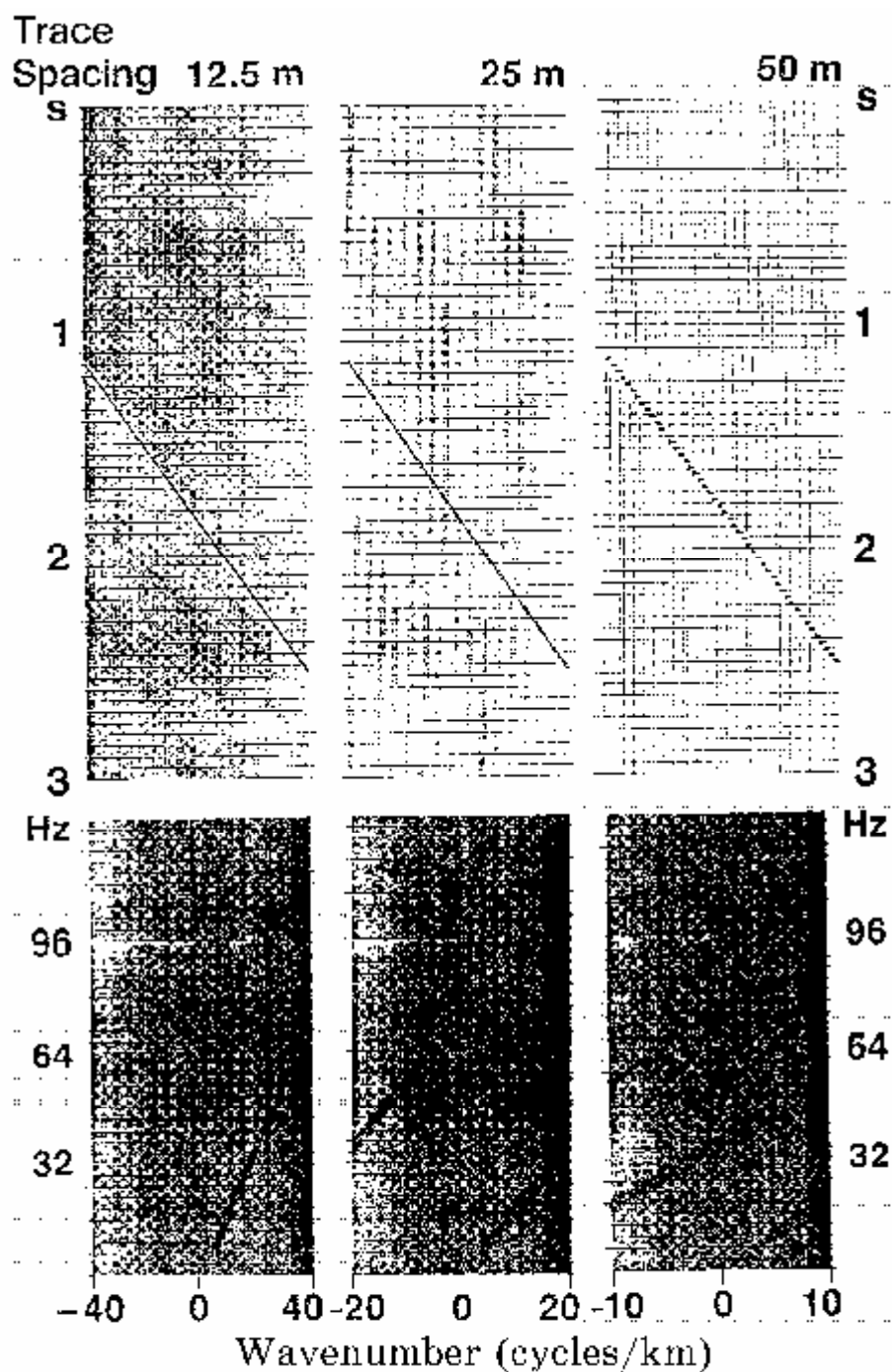


Рис.1-77 Отдельный наклонный сигнал, зарегистрированный при трех различных шагах между трассами с соответствующими $f-k$ спектрами. При шаге 12.5 м пространственная неоднозначность не возникает (слева). При шаге 25 м частоты выше 36 Гц являются неоднозначными (в середине). При шаге 50 м имеет место двойная неоднозначность (справа). Хотя сигналы на $f-k$ спектрах выглядят как характеризующиеся различными наклонами, на выборках (t, x) (вверху) наклон одинаков. Причина такого обманчивого характера заключается в различных горизонтальных масштабах, используемых для отображения $f-k$ спектров.

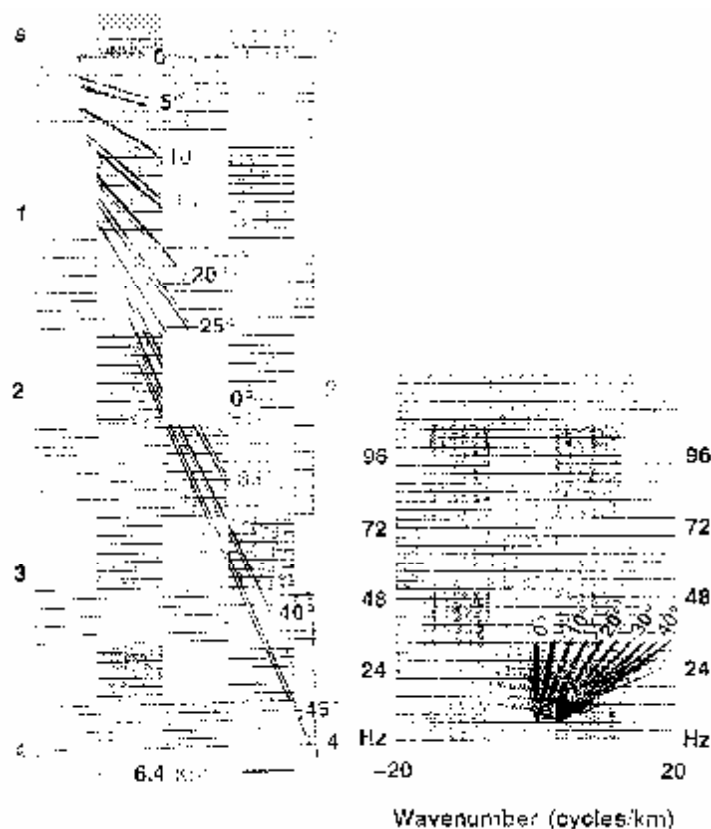


Рис.1-78 Разрез с нулевым выносом (256 трасс с шагом 25 м), содержащий 10 наклонных сигналов и его двумерный амплитудный спектр. Неоднозначные частоты отсутствуют.

По этой причине рассматривается только синтез одного наклонного сигнала из дискретного количества частотных составляющих. Распространим анализ на ряд наклонов. На рис.1-78 показан разрез с наклонами от 0 до 45° и двумерный соответствующий амплитудный спектр. Эти же наклоны, но с более высокочастотными составляющими показаны на рис.1-79. Сигналы с наклонами 0-, 5-, 10-, 15° не являются пространственно неоднозначными. При 20-градусном наклоне неоднозначность появляется около 72Гц, при наклоне 30° - около 48Гц и при наклоне 45° - около 36Гц. Чем больше наклон, тем ниже частота, при которой появляется пространственная неоднозначность.

Какова максимальная частота без неоднозначности или данном наклоне? Рассмотрим сигнал с наклоном 20° (рис.1-79). Сначала измерим наклон в мс на трассу. В модели (t, x) – 256 трасс с шагом 25м. Наклон 20° эквивалентен 7мс на трассу. Частотные составляющие, с периодами менее двойной величины наклона, являются пространственно неоднозначными. Следовательно, при данном наклоне в мс на трассу пороговая частота, при которой начинается пространственная неоднозначность, равна 500 на наклон, выраженный в мс на трассу. В нашем случае пороговая частота равна $500/7 = 72$ Гц. Это можно проверить путем исследования амплитудного спектра на рис.1-79. Вывод уравнения пороговой частоты рассмотрен в Разделе 4.3.5.

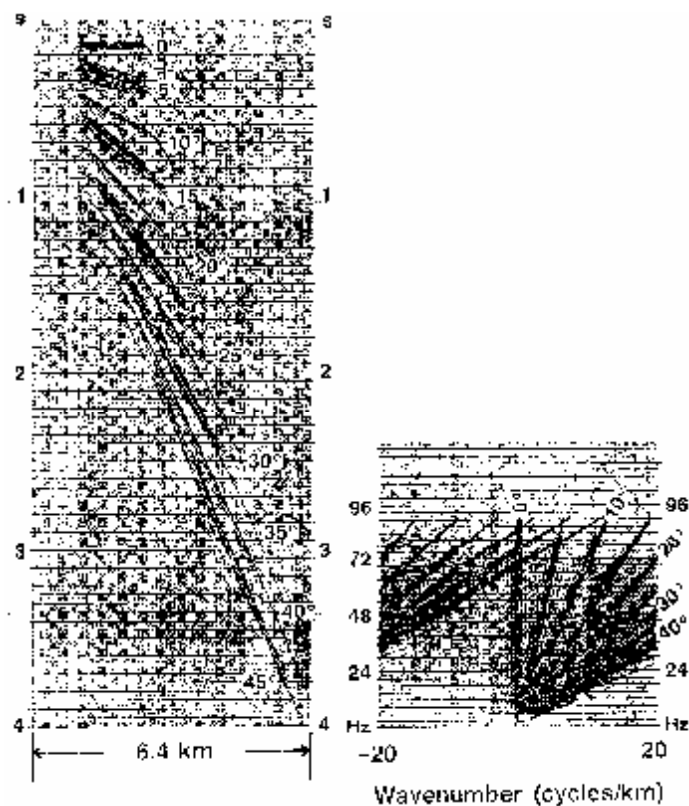


Рис.1-79 Разрез с нулевым выносом (256 трасса с шагом 25м), содержащий 10 наклонных сигналов, и его двумерный амплитудный спектр. Более сильные наклоны дают неоднозначность при снижении частот.

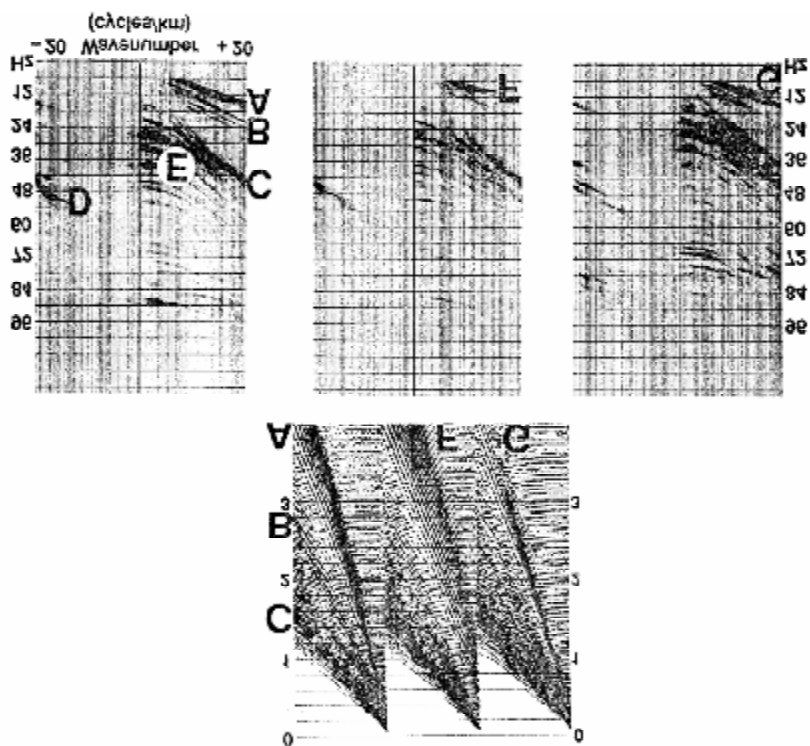


Рис.1-80 Три выборки ОПВ (вверху) и их f - k -спектры (внизу). Буквенные обозначения приведены в тексте. Сигнал попадает на квадрант, соответствующий положи-

тельному наклону на $f-k$ -спектре, если он попадает в сторону дальних выносов. (Данные Deminex Petroleum).

На рис.1-80 показаны 3 полевых рекорда и их двумерные спектры, известные как $f-k$ -спектры. Сейчас несложно распознать и соотнести различные события на выборках ОПВ с событиями на $f-k$ -спектрах. Событие А– это высокоамплитудная когерентная помеха с очень низкой групповой скоростью. При увеличении пространственной протяженности этих волн ширина полосы пропускания в направлении волнового числа сужается. Напротив, если пространственная протяженность уменьшается, событие, такое как G, занимает более широкую полосу волновых чисел на графике $f-k$ (сравните событие G и F). События В и С являются частями пакета канальных волн. Событие С содержит наложенную энергию выше 42Гц (на графике $f-k$ обозначена D. Первичные отражения и ассоциированные кратные отражения попадают в участок Е между осью частот и событием С.

1.6.2 Пространственная $f-k$ -фильтрация

Сигналы, наклоненные в плоскости (t, x) , могут быть разделены в плоскости (f, k) по величинам наклона. Это позволяет устранить из данных некоторые типы ненужной энергии. В частности, это когерентные линейные помехи в форме поверхностной волны, канальные волны, энергия, рассеянная в боковом направлении, скрывающая истинные отражения, которые могут присутствовать в зарегистрированных данных. Обычно эти типы помех изолированы от энергии отраженных волн в пространстве (f, k) . Из полевого рекорда на рис.1-81а видно, как энергия поверхностной волны может преобладать над данными. Это исследование зависимости помех от удаления от ПВ, которое состоит из 6 рекордов. Поверхностная волна представляет собой тип рассеивающей формы волны, которая распространяется по поверхности и по своему характеру является низкочастотной и высокоамплитудной. Обычно поверхностная волна подавляется в полевых условиях с помощью расстановки сейсмоприемников.

На рис.1-81b представлен двумерный амплитудный спектр составной выборки ОПВ на рис.1-81а. Здесь различные типы энергии изолированы один от другого. Можно различить поверхностную волну А, ее составляющую В, рассеянную в обратном направлении, и канальные волны С. Отражения D расположены около оси частот. Как показано на рис.1-81с, на спектре имеется область в виде конуса, внутри которой нежелательная энергия обнулена. Результирующая составная выборка ОПВ на рис.1-81d, по существу, свободна от энергии поверхностной волны; исключение составляет компоненты, рассеянная в обратном направлении. Обнуление конусообразной зоны в пространстве (f, k) – это одна из реализаций процесса, известного под названием пространственной $f-k$ -фильтрации. На рис.1-82 показаны шаги, составляющие этот процесс.

Практические проблемы, ассоциированные с двумерным преобразованием Фурье и выбором зоны подавления перечислены ниже:

1. Общепринятая реализация преобразования Фурье сама по себе формирует **wraparound** помеху. Это показано на рис.1-81d, изображение F. Чтобы избежать этой проблемы, необходимо распространить данные за пределы пространственно и временной осей путем заполнения нулями. Размер входной выборки обычно умножается на коэффициент 4, что эквивалентно удваиванию длины по t и по x . При этом возрастает стоимость, но устраняются эффекты **wraparound**.
2. Конус (зона подавления) не должен быть слишком узким. Это следует из предыдущего рассмотрения одномерного анализа Фурье частотных фильтров. При малой ширине зона подавления отклик (t, x) пространственного

фильтра будет содержать длинный ряд нулевых элементов. Благоприятным обстоятельством является то, что когерентные помехи с большой разностью времен вступления (например, поверхностная волна) часто изолируется в пространстве (f, k) от зоны, которая включает отраженный сигнал. Это можно показать на примере (см. рис.1-81b). В этих случаях энергия поверхностной волны А подавляется без нарушения отраженного сигнала с помощью широкой зоны (рис.1-81c).

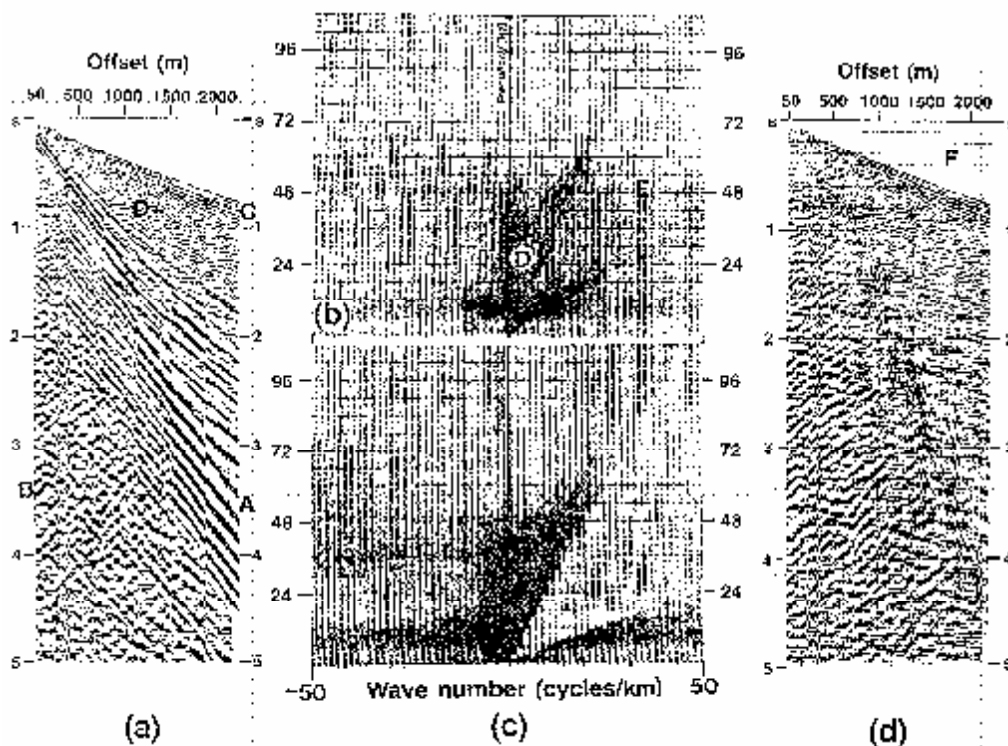


Рис.1-81 (а) Составной полевой рекорд, полученный при исследовании помех walk-away. Шаг между трассами равен 10м, А = поверхностная волна, В = рассеянная в обратном направлении компонента А, С = дисперсионные каналные волны, D = первичное отражение. (b) $f-k$ -спектр этого полевого рекорда. Обозначение наклонов такое же, как на рис.1-80. Событие E упоминается в упражнении 1-17. (c) $f-k$ -спектр полевого рекорда после подавления энергии поверхностной волны А. Сравните с $f-k$ -спектром (b) первоначального рекорда. Для целей отражения каждый спектр нормализован по отношению к собственному максимуму. (d) Полевой рекорд, спектр которого показан на изображении (c), после пространственной фильтрации. Сравните с (a). (Данные Turkish Petroleum Corp.)



Рис.1-82 Пространственная $f-k$ -
фильтрация.

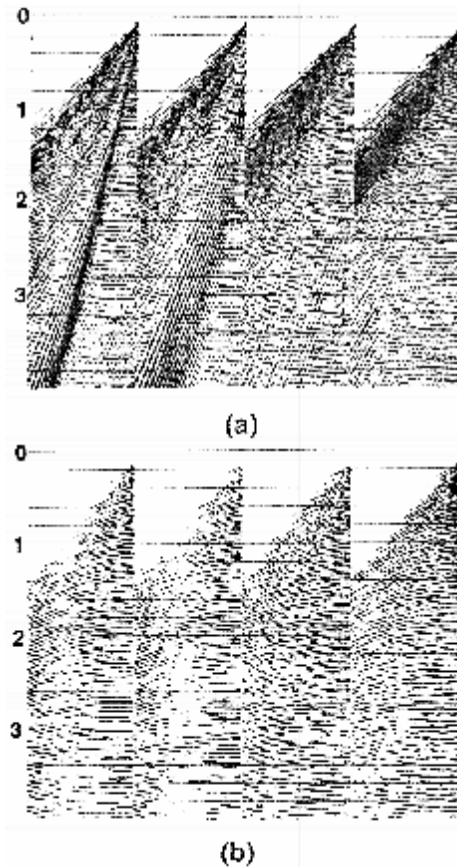


Рис.1-83 Четыре рекорда, полученные для малых глубин (а) до и (б) после пространственной $f-k$ -фильтрации с целью устранения когерентных помех. Когерентная помеха на этих рекордах представлена прежде всего канальными волнами (данные Deminex Petroleum).

3. Как и в случае одномерных частотных фильтров, амплитудный спектр $f-k$ -фильтра не должен иметь резких границ; должен быть плавный переход от зоны подавления к зоне пропускания. Это выполняется путем ввода переходных участков в границы зоны подавления (аналогично наклонам при полосовой фильтрации). Размер переходного участка должен быть достаточно большим, чтобы обеспечивалась его эффективность. С другой стороны, не следует задавать слишком широкий переходный участок, чтобы не подавлялся сигнал в зоне пропускания. Особое внимание нужно уделять низким частотам. Поскольку конус сужается к началу плоскости (f, k) , действительная зона подавления может захватывать низкочастотные составляющие зоны пропускания. Причина захвата состоит в том, что конус не может стать слишком узким. Можно остановить зону подавления, не доходя до низких частот. Это исключает действие пространственной фильтрации на низких частотах.
4. Пространственная неоднозначность часто обуславливает недостаточную производительность $f-k$ -фильтра. Зона подавления должна быть продлена до пространственно неоднозначных частотных компонент. Практический подход к этой проблеме – применение временных сдвигов к данным перед про-

пространственной фильтрацией, чтобы ненужный сигнал появляется на малых наклонах. Это приводит к устранению пространственной неоднозначности. После f - k -фильтрации временные сдвиги устраняются. Это, однако, не всегда может работать, поскольку те сигналы, которые не являются пространственно неоднозначными до смещения во времени, могут стать таковыми после смещения.

Не обязательно ограничивать зоны подавления/пропускания формой конуса. На рис.1-83 показаны четыре выборки ОСТ, а на рис.1-84 – их f - k -спектры до и после пространственной фильтрации. Квадранты слева от спектров в основном содержат пространственно неоднозначные данные. При сохранении формы конуса в правом квадранте и обнулении большей части левого квадранта устраняются цуги когерентных помех.

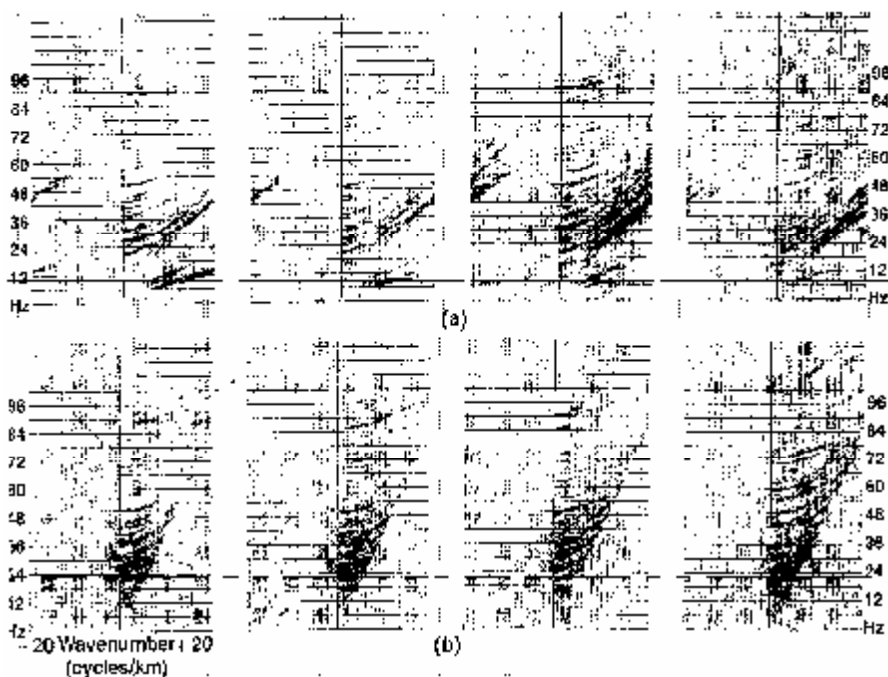


Рис.1-84 F - K -спектры выборок ОПВ на рис.1-83 (а) до и (б) после пространственной фильтрации. Обозначение наклонов такое же, как на рис.1-80.

К какому типу выборки применяется f - k -фильтрация? Поскольку в этом процессе серьезную проблему представляет собой неоднозначность, нужно применять пространственную фильтрацию на коротких выборках ОПВ, а не на выборках ОСТ, поскольку в последнем случае шаг между трассами может увеличиваться в два раза. Перед фильтрацией две соседние выборки можно расположить рядом, а после фильтрации разделить; это смягчает действие неоднозначности. Когерентная помеха (рис.1-83) подавляется в области выборок ОПВ. При сортировке на выборке ОСТ эта помеха не сохраняется в данных (рис.1-85).

На рис.1-86а показан суммированный разрез, полученный по выборкам ОСТ на рис.1-85а. Суммирование по ОСТ подавило большую часть когерентных помех. Пространственная фильтрация после суммирования может эффективно подавить любую оставшуюся когерентную помеху (рис.1-86с). Результат сопоставим с результатом пространственной фильтрации перед суммированием (рис.1-86б). Когерентные линейные помехи на суммированных данных также могут быть подавлены процессом миграции после суммирования, который включает пространственную фильтрацию.

Два типа когерентных линейных помех, которые требуют особого внимания – это каналные волны и энергия, рассеянная в боковом направлении. Канальные волны проявляются в виде линейных помех на выборках ОПВ (рис.1-83а) и выборках ОСТ (рис.1-85а), но в значительной мере ослабляются процессом суммирования (рис.1-86а). Энергия, рассеянная в боковом направлении, проявляется в виде линейных помех на выборках ОПВ (рис.1-87а), отсутствует на выборках ОСТ (рис.1-87b) и снова появляется в виде линейных помех на суммированных разрезах (рис.1-88а) (Larner и др. 1983). Энергия, рассеянная в боковом направлении, характеризуется широким диапазоном приращений, которые зависят от положения рассеивающего объекта. Этот тип энергии суммируется при высоких скоростях вдоль линейных краев кривой времен пробега. Мы ожидаем, что линейные помехи, которые видны на суммарном разрезе, на поздних временах – это в основном рассеянная энергия по краям кривой времен пробега, суммированная с энергией какого-либо высокоскоростного первичного отражения. Если $f-k$ -фильтрация не применяется к выборкам ОПВ, содержащим энергию, рассеянную в боковом направлении, может получиться суммарный разрез с когерентными линейными помехами (рис.1-88а). На рис.1-88b показано, что эти помехи можно подавить, подвергнув суммированный разрез пространственной фильтрации. Можно ли улучшить подавление этой помехи? Если $f-k$ -фильтр применить на рекордах ОПВ, получим сумму (рис.1-88с). Если сравнить этот результат с рис.1-88b, можно видеть, что на рис.1-88с более высокая разрешающая способность. Данные, обработанные $f-k$ -фильтром перед суммированием, также дают улучшенный скоростной анализ (рис.1-89).

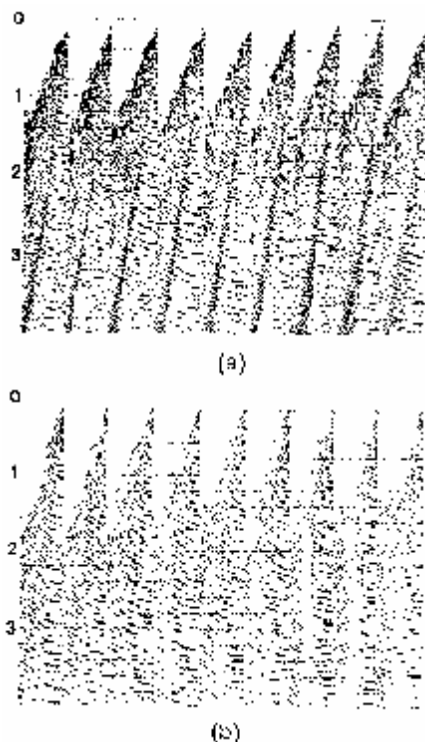


Рис.1-85 Выборки ОСТ (морская съемка) (а) до и (b) после пространственной фильтрации с целью удаления когерентных линейных помех. Это те же данные, что на рисю1-83. (Данные Deminex Petroleum)

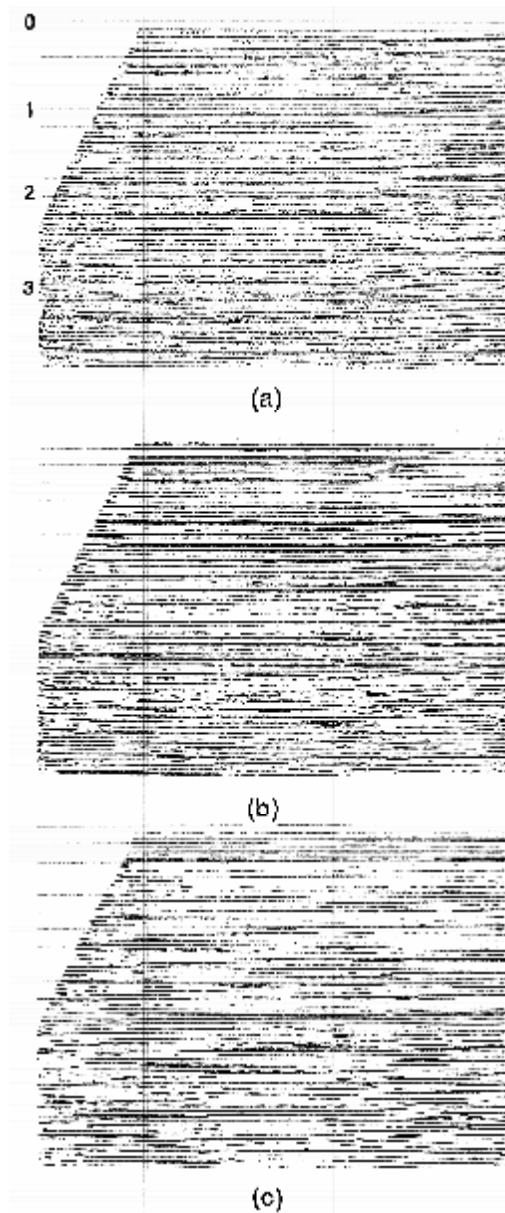


Рис.1-86 (а) Сумма ОСТ с некоторым количеством когерентных помех; (б) f - k -фильтрация перед суммированием; (с) f - k -фильтрация после суммирования. Выборки ОСТ показаны на рис.1-85 (Данные Deminex Petroleum).

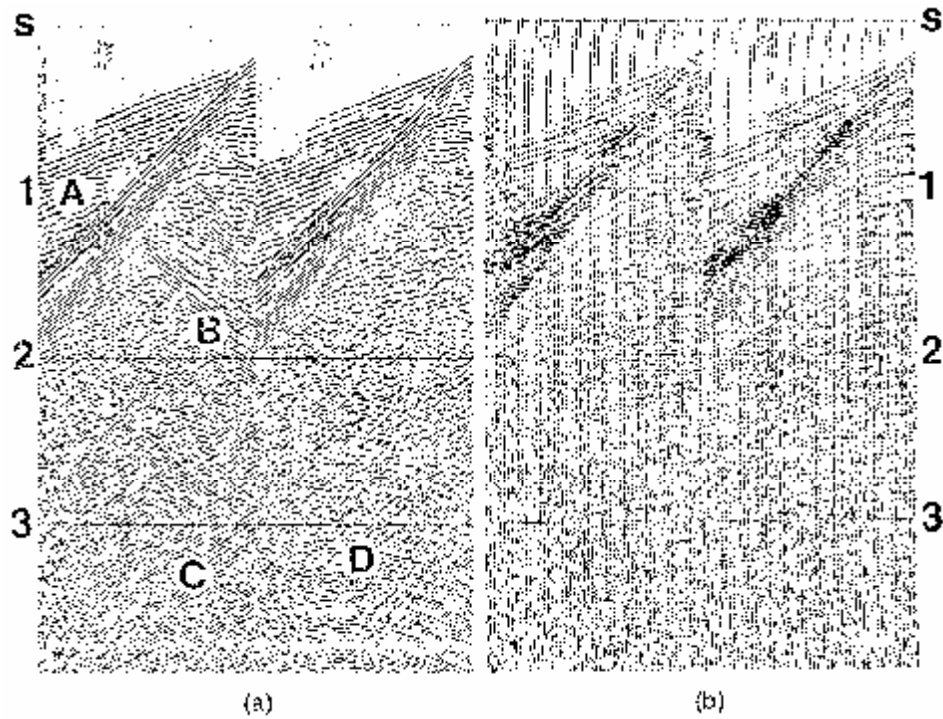


Рис.1-87 (а) Две выборки ОПВ и (b) две выборки ОСТ по одному и тому же профилю. Сумма ОСТ показана на рис.1-88а. Обратите внимание на присутствие когерентных линейных помех: А = пакет канальных волн (до 2с на дальнем выносе). В, С = помехи, рассеянные в боковом направлении с наклоном справа налево и наоборот. Каким источником энергии D с гиперболическими временами пробега? (Данные Taylor Woodrow Energy Ltd.)

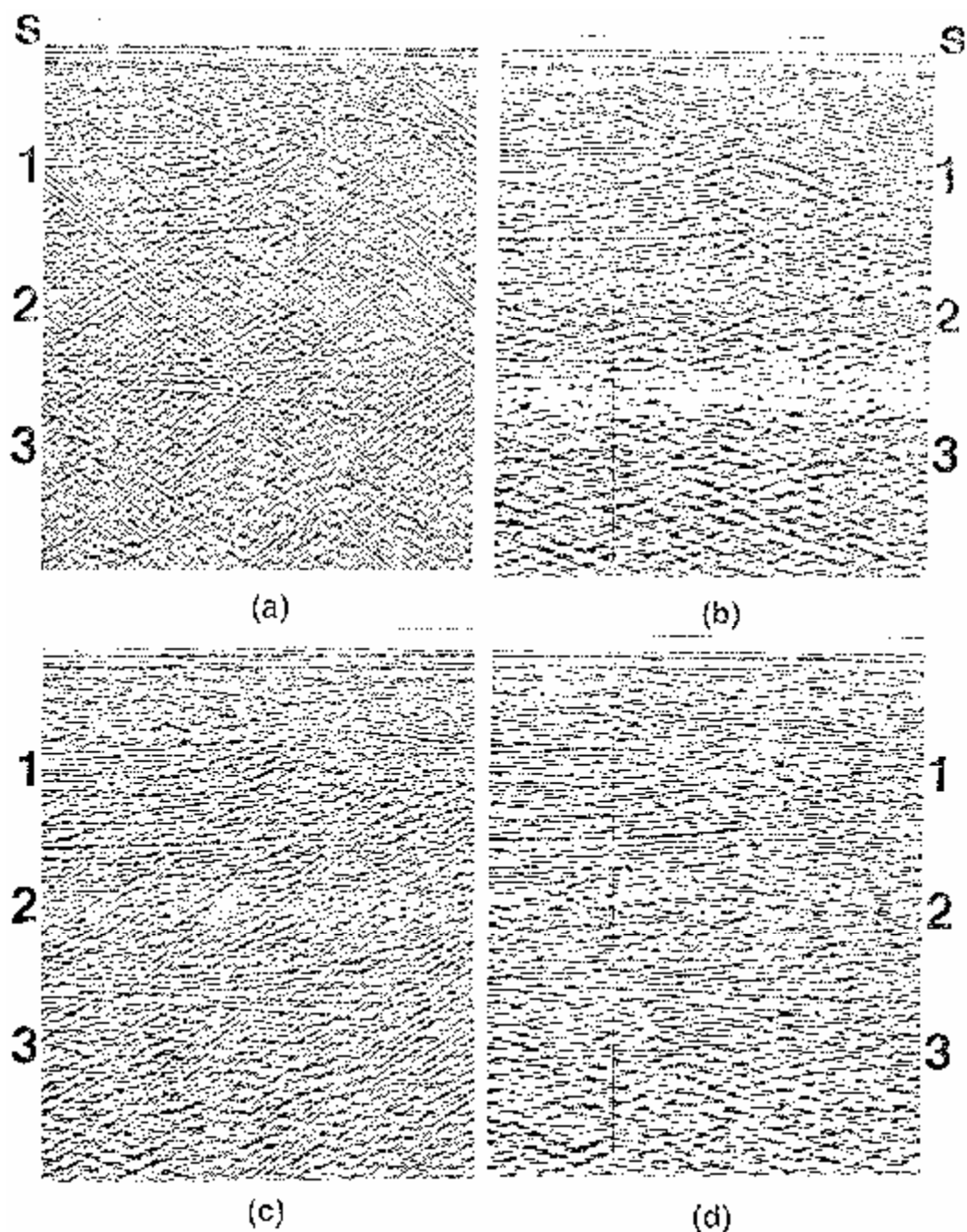


Рис.1-88 (а) Сумма ОСТ, осложненная когерентными помехами. Ассоциированные выборки ОПВ и ОСТ показаны на рис.1-87. (б) Эта же выборка ОСТ, обработанная $f-k$ -фильтром после суммирования. (с) Сумма ОСТ, обработанная $f-k$ -фильтром перед суммированием. (d) сумма ОСТ, дважды обработанная $f-k$ -фильтром перед суммированием: первый раз – в области ОПВ, второй раз - в области ОТП (Данные Taylor Woodrow Energy Ltd.)

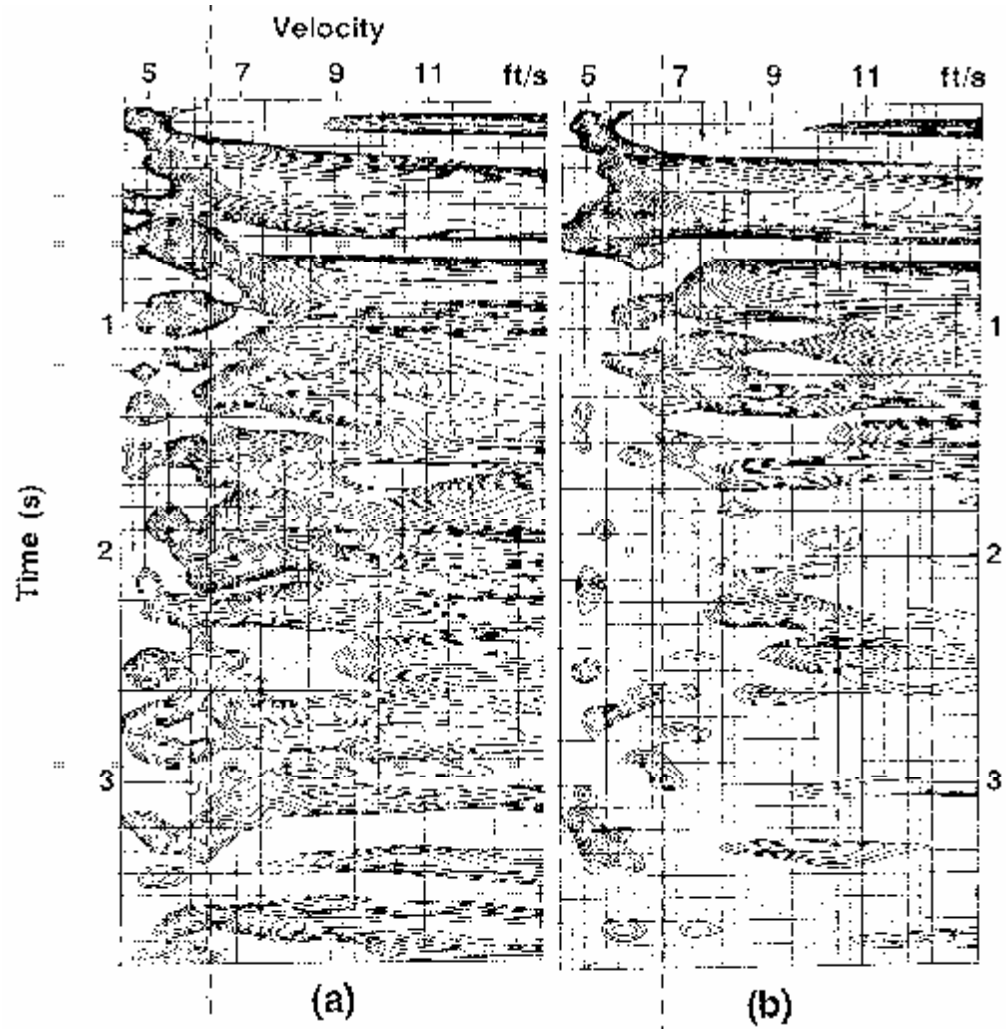


Рис.1-89 Скоростные спектры, ассоциированные с данными на рис.1-87b: (a) с пространственной фильтрацией; (b) без пространственной фильтрации.

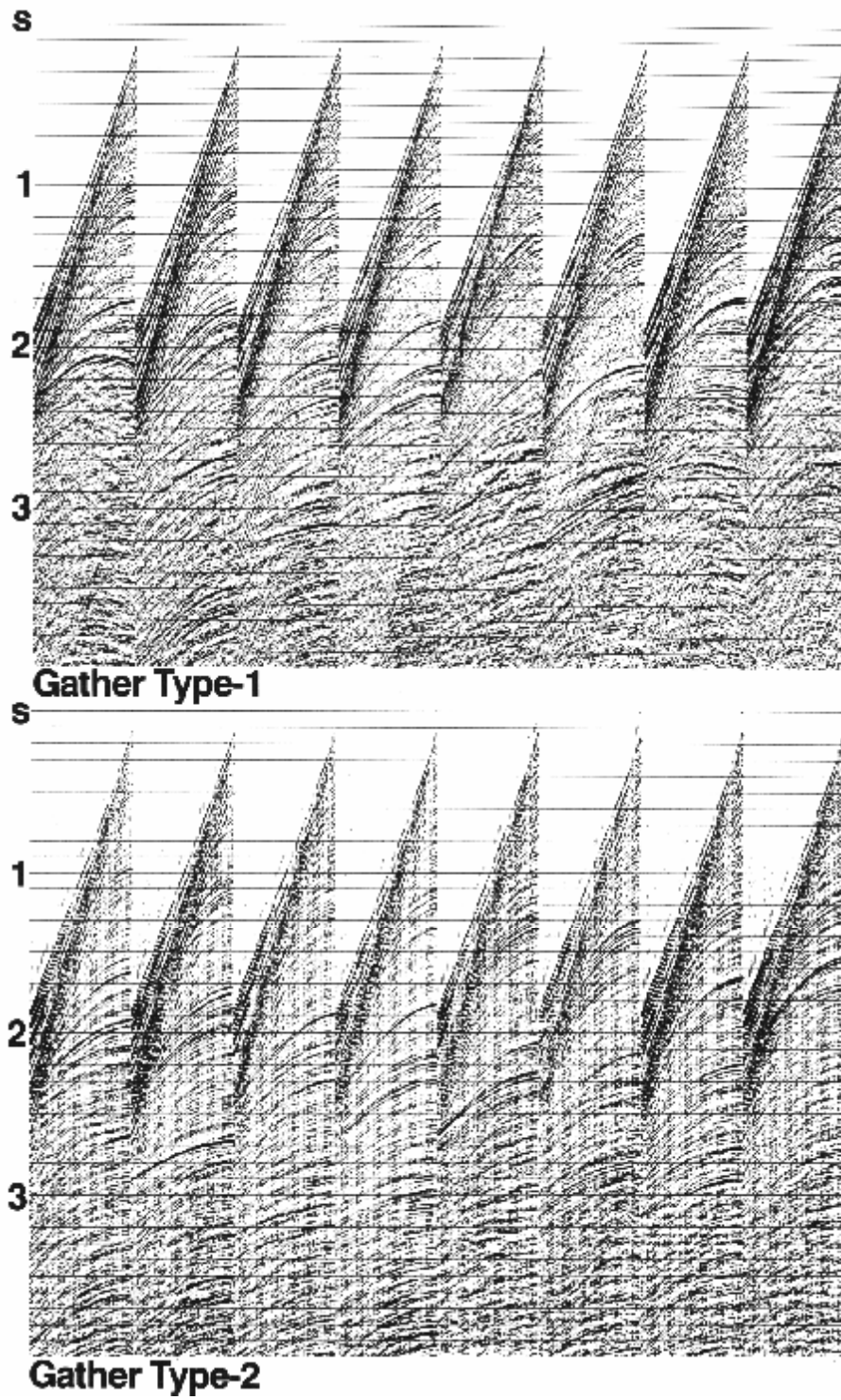


Рис.1-90 Набор полевых данных, отображенный в двух различных областях: ОПВ и ОСТ (см. упражнение 1-13).

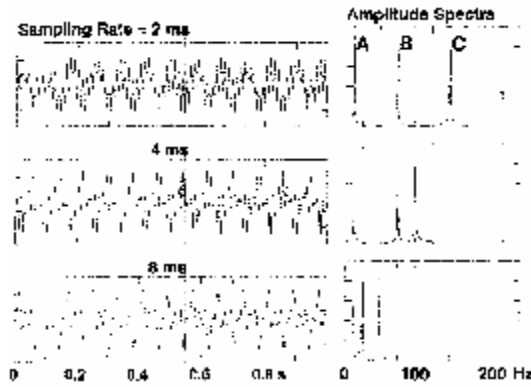


Рис.1-91 Сигнал с тремя частотными составляющими А, В и С, выбранный с тремя различными шагами: 2, 4 и 8мс. Появление зеркальных частот происходит при увеличении шага дискретизации (см. упражнение 1-19).

вертикали. События с одним и тем же наклоном в плоскости (t, x) , независимо от положения, располагаются на одной линии в радиальном направлении на плоскости $(f-k)$. Это основа для пространственной фильтрации, которая равносильна определению конуса подавления в области преобразования, а затем обратному преобразованию данных в область (t, x) .

Практический опыт работы показывает, что можно улучшить результат, если обрабатывать пространственным фильтром обе выборки – ОПВ ОТП. Полученная в этом случае сумма показана на рис.1-88d; сравните с рис.1-88b и 1-88c. Если $f-k$ -фильтрация была выполнена на выборках ОПВ, в данных может остаться значительная часть когерентных помех. С другой, второй прогон $f-k$ -фильтрации делает данные более размытыми и это может ухудшить определенные коллектора.

Итак, двумерное преобразование Фурье – это способ разложения волнового поля на плоскотоволновые составляющие. Каждая плоская волна несет монохроматический сигнал, который распространяется под определенным углом к

Список литературы

- Bracewell, R. N., 1965. The Fourier transform and its applications: McGraw-Hill Book Co.
- Clerhout, J. F., 1976. Fundamentals of geophysical data processing: McGraw-Hill Book Co.
- Grant, F. S. and West, G. F., 1965. Interpretation theory in applied geophysics: McGraw-Hill Book Co.
- Larner, K. L., Chambers, R., Yang, M., Lynn, W., and Wai, W., 1983. Coherent noise in marine seismic data: Geophysics, **48**, 854-886.
- Mayne, W. H., 1962. Common-reflection-point horizontal data stacking techniques: Geophysics, **27**, 927-938.
- Newman, P., 1973. Divergence effects in a layered earth: Geophysics, **38**, 481-488.
- Robinson, E. A. and Treitel, S., 1980. Geophysical signal analysis: Prentice-Hall, Inc.
- Rothman, D., Larner, K. L. and Chambers, R., 1981. Trace interpolation and design of 3-D surveys: Presented at the Ann. Eur. Assoc. Explor. Geophys. Mtg.
- Sengbush, R.L., 1983. Seismic exploration methods: Internat. Human Res. Dev. Corp.
- Yilmaz, O. and Cumro, D., 1983. Worldwide assortment of field seismic records: Tech. Rep., Western Geophysical Company.

Упражнения

Упражнение 1-1. Используя гиперболическое уравнение времени пробега, рассчитайте среднюю скорость до отражающей поверхности А в рекорде 8 (рис.1-33). Между А и поверхностью скорость постоянная. Таблица 1-8 (рекорд 8) содержит всю информацию, необходимую для расчета.

Упражнение 1-2. Обратитесь к рекорду исследования walk-away помех (рекорд 19, рис.1-33). Измерьте фазовую скорость (dx/dt) энергии поверхностной волны в точке А1 и преобладающую частоту в той же самой точке. Затем оцените преобладающую длину поверхностной волны (скорость/преобладающая частота). Длина расстановки сейсмоприемников, необходимая для подавления этой энергии в полевых условиях, должна быть равна или больше самой длинной волны – помехи. Таблица 1-8 (рекорд 19) содержит всю информацию для расчетов.

Упражнение 1-3. Измерьте групповую скорость (xt) поверхностной волны А в рекорде 25 (рис.1-33). Необходимая информация содержится в таблице 1-8 (рекорд 25).

Упражнение 1-4. Что представляет собой событие А в рекорде 29 (рис.1-33)? Является ли С, D и E кратными отражениями В?

Упражнение 1-5. Обратитесь к рекорду 30 (рис.1-33). Рассчитайте скорость в воде, используя вступления прямой волны А и отражения от дна В. Используйте время пробега в одном направлении для А и полное время пробега для В.

Упражнение 1-6. Исследуйте времена пробега для отражения от дна В и его первое кратное отражение М в рекорде 30 (рис.1-33). В частности, измерьте разности времен между В и М на ближних и на дальних трассах. Равны ли они? Если нет, объясните причину. (Ответ на это упражнение представляет собой предмет Раздела 7.5)

Упражнение 1-7. Идентифицируйте события А, В, С, D, E, F на рекорде 33 (рис.1-33).

Упражнение 1-8. Идентифицируйте события А, В, С, D, E на рекорде 34 (рис.1-33).

Упражнение 1-9. Сделайте заключение о наклонах сигналов А и В на рекорде 35 (рис.1-33).

Упражнение 1-10. Рассмотрите три стадии общепринятой обработки: деконволюция, суммирование, миграция. Расположите эти процессы в порядке важности и объясните, почему вы их так расположили.

Упражнение 1-11. Рассчитайте кратность n_f , шаг между средними D_u и шаг D_f между трассами ОСТ для каждой из следующих расстановок:

Код во каналах	Шаг между ПВ, м	Шаг между сейсмоприем- никами, м
Group 1		
6	25	25
6	50	25
6	75	25
6	100	25
6	200	25
Group 2		
6	25	25
6	25	50
6	25	75
6	25	100
6	25	200
Group 3		
4	25	25
6	25	25
8	25	25
10	25	25
12	25	25

Схема суммирования показана на рис.1-43. Постройте шаг между ПВ D_s в функции n_f , D_u и D_f для группы 1. Постройте функцию расстояния между приемниками D_g в функции n_f , D_u и D_f для группы 2. Постройте количество каналов n_c в функции n_f , D_u и D_f для группы 3. Покажите, что (а) кратность можно повысить путем увеличения числа регистрирующих каналов или путем уменьшения шага между ПВ; (б) интервал между средними точками можно уменьшить, делая меньше шаг между сейсмоприемниками. Кратность перекрытия определяется как $n_f = (n_g \cdot D_g)/(2D_s)$, где n_g – количество приемных каналов. Эта зависимость сохраняется для любого отношения $\cdot D_g/D_s$, при котором кратность – целое число, которое меньше или равно $n_g/2$.

Упражнение 1-12. Предположим, что ПВ, ассоциированный с выборкой 1 на рис.1-43. Определите, на какие средние точки это повлияет, т.е. какие из них будут с меньшей кратностью. Предположим, что пропущен сейсмоприемник, ассоциированный с выборкой 2 на рис.1-43. Определите, на какие средние точки это повлияет.

Упражнение 1-13. По рис.1-90 определите выборки ОПВ и ОСТ.

Упражнение 1-14. При каких обстоятельствах вы предпочтете присвоить временной выборке, которая предшествует центру скользящего временного окна, рассчитанную величину для функции мгновенного АРУ?

Упражнение 1-15. Рассмотрите аналоговый 200-герцовый синусоидальный сигнал. Если он был выбран с шагом 8мс, какова его алиасная часть?

Упражнение 1-16. Из первых вступлений на рекорде 27 (рис.1-33) обратите внимание, что в точке А произошло изменение геометрии приемной полосы. Каково соотношение интервалов между группами слева и справа от А?

Упражнение 1-17. Идентифицируйте событие Е на рис.1-81b.

Упражнение 1-18. При применении усиления происходит умножение функции усиления на сейсмическую трассу (рис.1-16). Этот процесс эквивалентен свертке преобразования Фурье функции усиления с преобразованием Фурье входной трассы. Опишите эффект применения усиления в частной области.

Упражнение 1-19. Обратитесь к рис.1-91. Какие пики на амплитудных спектрах временной последовательности, выбранной с шагом 4 и 8мс, соответствуют пикам А, В и С последовательности, выбранной с шагом 2мс?

Упражнение 1-20. Рассмотрим регистрирующую расстановку на рис.1-40. Схематически изобразите кривые времен пробега на выборке ОПВ, ассоциированные с точечными рассеивающими объектами (а) ниже косы, (б) позади косы и (с) перед косой. Считайте, что все рассеивающие объекты находятся в плоскости регистрации.

Упражнение 1-21. Что представляет собой событие С на рекорде 8 (рис.1-33).

Деконволюция

2.1 Введение

Деконволюция представляет собой процесс, который улучшает временную разрешающую способность сейсмических данных, сжимая основной сейсмический импульс. Как правило, деконволюция применяется перед суммированием; тем не менее, она применяется и к суммированным данным. На рис.2-1 показан суммированный разрез с деконволюцией перед суммированием и без нее. Деконволюция дает разрез со значительно более высокой разрешающей способностью. Осциллирующий характер суммы без деконволюции существенно ограничивает разрешающую способность.

Действие деконволюции можно также видеть на данных перед суммированием. На рис.2-2 показаны некоторые выборки ОГТ по морскому профилю до и после деконволюции. Обратите внимание, что на выборках после деконволюции выпуклые отражения различаются лучше. Деконволюция сняла значительное количество реверберации и сжала волну на каждом из выпуклых отражений. Суммированные разрезы, ассоциированные с этими выборками ОГТ,

показаны на рис.2-3. Улучшение, наблюдаемое на выборках ОГТ после деконволюции, также можно видеть на соответствующих временных разрезах.

Некоторые выборки ОГТ по наземному профилю, исправленные за нормальное приращение, показаны на рис.2-4. Обратите внимание, что на выборках на рис.2-4b и на суммированном разрезе на рис.2-5b деконволюция удалила большую часть реверберационной энергии и сжала импульс.

Иногда деконволюция делает больше, чем просто сжатие импульса; она может удалить из разреза значительную часть энергии кривых волн. Отметим, что на суммированном разрезе на рис.2-6b, который получен по выборкам ОГТ после деконволюции, имеется улучшение между 2 и 4 секундами. К сожалению, деконволюция не всегда хорошо делает это на кратных волнах (рис.2-7).

Чтобы понять деконволюцию, сначала исследуем компоновочные блоки зарегистрированной сейсмической трассы. Разрез состоит из слоев пород с различной литологией и физическими свойствами. С сейсмической точки зрения слои пород определяются по плотностям и скоростям, с которыми по ним распространяются сейсмические волны. Произведение плотности и скорости называется сейсмическим импедансом. Контрастность импеданса соседних слоев пород обуславливает отражение, которые регистрируются на профиле, проходящем по поверхности земли. Таким образом, зарегистрированная сейсмограмма может быть смоделирована как свертка импульсного отклика разреза с сейсмическим импульсом. Этот импульс имеет много компонент, включая характеристику источника, фильтр записи, отражения от поверхности и от-

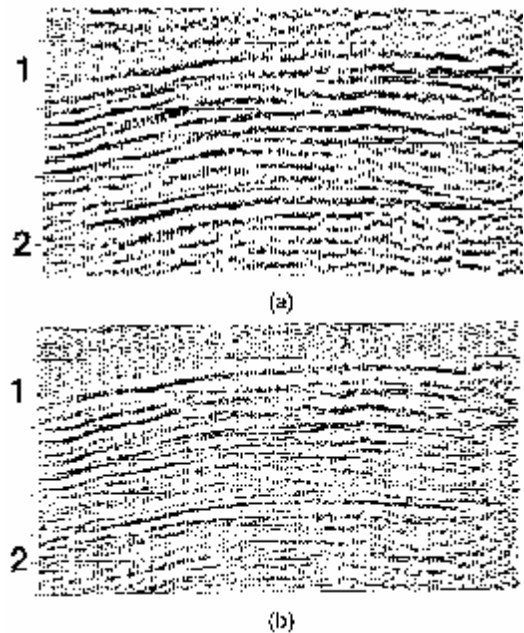


Рис.2-1 Интерпретаторы предпочитают четкое изображение разреза после деконволюции, на котором хорошо видно детали (b), а не размытый, осложненный реверберационными волнами разрез перед деконволюцией (a). Данные получены от Philips Petroleum.

клик сейсмоприемника. Импульсный отклик разреза – это то, что должно быть зарегистрировано, если импульс представляет собой всплеск. Импульсный отклик включает первичные отражения (последовательность коэффициентов отражения) и все возможные кратные волны. В идеальном случае деконволюция должна сжимать компоненты импульса и удалять кратные волны, оставляя в сейсмической трассе только отражательную способность разреза.

После общего обсуждения модели фильтрации (Раздел 2.2), в разделе 2.3 вводится понятие обратного фильтра. По существу, обратный фильтр, будучи свернутым с сейсмическим импульсом, преобразует его в единичный импульс (*spike*). При применении к сейсмограмме обратный фильтр должен давать импульсный отклик разреза. Обратный фильтр, действующий по принципу наименьших квадратов, рассмотрен в Разделе 2.4. Главное допущение, на котором основывается процесс деконволюции (в обычном случае, когда импульс источника неизвестен) состоит в том, что он является минимально-фазовым; это рассматривается в Разделе 2.5. Оптимальный фильтр Винера, который имеет широкий диапазон применения, рассмотрены в Разделе 2.6.

Фильтр Винера преобразует сейсмический импульс в любую желаемую форму. Например, подобно обратному фильтру, фильтр Винера может быть сконструирован для преобразования сейсмического импульса в единичный импульс.

Однако, фильтр Винера отличается от обратного фильтра тем, что он оптимален с точки зрения наименьших квадратов. Кроме того, разрешающей способностью результирующего импульса можно управлять, конструируя фильтр прогнозирования ошибок Винера (*prediction error filter*). Преобразование сейсмического импульса в единичный импульс повышает разрешающую способность. На практике вследствие помех на сейсмограмме и допущений, сделанных относительно сейсмического импульса и записанной сейсмограммы, деконволюция сжатия не всегда желательна. Наконец, фильтр прогнозирования ошибок может быть использован для удаления из сейсмограмм периодических компонент (т.е. кратных волн).

Математическая обработка деконволюции представлена в Приложении В. В тексте даются несколько числовых примеров, которые обеспечивают теоретический фон с эвристической точки зрения. много теоретических работ по деконволюции поступило от группы геофизического анализа MIT (*Geophysical Analysis Group*), сформированной в середине 50-х годов.

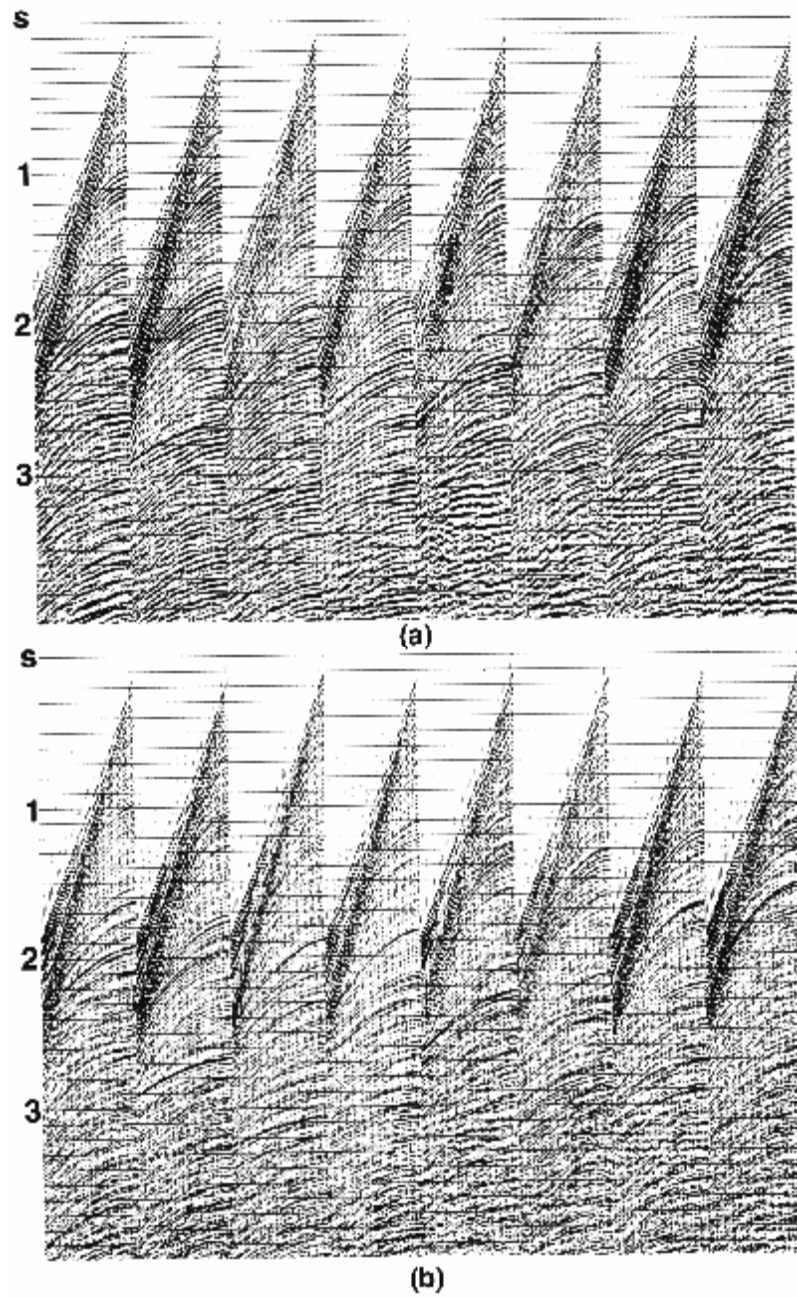


Рис.2-2 Отметим выпуклые отражения на выборках после деконволюции (b). Реверберирующие пути затрудняют выделение выпуклых отражений на выборках без деконволюции (a).

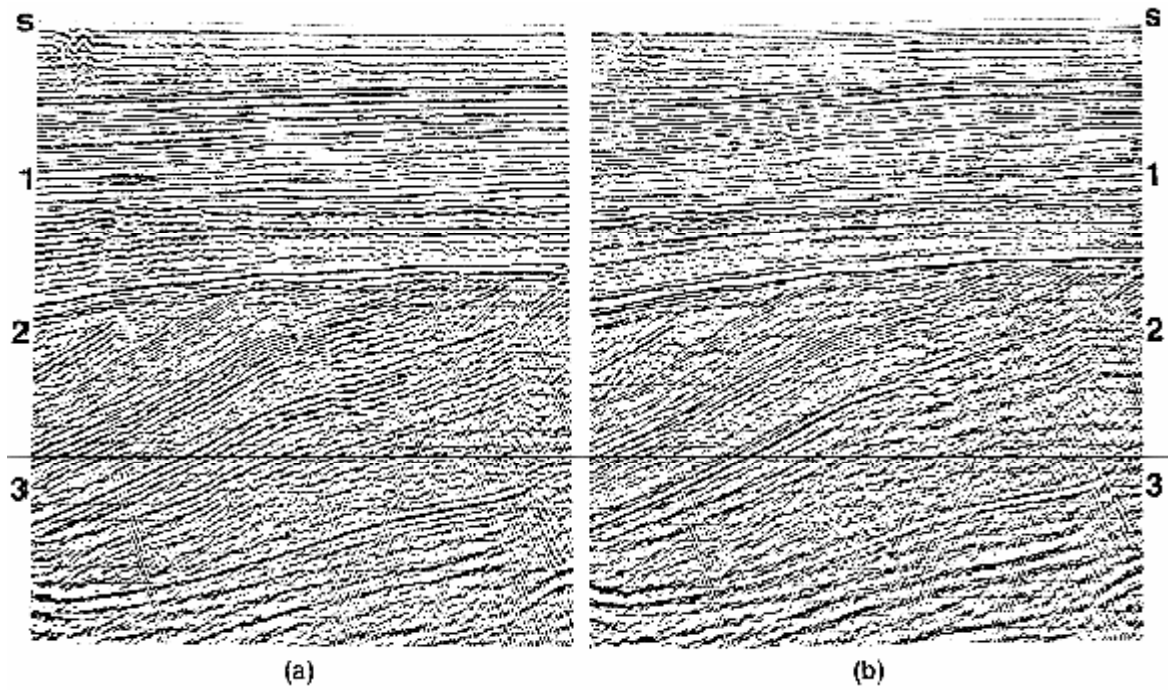


Рис.2-3 С каким суммированным разрезом вы предпочитаете работать? (а) Разрез получен по выборкам, представленным на рис.2-2а, которые не прошли деконволюцию; (б) Разрез получен по выборкам после деконволюции, представленным на рис.2-2б.

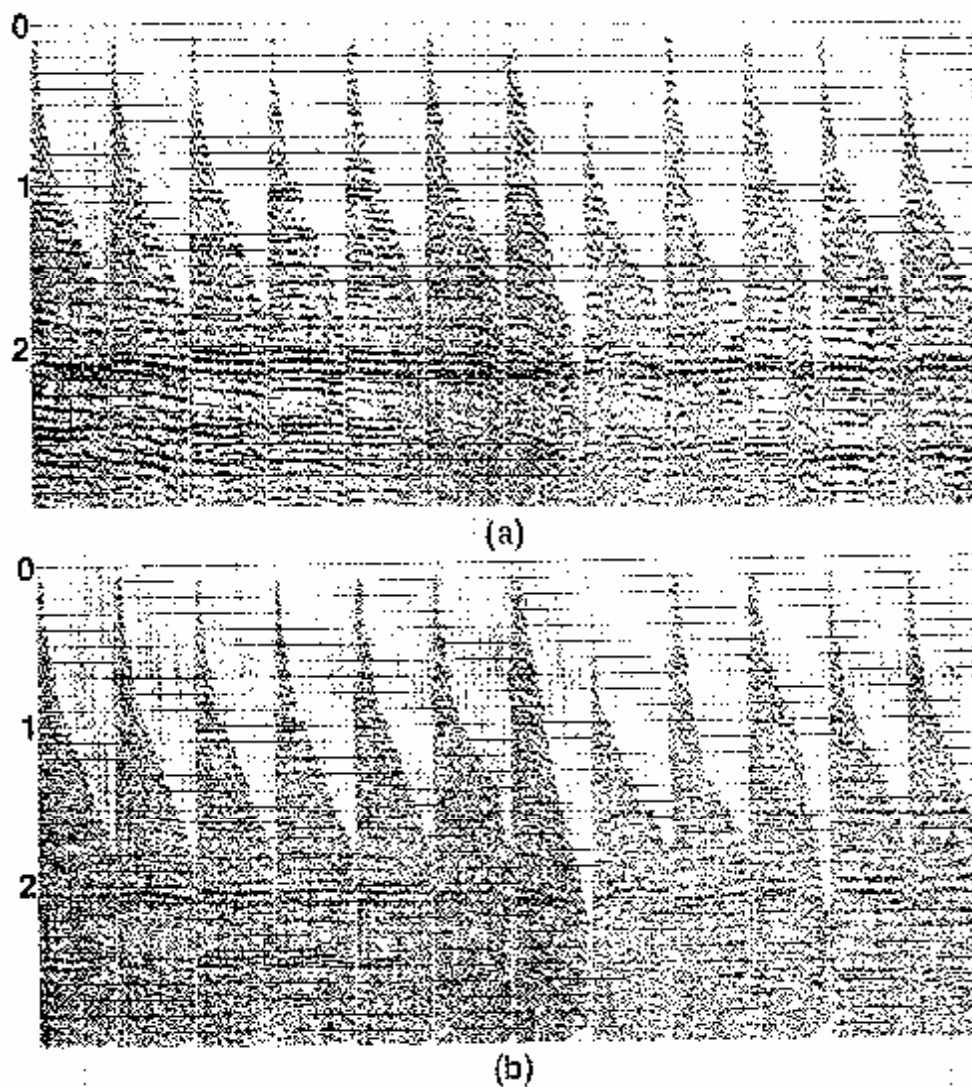


Рис.2-4 Некоторые выборки, исправленные за нормальное приращение, ассоциированные с суммированными разрезами на рис.2-5: (a) перед деконволюцией, (b) после деконволюции. Деконволюция удалила из данных особенности, обусловленные реверберацией.

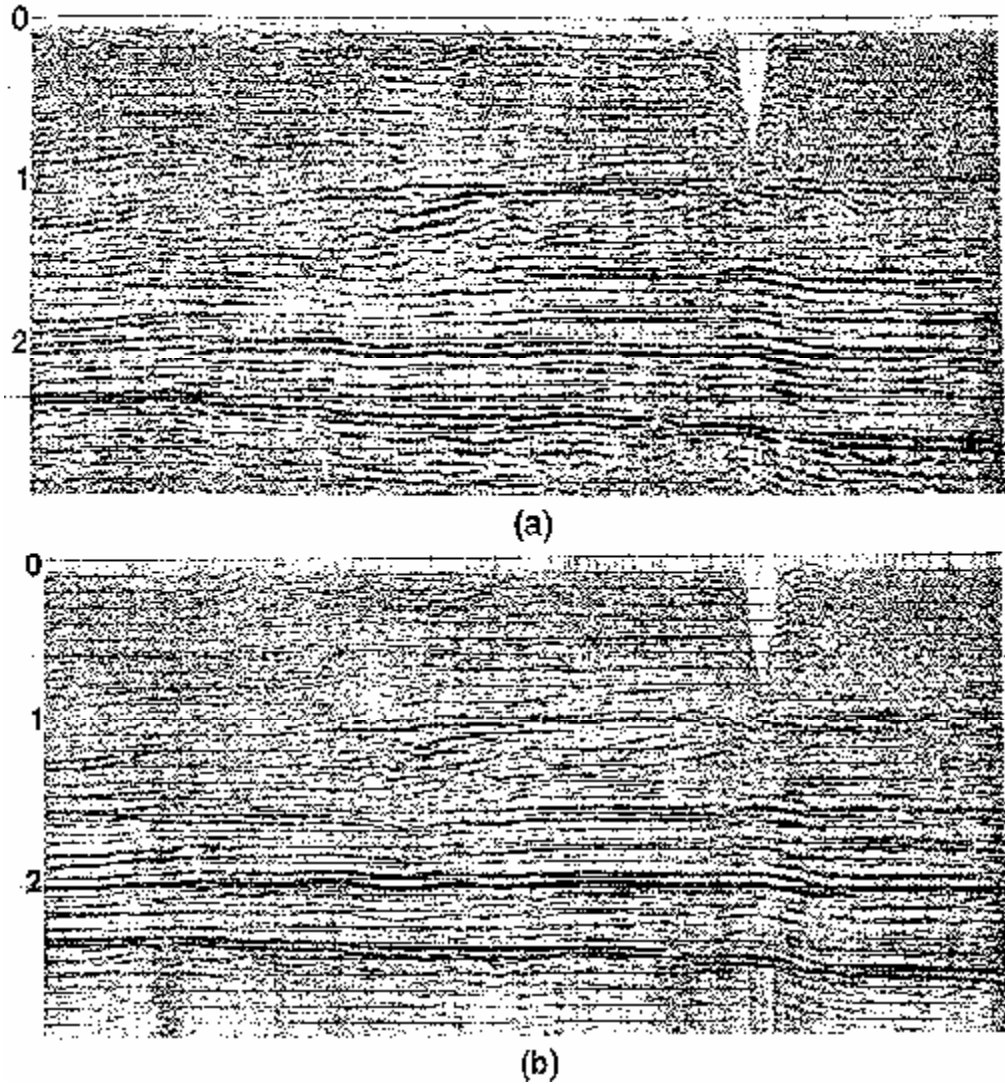


Рис.2-5 Деконволюция может выделять выпуклые отражения (b). Однако, на разрезе без деконволюции (a) отражения скрыты реверберирующей энергией. Выборки ОГТ, взятые для обоих разрезов, показаны на рис.2-4.

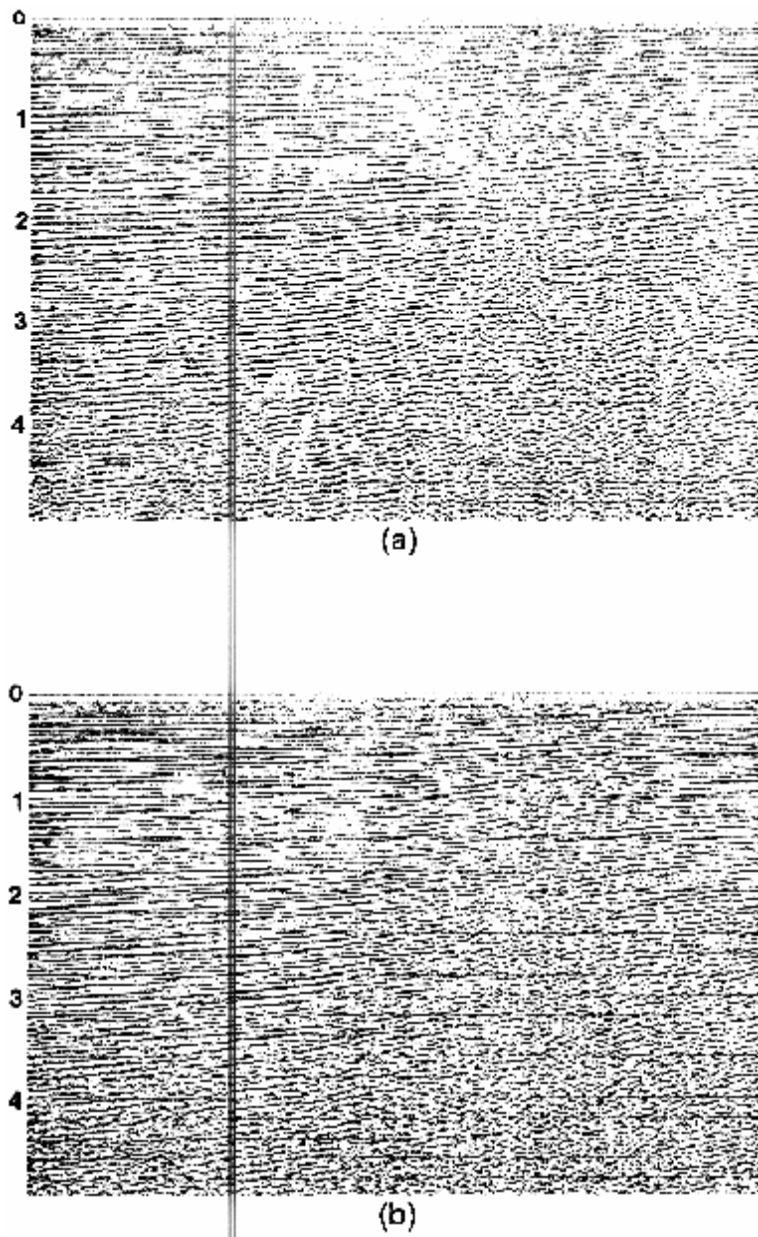


Рис.2-6 Суммы ОСТ (СМТ) без деконволюции перед суммированием (а); с деконволюцией сжатия перед суммированием (б). Деконволюция может удалить значительную часть энергии кратных волн из сейсмических данных. Данные представлены Elf Aquitane и партнерами.

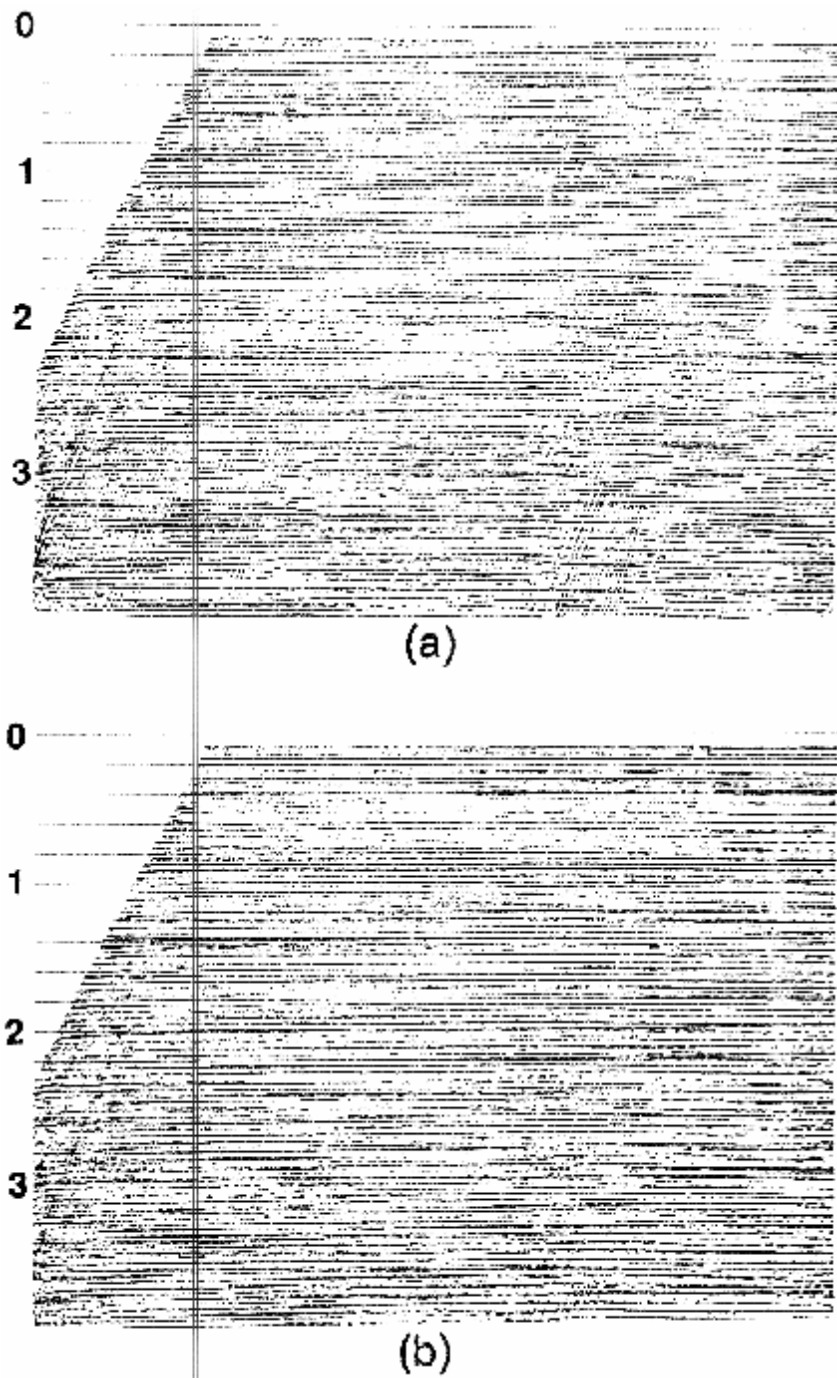


Рис.2-7 Суммы ОСТ без деконволюции перед суммированием (а); с деконволюцией сжатия перед суммированием. Сумма ОСТ без деконволюции содержит кратные волны всех типов. Деконволюция улучшила разрез? (Данные получены от Deminex Petroleum).

2.2 Модель фильтрации

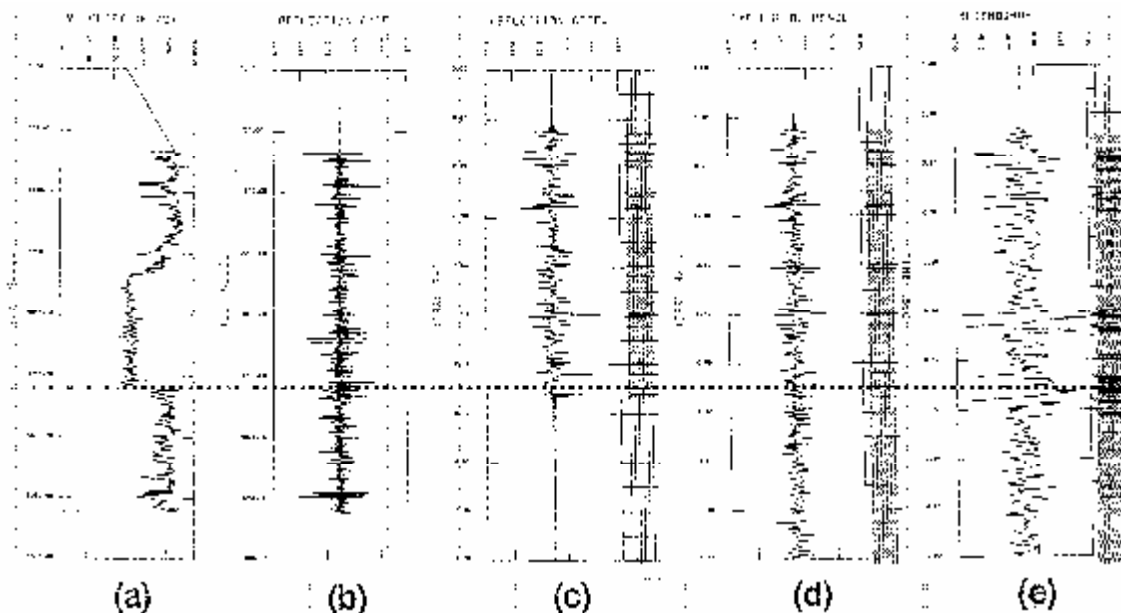


Рис.2-8 (а) Участок кривой АК; (б) последовательность коэффициентов отражения, выведенная по (а); (с) последовательность (б) после преобразования оси глубин в ось полного времени пробега; (d) импульсный отклик, который включает первичные отражения (с) и кратные волны; (е) синтетическая сейсмограмма, выведенная из (d) путем свертки с импульсом источника на рис.2-11. Одномерное сейсмическое моделирование означает получение (е) из (а). Деконволюция дает (d) и (с), а одномерное обращение означает получение (а) из (d). Идентифицируйте отражение на (а) и (б), которое соответствует всплеску на 0.5с на (с). Импульсный отклик (d) представляет собой соединение первичных отражений (с) и всех типов кратных волн.

На рис.2-8а показан участок кривой АК. Эта кривая представляет собой график интервальной скорости в функции глубины. Здесь скорости измерены в интервале 1000-5400 футов с шагом 2 фута. Скоростная функция экстраполирована на поверхность по линейному закону. Кривая АК содержит сильную низкочастотную компоненту с хорошо различимым блоковым характером, представляющим заметные изменения скорости. Эта низкочастотная компонента, которая обычно оценивается путем скоростного анализа выборок ОГТ (Раздел 3.3).

Во многих кривых АК низкочастотная компонента представляет собой выражение общего возрастания скорости с глубиной вследствие уплотнения. В некоторых кривых АК однако, низкочастотная компонента представляет блоковый характер (рис.2-8а), который обусловлен крупномасштабными литологическими изменениями. Основываясь на этом блоковом характере, мы можем определить слои с постоянной интервальной скоростью (таблица 2-1), каждый из которых может быть ассоциирован с геологической формацией (таблица 2-2).

Кривая АК имеет также высокочастотную компоненту, которая наложена на низкочастотную компоненту. Эти быстрые флуктуации можно отнести за счет свойств породы, которые по характеру являются локальными. Например, слой известняка может содержать прослойки глины и песка. Изменение пористости также могут влиять на интервальные скорости в пределах слоя породы. Отметим, что замеры ГИС имеют ограниченную точность; следовательно, некоторые высокочастотные вариации, в частности, ассоциированные с первым вступлением, которое является достаточно сильным

для того, чтобы включить в скважинном приборе один приемник, но не другой (перескок цикла), не вызваны изменениями литологии.

Замеры скорости и плотности по ГИС обеспечивают связь между сейсмическими данными и геологией разреза. Объясним взаимосвязь между замерами ГИС и зарегистрированной сейсмической трассой. Сейсмический импеданс определяется как произведение плотности и скорости. По замерам ГИС мы знаем, что вертикальный градиент плотности часто значительно меньше, чем вертикальный градиент скорости. Следовательно, мы часто допускаем, что контрастность импеданса двух слоев пород в значительной мере обусловлена контрастом скорости. Это допущение не всегда верно. Мы выходим из положения, поскольку градиент плотности обычно имеет тот же знак, что и градиент скорости. Следовательно, функция импеданса, выведенная по скоростной функции, должна быть корректной только в пределах масштабного коэффициента.

Первый ряд предположений, используемых для построения прямой модели для сейсмической трассы, выходит следующим образом:

1a Разрез состоит из горизонтальных слоев с постоянной скоростью.

2b Источник формирует плоскую продольную волну, которая падает на границы между слоями под углом 0° . В этих условиях поперечные волны не формируются.

Допущение 1a нарушается в участках, сложных в участках, сложных в структурном отношении и в участках с крупными изменениями фаций в латеральном направлении.

Табл. 2-1 Тренд интервальной скорости, полученный по данным АК на рис.2-8а.

Номер слоя	Интервальная скорость, фт/с	Интервальная глубина, фт
1	11000	000-2000
2	10000	2000-2250
3	18000	2250-2500
4	12600	2500-3275
5	10000	3275-5400

Табл. 2-2 Стратиграфическая идентификация, ассоциированная со слоями, приведенными в табл. 2-1.

Номер слоя	Литологическая единица
1	Ивазакит
2	Сланцеватый известняк с постепенным уменьшением содержания глины
3	Сланцеватый известняк
4	Песчаник
5	Доломит

* Скорость в этом слое постепенно уменьшается

Допущение 1b подразумевает, что должны быть использованы данные с нулевым выносом. Однако, нулевой вынос никогда не регистрируется. С другой стороны, если глубина границ слоев велика по сравнению с длиной косы, мы допускаем, что угол падения на данную границу мал и игнорируем зависимость угла от коэффициентов отражения. Исходя из допущений 1a и 1b, коэффициент отражения (для давления или односторонней нагрузки) c , который ассоциирован с границей между, слоями, предположим 1 и 2, можно определить как $c = (I_2 - I_1)/(I_2 + I_1)$, где I – сейсмический импеданс, ассоциированный с каждым слоем, который равен произведению плотности ρ на скорость v .

Если мы допустим также, что плотность не изменяется с глубиной или не изменяется в такой же мере, как скорость, то $c \approx (v_2 - v_1)/(v_2 + v_1)$. Для вертикального падения коэффициент отражения представляет собой отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей волны. Кроме того, по определению, коэффициент отражения выглядит как отношение изменения акустического импеданса к двойной величине среднего акустического импеданса. Если $v_2 > v_1$, коэффициент отражения будет положительным, а если $v_2 < v_1$, коэффициент отражения будет отрицательным. Последо-

вательность коэффициентов отражения $c(z)$, где z – переменная глубины, выведена из кривой АК $v(z)$ и показана на рис.2-8b.

Положение каждого всплеска дает глубину границы слоя, а величина каждого всплеска соответствует доле падающей плоской волны с единичной амплитудой, которая должна быть отражена от границы слоя.

Чтобы преобразовать последовательность коэффициентов отражения $c(z)$ (рис.2-8b), выведенную из кривой АК, в последовательность времен $c(t)$, выберите шаг дискретизации, например, 2мс. Затем, используя информацию о скорости в кривой (рис.2-8a), преобразуйте ось глубин в ось вертикального времени. Результат преобразования показан на рис.2-8с – в виде трассы, записанной способом отклонений и трассы, записанной способом переменной площади и отклонений (одна и та же трасса повторяется шесть раз, чтобы подчеркнуть сильные отражения). Последовательность коэффициентов отражения $c(t)$ представляет отражательную способность ряда фиктивных границ слоев, которые разделены временным интервалом, называемым частотой квантования. Эта модель разреза, которая имеет слои с одинаковым временем пробега (Goupillaud, 1961) используется постольку, поскольку сейсмические волны записываются во времени. Основные отражения происходят от границы между слоями 2 и 3, расположенной на $0.3с$ и от границы между слоями 4 и 5, расположенной около $0.5с$.

Пока последовательность коэффициентов отражения (рис.2-8с) состоит только из первичных отражений (энергии, отраженной только один раз). Чтобы получить полный одномерный отклик горизонтально-слоистой модели разреза (допущение 1а), необходимо включить кратные отражения всех типов (от поверхности, внутрипластовые и межпластовые). Если импульс источника представляет собой единичный импульс, сейсмограмма при нулевом выносе должна быть импульсным откликом разреза, который включает первичные и кратные отражения. Здесь для получения такого импульсного отклика используется метод Kunetz (Claerbout, 1976). Импульсный отклик, выведенный из последовательности коэффициентов отражения на рис.2-8с, показан на рис.2-8d способом переменной площади и отклонений.

Характерная продольная волна, созданная импульсным источником, таким как взрывной источник или воздушная пушка, называется сигнатурой источника. Все сигнатуры можно описать как импульсы конечной длины в ограниченной полосе частот; например, измеренная сигнатура источника Аквапульс (Aquapulse) на рис.2-9. По мере прохождения этого импульса в землю происходят две вещи. Первая: полная амплитуда затухает вследствие расхождения фронта волны. Вторая: частоты затухают вследствие эффекта поглощения пород (см. Раздел 1.5). Последовательное изменение импульса источника во времени и в глубине также показано на рис.2.9. В любой данный момент времени импульс не будет таким же, как в момент приведения источника в действие. Такое изменение формы волны, зависящее от времени, называется нестационарностью. Перед деконволюцией обычно применяется компенсация нестационарности. Расхождение фронта волны устраняется путем применения функции сферического расхождения (раздел 1.5). Затухание частоты компенсируется путем применения методик обработки, рассмотренных в Разделе 2.8. В результате простая модель фильтрации, рассмотренная здесь, не включает нестационарность. Это приводит к следующему допущению:

Допущение 2. Форма волны источника не изменяется по мере прохождения вглубь разреза, т.е. она является стационарной.

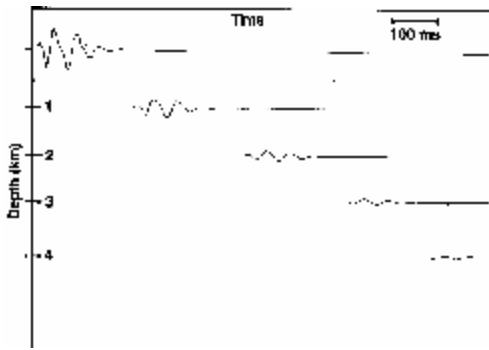


Рис.2.9 Импульс источника после того, как вступление принимает форму, показанную в левом верхнем углу. По мере прохождения импульса в разрезе уровень амплитуды понижается (геометрическое расхождение) и происходит потеря высоких частот (поглощение частот).

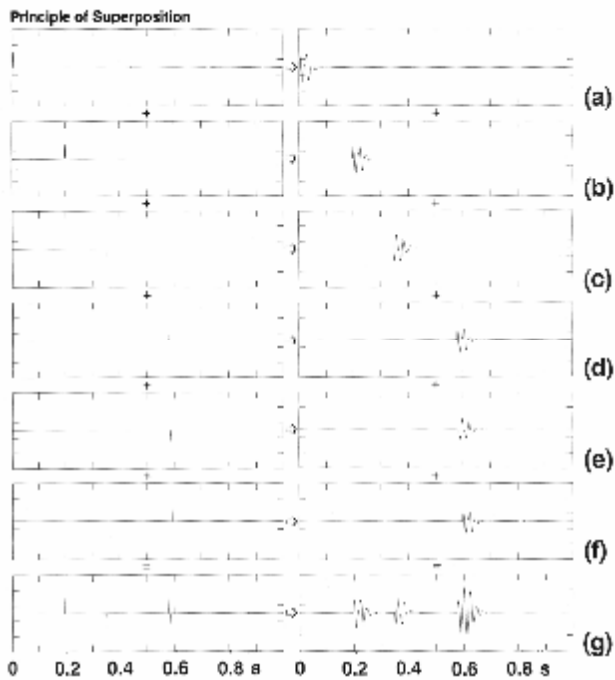


Рис.2.10 Импульс *a*, проходящий в глубину разреза, повторяет сам себя при встрече с отражающей поверхностью (b, c, d, e, f). В левой колонке представлены коэффициенты отражения, а в правой – отклик на импульс. Полученная в результате синтетическая сейсмограмма (справа внизу) представляет сглаженный (составной) отклик отражательной способности разреза (внизу слева) на импульс (вверху справа).

ражений на временах 0.2 и 0.35с мы идентифицируем две границы слоев. Однако, для того, чтобы идентифицировать три близко расположенные друг к другу отражающие границы по сложному отклику (около 0.6с на рис.2.10g), необходимо удалить форму волны источника; при этом будет получена последовательность рассредоточенных всплесков. Этот процесс удаления является противоположностью процесса фильтрации, используемого для получения отклика последовательности коэффициентов отражения на основной импульс. Следовательно, обратный процесс называется деконволюцией.

Сейчас может быть предложена модель фильтрации для записанной сейсмограммы. Предположим, что волна с сигнатурой источника (рис.2.10a) распространяется вертикально вниз и падает на границу слоя на времени полного пробега 0.2с. Коэффициент расхождения, ассоциированный с границей, представлен всплеском на рис.2-10b. В результате отражения импульс источника повторяет сам себя, умножаясь на коэффициент отражения. Если мы имеем ряд границ слоев, представленных отдельными всплесками на рис.2.10d – 2.10f, импульс повторяет сам себя на этих границах таким же образом. Если коэффициент отражения отрицательный, импульс повторяет сам себя с обращенной полярностью (рис.2.10e).

Рассмотрим группу коэффициентов отражения на рис.2.10g. Отклик этой последовательности рассредоточенных всплесков на основной импульс представляет собой наложение отдельных импульсных откликов. Этот линейный процесс называется принципом суперпозиции; он достигается путем основного импульса с последовательностью коэффициентов отражения (рис.2.10g). Процесс фильтрации уже был продемонстрирован на –числовом примере в Разделе 1.2.3. Отклик, показанный на рис.2.10g, имеет некоторые важные характеристики. Обратите внимание, что для от-

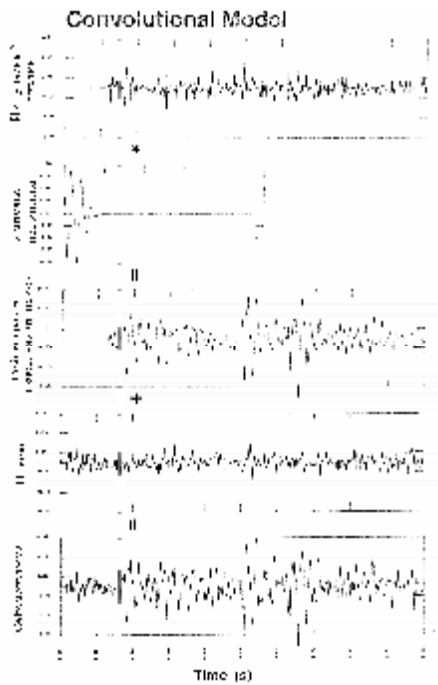


Рис.2.11 Верхнее изображение – то же, что на рис.2.8d. Звездочка обозначает свертку. Зарегистрированная сейсмограмма (нижнее изображение) представляет собой сумму сейсмограммы, свободной от помех и трассы помех. Этот рисунок является эквивалентом ур. (2.1).

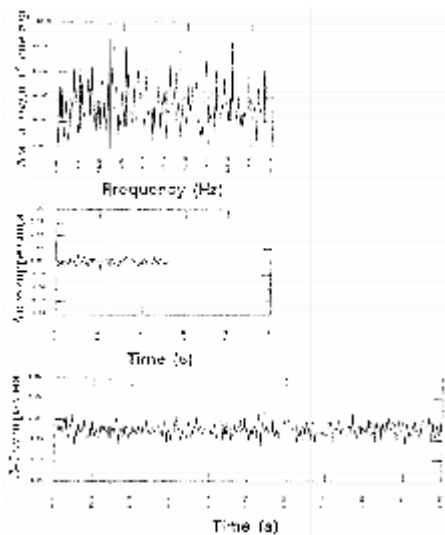


Рис.2.12 Последовательность случайных помех с бесконечной длиной имеет плоский амплитудный спектр и автокорреллограмму, которая равна 0 на всех задержках кроме нулевой. Что отличает случайный сигнал от единичного импульса (1, 0, 0,...)?

показаны на рис.2-12. Последовательность случайных помех имеет белый спектр, который содержит все частоты. В свою очередь, это подразумевает, что функция автокорреляции представляет собой единичный импульс при нулевой задержке и нуль при всех

Применим принцип суперпозиции к импульсному отклику, выведенному из кривой АК на рис.2.8d. Свертка сигнатуры источника с импульсным откликом дает синтетическую сейсмограмму, показанную на рис.2.11.

Синтетическая сейсмограмма показана также на рис.2.8e. Эта одномерная сейсмограмма с нулевым выносом свободна от случайных помех. Для более реалистичного представления сейсмограммы добавлена помеха (рис.2-11). Модель фильтрации зарегистрированной сейсмограммы, является сейчас законченной. “Компоновочные блоки” модели описываются уравнением:

$$x(t) = w(t)*e(t)+n(t), \quad (2.1)$$

где:

$x(t)$ = зарегистрированная сейсмограмма

$w(t)$ = основной сейсмический импульс

$e(t)$ = импульсный отклик разреза

$n(t)$ = случайная помеха

* = обозначает деконволюцию.

Уравнение (2.1) представляет собой математическую формулировку модели фильтрации, описанной на рис.2.11. Деконволюция пытается восстановить последовательность коэффициентов отражения (или импульсный отклик) по зарегистрированной сейсмограмме.

Существуют альтернативы модели фильтрации, заданной уравнением (2.1). Одна альтернатива, которая по сравнению с вышеприведенной формулировкой, точно характеризует развитие событий в разрезе, описана в Приложении В.6. Тем не менее именно вышеприведенная формулировка является наиболее приемлемой моделью для одномерной сейсмограммы.

Случайная помеха, присутствующая в зарегистрированной сейсмограмме, имеет несколько источников. Внешние источники – это движения, вызванные ветром, помехи, обусловленные окружающей средой или сейсмоприемник, слабо закрепленный в грунте. Причина внутренних источников может заключаться в регистрирующей аппаратуре. Сейсмограмма помех и ее характеристики

остальных задержках. Из рис.2.12 можно видеть, что эти требования к характеристикам вполне применимо удовлетворяются.

Сейчас исследуем уравнение для модели фильтрации. Все, что известно в ур. (2.1) – это $x(t)$, т.е. зарегистрированная сейсмограмма. Импульсный отклик разреза $e(t)$ должен быть рассчитан везде, кроме скважины с данными АК хорошего качества. Форма волны источника $w(t)$ тоже, как правило, неизвестна, хотя в определенных случаях она все же известна, например, можно замерить сигнатуру расстановки воздушных пушек. Однако, измеряется только форма волны в последовательности возбуждения расстановки источников, а не импульс, который записывается сейсмоприемником. Наконец, отсутствуют априорные данные о случайной помехе $n(t)$.

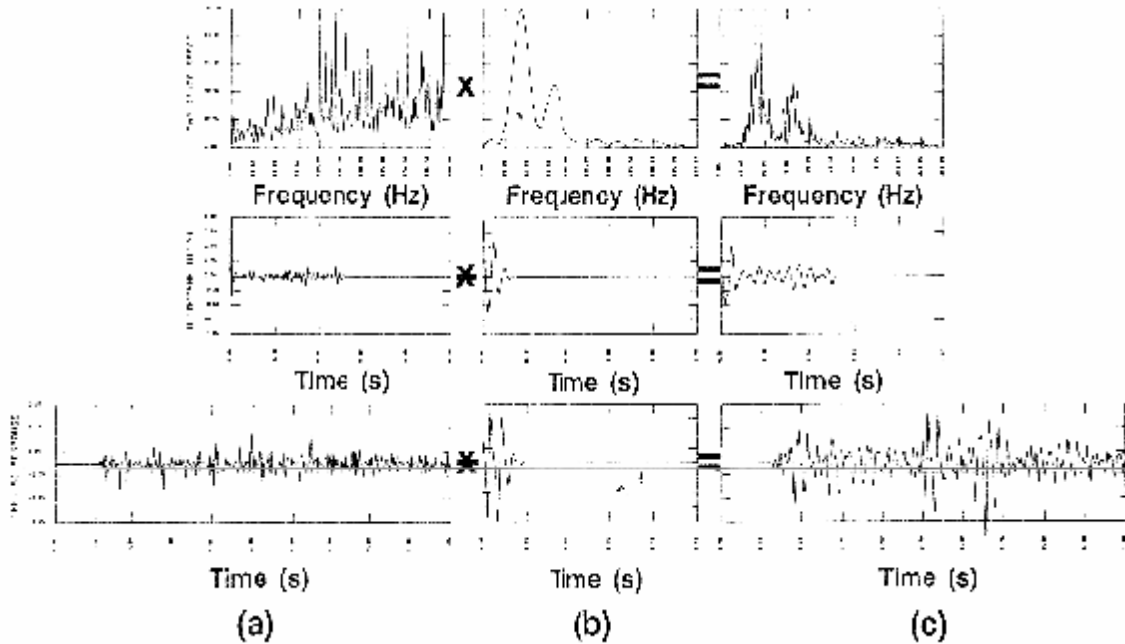


Рис.2.13 Свертка импульсного отклика разреза (а) с импульсом (b) (ур.2.2) дает сейсмограмму (с) (нижний ряд изображений). Этот процесс является также фильтрационным в единицах коррелограмм (средний ряд изображений) и мультипликативным в единицах амплитуд спектров (верхний ряд изображений). Допущение 5 (о случайном характере отражательной способности) основывается на сходстве между автокоррелограмм и амплитудными спектрами импульсного отклика и импульса.

Сейчас у нас имеются три неизвестных, одно известное и одно простое уравнение (2.1). Может ли быть решена эта задача? Пессимисты считают “нет”. Однако, на практике деконволюция применяется к сейсмическим данным в качестве составной части общепринятой обработки. Более того, с годами деконволюция стала эффективным методом повышения разрешающей способности. Чтобы найти неизвестное $e(t)$, необходимо сделать дальнейшие допущения.

Допущение 3 Компонента помех $n(t)$ равна 0.

Допущение 4 Форма волны источника известна.

При этих допущениях мы имеем одно уравнение (2.1) и одно неизвестное. В реальных условиях на одно из двух вышеприведенных допущений не является действительным. По этому модель фильтрации рассматривается далее в следующем разделе, в области частот, чтобы ослабить допущение 4. Если форма волны источника известна (например, зарегистрированная сигнатура источника), решение задачи деконволюции является детерминистическим. В разделе 2.3 рассматривается один такой метод реше-

ния для $e(t)$. Если форма волны источника неизвестна (обычный случай), решение задачи деконволюции является статистическим. Теория прогноза Винера (Раздел 2.6) предоставляет один метод статистической деконволюции.

2.2.1 Модель фильтрации в частотной области

Модель фильтрации для сейсмограммы, свободной от помех (допущение 3), представлена уравнением:

$$x(t) = w(t) * e(t) \quad (2.2)$$

Свертка во временной области эквивалентна умножению в области частот (Раздел 1.2.3). В частности, амплитудный спектр сейсмограммы равен произведению амплитудного спектра сейсмического импульса и импульсного отклика разреза [уравнение (B.5)]. На рис.2.13 показаны амплитудные спектры (верхний ряд) импульсного отклика $e(t)$, сейсмического импульса $w(t)$ и сейсмограммы $x(t)$. Импульсный отклик такой же, какой показан на рис.2.8d. Сходство общей формы амплитудного спектра импульса и сейсмограммы является очевидной. На самом деле, сглаженная версия амплитудного спектра сейсмограммы почти неотличима от амплитудного спектра импульса. В общем случае считается, что быстрые флуктуации, наблюдаемые в амплитудном спектре сейсмограммы, являются проявлением импульсного отклика разреза, тогда как основная форма в первую очередь ассоциирована с импульсом источника.

С математической точки зрения сходство амплитудных спектров сейсмограммы и импульса предполагает, что амплитудный спектр импульсного отклика разреза должен быть почти плоским (см. Приложение B.1). Исследуя амплитудный спектр импульсного отклика на рис.1.13, мы видим, что он занимает, в сущности, всю ширину спектральной полосы. Как видно на рис.2.12, последовательность времен, которая представляет случайный процесс, имеет плоский (белый) спектр по всей ширине спектральной полосы. При более подробном исследовании амплитудного спектра импульсного отклика на рис.2.13 можно видеть, что он не является полностью плоским; высокочастотные компоненты проявляют тенденцию к постепенному усилению. Следовательно, отражательная способность не является полностью случайным процессом. Это наблюдалось в спектральных свойствах функций отражательной способности, выведенных из кривых АК (Walden и Hosken, 1984)

Исследуем функции (средний ряд на рис.2.13) импульсного отклика, сейсмического импульса и синтетической сейсмограммы. Отметим сходство ФАК основного импульса и сейсмограммы. Это сходство ограничивается задержками, для которых автокорреляция импульса не равна 0. С математической точки зрения сходство автокоррелограмм импульса и сейсмограммы предполагает, что импульсный отклик имеет функцию автокорреляции, которая мала на всех задержках, кроме нулевой (см. Приложение B.1). ФАК случайных помех на рис.2.12 также имеет сходные характеристики. Имеется, однако, одно второстепенное различие. Имеется, однако, одно второстепенное различие. При сопоставлении рис.2.12 и 2.13 можно видеть, что ФАК импульсного отклика имеет значительную по величине отрицательную задержку, следующую за нулевой задержкой, чего не наблюдается для ФАК случайных помех. Положительный пик (нулевая задержка), сопровождаемый меньшим по величине отрицательным пиком в автокоррелограмме импульсного отклика обусловлен поведением спектра, рассмотренным выше. В частности, положительный пик меньшей величины вместе действуют как дробный дифференциальный оператор, который имеет эффект линейного изменения (gamr effect) в амплитудном спектре (см. Приложение A).

Приведенные выше наблюдения, выполненные на амплитудном спектре и функциях автокорреляции (рис.2.13) подразумевают, что отражательная способность не является полностью случайным процессом. Тем не менее, почти всегда делается следующее допущение об отражательной способности с целью устранения допущения 4.

Допущение 5. Отражательная способность представляет собой случайный процесс. Это подразумевает, что сейсмограмма имеет характеристики сейсмического импульса в смысле сходства их ФАК и амплитудных спектров.

Это допущение спектров является ключевым в реализации прогнозируемой деконволюции; оно позволяет вместо неизвестной ФАК сейсмического импульса подставить известную ФАК сейсмограммы. В разделе 2.6 мы увидим, что как результат допущения 5, непосредственно по ФАК сейсмограмме можно рассчитать обратный фильтр. Для этого типа деконволюции не требуется допущение 4, которое в действительности никогда не соблюдается.

2.3 Обратная фильтрация

В операторе фильтра $a(t)$ было определено, что свертка $a(t)$ с известной сейсмограммой $x(t)$ дает оценку импульсного отклика разреза $e(t)$:

$$e(t) = a(t) * x(t) \quad (2.3)$$

Подставив уравнение (2.3) в уравнение (2.2), получим:

$$x(t) = w(t) * a(t) * x(t) \quad (2.4)$$

При удалении $x(t)$ из обеих частей уравнения получаем следующее:

$$d(t) = w(t) * a(t), \quad (2.5)$$

где $d(t)$ представляет дельта функцию Кронекера.

$$\delta(t) = \begin{cases} 1, & t = 0 \\ 0, & \text{в любом другом случае.} \end{cases} \quad 2.6$$

Решая уравнение (2.5) для оператора фильтра $a(t)$, получаем:

$$a(t) = d(t) * w(t) \quad 2.7$$

где $w(t)$ – обратная величина сейсмического импульса $w(t)$, которая считается известной на данный момент времени. Следовательно, оператор фильтра, необходимый для расчета импульсного отклика разреза по зарегистрированной сейсмограмме, превращается в математическую обратную величину сейсмического импульса. Уравнение (2.5) подразумевает, что обратный фильтр преобразует основной импульс в единичный импульс при $t = 0$. Аналогично, обратный фильтр преобразует сейсмограмму в последовательность единичных импульсов, которая определяет импульсный отклик разреза. Сле-

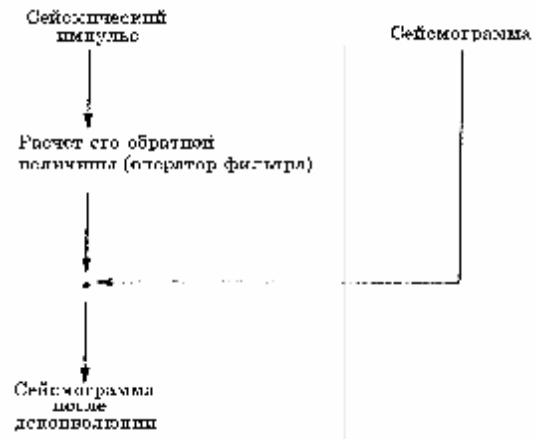


Рис.2.14 Блок-схема обратной фильтрации.

довательно, обратная фильтрация представляет собой метод деконволюции при условии, что форма волны источника (детерминистическая деконволюция). Шаги обратной фильтрации показан на рис.2-14.

Как мы рассчитываем обратную величину сейсмического импульса? Это выполняется математическим путем с применением z -преобразования. Например, пусть основной импульс представляет собой двухточечную временную последовательность, заданную как $(1, -\frac{1}{2})$. Z -преобразование этого импульса определяется следующим полиномом:

$$W(z) = 1 - (\frac{1}{2})z. \quad 2.8$$

Степень переменной z представляет собой количество единичных временных задержек, ассоциированное с каждой выборкой в последовательности. Первый элемент имеет нулевую задержку, поэтому z возводится в нулевую степень. Второй элемент имеет единичную задержку, поэтому z возводится в степень 1. Таким образом, z -преобразование временной последовательности представляет собой полином относительно z , коэффициенты которого представляют собой значения временных выборок.

Между z -преобразованием и преобразованием Фурье существует естественная взаимосвязь (Приложение А). Переменная z определяется как

$$z = e^{-i\omega\Delta t}$$

где ω - угловая частота, а Δt - шаг дискретизации.

Обратная величина импульса $w'(t)$ получается путем многочленного деления z^{-1} на $W(z)$ (уравнение 2.8):

$$W'(z) = 1/[1 - \frac{1}{2}z] = 1 + (\frac{1}{2})z + (\frac{1}{4})z^2 + \dots \quad (2.9)$$

Обратная временная последовательность представляет собой коэффициенты $W'(z)$, т.е. $[1, \frac{1}{2}z, (\frac{1}{4}), \dots]$; это также оператор фильтра $a(t)$. Отметим, что он имеет бесконечное количество коэффициентов, которые быстро уменьшаются. Как в любом процессе фильтрации, на практике оператор урезается.

Рассмотрим сначала двухточечный оператор $[1, (\frac{1}{2})]$. Как показано в таблице в таблице 2.3, свертка этого оператора с импульсом дает результат $[1, 0, (-\frac{1}{2})]$. Идеальный результат представляет собой единичный импульс с нулевой задержкой $(1, 0, 0)$. Хотя результат не является идеальным, он ближе к единичному импульсу, чем входной импульс $[1, (\frac{1}{2})]$.

Таблица 2.3 Свертка урезанного обратного фильтра $[1, (-\frac{1}{2})]$ с входным импульсом $[1, (\frac{1}{2})]$.

Можно ли улучшить результат, включив еще один коэффициент в обратный фильтр, как показано в таблице 2.4? На выходе получаем $[1, 0, 0, (-\frac{1}{8})]$. Это более точное представление результата $[1, 0, 0, 0]$, нежели то, которое дает двухточечный фильтр.

Обратите внимание, что из сигнала, получаемого на выходе трехточечного фильтра,

	1	$-\frac{1}{2}$	Output
$\frac{1}{2}$	1		1
	$\frac{1}{2}$	1	0
		$\frac{1}{2}$	1
			$-\frac{1}{4}$

Таблица 2.4 Свертка урезанного обратного фильтра $[1, (\frac{1}{2}), (\frac{1}{4})]$ с входным импульсом $[1, (-\frac{1}{2})]$.

	1	$\frac{1}{2}$	Output
$\frac{1}{4}$	1		1
	$\frac{1}{2}$	1	0
		$\frac{1}{2}$	1
			$-\frac{1}{8}$

входного импульса $[(-\frac{1}{2}), 1]$? Здесь многочленное деление дает расходящийся ряд $(-2, -4, -8, \dots)$. Урежем этот ряд и свернем двухточечный оператор с входным импульсом $[(-\frac{1}{2}), 1]$, как показано в таблице 2.5.

Действительный результат $(-1, 0, 4)$, тогда как желаемым результатом является $(1, 0, 0)$. Результат не только далек от требуемого, он также менее близок к единичному импульсу, чем входной импульс $[(-\frac{1}{2}), 1]$. Причина этого заключается в том, что коэффициенты обратного фильтра скорее возрастают во времени, а не убывают. При урезании большие коэффициенты исключаются из расчета. Если в вышеприведенном примере мы возьмем коэффициент -8 , получаем $(1, 0, 0, -8)$, что также является плохой аппроксимацией нужного результата $(1, 0, 0, 0)$.

2.4 Обратная фильтрация по методу наименьших квадратов

Когда входной импульс имеет вид, близкий к требуемому, например, $(1, -\frac{1}{2})$, в отличие от $(-\frac{1}{2}, 1)$, обратная фильтрация, описанная в Разделе 2.3, дает хорошую аппроксимацию единичного импульса. Можем ли мы улучшить результат? Сформулируем задачу: при данном входном импульсе $[1, (-\frac{1}{2})]$ найти такой двухэлементный фильтр (a, b) , чтобы ошибка между действительным и желаемым результатами $(1, 0, 0)$ была минимальной с точки зрения метода наименьших квадратов. Рассчитаем действительный результат, свернув фильтр (a, b) с входным импульсом $[1, (-\frac{1}{2})]$. В таблице 2.6 показана такая свертка.

Кумулятивная энергия ошибка L определяется как сумма квадратов разностей коэффициентов действительного и желаемого результатов:

утечка энергии в ненулевые задержки уменьшается; следовательно, этот сигнал ближе к единичному импульсу. По мере добавления элементов в обратный фильтр сигнал на выходе становится ближе к единичному импульсу при нулевой задержке. Поскольку количество точек, допускаемое в длине оператора, является ограниченным, на практике результат никогда не представляет собой совершенный единичный импульс.

Обратная величина входного импульса $[1, (-\frac{1}{2})]$ имеет коэффициенты, которые быстро уменьшаются до 0. Что можно сказать об обратной величине

$$L = (a - 1)^2 + (b - a/2)^2 + (-b/2) \quad (2.10)$$

Задача состоит в том, чтобы найти такие коэффициенты (a, b) , чтобы L принимала минимальное значение. Это требует изменения L относительно коэффициентов (a, b) (Приложение В.5). Упростив уравнение (2.10), взяв частные производные L по a и b , и задав результаты равными 0, получаем:

$$\left(\frac{\partial}{\partial a}\right)L - b = 2, \quad (2.11a)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial b}\right)L - a = 0, \quad (2.11b)$$

Имеется два уравнения и два неизвестных: коэффициенты фильтра (a, b) . Так называемую нормальную систему уравнений (2.11a) и (2.11b) можно привести в следующую матричную форму:

$$\begin{bmatrix} \frac{5}{2} & 1 \\ -1 & \frac{3}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Решив эту матрицу относительно коэффициентов фильтра, получаем $(a, b) = \left[\left(\frac{20}{21}, \frac{8}{21}\right)\right]$. Этот фильтр применяется ко входному импульсу, как показано в таблице 2.7.

Таблица 2.5 Свертка урезанного обратного фильтра $[(-2, -4)]$ с входным импульсом $[(-0.5), 1]$

	$-\frac{1}{2}$	1	Output
-4	-2		1
	-4	-2	0
		-4	-2
			-4

Таблица 2.6 Свертка фильтра (a, b) с входным импульсом $[1, (-0.5)]$.

1	$-\frac{1}{2}$	Actual Output	Desired Output
b	a	a	1
b	a	$b \cdot a/2$	0
	b	$b/2$	0

Чтобы количественно охарактеризовать близость этого результата к единичному импульсу и сопоставить его с обратным фильтром в таблице 2.3, рассчитаем энергию ошибок, в обоих случаях (таблица 2.8). Фильтр, работающий методом наименьших квадратов, дает меньшую ошибку при попытке преобразования входного импульса $[1, (-\frac{1}{2})]$ в единичный импульс при нулевой задержке $(1, 0, 0)$.

Исследуем рабочие характеристики фильтра, работающего методом наименьших квадратов с входным импульсом $[(-\frac{1}{2}), 1]$. Отметим, что обратный фильтр дал для этого импульса неустойчивого результаты (таблица 2.5). Нам нужно найти двухэлементный фильтр (a, b) , который при свертывании с входным импульсом $[(-\frac{1}{2}), 1]$ дает оценку требуемого единичного результата $(1, 0, 0)$. Как и ранее, ошибка между действительным и желаемым результатами должна быть минимальной (таблица 2.9).

Кумулятивная энергия ошибки определяется уравнением:

$$L = (-a/2 - 1)^2 + (-b/2 + a)^2 + b^2 \quad (2.13)$$

Упростив, взяв частные производные L по a и b и задав результаты равными нулю, получаем:

$$\left(\frac{5}{2}\right)a - b = -1, \quad (2.14a)$$

$$\left(\frac{5}{2}\right)b - a = 0. \quad (2.14b)$$

В матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \frac{5}{2} & -1 \\ -1 & \frac{5}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Таблица 2.7 Свертка входного импульса $[1, (-0.5)]$ с коэффициентами фильтра $[\frac{20}{21}, (\frac{8}{21})]$.

$(\frac{8}{21})]$.

	1	$\frac{1}{2}$	Output
$\frac{3}{21}$	$\frac{20}{21}$	$\frac{8}{21}$	$\frac{20}{21}$
	$\frac{8}{21}$	$\frac{20}{21}$	$-\frac{2}{21}$
		$\frac{20}{21}$	$\frac{8}{21}$

Таблица 2.8 Ошибки при двухэлементной обратной фильтрации и фильтрации методом наименьших квадратов.

	На входе: $[1, (-\frac{1}{2})]$ Желаемый результат: $(1, 0, 0)$			Ошибка отклика
	Действительный результат			
Обратный фильтр	1	0	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{6}$
Фильтр, действующий методом наименьших квадратов	$\frac{20}{21}$	$-\frac{2}{21}$	$\frac{8}{21}$	$\frac{1}{21}$

Решая относительно коэффициентов фильтра, получаем $(a, b) = [(-\frac{10}{21}), (-\frac{4}{21})]$.

В таблице 2.10 показан результат применения этого фильтра к входному импульсу.

В таблице 2.11 показан результат применения обратного фильтра и фильтра, действующего по методу наименьших квадратов, причем ошибка, допущенная обратным фильтром намного больше. Однако, для входного импульса $[(-\frac{1}{2}), 1]$ оба фильтра дают большие ошибки (таблица 2.11) сравнительно с ошибками для импульса $[1, (-\frac{1}{2})]$ (таблица 2.8). Причина этого рассматривается в Разделе 2.5.

2.5 Минимально-фазовый импульс

В двух предыдущих разделах для числового анализа обратного фильтра, действующего по принципу наименьших квадратов использовались два входных импульса:

$[1, (-\frac{1}{2})]$ и $[(-\frac{1}{2}), 1]$. Результаты показывают, что ошибка при преобразовании первого

импульса в единичный импульс с нулевой задержкой меньше, чем при преобразовании второго импульса (см. таблицы 2.8 и 2.11). Первый импульс ближе к одиночному импульсу с нулевой задержкой $(1, 0, 0)$, чем второй импульс. С другой стороны, второй импульс ближе к единичному импульсу с нулевой задержкой $(0, 1, 0)$, чем первый импульс. Мы приходим к выводу, что ошибка уменьшается, если результат сильно напоминает распределение энергии во входной последовательности. Первый импульс ха-

рактически характеризуется большей энергией в начале, а у второго импульса основная энергия сосредоточена в конце.

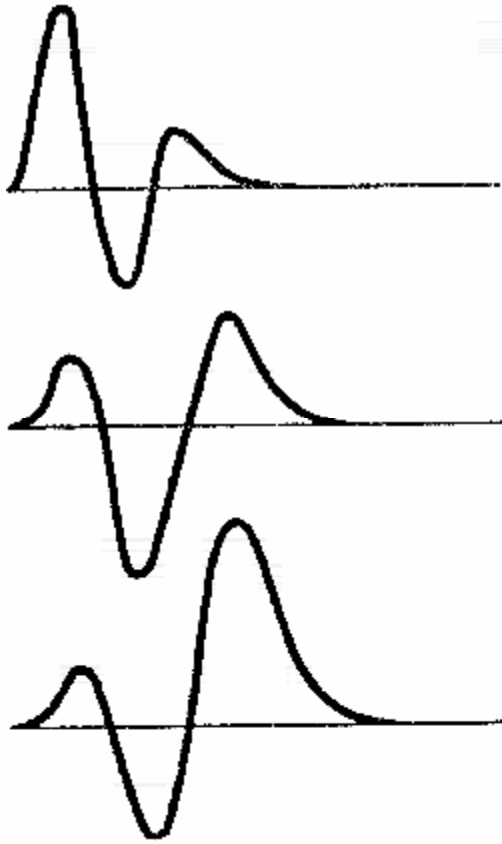


Рис.2.15 Импульс имеет конечную длину. Если максимум энергии приходится на начало импульса, он является минимально-фазовым (вверху). Если энергия сконцентрирована главным образом в середине импульса, он является смешанно-фазовым (в середине). Если энергия сконцентрирована в конце импульса, он является максимально-фазовым. Количественный анализ этого показан на рис.2.16.

На рис.2.15 показаны три импульса с одним и тем же амплитудным спектром, но с различными фазовыми спектрами с задержкой. Основная энергия верхнего импульса сконцентрирована в начале, у среднего импульса – в центре и у нижнего – в конце. Из Раздела 1.2.2 мы знаем, что форма импульса может быть модифицирована путем изменения фазового спектра при постоянном амплитудном спектре.

Рис.2.9 Свертка фильтра (a, b) с входным импульсом [(-0.5), 1].

	$-\frac{1}{2}$	1	Actual Output	Desired Output
b	a		$\frac{1}{2}$	1
	b	a	$-\frac{1}{2}$	0
		b	a	0

Рис.2.10 Свертка входного импульса [(-0.5), 1] с коэффициентом фильтра $[(-\frac{10}{21}), (-\frac{4}{21})]$.

	$-\frac{1}{2}$	1	Output
$-\frac{4}{21}$	$-\frac{10}{21}$		$\frac{5}{21}$
	$-\frac{4}{21}$	$-\frac{10}{21}$	$-\frac{8}{21}$
	$-\frac{4}{21}$	$-\frac{10}{21}$	$\frac{4}{21}$

Рис.2.11 Ошибки, допущенные при двухэлементной обратной фильтрации и фильтрации методом наименьших квадратов.

Платформа: [(-.5), 1]

Желаемый результат: (1, 0, 0)

	Действительный результат			Потеря энергии
Исходный фильтр	1	0	4	16
Фитинг с помощью метода наименьших квадратов	$\frac{4}{21}$	$\frac{10}{21}$	$\frac{4}{21}$	$\frac{16}{21}$

Рис.2.12 Кумулятивная энергия

Импульс	Кумулятивная энергия на промежуточной выборке		
	0	1	2
A	16	16	17
B	4	14	17
C	4	12	17
D	1	1	17

Мы говорим, что импульс минимально-фазовый, если максимум его энергии сконцентрирован в начале. Аналогично, импульс является максимально-фазовым, если максимальная энергия сосредоточена в конце этого импульса. Наконец, во всех промежуточных ситуациях импульс является смешанно-фазовым. Отметим, что импульс оп-

ределяется как переходная форма волны конечной длины, т.е. импульс является реализуемым. Минимально-фазовый импульс является односторонним в том смысле, что он нулевой до времени $t = 0$. Импульс, равный нулю для $t < 0$, называется каузальным (causal). Эти определения согласуются с пониманием того, что физические системы реагируют на возбуждение только после возбуждения. Отклик также имеет конечную продолжительность. Можно сделать вывод, что минимально-фазовый импульс является реализуемым и казуальным. Эти наблюдения можно охарактеризовать количественно, рассматривая четыре трехточечных импульса (Robinson, 1966):

- A: (4, 0, -1)
- B: (2, 3, -2)
- C: (-2, 3, 2)
- D: (-1, 0, 4)

Рассчитаем кумулятивную энергию каждого импульса в какой-либо один момент времени. Кумулятивная энергия рассчитывается путем сложения амплитуд, возведенных во вторую степень, как показано на рис.2.16. Отметим, что все четыре импульса характеризуются одинаковой полной энергией (17 единиц), но скорость повышения энергии у каждого импульса своя. Например, в случае импульса А энергия возрастает почти до полной величины при самой первой временной задержке. Для импульсов В и С энергия возрастает относительно медленно. Наконец, импульс D характеризуется наименьшей скоростью возрастания энергии. На рис.2.16 можно видеть, что кривые энергии для импульсов А и D образуют верхнюю и нижнюю границы. Импульс А имеет наименьшую задержку энергии, а импульс D – наибольшую. При данном фиксированном амплитудном спектре, как на рис.2.17, импульс с наименьшей задержкой энергии называется минимально задержанным, а импульс с наибольшей задержкой энергии называется максимально задержанным. Это является основой теоремы задержки энергии Робинсона: минимально-фазовый импульс имеет наименьшую задержку энергии.

Временная задержка эквивалентна задержке по фазе. На рис.2.18 показаны фазовые спектры четырех импульсов (Robinson, 1966). Отметим, что импульс А характеризуется наименьшим изменением по оси частот и мы говорим, что это минимально-фазовый импульс. Импульс D характеризуется наибольшим изменением, и мы говорим, что это максимально-фазовый импульс. Наконец, импульсы В и С характеризуются изменениями большими, чем импульс А и меньшими, чем импульс D; следовательно, они являются смешанно-фазовыми. Поскольку все четыре импульса имеют один и тот же амплитудный спектр (рис.2.17) и энергетический спектр, они должны иметь один и ту же ФАК. Это можно видеть из таблицы 2.13, где сведение в таблицы только одна сторона ФАК, поскольку последовательность реального времени имеет симметричную ФАК (Раздел 1.2.3).

Отметим, что нулевая задержка на ФАК равна полной энергии, содержащейся в каждом импульсе, т.е. 17 единиц. Это действительно для любого импульса; площадь под кривой энергетического спектра равна величине нулевой задержки ФАК, это утверждается теоремой Парсеваля (Приложение А).

Процесс, посредством которого сейсмический импульс сжимается в единичный импульс с нулевой задержкой, деконволюцией сжатия. В Разделах 2.3 и 2.4 были рассмотрены фильтры, предназначенные для достижения этой цели. Их рабочие характеристики зависят не только от длины (сравните результаты двух- и трехточечного фильтров в Разделе 2.3), но от того, является ли входной импульс минимально-фазовым. Оператор деконволюции является результатом обращения импульса. Если импульс был минимально-фазовым, результатом деконволюции также будет устойчивый минимально-фазовый импульс. Термин “устойчивый” означает, что коэффициенты фильтра образуют сходящийся ряд. В частности, коэффициенты убывают во времени (и

равны нулю при $t = \infty$); следовательно, фильтр характеризуется конечной энергией. Это относится к импульсу $[1, (-\frac{1}{2})]$ результат обращения которого $[1, (\frac{1}{2}), (\frac{1}{4}), \dots]$. Результат обращения представляет собой устойчивый фильтр деконволюции сжатия. С другой стороны, если импульс был минимально-фазовым, результат его обращения не будет устойчивым.

Таблица 2.13 Задержка ФАК А, В, С, D.

Wavelet A				Output
4	0	-1		17
4	0	-1		0
	4	0	-1	-4
Wavelet B				Output
2	3	-2		17
2	3	-2		0
	2	3	-2	-4
Wavelet C				Output
-2	3	2		17
-2	3	2		0
	-2	3	2	-4
Wavelet D				Output
-1	0	4		17
-1	0	4		0
	-1	0	4	-4

Таблица 2.14 Задержка ФАК входного импульса $[1, (-0.5)]$.

		Output
1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{5}{4}$
1	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
	1	$-\frac{1}{2}$

Таблица 2.15 Задержка ФВК желаемого результата $(1, 0, 0)$ с входным импульсом $[1, (-0.5)]$.

			Output
1	0	0	1
1	$-\frac{1}{2}$		0
	1	$-\frac{1}{2}$	

Это действительно для импульса $[(-\frac{1}{2}), 1]$, результат обращения которого задается расходящимся рядом $[-2, -4, -8, \dots]$. Наконец, смешанно-фазовый импульс не имеет устойчивого результата обращения. Эта дискуссия приводит нас к допущению б.

Допущение 6. Сейсмический импульс является минимально-фазовым. Следовательно, результат его обращения также будет минимально-фазовым.

Это допущение требуется для деконволюции сжатия. В Разделе 2.6 мы увидим, что импульс может быть преобразован в задержанный единичный импульс, даже если он не является минимально-фазовым.

2.6 Оптимальный фильтр Винера.

Вернемся к желательному результату, который рассматривается при исследовании обратного фильтра и фильтра, действующего методом наименьших квадратов, т.е. единичный импульс с нулевой задержкой (1, 0, 0). Автокорреляция входного импульса $[1, (-\frac{1}{2})]$ показана в таблице 2.14.

В пределах масштабного коэффициента, равного 2, этот результат будет представлять собой то же самое, что и первая колонка матрицы 2×2 в левой части уравнения (2.12) – это уравнение мы решали для получения обратного фильтра, действующего по методу наименьших квадратов. Уравнение (2.12) можно записать следующим образом:

$$2 \begin{bmatrix} \frac{5}{4} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{5}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Разделим обе части на 2:

$$\begin{bmatrix} \frac{5}{4} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{5}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Сейчас рассчитаем ФВК желаемого результата (1, 0, 0) с входным импульсом $[1, (-\frac{1}{2})]$ (Таблица 2.15).

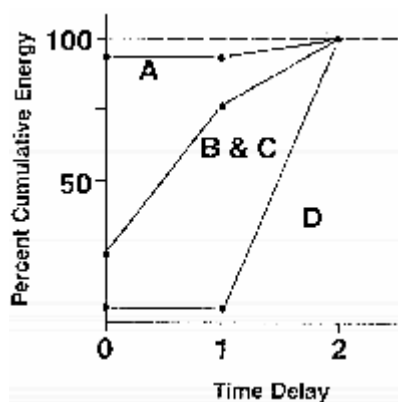


Рис. 2.16 Количественный анализ минимально- и максимально-фазового импульсов. Максимальная скорость нарастания энергии во времени наблюдается у минимально-фазового импульса (A); у максимально-фазового импульса (D) скорость нарастания энергии наименьшая.

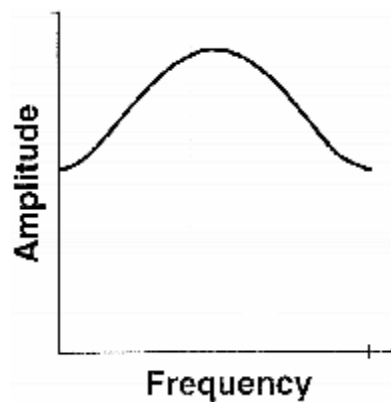


Рис.2.17 Все импульсы на рис. 2.16 (A, B, C, D) охарактеризуются этим одним и тем же амплитудным спектром (Robinson, 1966).

Результат представляет собой то же самое, что и матрица из одного столбца в правой части уравнения (2.17). В общем случае элементы матрицы в левой части – это задержки ФАК входного импульса, а элементы матрицы, состоящей из одной колонки в правой части – это задержки ФВК желаемого результата с входным импульсом.

Выполним аналогичные операции для импульса $[(-\frac{1}{2}), 1]$. ФАК этого импульса дается в таблице 2.16. Отметим, что ФАК импульса $[(-\frac{1}{2}), 1]$ идентична ФАК импульса $[1, (-\frac{1}{2})]$ (таблица 2.14). Как рассмотрено в Разделе 2.5, это важное свойство группы импульсов с одинаковыми амплитудными спектрами. Перепишем матричное уравнение (2.15):

$$2 \begin{bmatrix} \frac{\pi}{4} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Разделим обе части на 2:

$$\begin{bmatrix} \frac{\pi}{4} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

ФВК желаемого результата $(1, 0, 0)$ со входным импульсом $[(-\frac{1}{2}), 1]$ дана в таблице 2.17. Отметим, что этот результат представляет собой то же самое, что и правая часть уравнения (2.19). Более того, элементы матрицы в левой части представляют собой задержки ФАК входного импульса. Матричные уравнения (2.17) и (2.19) были использованы для вывода обратных фильтров, действующих по принципу наименьших квадратов (Раздел 2.4). Эти фильтры затем были применены к входным импульсам с целью их сжатия до единичного импульса с нулевой задержкой. Матрицы левых частей в уравнениях (2.17) и (2.19) состоят из задержек ФАК входных импульсов.

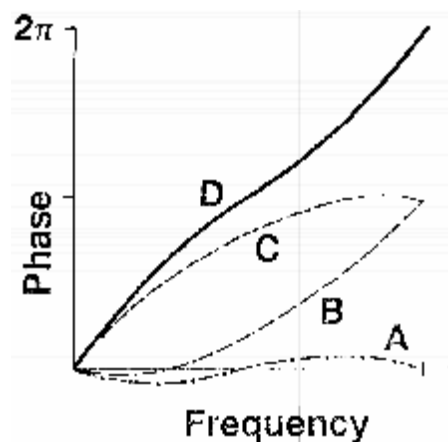


Рис. 2.18 Phase-lag spectra импульсов, определенных на рис. 2.16. Они имеют общий амплитудный спектр (см. рис. 2.17) (Robinson, 1966).

Таблица 2.16 Задержки ФАК входного импульса

$[(-\frac{1}{2}), 1]$.

$-\frac{1}{2}$	1	Output
$-\frac{1}{2}$	1	
$-\frac{1}{2}$	1	

Таблица 2.17 ФВК желаемого результата $(1, 0, 0)$

с входным импульсом $[1, (-\frac{1}{2})]$.

1	0	0	Output
$-\frac{1}{2}$	1		
$-\frac{1}{2}$	1		

Кроме того, матрицы из одной колонки в правой части состоят из задержек ФВК желательного результата, т.е. единичного импульса с нулевой задержкой с входными импульсами. Эти наблюдения были обобщены Винером для выведения фильтров, кото-

рые преобразуют входной сигнал в любой нужный выходной сигнал. Общая форма матричного уравнения для фильтра длины n (Robinson и Treitel, 1980).

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \dots & r_{n-1} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \dots & r_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \dots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Здесь r_i , a_i , и g_i ($i = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$) – ФАК входного импульса, коэффициенты желаемого фильтра и ФВК желаемого результата соответственно. Оптимальный фильтр Винера a_i является оптимальным в том смысле, что ошибка, определенная по методу наименьших квадратов между действительным и желаемым результатами является минимальной. Когда желаемый результат представляет собой единичный импульс с нулевой задержкой $(1, 0, 0, \dots, 0)$, фильтр Винера идентичен обратному фильтру, действующему по принципу наименьших квадратов. Другими словами, последний является специальным случаем первого. Фильтр Винера применяется для решения большого класса задач, в которых может быть рассмотрен любой желаемый результат, а не только единичный импульс с нулевой задержкой.

Имеются пять вариантов желаемого результата:

- Тип 1: Единичный импульс с нулевой задержкой.
- Тип 2: Единичный импульс с произвольной задержкой.
- Тип 3: Форма входной последовательности, продвинутая во времени.
- Тип 4: Нуль-фазовый импульс.
- Тип 5: Любая произвольная форма.

Эти результаты будут рассмотрены в следующих разделах.

Общая форма нормальных уравнений (уравнение 2.20) была принята в числовых примерах для специального случая, где желаемый результат представляет собой единичный импульс с нулевой задержкой. В Приложении В.5 содержится краткая математическая обработка оптимальных фильтров Винера. На рис. 2.19 можно видеть конструкцию и применение фильтра Винера.

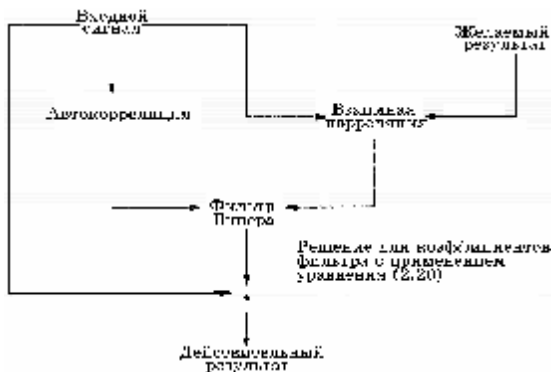


Рис. 2.19 Блок-схема конструкции и применения фильтра Винера.

расчета. Для этого необходимо рассчитать двухточечный фильтр, вывести по нему трехточечный фильтр и т.д., пока не будет получен n -точечный фильтр (Claerbout, 1976). На практике алгоритмы фильтрации, основанные на теории оптимального фильтра Винера, известны как алгоритмы Винера-Левинсона.

Определение коэффициентов фильтра Винера требует решения так называемых нормальных уравнений (уравнение 2.20). Хотя в наших числовых примерах матрица 2×2 была решена от руки, для длинных операторов решение является дорогостоящим. По уравнению (2.20) можно видеть, что матрица автокорреляции является симметричной. Эта специальная матрица, называемая матрицей Теорлитц, может быть решена с помощью повторения Левинсона – схемы эффективной с точки зрения процесса

2.6.1 Деконволюция сжатия

Процесс с единичным импульсом с единичной задержкой (желаемый результат типа 1) называется деконволюцией сжатия. Взаимная корреляция желаемого единичного импульса $(1, 0, 0, \dots, 0)$ со входным импульсом $(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ дает последовательность $(x_0, 0, 0, \dots, 0)$. Обобщенная форма нормальных уравнений (уравнение 2.20) имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} & \dots & r_{0,n-1} \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1,n-2} \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2,n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{n-1,0} & r_{n-1,1} & r_{n-1,2} & \dots & r_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Уравнение (2.21) пересчитано по $(1/x_0)$. Обратный фильтр, действующий по принципу наименьших квадратов, который был рассмотрен в Разделе 2.4, имеет такую же форму, что и матричное уравнение (2.21). Следовательно, деконволюция сжатия с математической точки зрения идентична обратной фильтрации по методу наименьших квадратов. На практике между двумя типами фильтрации делается различие. Матрица автокорреляции в левой части уравнения (2.21) рассчитана по входной сейсмограмме (допущение 5) в случае деконволюции сжатия (статической деконволюции) непосредственно по известному импульсу источника, в случае обратной фильтрации по принципу наименьших квадратов (детерминистическая деконволюция).

На рис. 2.20 в обобщенном виде показана деконволюция сжатия, основанная на алгоритме Винера-Левинсона. Изображение (а) – входной смешанно-фазовый импульс. Его амплитудный спектр (b) показывает, что большая часть энергии импульса приходится на диапазон 10-50 Гц. Функция автокорреляции (d) используется в уравнении (2.21) для расчета оператора деконволюции сжатия (e). Амплитудный спектр оператора (f) приблизительно можно представить как результат обращения амплитудного спектра входного импульса (b); по мере возрастания длины оператора аппроксимация улучшается. Это следует ожидать, т.к. цель деконволюции сжатия состоит в сглаживании спектра результата. Применение этого оператора к входному импульсу дает результат, показанный в k.

В идеальном случае мы хотели бы получить одиночный импульс с нулевой задержкой, как показано на изображении n, но допущение б было нарушено тем, что входной импульс – смешанно-фазовый (а). На изображении h показан результат обращения оператора деконволюции; это минимально-фазовый эквивалент входного смешанно-фазового импульса а. Оба импульса имеют одинаковые амплитудные спектры (b и i), но их фазовые спектры существенно различаются (с и j). Поскольку деконволюция сжатия является эквивалентом обратной фильтрации методом наименьших квадратов, минимально-фазовый эквивалент представляет собой просто результат обращения оператора деконволюции. Следовательно, амплитудный спектр оператора является результатом обращения амплитудного спектра минимально-фазового эквивалента (f и i), а фазовый спектр оператора – это фазовый спектр минимально-фазового импульса со знаком минус, как показано в g и j. Один из способов выделения сейсмического импульса (при условии, что он минимально-фазовый) – это расчет оператора деконволюции сжатия и определение результата его обращения.

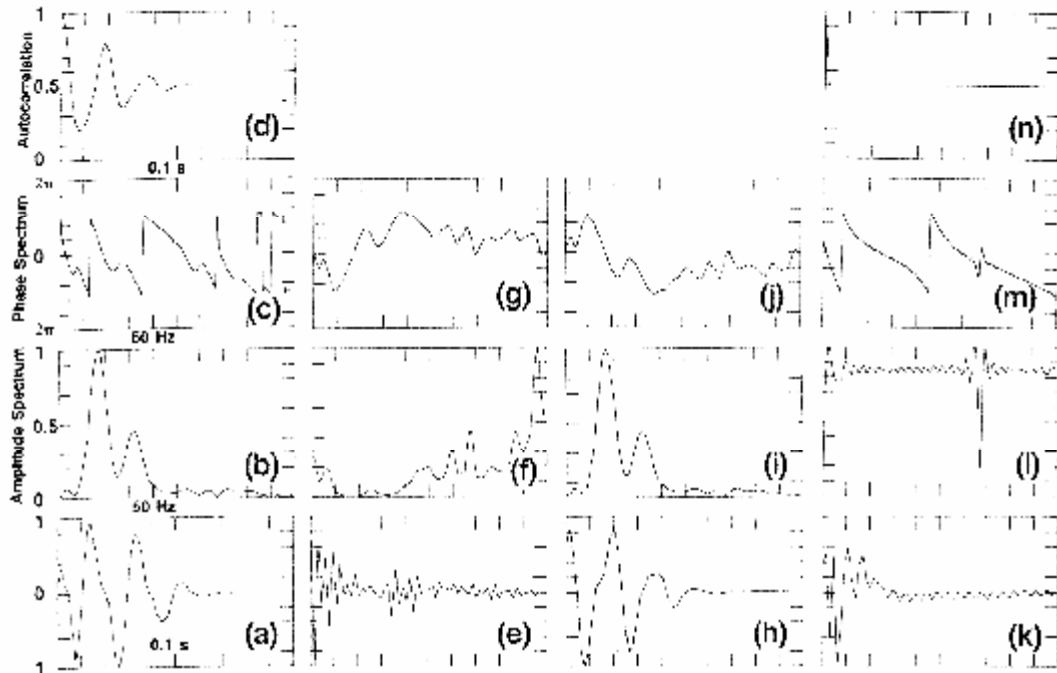


Рис. 2.20 Начиная с импульса (а), рассчитывается автокоррелограмма (d) с целью вывода оператора деконволюции сжатия (е). Этот оператор и результат его обращения являются минимально-фазовыми. Результат обращения оператора деконволюции имеет такой же амплитудный спектр, что и первоначальный импульс [сопоставьте (i) и (b)]. Его фазовый спектр представляет собой фазовый спектр оператора деконволюции сжатия с обратным знаком [сопоставьте (j) и (g)]. Если оператор e был свернут с первоначальным импульсом a , получаем k . Хотя спектр результата является почти плоским (l), он далек от единичного импульса при $t = 0$ (n). Этот желаемый результат (n) можно получить, если на вход подается минимально-фазовый импульс (h), а не смешанно-фазовый (a).

В заключение отметим, что если входной импульс не является минимально-фазовым, деконволюция сжатия не может преобразовать его в совершенный единичный импульс с нулевой задержкой (k). Хотя амплитудный спектр, в сущности, плоский (l), фазовый спектр результата не является минимально-фазовым (m). Наконец, обратите внимание, что оператор деконволюции сжатия представляет собой результат обращения минимально-фазового эквивалента входного импульса. Этот импульс может быть минимально-фазовым, но может и не быть таковым.

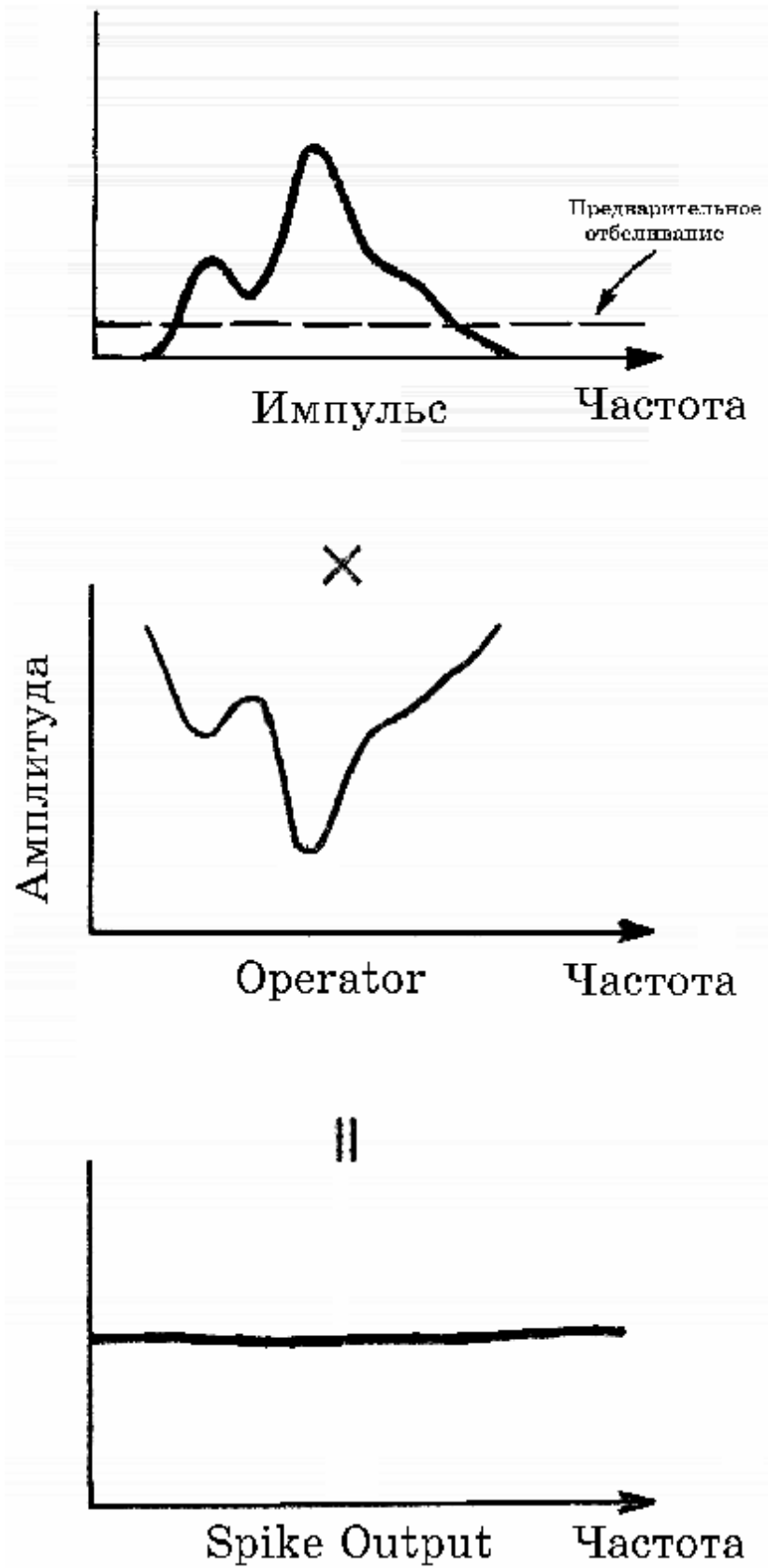


Рис.2.21 Количество отбеливания, предназначенного для добавления смещения в амплитудный спектр сейсмограммы, подлежащей деконволюции. Это предотвращает деление на 0, поскольку ампли-

тудный спектр обратного фильтра (в центре) представляет собой результат обращения сейсмограммы (вверху).

2.6.2 Предварительное отбеливание

Из предыдущего раздела мы знаем, что амплитудный спектр оператора деконволюции сжатия представляет собой (приблизительно) результат обращения амплитудного спектра входного импульса. Это показано на рис. 2.21. Что происходит, если в амплитудном спектре входного импульса имеются нули? Применим минимально-фазовый полосовой фильтр (см. Упражнение 2.10) с широкой полосой пропускания (3 - 108Гц) к минимально-фазовому импульсу (h на рис.2.20). Деконволюция отфильтрованного импульса не дает совершенный единичный импульс. Вместо этого получается единичный шаг-импульс, сопровождаемый высокими частотами (рис. 2.22). Такой низкочастотный результат обусловлен тем, что оператор деконволюции пытается усилить отсутствующие частоты, как видно из амплитудного спектра результата. Может ли эта проблема быть связана с зарегистрированной сейсмограммой? Ситуация, когда амплитудный спектр входного сигнала содержит нули, встречается редко. В сейсмограмме всегда содержатся помехи и они являются аддитивными во временной и в частотной областях. Более того, в процессе обработки формируются цифровые помехи, также являющиеся аддитивными в частотной области. Однако, для того, чтобы гарантировать цифровую устойчивость, перед деконволюцией вводится искусственный уровень белого шума. Этот процесс называется предварительным отбеливанием и показан на рис. 2.21. Предварительное отбеливание достигается путем прибавления константы к нулевой задержке функции автокорреляции. Если предварительное отбеливание выражается в процентах ($0 \leq \epsilon < 1$), должны быть решены следующие нормальные уравнения (из уравнения 2.21).

$$\begin{bmatrix} 1 + \epsilon r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_{n-1} \\ r_1 & 1 + \epsilon r_2 & r_3 & \dots & r_{n-2} \\ r_2 & r_3 & 1 + \epsilon r_4 & \dots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \dots & 1 + \epsilon r_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Прибавление постоянной ϵr_0 к нулевой задержке ФАК – это то же самое, что и добавление белого шума к спектру; его полная энергия равна этой константе. Влияние уровня предварительного отбеливания на рабочие характеристики деконволюции рассмотрено в Разделе 2.7.3.

2.6.3 Формирующие фильтры Винера.

Сжатие импульса $[(-\frac{1}{2}), 1]$ в единичный импульс с нулевой задержкой $(1, 0, 0)$ процессом деконволюции сжатия нельзя назвать беспроблемным (таблица 2.11). С точки зрения распределения энергии этот входной импульс более схож с задержанным единичным импульсом, таким как $(0, 1, 0)$, чем с единичным импульсом с нулевой задержкой $(1, 0, 0)$. Возможно, фильтр, который преобразует импульс $[(-\frac{1}{2}), 1]$ в задержанный единичный импульс должен давать меньшую ошибку, нежели тот фильтр, который формирует его в одиночный импульс с нулевой задержкой. Будем следовать блок-схеме на рис. 2.19, чтобы разработать и применить фильтр с целью преобразова-

ния импульса $[(-\frac{1}{2}), 1]$ в задержанный единичный импульс $(0, 1, 0)$. Сначала рассчитаем ФАК (таблица 2.18).

Из таблицы 2.16 мы знаем ФАК входного импульса. Подставляя результаты из таблицы 2.16 и 2.18b матричное уравнение (2.20), получаем:

$$\begin{bmatrix} \frac{5}{4} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{5}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Решим относительно коэффициентов фильтра: $(a, b) = [(\frac{16}{21}), (-\frac{2}{21})]$. Этот фильтр применяется к входному импульсу, как показано в таблице 2.19. Энергия ошибки, рассчитанной методом наименьших квадратов между действительным и желаемым результатами равна $(\frac{84}{441})$. Из таблицы 2.11 можно видеть, что ошибка для единичного

импульса с нулевой задержкой составила $(\frac{336}{441})$. Это показывает, что при преобразовании импульса $[(-\frac{1}{2}), 1]$ в задержанный единичный импульс $(0, 1, 0)$ ошибка меньше, чем

при преобразовании в единичный импульс с нулевой задержкой $(1, 0, 0)$. Исследуем одиночный импульс с несколько большей задержкой $(0, 0, 1)$ и рассчитаем ошибку.

В общем случае, для любого данного выходного импульса последовательность желательных результатов может быть определена как задержанные единичные импульсы. Затем можно построить ошибки, рассчитанные методом наименьших квадратов в функции задержки. Задержка, которая соответствует наименьшей ошибке, выбирается для определения желаемого результата в виде задержанного единичного импульса. Действительными выходными данными фильтра Винера, который использует этот оптимальный задержанный единичный импульс должен быть наиболее компактный сигнал.

Процесс, дающий результат типа 5 (любая желаемая произвольная форма), называется формированием импульса. Фильтра, который выполняет это называется формирующим фильтром Винера. Результаты типа 2 (задержанный единичный импульс) и 4 (нуль-фазовый импульс) представляют собой специальные случаи более общего формирования импульса.

На рис.2.23 показаны восемь случаев последовательности формирования импульсов с задержанными единичными импульсами в качестве желаемых результатов. На вход подается смешанно-фазовый импульс. Во всех восьми случаях длина фильтра поддерживалась постоянной. Обратите внимание, что случай единичного импульса с нулевой задержкой (деконволюция сжатия) не всегда дает наилучший результат (рис. 2.23a). Задержка в пределах 60мс (рис. 2.23e), похоже, дает результат, наиболее близкий к совершенному единичному импульсу. Обычно процесс не очень чувствителен к величине задержки, если она близка к оптимальной. Если входной импульс был минимально-фазовым, оптимальная задержка желаемого выходного единичного импульса в общем случае равна 0. С другой стороны, если входной импульс был смешанно-фазовым, как показано на рис. 2.23, оптимальная задержка отлична от нулевой. Наконец, если входной импульс был максимально-фазовым, оптимальная задержка представляет собой длину этого импульса (Robinson и Treitel, 1980).

Можем ли мы не подавать задержку на желаемый результат в виде единичного импульса (рис. 2.23) и получить результат лучше, чем при деконволюции сжатия? Эта цель достигается путем применения постоянного временного сдвига (60мс на рис. 2.23) к задержанному выходному единичному импульсу. Тот же результат можно получить

смещая оператор формирующего фильтра на величину, равную задержке единичного импульса и применяя его к входному импульсу. Такой оператор фильтра является двусторонним (некаузальным), поскольку он имеет коэффициенты для отрицательных и положительных значений времени. Односторонний фильтр, определенный по положительной временной оси, имеет компоненту упреждения (*anticipation component*), тогда как фильтр, определенный по отрицательной оси времени, имеет компоненту памяти (*memory component*) (Robinson и Treitel, 1980). Двусторонний фильтр имеет компоненту упреждения и компоненту памяти. На рис. 2.24 показана последовательность формирующих фильтраций с двусторонними фильтрами Винера для различных величин задержки единичного импульса.

На рис. 2.25 показаны примеры формирования импульсов. Входной импульс (трасса b) – это тот же самый смешанно-фазовый импульс, что и на рис. 2.24 (левое верхнее изображение). Этот импульс формируется в нуль-фазовые импульсы с тремя различными полосами пропускания (трассы c, d, e). На промышленном жаргоне этот процесс называется дефазированием. На рис. 2.25 показан другой пример формирования импульса, в котором входной импульс был преобразован в его минимально-фазовый эквивалент (трасса f).

Таблица 2-18 Взаимная корреляция желаемого результата (0, 1, 0) с входным импульсом $[-\frac{1}{2}, 1, \frac{1}{2}]$.

0	1	0	Output
$-\frac{1}{2}$	1		1
	$-\frac{1}{2}$	1	$-\frac{1}{2}$

Таблица 2-19 Свертка входного импульса $[-\frac{1}{2}, 1, \frac{1}{2}]$ с коэффициентами фильтра $[\frac{16}{21}, -\frac{2}{21}]$.

$-\frac{1}{2}$	1	0	Output
$-\frac{1}{2}$	$\frac{16}{21}$		$-\frac{8}{21}$
	$-\frac{2}{21}$	$\frac{16}{21}$	$\frac{14}{21}$
		$-\frac{2}{21}$	$-\frac{1}{21}$

Это преобразование часто применяется к зарегистрированным сигналам воздушной пушки. На рис. 2.26 показаны примеры зарегистрированной сигнатуры воздушной пушки, которая была переформирована в минимально-фазовый эквивалент и в единственный импульс. Когда на вход подается зарегистрированная сигнатура, формирования импульса на рис. 2.26 называются обработкой сигнатуры. Формирование импульса требует знания входного импульса для расчета колонки в правой части уравнения (2.20). Если импульс неизвестен (а в реальных условиях он неизвестен), его можно оценить статистическим способом, исходя из данных. Из этой оценки выводится минимально-фазовый импульс, который затем формируется в нуль-фазовый импульс.

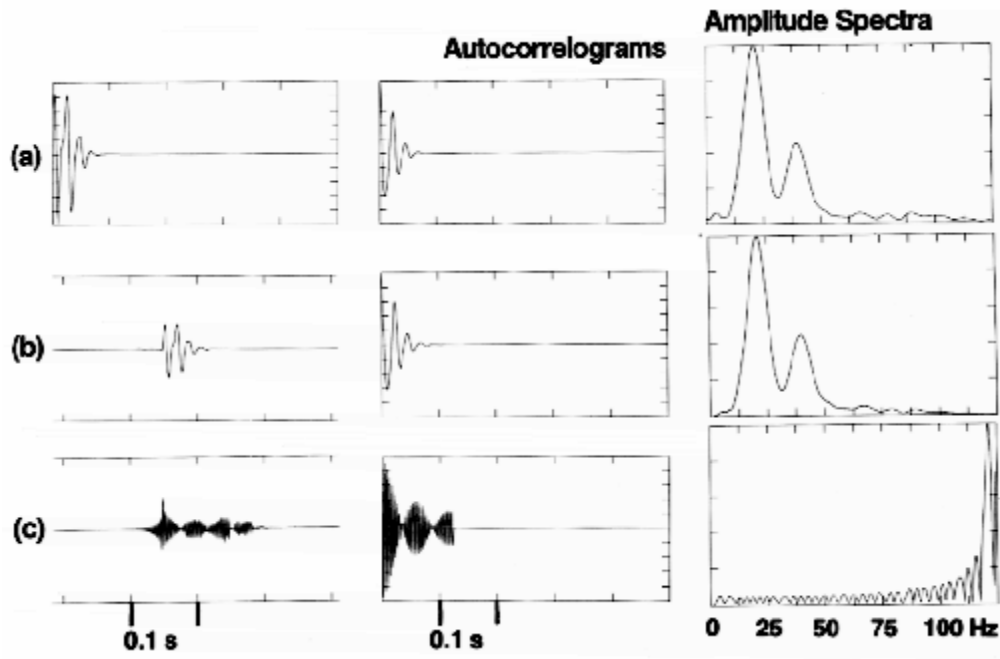


Рис. 2-22 (а) Минимально-фазовый импульс, (б) полосовая фильтрация, (с) после деконволюции. Амплитудный спектр импульса, пропущенного через полосовой фильтр, имеет нуль на частотах больше 108Гц (средний ряд); следовательно, выведенный из него обратный фильтр дает неустойчивые результаты (нижний ряд). Временные задержки на импульсах в левой части среднего и нижнего рядов – только для отображения.

Обработка импульса – это термин, который используется с гибкостью. Наиболее общее значение этого термина относится к оценке основного импульса, выведенного в сейсмограмму и обозначает формирующий фильтр для преобразования оцененного импульса в нужную форму – обычно широкополосный нуль-фазовый импульс (рис. 2.25) и, наконец, применение формирующего фильтра к сейсмограмме. Другой тип обработки импульса включает формирование импульса, желаемым результатом, которого является нуль-фазовый импульс с таким же амплитудным спектром, что и у входного импульса (рис. 2.27). Отметим, что этот тип обработки импульса не пытается сгладить спектр, а только исправить за фазу входной импульс, который иногда предполагается минимально-фазовым.

2.6.4 Прогнозируемая деконволюция

Желаемый результат типа 3 (продвинутая во времени форма входной последовательности) предполагает процесс прогнозирования. При данном входном $x(t)$ мы хотим предсказать его величину в некотором будущем времени ($t + a$), где a - задержка предсказания. Винер показал, что фильтр, используемый для оценки $x(t + a)$, может быть рассчитан с помощью специальной формы матричного уравнения (2.20) (Robinson и Treitel, 1980). Поскольку желаемый результат $x(t + a)$ представляет собой продвинутую во времени версию входной величины $x(t)$, необходимо приспособить правую часть уравнения (2.20) к задаче предсказания.

Рассмотрим пятиточечную входную временную последовательность x_i , где $i = 0, 1, 2, 3, 4$ и зададим $a = 2$. Функция автокорреляции x_i рассчитана в таблице 2.20. Взаимная корреляция между желаемым результатом $x(t + 2)$ и входной величиной $x(t)$ показана в таблице 2.21.

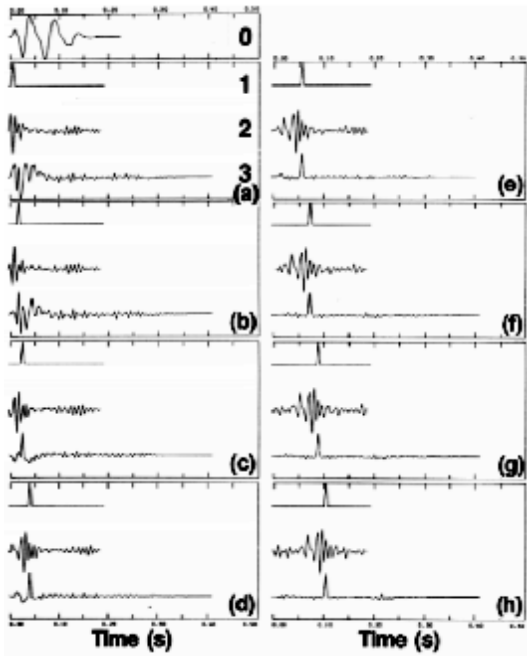


Рис. 2.23 Формирующий фильтр. (0) входной импульс, (1) желаемый результат, (2) оператор формирующего фильтра, (3) действительный результат. Здесь задача состоит в преобразовании смешанно-фазового импульса (0) в последовательность задержанных единичных импульсов (a – h) путем использования одностороннего оператора (только компонента упреждения). Лучший результат – с 60-миллисекундной задержкой (e).

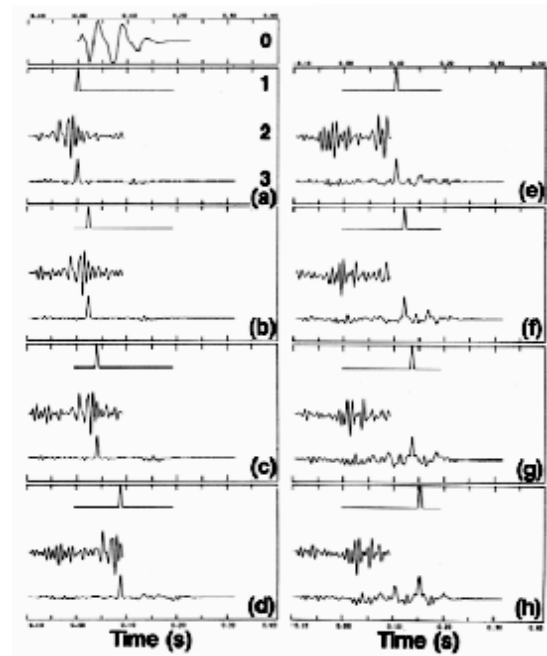


Рис. 2.24 Формирующая фильтрация. (0) входной импульс, (1) желаемый результат, (2) оператор формирующего фильтра, (3) действительный результат. Здесь задача состоит в преобразовании смешанно-фазового импульса (0) в последовательность задержанных единичных импульсов (a – h) с помощью двустороннего оператора (с компонентами упреждения и памяти). Лучший результат получается при единичном импульсе с нулевой задержкой с применением двустороннего фильтра (a).

Сравните результаты в таблицах 2.20 и 2.21. Обратите внимание, что $g_i = r_{i+\alpha}$, $\alpha = 2$, $i = 0, 1, 2, 3, 4$. Уравнение (2.20) перезаписывается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \\ r_1 & r_0 & r_1 & r_2 & r_3 \\ r_2 & r_1 & r_0 & r_1 & r_2 \\ r_3 & r_2 & r_1 & r_0 & r_1 \\ r_4 & r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Коэффициент прогнозируемого фильтра a_i , где $i = 0, 1, 2, 3, 4$, могут быть рассчитаны по уравнению (2.24). Сейчас можно рассчитать действительный результат (таблица 2.22).

Таблица 2.20 Задержки ФАК входной последовательности $[x_0, x_1, x_2, x_3, x_4]$

$$\begin{aligned} r_0 &= x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 \\ r_1 &= x_0x_1 + x_1x_2 + x_2x_3 + x_3x_4 \\ r_2 &= x_0x_2 + x_1x_3 + x_2x_4 \\ r_3 &= x_0x_3 + x_1x_4 \\ r_4 &= x_0x_4 \\ r_5 &= 0 \\ r_6 &= 0 \end{aligned}$$

Таблица 2.21 Взаимная корреляция между желаемым результатом $x(t+2)$ и входной величиной $x(t)$.

$$\begin{aligned} r_{01} &= x_0x_2 + x_1x_3 + x_2x_4 \\ r_{11} &= x_1x_3 + x_2x_4 \\ r_{21} &= x_2x_4 \\ r_{31} &= 0 \\ r_{41} &= 0 \end{aligned}$$

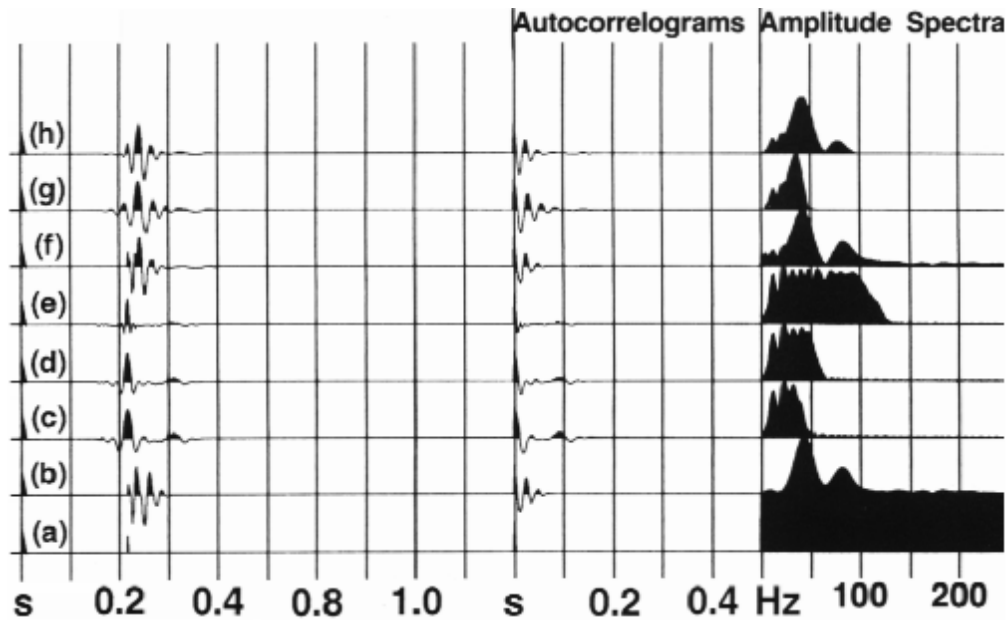


Рис. 2.25 Формирующий фильтр с различными желаемыми результатами. (a) Импульсный отклик, (b) входная сейсмограмма. Здесь *c, d, e* показывают три возможных желаемых результата, которые представляют собой нуль-фазовые импульсы в ограниченной полосе пропускания, тогда как *f* показывает желаемый результат, представляющий собой минимально-фазовый эквивалент входного импульса *b*. Наконец, *g* и *h* – желаемые результаты, которые представляют собой версии *f*, пропущенные через полосовой фильтр.

Поскольку мы пытаемся предсказать продвинутой во времени форму входного сигнала, действительным результатом является оценка последовательности $x_{i+\alpha}$, где $\alpha = 2$. Последовательность ошибок предсказания дается в таблице 2.23.

Результаты в таблице 2.23 предполагают, что последовательность ошибок более прямым способом – путем свертки входной последовательности с фильтром, коэффициенты которого $(1, 0, -a_0, -a_1, -a_2, -a_3, -a_4)$ (Таблица 2.24).

Результаты для e_2, e_3, e_4, e_5, e_6 являются идентичными (Табл. 2.23 и 2.24). Поскольку последовательность $(a_0, a_1, a_2, a_3, a_4)$ называется фильтром предсказания (*prediction filter*), естественным будет назвать последовательность $(1, 0, -a_0, -a_1, -a_2, -a_3, -a_4)$ фильтром предсказания ошибок. При применении на входной последовательности, этот фильтр дает последовательность ошибок в процессе предсказания.

Почему столько внимания уделяется последовательности ошибок? Рассмотрим процесс предсказания, как он относится к сейсмической трассе. Временная последовательность может быть предсказана на будущем времени $t + \alpha$, где α – задержка предсказания (или расстояние предсказания). Сейсмическая трасса часто имеет предсказуемую компоненту (кратные волны) с периодической частотой возникновения. Согласно допущению 5, что-либо еще (например, истинные отражения) является непредсказуемым.

Кто-то может сказать, что отражения также предсказуемы (например, в случае циклического осадконакопления). Однако, этот тип осадконакопления встречается нечасто. Если фильтр предсказания дает прогнозируемую компоненту сейсмической трассы (кратные волны), оставшаяся непрогнозируемая часть (последовательность ошибок) является, в сущности, последовательностью коэффициентов отражения.

Уравнение (2.24) можно обобщить для случая фильтра предсказания длиной n и задержки предсказания длиной α .

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_{n-1} \\ r_1 & r_2 & r_3 & \dots & r_n \\ r_2 & r_3 & r_4 & \dots & r_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_n & r_{n+1} & \dots & r_{2n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Таблица 2.22 Свертка фильтра предсказания $\alpha(t)$ с входной последовательностью с целью расчета действительного результата $y(t)$.

$$\begin{aligned} y_0 &= a_0x_0 \\ y_1 &= a_1x_0 + a_0x_1 \\ y_2 &= a_2x_0 + a_1x_1 + a_0x_2 \\ y_3 &= a_3x_0 + a_2x_1 + a_1x_2 + a_0x_3 \\ y_4 &= a_4x_0 + a_3x_1 + a_2x_2 + a_1x_3 + a_0x_4 \end{aligned}$$

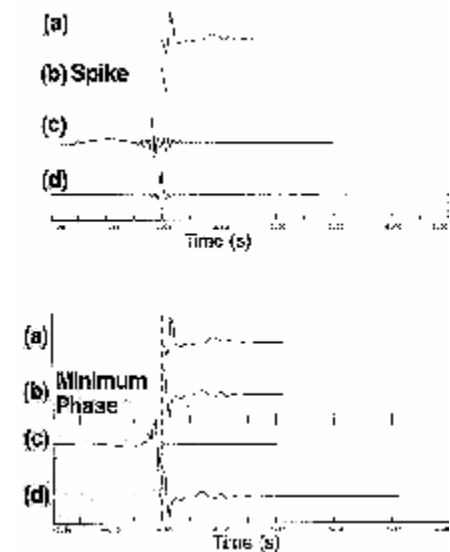


Рис. 2.26 Обработка сигнатуры: (а) Зарегистрированная сигнатура, (б) желаемый результат, (с) фильтрующий оператор, (д) сформированная сигнатура. Желаемый результат представляет собой единичный импульс с нулевой задержкой (вверху) и минимально-фазовый эквивалент зарегистрированной сигнатуры (внизу).

Таблица 2.23 Последовательность ошибок $e_{i+2} - x_{i+2}y_i$.

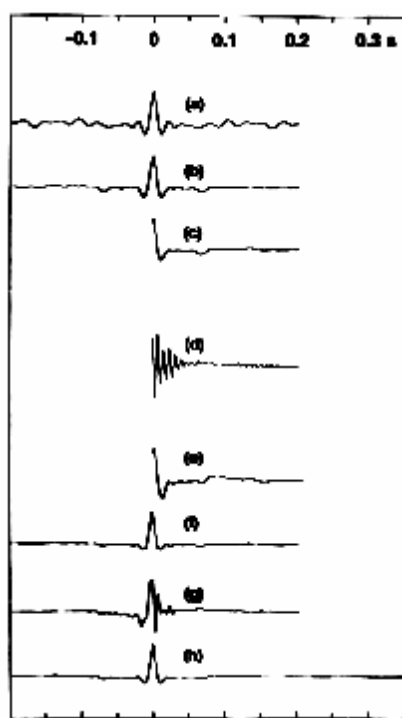


Рис. 2.27 Обработка импульса. Автокоррелограмма a , оцененная по сейсмической трассе, используется после сглаживания (b) для расчета оператора деконволюции сжатия d . (Здесь c – односторонняя версия b). Результатом обращения этого спектра является минимально-фазовый импульс e , который иногда считается основным импульсом, который содержится в первоначальной сейсмической трассе. Не представляет сложности расчет его нуль-фазового эквивалента f и разработка формирующего фильтра g , который преобразует минимально-фазовый импульс e в нуль-фазовый импульс f . Действительным результатом является h , который нужно сопоставить с f . Отметим, что нуль-фазовый эквивалент f имеет такой же амплитудный спектр, что и минимально-фазовый импульс e .

Таблица 2.24 Свертка коэффициентов фильтра $[1, 0, -a_i]$, $i = 0, 1, 2, 3, 4$ со входной последовательностью x_i , $i = 0, 1, 2, 3, 4$.

$$\begin{aligned}
 e_2 &= x_2 - a_0 x_1 \\
 e_3 &= x_3 - a_1 x_2 - a_0 x_1 \\
 e_4 &= x_4 - a_2 x_3 - a_1 x_2 - a_0 x_1 \\
 e_5 &= 0 - a_3 x_4 - a_2 x_3 - a_1 x_2 - a_0 x_1 \\
 e_6 &= 0 - a_4 x_5 - a_3 x_4 - a_2 x_3 - a_1 x_2 - a_0 x_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 e_{11} &= x_0 \\
 e_{12} &= x_1 \\
 e_{13} &= x_2 - a_0 x_1 \\
 e_{14} &= x_3 - a_1 x_2 - a_0 x_1 \\
 e_{15} &= 0 - a_2 x_3 - a_1 x_2 - a_0 x_1 \\
 e_{16} &= 0 - a_3 x_4 - a_2 x_3 - a_1 x_2 - a_0 x_1
 \end{aligned}$$

Отметим, что для разработки фильтра предсказания требуется только ФАК входной последовательности. Имеется два подхода к прогнозируемой деконволюции. Фильтр предсказания может быть сконструирован с помощью уравнения (2.25) и применен на входной последовательности, как описано на рис. 2.28.

В качестве альтернативы, фильтр предсказания ошибок может быть разработан и свернут со входной последовательностью, как описано на рис. 2.29.

Рассмотрим специальный случай единичной задержки предсказания (unit prediction lag), $\alpha = 1$. Уравнение (2.25) принимает вид:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \\ r_1 & r_0 & r_1 & r_2 & r_3 \\ r_2 & r_1 & r_0 & r_1 & r_2 \\ r_3 & r_2 & r_1 & r_0 & r_1 \\ r_4 & r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Прибавив правую часть к левой, получим:

$$\begin{bmatrix} -r_1 & r_0 & r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \\ -r_2 & r_1 & r_0 & r_1 & r_2 & r_3 \\ -r_3 & r_2 & r_1 & r_0 & r_1 & r_2 \\ -r_4 & r_3 & r_2 & r_1 & r_0 & r_1 \\ -r_5 & r_4 & r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Добавим одну строку и сместим знак “-” в матрицу состоящую из одной колонки, которая представляет коэффициенты фильтра:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & r_3 & r_4 & r_5 \\ r_1 & r_0 & r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \\ r_2 & r_1 & r_0 & r_1 & r_2 & r_3 \\ r_3 & r_2 & r_1 & r_0 & r_1 & r_2 \\ r_4 & r_3 & r_2 & r_1 & r_0 & r_1 \\ r_5 & r_4 & r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

где $L = r_0 - r_1 a_0 - r_2 a_1 - r_3 a_2 - r_4 a_3 - r_5 a_4$. Отметим, что имеются 6 неизвестных: $L, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$ и 6 уравнений. Решение этих уравнений дает фильтр предсказания ошибки с единичной задержкой, $[1, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4]$.

Мы можем переписать уравнение (2.28) следующим образом:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & r_3 & r_4 & r_5 \\ r_1 & r_0 & r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \\ r_2 & r_1 & r_0 & r_1 & r_2 & r_3 \\ r_3 & r_2 & r_1 & r_0 & r_1 & r_2 \\ r_4 & r_3 & r_2 & r_1 & r_0 & r_1 \\ r_5 & r_4 & r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

где $b_0 = 1$, $b_i = -a_{i-1}$, $i = 1, 2, 3, 4, 5$. Это уравнение имеет знакомую нам структуру. За исключением коэффициента Ламе L , оно имеет такую же форму, что и уравнение (2.21), которое дает коэффициенты для обратного фильтра с нулевой задержкой, действующего по принципу наименьших квадратов. Отметим, что этот обратный фильтр представляет собой то же самое, что и фильтр предсказания ошибок с единичной задержкой предсказания (кроме коэффициента Ламе). Следовательно, деконволюция сжатия представляет собой специальный случай прогнозируемой деконволюции с единичной задержкой предсказания.

Сейчас мы знаем, что прогнозируемая деконволюция является общим процессом, который включает деконволюцию сжатия. В общем случае можно утверждать следующее: при данном входном импульсе длины $(n + \alpha)$ фильтр предсказания ошибок сжимает его до импульса длиной α , где α - задержка предсказания (Peacock и Treitel, 1969). При $\alpha = 1$ процедура называется деконволюцией сжатия. На рис. 2.30 показана взаимосвязь различных фильтров, рассмотренных в этой главе и показан вид обработки, заключенный в них.

На рис. 2.30 обратите внимание, что фильтр Винера может быть использован для решения широкого ряда задач. В частности, прогнозируемая деконволюция является составной частью обработки сейсмических данных, цель которой состоит в сжатии сейсмического импульса, что обеспечивает повышение временной разрешающей способности. Кроме того, прогнозируемая деконволюция может быть использована для приведения импульса в единичный вид и получения оценки отражательной способности.

Еще раз посмотрим на допущения, лежащие в основе прогнозируемой деконволюции:

- | | |
|---------------|---|
| Допущение 1а. | Разрез состоит из горизонтальных слоев с постоянной скоростью. |
| Допущение 1б. | Источник формирует плоскую продольную волну, которая вертикально падает на границы слоев. При таких условиях поперечные волны не формируются. |
| Допущение 2. | Форма волны источника не изменяется при ее прохождении по разрезу, т.е. она является стационарной. |
| Допущение 3. | Компонента помех $n(t) = 0$. |
| Допущение 4. | Отражательная способность представляет собой случайный процесс. Это означает, что сейсмограмма имеет характеристики сейсмического импульса т.к. их ФАК и амплитудные спектры являются сходными. |
| Допущение 5. | Сейсмический импульс является минимально-фазовым; следовательно, результат его обращения также является минимально-фазовым. |

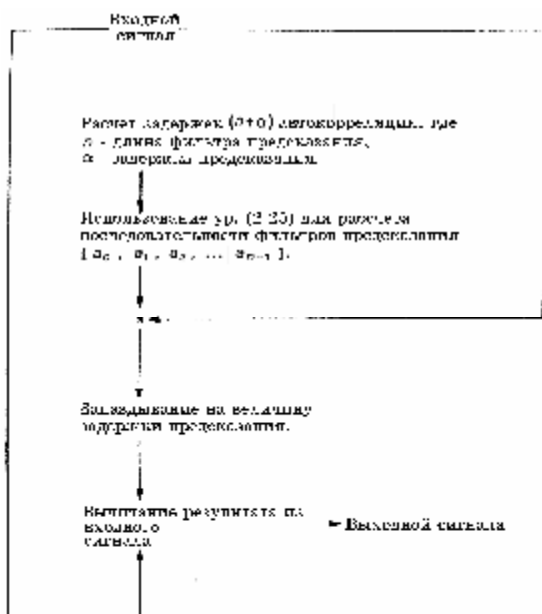


Рис. 2.28 Блок-схема прогнозируемой деконволюции, использующей фильтры предсказания.

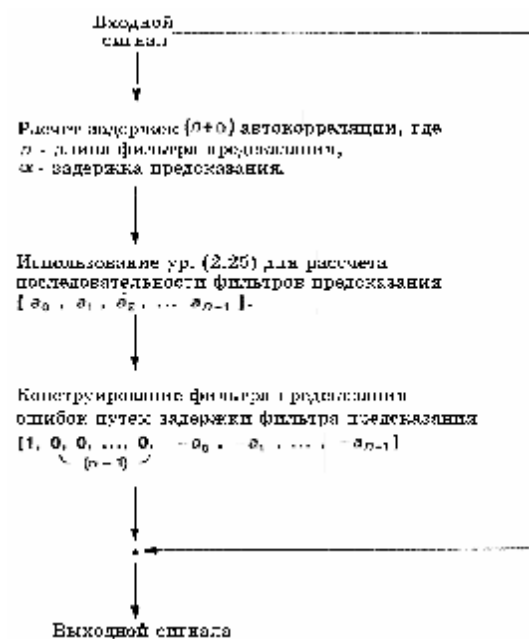


Рис. 2.29 Блок-схема прогнозируемой деконволюции, использующей фильтры предсказания ошибок.

Допущения 1а, 1б и 2 являются основой модели фильтрации зарегистрированной сейсмограммы (Раздел 2.2). На практике деконволюция часто дает хорошие результаты на площадях, где эти три допущения в строгом смысле не действительны. На практике допущение 2 может быть ослаблено при рассмотрении деконволюции, изменяющейся во времени. В этой методике сейсмограмма делится на ряд временных окон (обычно три или более окон). Затем для каждого окна рассчитывается оператор деконволюции и свертывается с данными в этом окне. Что касается допущения 3, помеха может быть минимизирована в процессе регистрации. Могут быть разработаны операторы деконволюции с использованием временных окон и частотных полос с низким уровнем помех. Можно воспользоваться преимуществом, которое дает низкий уровень помех при суммировании, выполнив деконволюцию после суммирования.

Если импульс источника был минимально-фазовым и известным, деконволюция в случае отсутствия помех (рис.2.31 и 2.32, трасса с) может быть совершенный результат. Если допущение 4 было нарушено и если форма волны источника неизвестна, у вас будут проблемы (трасса d). Качество результата деконволюции сжатия уменьшается далее, если импульс источника не является минимально-фазовым (рис. 2.33 и 2.34), т.е. нарушается допущение 5. Наконец, если данные содержат помехи (т.е. нарушено допущение 3), результат деконволюции становится неприменимым.

2.7 Прогнозируемая деконволюция на практике

По рисункам 2.31 – 2.35 можно судить о том, насколько полезной является прогнозируемая деконволюция. В реальных условиях деконволюция была применена к миллиардам сейсмических трасс; в большинстве случаев она дала удовлетворительные результаты. Рисунки 2.31 – 2.35 подчеркивают решающие допущения, в основе прогнозируемой деконволюции. Когда деконволюция не работает на некоторых данных, наиболее вероятная причина этого состоит в следующем: нарушено одно или несколько вышеперечисленных допущений. В этом разделе будет выполнен ряд числовых экспериментов с целью исследования действительности этих допущений. Цель этих экспериментов: дать основное понимание деконволюции с практической точки зрения.

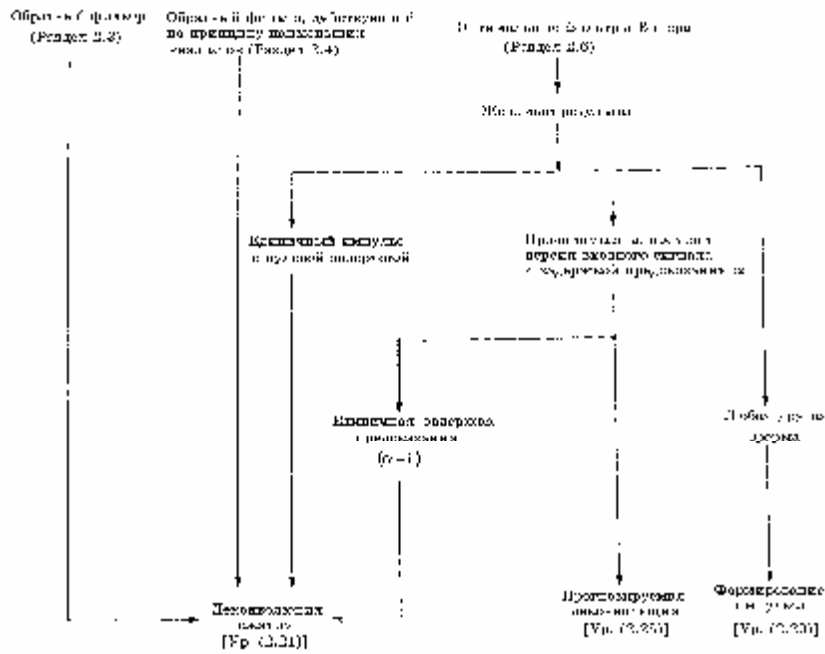


Рис. 2.30 Блок-схема взаимосвязей между различными фильтра деконволюции.

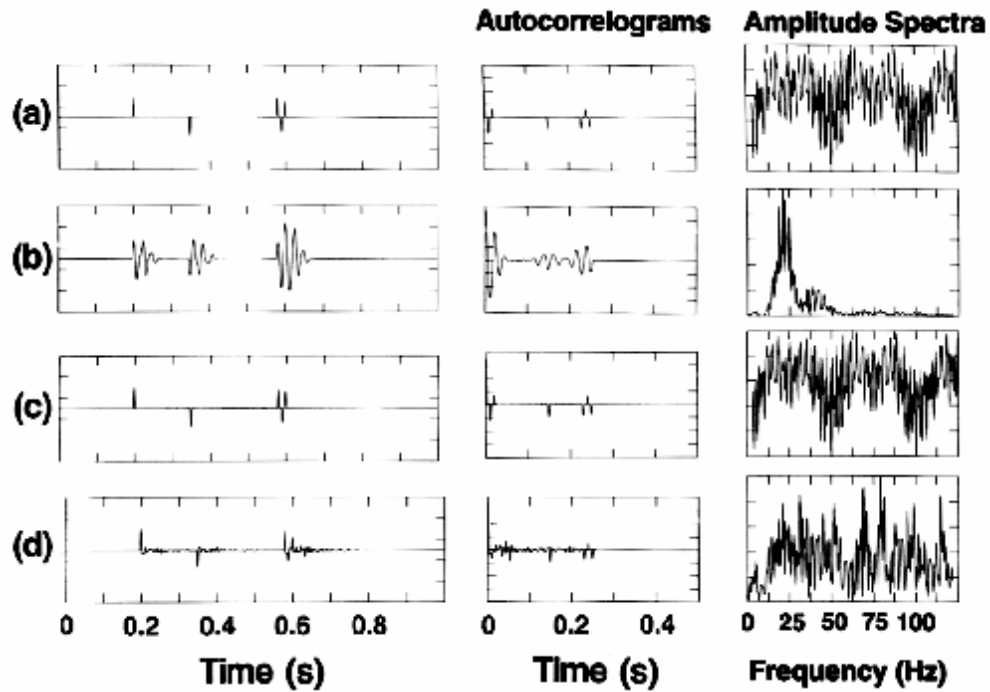


Рис. 2.31 (а) Импульсный отклик; (б) сейсмограмма; (с) деконволюция сжатия, использующая известный минимально-фазовый импульс; (д) деконволюция, предлагающая неизвестный минимально-фазовый импульс источника. Импульсный отклик (а) представляет собой последовательность рассредоточенных единичных импульсов. Для неизвестного импульса источника (т.е. допущение 4 нарушено) деконволюция сжатия дает менее совершенный результат [сравните (с) и (д)].

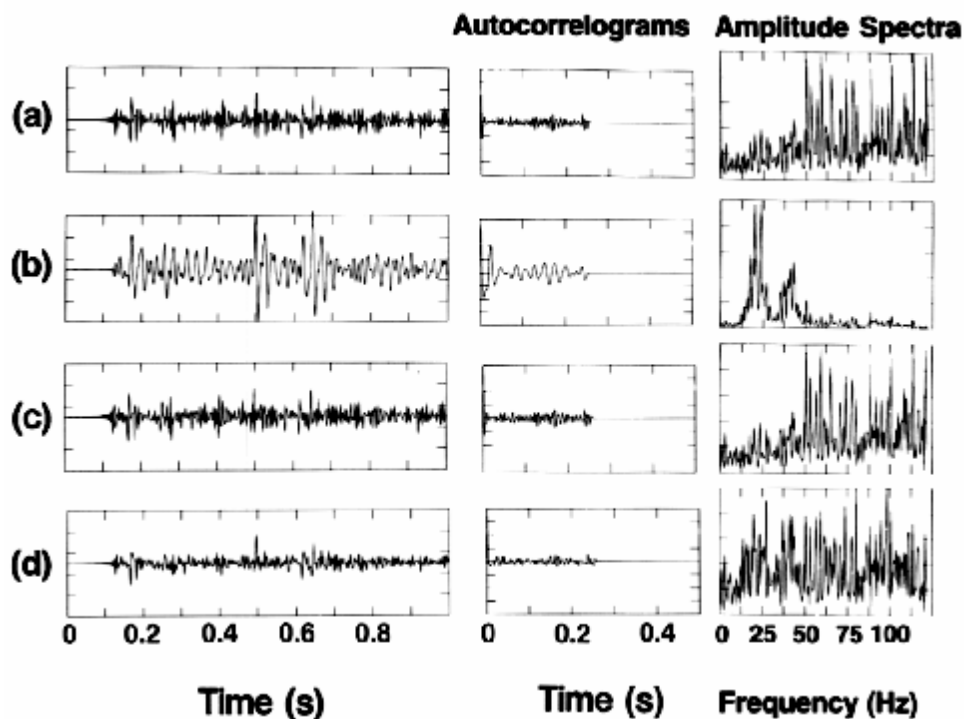


Рис. 2.32 (а) Импульсный отклик; (б) сейсмограмма; (с) деконволюция сжатия, использующая известный минимально-фазовый импульс источника; (д) деконволюция, предлагающая неизвестный минимально-фазовый импульс источника. Импульсный отклик (а) основывается на данных АК (рис. 2.8а). Для неизвестного импульса источника (т.е. допущение 4 нарушено) деконволюция сжатия дает менее совершенный результат [сравните (с) и (д)].

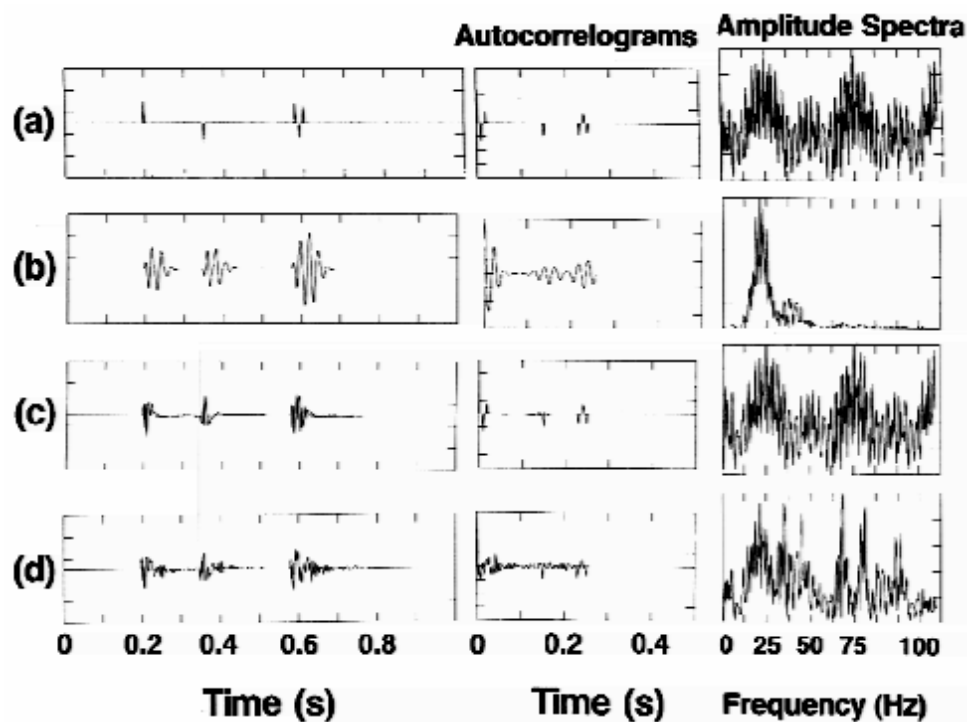


Рис. 2.33 (а) Импульсный отклик; (б) сейсмограмма; (с) деконволюция сжатия, использующая известный смешанно-фазовый импульс источника; (д) деконволюция, предлагающая неизвестный смешанно-фазовый импульс источника. Импульсный отклик (а) представляет собой рассредоточенную последовательность единичных импульсов. Для смешанно-фазового импульса источника (т.е. нарушено допущение 5) деконволюция сжатия дает результат (д) даже при известном импульсе (с).

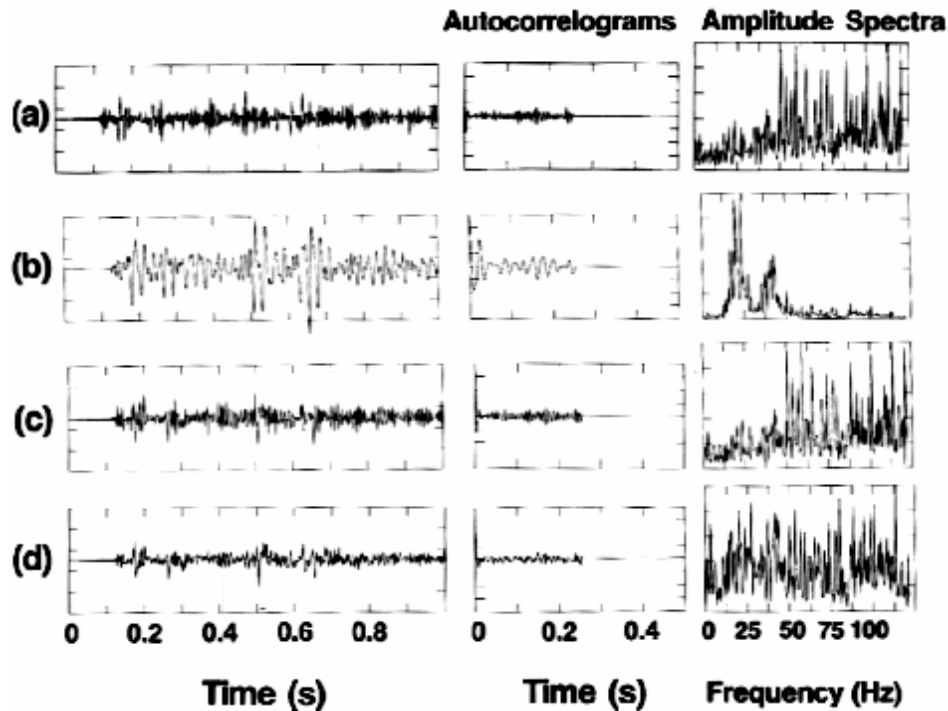


Рис. 2.34 (а) Импульсный отклик; (б) сейсмограмма; (с) деконволюция, использующая известный смешанно-фазовый импульс источника; (д) деконволюция, предлагающая неизвестный смешанно-фазовый импульс источника. Импульсный отклик (а) основан на данных АК (рис. 2.8а). Для смешанно-фазового импульса источника (т.е. нарушено допущение 5) деконволюция сжатия дает результат (д) даже при известном импульсе (с).

2.7.1 Длина оператора

Начнем с одиночного минимально-фазового импульса, показанного на рис. 2.36 (трасса b). Для него соблюдаются допущения 1-5. Идеальным результатом деконволюции сжатия является единичный импульс с нулевой задержкой (трасса a). В этом и последующих анализах мы обращаемся к автокоррелограмме и к амплитудному спектру (который построен в линейном масштабе) результата каждой деконволюции, чтобы лучше оценить полученные данные. На рис. 2.36 и следующих рисунках n , a и e относятся к длине оператора фильтра предсказания, к задержке предсказания и к предварительному отбеливанию в процентах соответственно. Длина фильтра предсказания ошибок равна $n + \alpha$. На рис. 2.36 задержка предсказания является единичной и равна 2-миллисекундному шагу дискретизации; предварительное отбеливание равно 0%. Длина оператора изменяется так, как показано на рисунке. Короткие операторы дают единичные импульсы с малой амплитудой и относительно высокочастотными хвостами. Оператор длиной 128мс дает почти совершенный единичный импульс. Более длинные операторы обеспечивают дальнейшее отбеливание спектра, приближая его к спектру импульсного отклика.

Действие деконволюции сжатия на сейсмограмму, выведенную путем свертки минимально-фазового импульса с рассредоточенной последовательностью единичных импульсов аналогична (рис. 2.37) случаю одиночного изолированного импульса (рис. 2.36). Напоминаем, что деконволюция сжатия представляет собой обратную фильтрацию, где оператор представляет собой результат обращения сейсмического импульса, полученный методом наименьших квадратов. Следовательно, чем больше коэффициентов включено в обратный фильтр, тем лучше получается результат.

Сейчас рассмотрим реальную ситуацию, когда импульс источника неизвестен. Для создания оператора деконволюции используется автокорреляция входной сейсмо-

граммы, а не сейсмического импульса (в основе этого находится допущение 4). Результат использования автокорреляции трассы, а не импульса, показан на рис. 2.38. Деконволюция восстанавливает основные аспекты последовательности единичных импульсов (трасса а). Отметим, однако, что трассы после деконволюции содержат ложные низкоамплитудные выбросы, сопровождающие каждый из реальных единичных импульсов. Мы видим, что увеличение длины оператора не улучшает результаты бесконечно; напротив, появляется все больше и больше ложных выбросов.

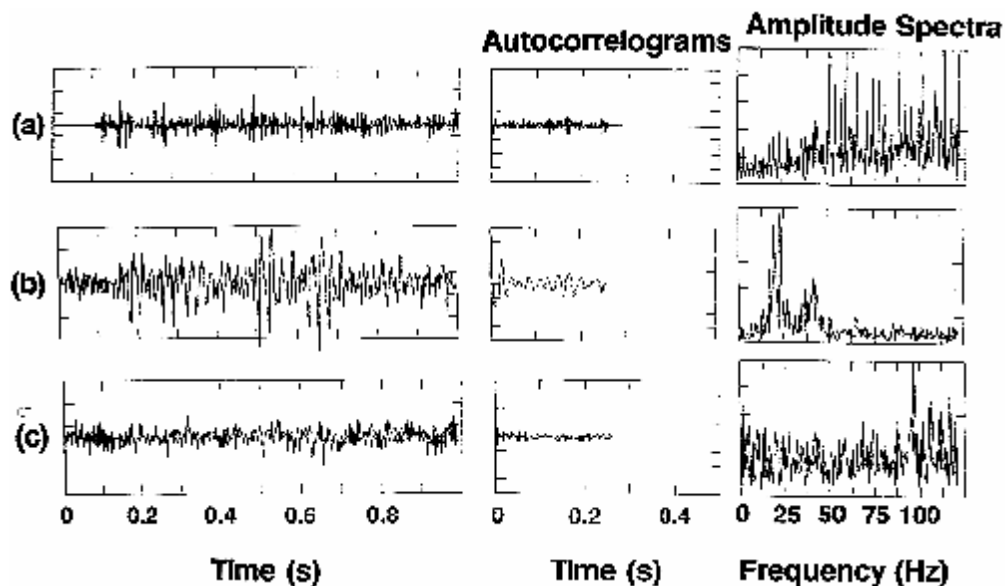


Рис. 2.35 (а) Импульсный отклик; (b) сейсмограмма с помехами; (с) деконволюция, предполагающая неизвестный смешанно- фазовый импульс источника. Импульсный отклик (а) основан на данных АК (рис. 2.8а). В присутствии случайных помех (т.е. нарушено допущение 3) деконволюция сжатия может формировать результат, который не имеет отношения к отражательной способности разреза [сравните (а) и (с)].

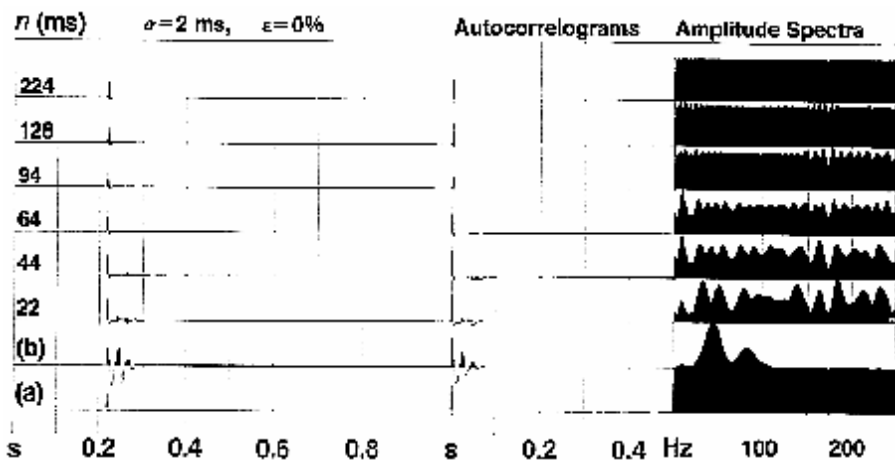


Рис. 2.36 Опробование длины оператора для одиночного изолированного входного импульса, где n = длина оператора; α = задержка предсказания; ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) Импульсный отклик; (b) сейсмограмма с минимально-фазовым импульсом источника.

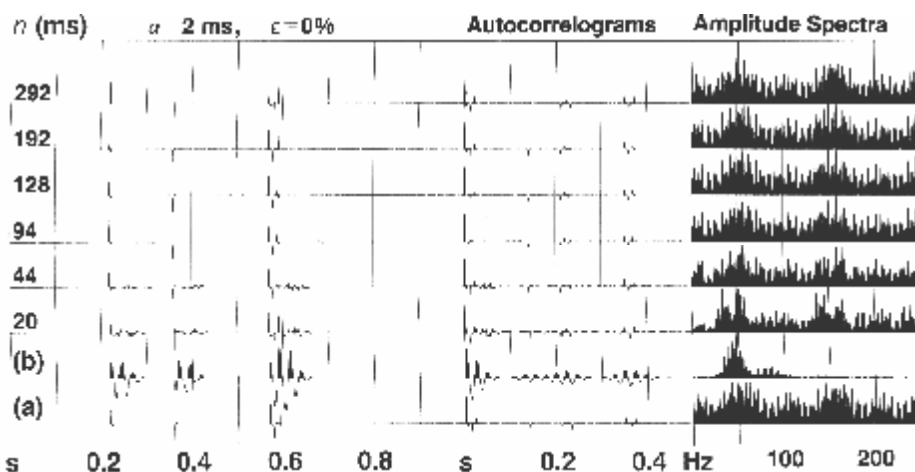


Рис. 2.37 Определение длины оператора, где n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с известным минимально-фазовым импульсом источника.

Очень короткие операторы формируют такой же тип всплеска помех, какой показан на рис. 2.36 и 2.37. Исследуем ряд опробований деконволюции на рис. 2.38 и отметим, что лучшим является 94-миллисекундный оператор. Только первые 100мс представляют автокорреляцию импульса источника. Это объясняет, почему 94-миллисекундный оператор дает лучшие результаты; задержки автокорреляции (рис. 2.38, трасса b) при превышении 94мс не представляет сейсмический импульс.

Рассмотрим сейсмограмму на рис. 2.39, где импульс предполагается неизвестным. Деконволюция восстановила единичные импульсы, которые соответствуют основным отражениям в импульсном отклике (трасса b). Оператор длиной 64мс дает хорошие результаты.

Смешанно-фазовый импульс на рис. 2.40 показывает, что может произойти при нарушении допущения 5. Импульс на рис. 2.36 представляет собой минимально-фазовый эквивалент смешанно-фазового импульса на рис. 2.40. Оба импульса имеют одинаковые автокоррелограммы и амплитудные спектры. Следовательно, операторы деконволюции для обоих импульсов являются идентичными. Поскольку допущение о минимально-фазовом сейсмическом импульсе нарушено, деконволюция не преобразует смешанно-фазовый импульс в совершенный единичный импульс: результатом деконволюции является сложный высокочастотный импульс. Отметим также, что доминирующий пик на выходе имеет отрицательный знак, тогда как импульсный отклик имеет положительный единичный импульс. Эта смена знаков может произойти при деконволюции смешанно-фазового импульса. Дальнейшее увеличение длины оператора приводит к отбеливанию спектра, 128-миллисекундный оператор дает результат, который не может быть улучшен путем дальнейшего увеличения длины оператора.

Сейсмограмма, полученная из смешанно-фазового импульса и рассредоточенной последовательности единичных импульсов (см. предыдущие рисунки) показана на рис. 2.41. Оператор длиной 94мс дает наилучший результат. Это также можно видеть на рис. 2.42, где нарушены допущения 4 и 5. Несколько хуже ситуация с сейсмограммой на рис. 2.43. Всплески, которые соответствуют основным отражениям на импульсном отклике, были восстановлены, однако имеются некоторые погрешности марок времени и обращения полярности (сопоставьте эти результаты с рис. 2.39 отражения между 0.2с и 0.3с и 0.6с и 0.7). Оператор длиной 64мс дает результат, который не может быть улучшен путем использования более длинных операторов.

Оператор какой длины нужно использовать для деконволюции сжатия? Чтобы выбрать длину оператора, в идеальном случае мы хотим использовать ФАК неизвестного сейсмического импульса. ФАК входной сейсмограммы имеет характеристики ФАК импульса (допущение 4). Следовательно, представляется целесообразным исполь-

зовать часть ФАК, полученной по входной сейсмограмме, которая должна иметь наибольшее сходство с ФАК неизвестного сейсмического импульса. Эта часть представляет собой первую переходную зону в ФАК, как видно при сопоставлении функций автокорреляции трассы b на рис. 2.36 и трассы с на рис. 2.43 предполагают этот же принцип.

2.7.2 Задержка предсказания

Мы знаем, что прогнозируемая деконволюция имеет два варианта использования: (а) деконволюция сжатия, случай единичной задержки предсказания и (б) предсказание входной сейсмограммы на будущее время, определенное задержкой предсказания. Случай (б) используется для предсказания и подавления кратных волн. Исследуем влияние параметра задержки предсказания с точки зрения интерпретации. Рассмотрим одиночный минимально-фазовый импульс на рис. 2.44. Здесь длина оператора и предварительное отбеливание (в процентах) поддерживаются постоянными, а задержка предсказания изменяется.

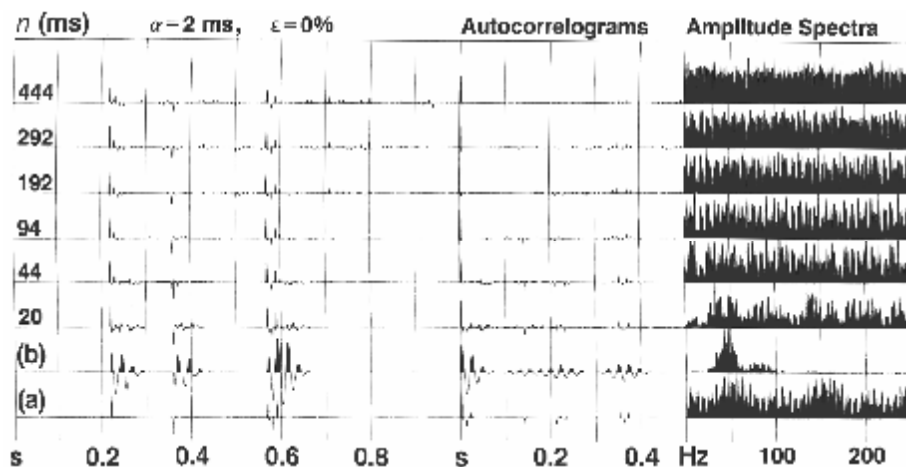


Рис. 2.38 Опробование длины оператора. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с неизвестным минимально-фазовым импульсом источника.

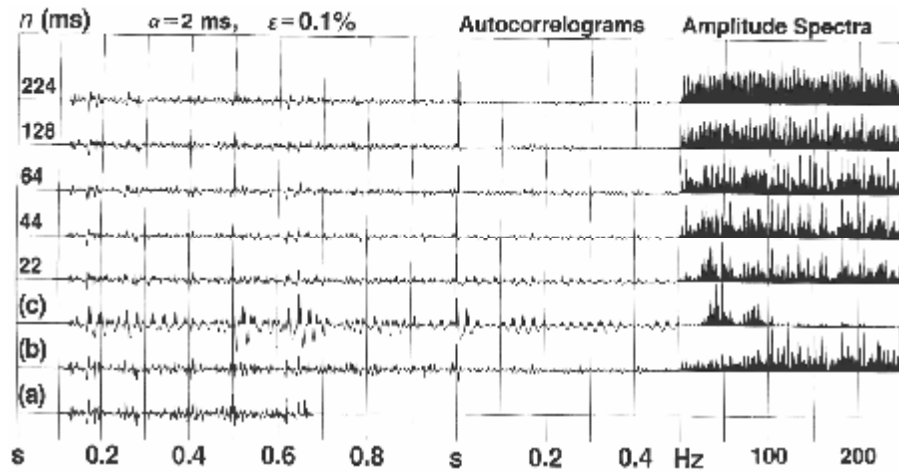


Рис. 2.39 Опробование длины оператора. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) коэффициенты отражения; (б) импульсный отклик; (с) сейсмограмма с неизвестным минимально-фазовым импульсом источника.

Когда задержка предсказания равна шагу дискретизации, результат эквивалентен деконволюции сжатия. Прогнозируемая деконволюция, которая использует задержку предсказания, больше единичной дает вместо единичного импульса импульс конечной длины. При данном входном импульсе, состоящем из $\alpha+n$ выборок прогнозируемая деконволюция, используя фильтр предсказания длиной n и задержку предсказания α , преобразует этот импульс в другой импульс, длина которого равна α выборок. Первые α задержек функции автокорреляции сохраняются, а следующие n задержек обращаются в 0. Кроме того, по мере возрастания задержки (рис. 2.44) увеличивается сходство амплитудного спектра результата с амплитудным спектром входного импульса.

При задержке предсказания, равной 94мс прогнозируемая деконволюция не оказывает никакого воздействия на входной импульс, т.к. все задержки ФАК остаются незатронутыми. Этот эксперимент имеет важное практическое значение: в идеальных условиях отсутствия помех разрешающую способность результата прогнозируемой деконволюции можно контролировать, подбирая задержку предсказания. Единичная задержка предсказания означает высшую разрешающую способность; при увеличении задержки предсказания разрешающая способность снижается. В реальных условиях, однако, эти оценки диктуются отношением сигнал/помеха. Результат деконволюции, использующей единичную задержку предсказания, содержит высокие частоты: тем не менее разрешающая способность может ухудшиться, если энергия в высокочастотном диапазоне представляет собой в основном помеху, а не сигнал.

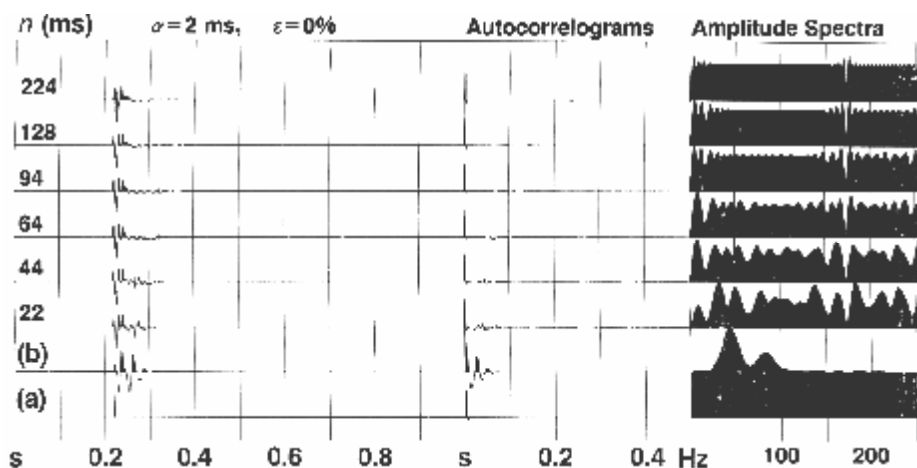


Рис. 2.40 Опробование длины оператора для одиночного входного импульса. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма со смешанно-фазовым импульсом источника.

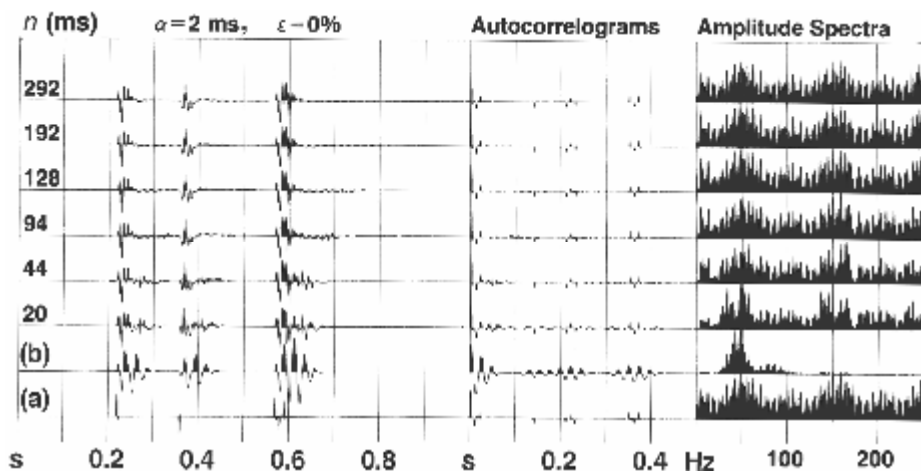


Рис. 2.41 Опробование длины оператора. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с известным смешанно-фазовым импульсом источника.

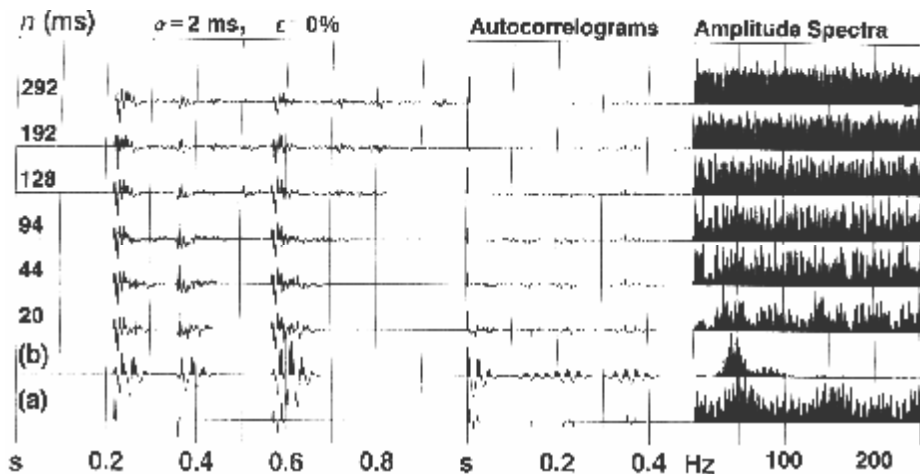


Рис. 2.42 Опробование длины оператора. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с неизвестным смешанно-фазовым импульсом источника.

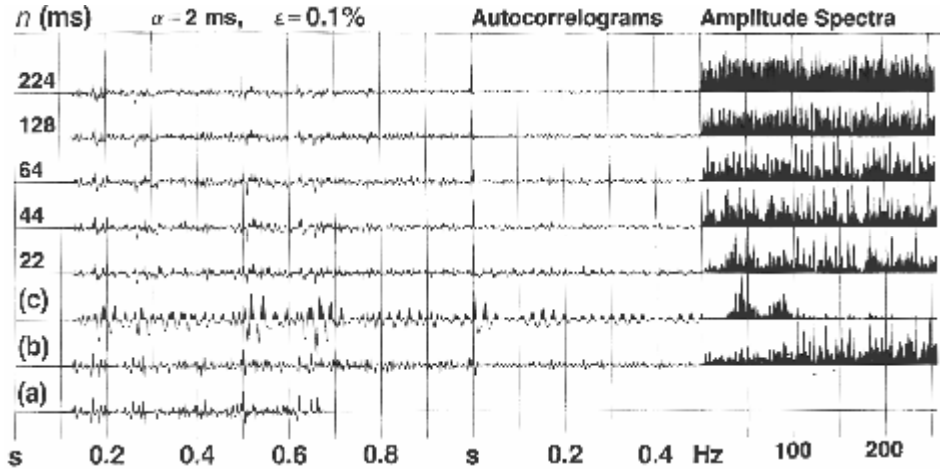


Рис. 2.43 Опробование длины оператора. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) отражательная способность; (б) импульсный отклик; (с) сейсмограмма с неизвестным смешанно-фазовым импульсом источника.

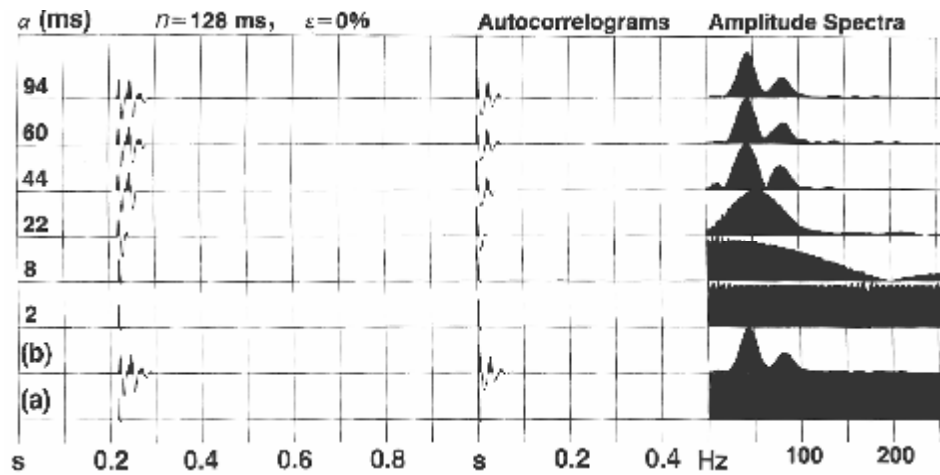


Рис. 2.44 Опробование задержки предсказания для единственного, изолированного входного импульса. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с неизвестным минимально-фазовым импульсом источника.

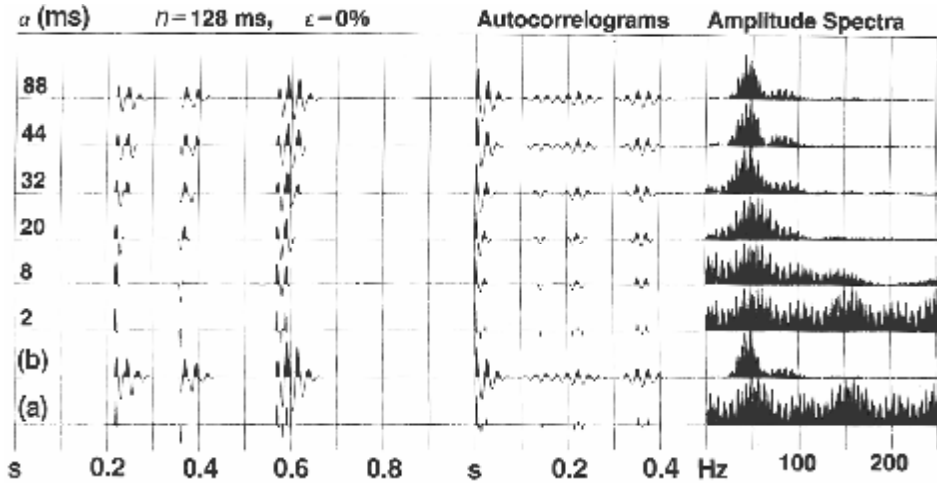


Рис. 2.45 Опробование задержки предсказания. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с известным минимально-фазовым импульсом источника.

На рис. 2.44 задержки предсказания 8 и 22мс соответствуют первому и второму переходу через нуль функции автокорреляции. Первый переход через нуль формирует всплеск с некоторой шириной, а второй переход через нуль формирует импульс с положительным и отрицательным лепестками.

Взаимосвязь между задержкой предсказания и отбеливанием также сохраняется для рассредоточенной последовательности единичных импульсов на рис. 2.45 и в случае, когда входной импульс неизвестен (рис. 2.46). Влияние задержки предсказания на результат прогнозируемой деконволюции синтетической сейсмограммы, которая была получена по данным АК (рис. 2.8а), показано на рис. 2.47 и 2.48. По мере увеличения задержки предсказания спектр результата становится менее широкополосным. Прогнозируемая деконволюция сейсмограмм, созданных из смешанно-фазового импульса, снова показывает, что разрешающую способность выходного сигнала можно контролировать путем подбора задержки предсказания (рис. 2.49-2.53).

Если задержка предсказания возрастает, полоса спектра выходного сигнала становится более ограниченной. Этого можно достичь, применяя полосовой фильтр на результате деконволюции сжатия.

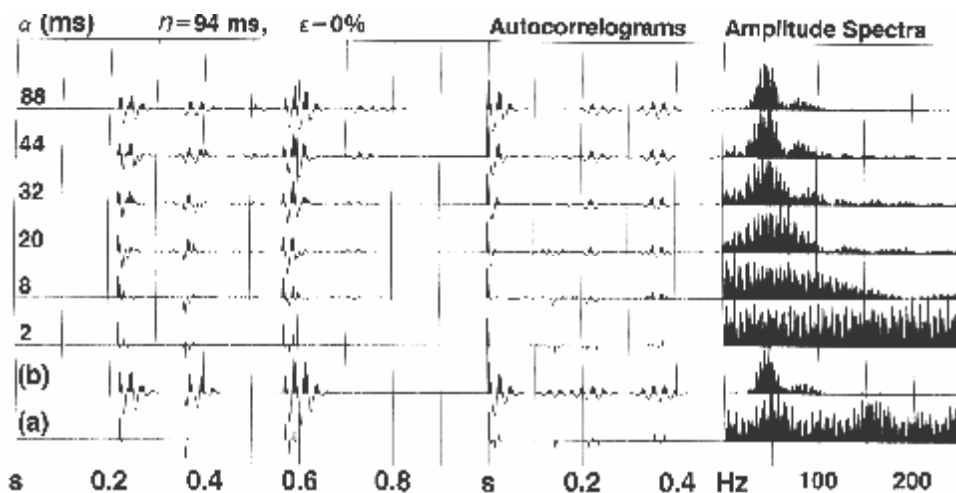


Рис. 2.46 Опробование задержки предсказания. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с неизвестным минимально-фазовым импульсом источника.

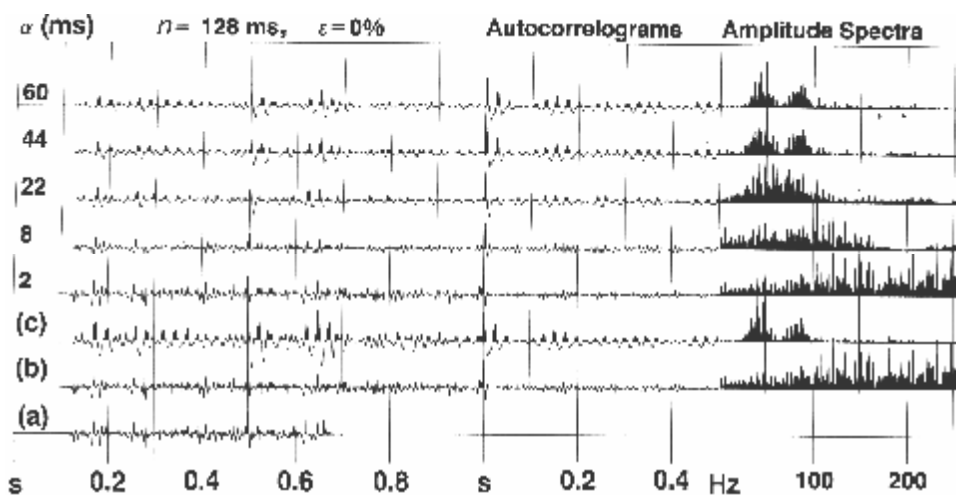


Рис. 2.47 Опробование задержки предсказания. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) отражательная способность; (б) импульсный отклик; (с) сейсмограмма с известным минимально-фазовым импульсом источника.

Являются ли эквивалентными эти два способа ограничения полосы пропускания? Обратимся к результатам для минимально-фазового (рис. 2.44) и смешанно-фазового импульсов (рис. 2.49). Обратите внимание, что результат 22-миллисекундной задержки предсказания имеет амплитудный спектр в ограниченной полосе приблизительно от 0 до 100Гц. Однако, форма спектра в этой полосе отлична от прямоугольной; она сходна, скорее, с формой входного импульса. Прямоугольная форма получается в случае, когда полосовой фильтр (0 - 100Гц) применяется к результату деконволюции сжатия (задержка предсказания 2мс). Следовательно, деконволюция сжатия, сопровождаемая полосовой фильтрацией, не является эквивалентом прогнозируемой деконволюции с задержкой предсказания больше единичной.

В заключении отметим, что при возрастании задержки предсказания результат прогнозированной деконволюции будет меньше напоминать единичный импульс. Этим эффектом можно воспользоваться, т.к. он позволяет контролировать результат деконволюции путем задержки предсказания. Применение деконволюции сжатия к полевым данным не всегда желательно, т.к. оно усиливает в данных высокочастотную помеху. Более заметный эффект неединичной задержки предсказания – это подавление высоко-

частотного конца спектра и сохранение общей формы спектра входных данных. Этот эффект можно наблюдать на рис. 2.48 и 2.53, что соответствует минимально-фазовому и смешанно-фазовому импульсам. Если задержка предсказания возрастает далее, оказывается воздействие на низкочастотный конец спектра и полоса пропускания выходного сигнала становится более ограниченной.

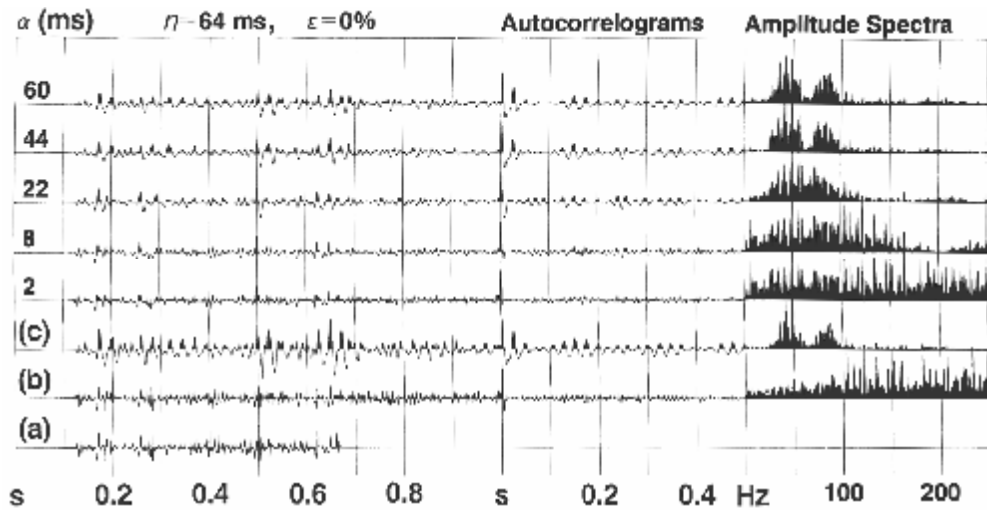


Рис. 2.48 Опробование задержки предсказания. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) отражательная способность; (б) импульсный отклик; (с) сейсмограмма с неизвестным минимально-фазовым импульсом источника.

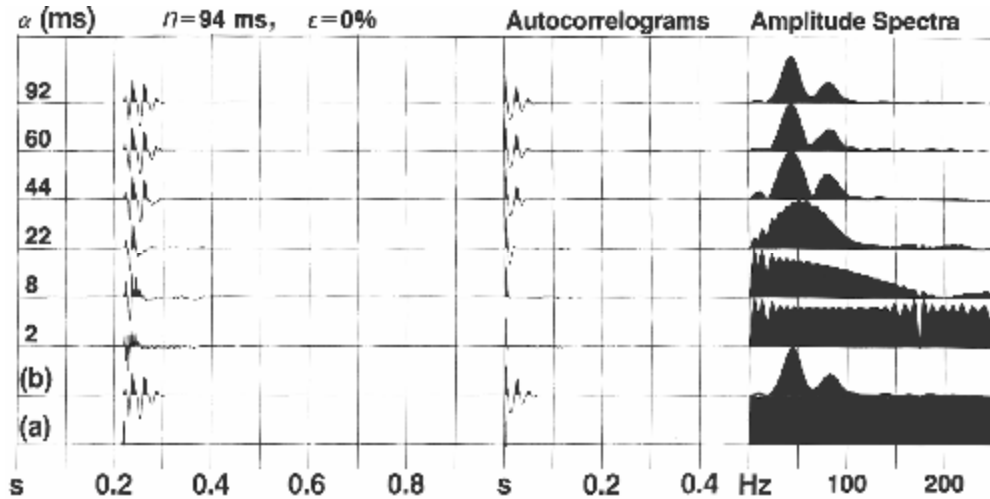


Рис. 2.49 Опробование задержки предсказания для единичного, изолированного входного импульса. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма со смешанно-фазовым импульсом источника.

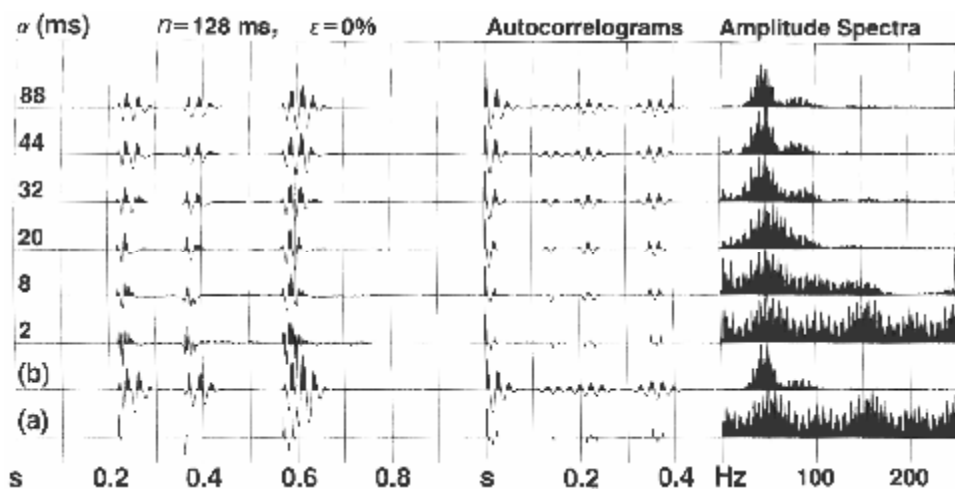


Рис. 2.50 Опробование задержки предсказания. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с известным смешанно-фазовым импульсом источника.

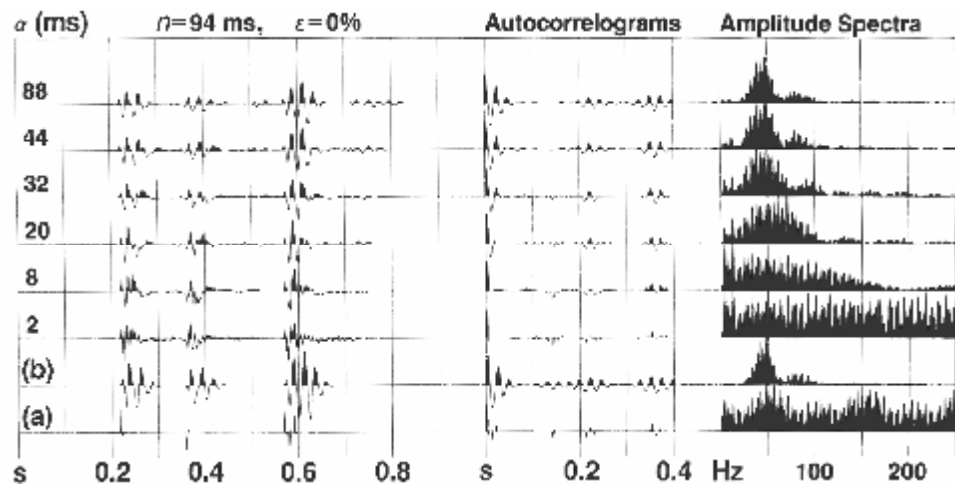


Рис. 2.51 Опробование задержки предсказания. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с неизвестным смешанно-фазовым импульсом источника.

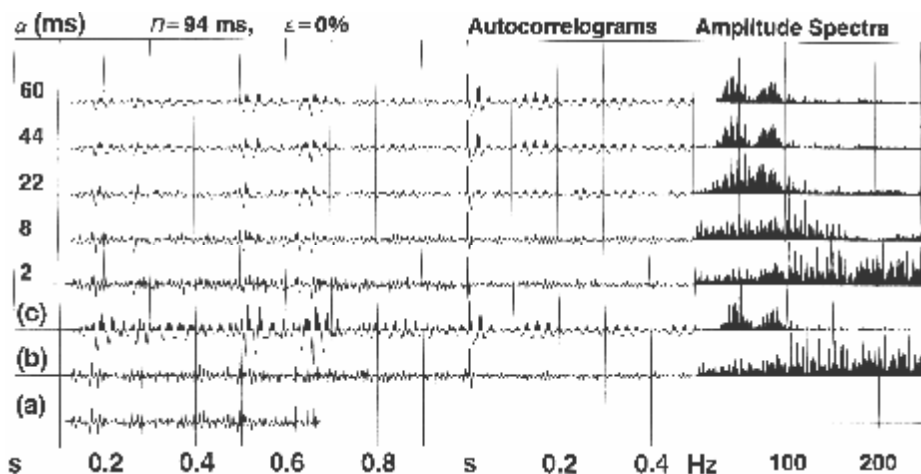


Рис. 2.52 Опробование задержки предсказания. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) отражательная способность; (б) импульсный отклик; (с) сейсмограмма с известным смешанно-фазовым импульсом источника.

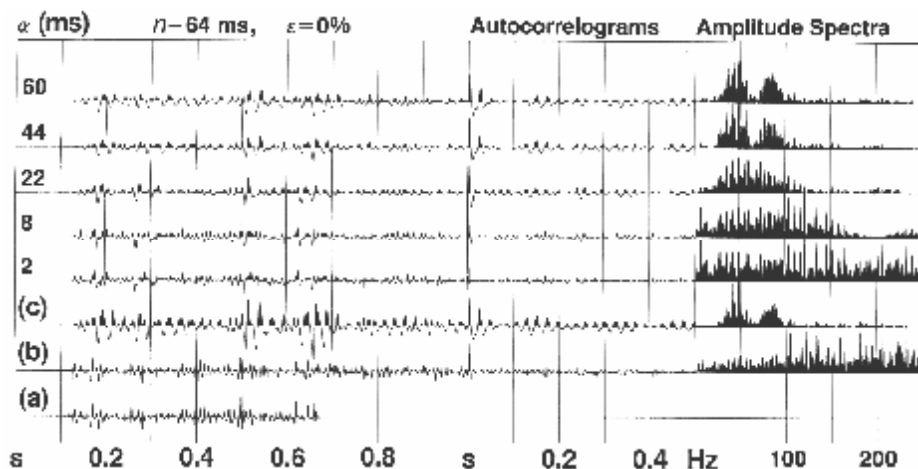


Рис. 2.53 Опробование задержки предсказания. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) отражательная способность; (б) импульсный отклик; (с) сейсмограмма с неизвестным смешанно-фазовым импульсом источника.

2.7.3 Предварительное отбеливание

Причины предварительного отбеливания были рассмотрены в Разделе 2.6.2. Рассмотрим одиночный изолированный минимально-фазовый импульс (рис. 2.54). Будем изменять предварительное отбеливание, выраженное в процентах при постоянных длине оператора и задержке предсказания. Отметим, что эффект изменения предварительного отбеливания сходен с эффектом изменения задержки предсказания, т.е. по мере возрастания предварительного отбеливания спектр становится менее широкополосным. Сравните рис. 2.44 и 2.54. Обратите внимание, что предварительное отбеливание сужает спектр, сохраняя его гладкость, тогда как увеличение задержки предсказания сужает спектр и изменяет его форму, делая его более похожей на спектр входного сейсмического импульса. Эти характеристики можно также получить из форм входных импульсов. Предварительное отбеливание сохраняет характер результата, близкий к единичному импульсу, хотя и добавляет низкоамплитудный низкочастотный хвост (рис. 2.54). С другой стороны, при увеличении задержки предсказания формируется импульс, длительность которого равна задержке предсказания.

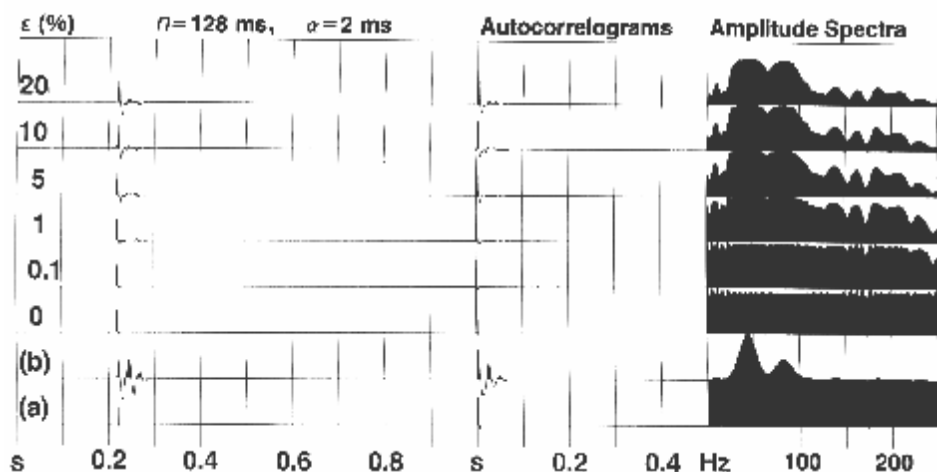


Рис. 2.54 Опробование предварительного отбеливания для одиночного изолированного входного импульса. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с минимально-фазовым импульсом источника.

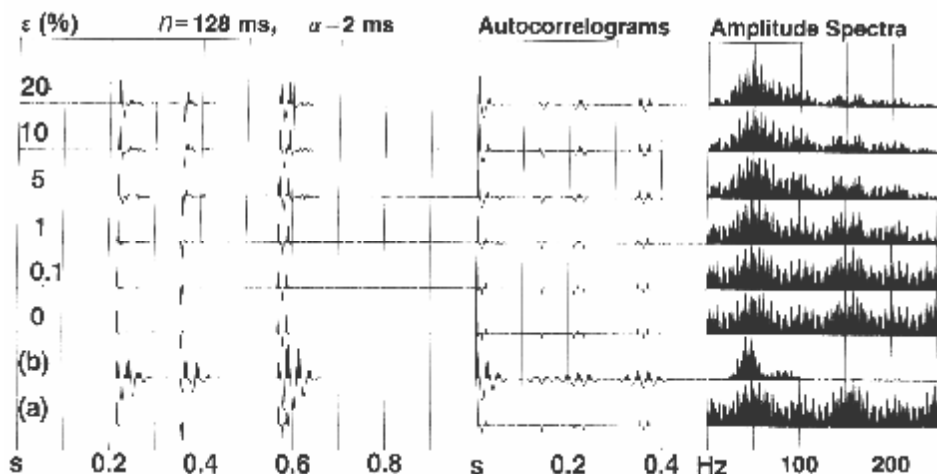


Рис. 2.55 Опробование предварительного отбеливания. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с известным минимально-фазовым импульсом источника.

Действие предварительного отбеливания на сейсмограмму, представляющую собой последовательность единичных импульсов с известным и неизвестным минимально-фазовым импульсом показана на рис. 2.55 и 2.56 соответственно. Действие предварительного отбеливания на деконволюцию синтетической сейсмограммы, полученной по данным АК (рис. 2.8а) показано на рис. 2.57 и 2.58 для известного и неизвестного минимально-фазовых импульсов. Опробования предварительного отбеливания с применением смешанно-фазового импульса показаны на рис. 2.59. Комбинированное действие задержки предсказания, больше единичной и предварительного отбеливания для единичного изолированного импульса показано на рис. 2.60. Эти рисунки показывают, что предварительное отбеливание сужает спектр результата, и он становится спектром в ограниченной полосе. В частности, опробования на рис. 2.54 и 2.59, в которых использованы единичные изолированные минимально-фазовый и смешанно-фазовый импульсы показывают, что деконволюция сжатия с некоторым количеством предварительного отбеливания в определенной степени эквивалентна декон

волюции сжатия без предварительного отбеливания, после которой следует широкополосная фильтрация.

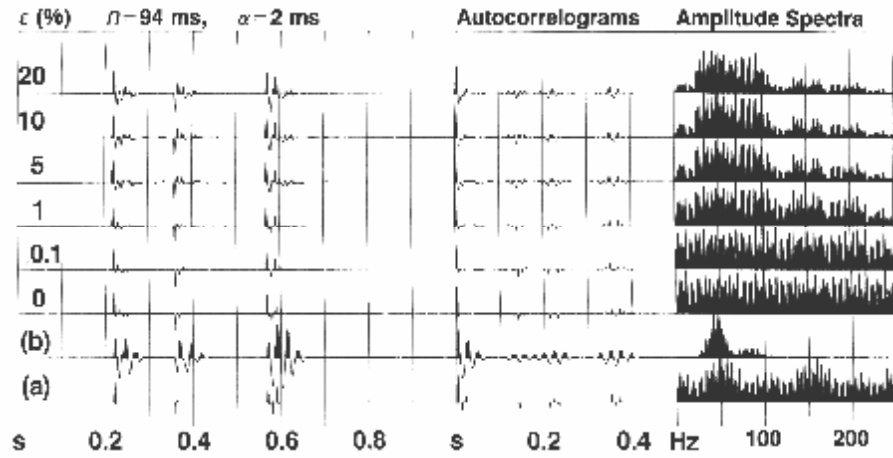


Рис. 2.56 Опробование предварительного отбеливания. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ε = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с неизвестным минимально-фазовым импульсом источника.

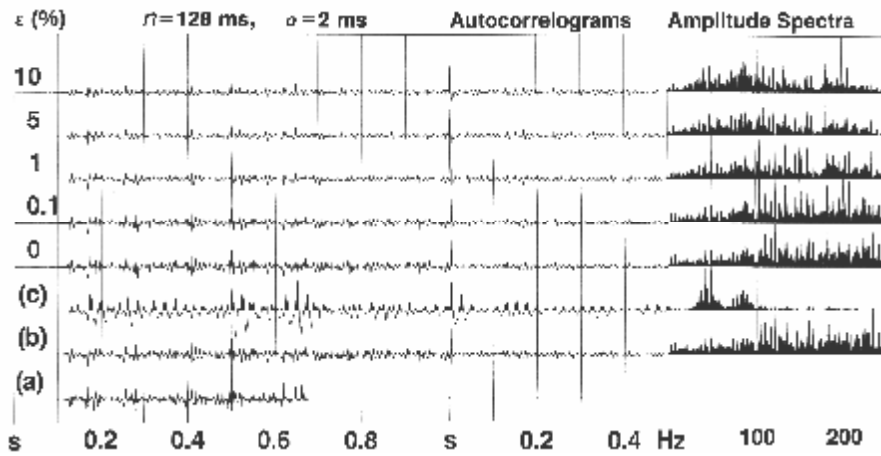


Рис. 2.57 Опробование предварительного отбеливания. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ε = предварительное отбеливание в процентах. (а) отражательная способность; (б) импульсный отклик; (в) сейсмограмма с известным минимально-фазовым импульсом источника.

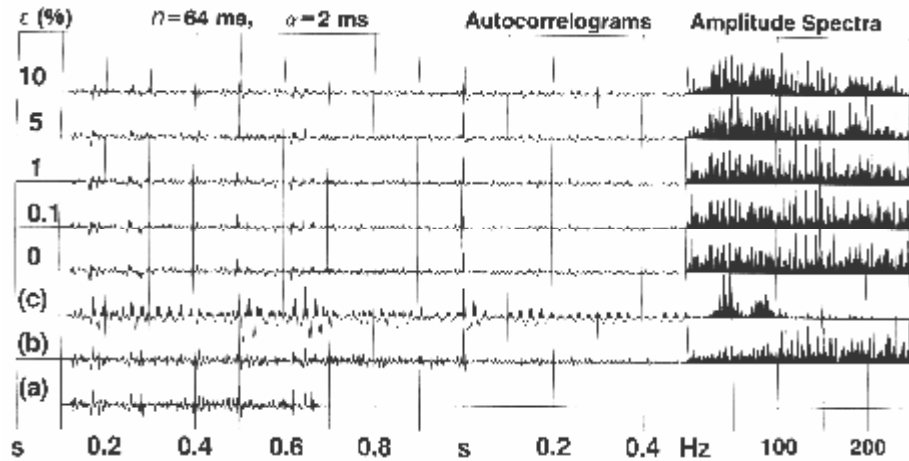


Рис. 2.58 Опробование предварительного отбеливания. $n = 64$ ms, $\alpha = 2$ ms, $\varepsilon =$ предварительное отбеливание в процентах. (а) отражательная способность; (б) импульсный отклик; (в) сейсмограмма с неизвестным минимально-фазовым импульсом источника.

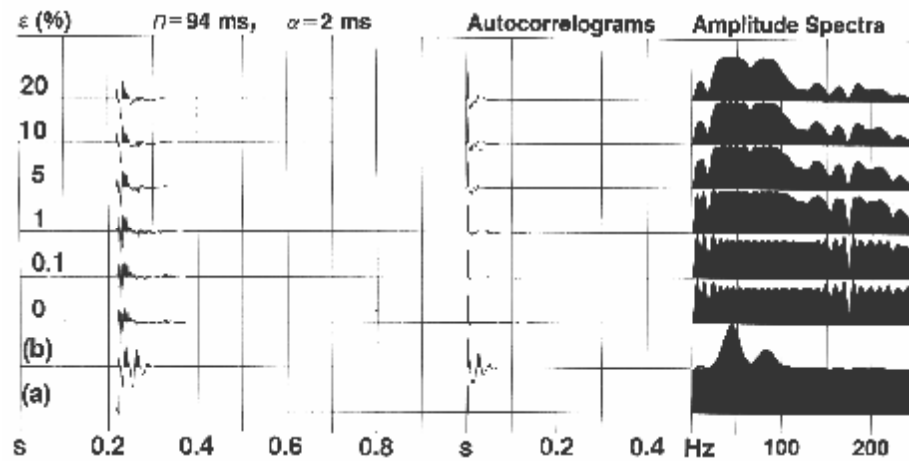


Рис. 2.59 Опробование предварительного отбеливания для одиночного изолированного входного импульса. $n = 94$ ms, $\alpha = 2$ ms, $\varepsilon =$ предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма со смешанно-фазовым импульсом источника.

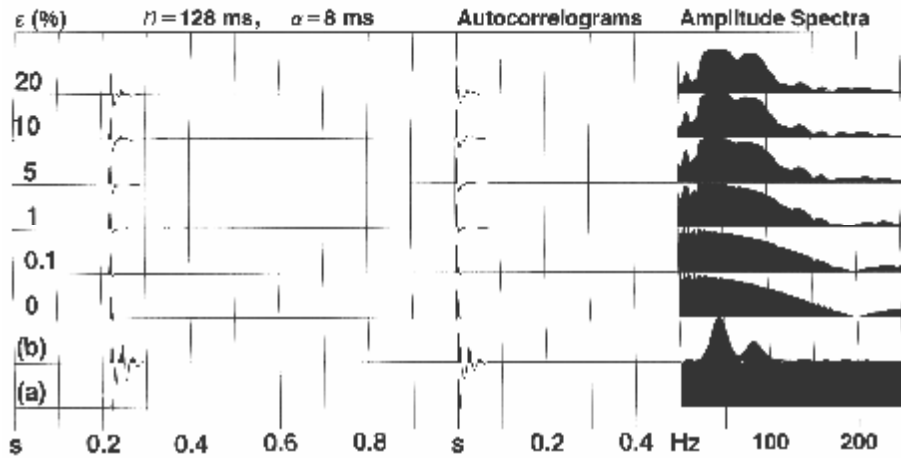


Рис. 2.60 Опробование предварительного отбеливания для одиночного изолированного входного импульса. n = длина оператора, α = задержка предсказания, ϵ = предварительное отбеливание в процентах. (а) импульсный отклик; (б) сейсмограмма с минимально-фазовым импульсом источника.

Это, однако, не вполне справедливо, поскольку предварительное отбеливание оставляет некоторое количество относительно подавленной энергии в высокочастотном конце спектра. Из рис. 2.60 мы делаем вывод, что прогнозируемая деконволюция с задержкой предсказания больше единичной и с некоторым количеством предварительного отбеливания дает результат, в определенной степени эквивалентный деконволюции сжатия, которая сопровождается полосовой фильтрацией.

В заключении мы можем сказать, что предварительное отбеливание дает результат в ограниченной полосе пропускания. Однако, по сравнению с изменением задержки предсказания эффект является менее управляемым. Изменяя задержку предсказания, мы имеем определенные мысли о ширине полосы пропускания выходных данных, поскольку она связана с задержкой предсказания. Чем меньше задержка предсказания, тем шире полоса пропускания выходных данных. Предварительное отбеливание используется только для того, чтобы избежать числовой неустойчивости при решении матрицы Теорлитца. На практике стандартным является предварительное отбеливание от 0.1 до 1%.

2.7.4. Действие случайных помех на деконволюцию

Согласно допущению 3 мы считаем, что компонента помех в зарегистрированной сейсмограмме равна 0. Автокорреляция идеальных случайных помех на всех задержках, кроме нулевой, равна 0 (рис. 2.12). Следовательно, действие случайных помех на операторы деконволюции должно быть сходным с действием предварительного отбеливания. Оба эти действия модифицируют диагональ матрицы автокорреляции, приближая ее к главной диагонали [уравнение (2.22)]. Однако, компонента помех также несколько модифицирует нулевые задержки ФАК. Сопоставим автокоррелограммы трасс на рис. 2.54 и 2.61. На рис. 2.54 рассматривается изолированный минимально-фазовый импульс, а на рис. 2.61 к этому же импульсу добавлены случайные помехи. Результат деконволюции сжатия импульса, осложненного помехами с применением 128-миллисекундного оператора сходен с результатом деконволюции сжатия импульса без помех, в которой используется спектр такой же длины, но с 20-процентным предварительным отбеливанием. Этот результат имеет практическое значение: предварительное отбеливание эквивалентно добавлению оптимальных случайных помех к системе. Поскольку случайные помехи обычно содержатся в системе, к сейсмограмме нужно добавлять лишь весьма незначительное количество белого шума, например, 0.1%.

Влияние случайных помех на рабочие характеристики деконволюции рассмотрено на рис.2.62 и 2.63. Результаты нужно сопоставить со случаем отсутствия помех (соответственно – рисунки 2.39 и 2.43). Обратите внимание, что помехи оказывают неблагоприятное влияние на деконволюцию. Например, при сопоставлении рис.2.39 и 2.62 можно видеть, что результат деконволюции сейсмограммы, осложненной помехами, содержит ложные выбросы (например, между 0.5 и 0.6), которые могут быть интерпретированы как действительные отражения. Есть примеры полевых данных, осложненных помехами, которые дают лучшую сумму, когда они не обработаны деконволюцией. Только основываясь на опробовании, мы можем определить, дает ли деконволюция удовлетворительные результаты в случае данных, осложненных помехами.

2.7.5 Подавление кратных волн

Мы знаем, что фильтр предсказания прогнозирует в сейсмограмме периодические события, например, кратные волны. Фильтр предсказания ошибок дает непрогнозируемую компоненту сейсмограммы, т.е. последовательность коэффициентов отражения. Например, рассмотрим простой случай кратных отражений от поверхности и дна водного слоя. Если коэффициент отражения дна водного слоя c_w , а глубина водного слоя эквивалентна полному времени пробега, t_w , временная последовательность будет иметь вид:

$$(1, 0, \dots, 0, -c_w, 0, \dots, 0, c_w^2, 0, \dots, 0, -c_w^3, \dots)$$

как показано на рис.2.64 (трассы b и c). Импульсы на трассе b разделены временем t_w . Отметим, что периодичность последовательности (трассы b и c) проявляется в амплитудном спектре в виде периодических пиков (или вырезов). Чем больше единичные импульсы разнесены во времени, тем ближе друг к другу располагаются пики (или вырезы) в амплитудном спектре.

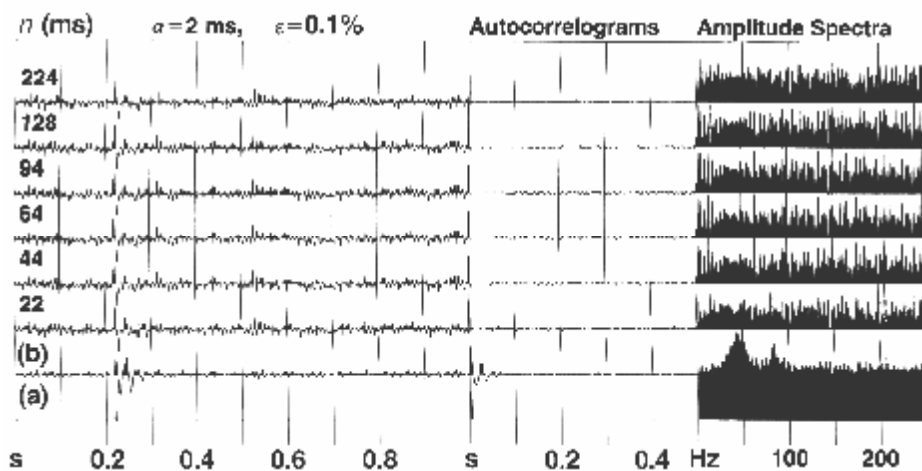


Рис.2.61 Действие случайных помех на рабочие характеристики деконволюции. Входная сейсмограмма (b), ассоциированная с отражательной способностью (a), содержит единственный изолированный импульс (около 0,2с), окруженный случайными помехами. n - длина оператора, α - задержка предсказания, ϵ - предварительное отбеливание в процентах.

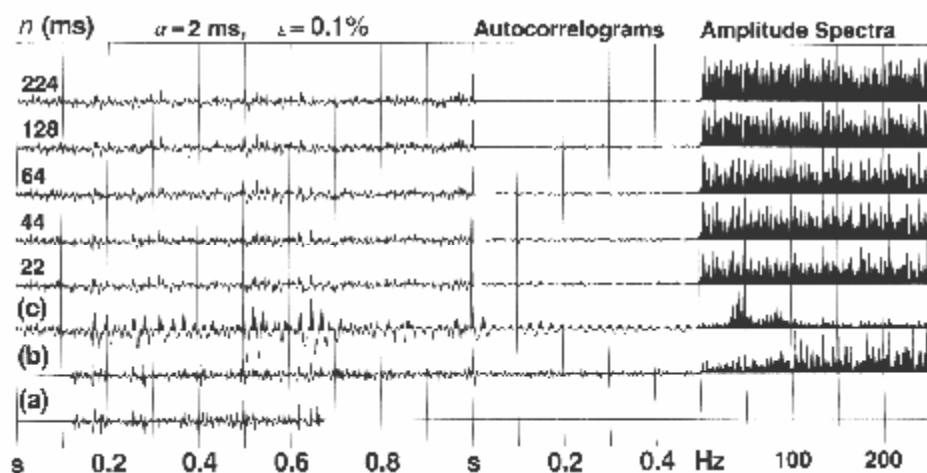


Рис.2.62 Действие случайных помех на рабочие характеристики деконволюции. (а) отражательная способность, (b) импульсный отклик. Входная сейсмограмма (с) с неизвестным минимально-фазовым импульсом источника осложнена помехами. n - длина оператора, α - задержка предсказания, ϵ - предварительное отбеливание в процентах.

Свободную от помех модель фильтрации для сейсмограммы, содержащей кратные отражения от поверхности и дна водного слоя, можно записать следующим образом:

$$x(t) = w(t) * m(t) * e(t) \quad (2.30)$$

где $m(t)$ представляет последовательность всплесков реверберации в слое воды (рис.2.64, трасса b) и $e(t)$ сейчас представляет импульсный отклик разреза, из которого исключены кратные отражения, ассоциированные с водным слоем. Прогнозируемая деконволюция может подавить эту периодическую компоненту в сейсмограмме, как можно видеть на примере трассы d.

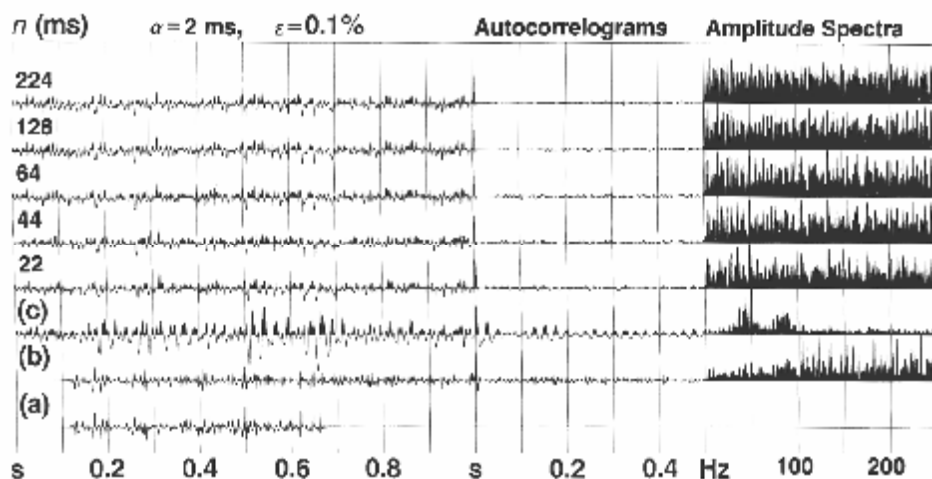


Рис.2.63 Действие случайных помех на рабочие характеристики деконволюции. (а) отражательная способность, (b) импульсный отклик. Входная сейсмограмма (с) с неизвестным смешанно-фазовым импульсом источника осложнена помехами. n - длина оператора, α - задержка предсказания, ϵ - предварительное отбеливание в процентах.

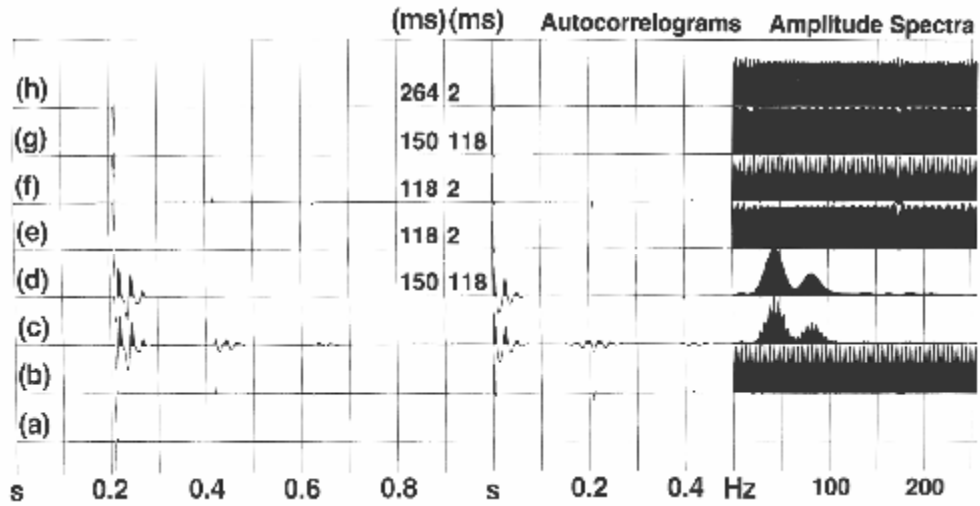


Рис.2.64 Отражательная способность; (b) импульсный отклик; (c) сейсмограмма. Двухшаговая деконволюция, направленная на подавление последовательности кратных волн, затем сжимаем оставшийся первичный импульс (d) \rightarrow (e). Процесс может быть выполнен в обратном порядке (f) \rightarrow (g). n – длина оператора, α – задержка предсказания.

Обратите внимание, что имеются две цели прогнозируемой деконволюции: (a) сжатие сейсмического импульса $w(t)$; (b) предсказание и подавление кратных волн $m(t)$. Первая цель достигнута с помощью оператора с единичной задержкой предсказания, а вторая – с помощью оператора, у которого длина задержки больше единичной. Для определения подходящей задержки с целью подавления кратных волн можно использовать автокорреляцию входной трассы. Периодичность, обусловленная кратными отражениями, можно видеть на автокоррелограмме трассы с (рис.2.64): это изолированная последовательность пакетов энергии в окрестности 0.2 и 0.4с. Чтобы обойти первую часть автокоррелограммы, которая представляет сейсмический импульс, необходимо выбрать задержку предсказания. Чтобы включить первый пакет энергии в автокоррелограмму, необходимо выбрать длину оператора. После применения прогнозируемой деконволюции у нас остается только первичное отражение от дна водного слоя. Изолированные выбросы на автокоррелограмме подавлены, а периодические пики на амплитудном спектре удалены (трасса d). Если требуется, основной импульс может быть с шагом в единичный импульс (трасса e) путем применения деконволюции сжатия к результату прогнозируемой деконволюции (трасса d). Последовательность может быть обратной: сначала применяется деконволюция сжатия (трасса f), а затем – прогнозируемая деконволюция (трасса g).

Используя достаточно длинный оператор деконволюции сжатия, в одном шаге можно достичь две цели, как видно на примере трассы h. Однако, этот подход может оказаться опасным, если действительные отражения непреднамеренно подавлены, как можно видеть на рис.2.65.

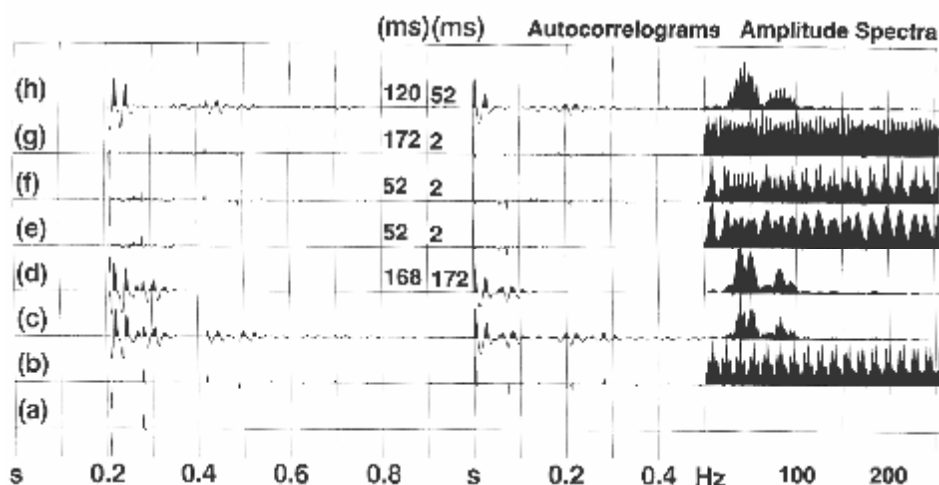


Рис.2.65 Прогнозируемая деконволюция для подавления кратных волн. (а) Отражательная способность; (b) импульсный отклик; (с) сейсмограмма. Двухшаговая деконволюция: прогнозируемая деконволюция (d) сопровождается деконволюцией сжатия (е). Трассы (f), (g) и (h) получаются в том случае когда, одношаговая деконволюция применяется к входной трассе (с) с применением длин оператора n и задержек предсказания α .

Здесь отражение от дна водного слоя сопровождается более глубоким отражением на времени около 0.28с (трасса а).

Импульсный отклик содержит кратные отражения от поверхности и дна водного слоя и многократные отражения в тонком слое, обусловленные более глубокой отражающей поверхностью (трасса b). Амплитудный спектр содержит парные пики, что указывает на присутствие двух различных периодических компонент в сейсмограмме. Тщательный подбор параметров прогнозируемой деконволюции дает трассу, содержащую только те импульсы, которые ассоциированы с дном водного слоя и более глубокой отражающей поверхностью (трасса d). Затем следует деконволюция сжатия, которая дает два единичных импульса, представляющие дно водного слоя и более глубокое первичное отражение. Деконволюция сжатия формирует последовательность коэффициентов отражения и единичные импульсы, которые представляют кратные отражения (трасса f). Если используется более длинный оператор деконволюции сжатия, первичное отражение может быть просто удалено (трасса g). Если оператор прогнозируемой деконволюции используется с неподходящими параметрами, первичное отражение снова может быть легко удалено (трасса h).

Как мы можем гарантировать, что деконволюция не будет уничтожать первичные отражения? Исследуем автокоррелограмму трассы с на рис.2.65. Первые 50мс представляют сейсмический импульс. Затем следует всплеск (от 50 до 170мс), который представляет корреляцию дна водного слоя и первичное отражение. Изолированный всплеск от 170 до 340мс представляет последовательность кратных отражений в том слое и кратных отражений от поверхности и дна водного слоя. Должна быть выбрана задержка предсказания, чтобы обойти первую часть автокоррелограммы, представляющую сейсмический импульс и возможную корреляцию между первичными отражениями. Длина оператора должна быть выбрана так, чтобы был включен первый изолированный всплеск (в данном случае – между 170 и 340мс).

Периодичность кратных отражений сохраняется только при вертикальном падении и нулевом выносе. Следовательно, прогнозируемая деконволюция, нацеленная на подавление кратных отражений, может не быть полностью эффективной, когда она применяется к данным с нулевым выносом, таким как данные ОПВ или ОСТ. Иногда прогнозируемая деконволюция применяется к данным, суммированным по ОСТ с целью подавления кратных отражений. Рабочие характеристики такого подхода могут быть неудовлетворительными, т.к. отношения амплитуд кратных волн часто существ-

венно изменены процессом суммирования, в первую очередь вследствие разности скоростей первичных и кратных волн. Кроме того, компенсация геометрического расхождения с помощью функции скоростей первичных волн неблагоприятно влияет на амплитуды кратных волн в данных с нулевым выносом. Это одна область, в которой сохраняются периодичность и амплитуды кратных волн, область наклонной суммы (slant stack). В Разделе 7.5 рассматривается применение прогнозируемой деконволюции к данным наклонной суммы с целью подавления кратных волн.

2.7.6 Примеры полевых данных

Исследуем параметры деконволюции на примерах полевых данных. На рис.2.66 показана выборка ОСТ, которая содержит пять отражений около 1.1, 1.35, 1.85, 2.15 и 3.05с. Выборка содержит такие сильные реверберационные волны, ассоциированные с этими отражениями. На ри.2.66 – 2.69 и 2.75, 2.76 длина входных выборок равна 6с; отражаются только первые 4с результатов. Исследование параметров деконволюции начнем с анализа временного окна с целью оценки ФАК. Первое выбранное окно может иметь полную длину (6с), как показано на рис.2.66а. Сплошная линия на выборках ОСТ обозначает начало и конец временного окна. В нижней части каждого изображения показана автокоррелограмма записи. Второй выбор должен исключить более глубокую часть записи, где преобладают случайные помехи. Начало окна выбирается как траектория первых вступлений (рис.2.66б). Третий выбор может исключать не только более глубокие части, но и верхнюю часть записи, которая содержит энергию, соответствующую головным волнам (рис.2.66с). Эти волны проходят внутри водного слоя и не являются частью сигнала, отраженного от глубинных слоев.

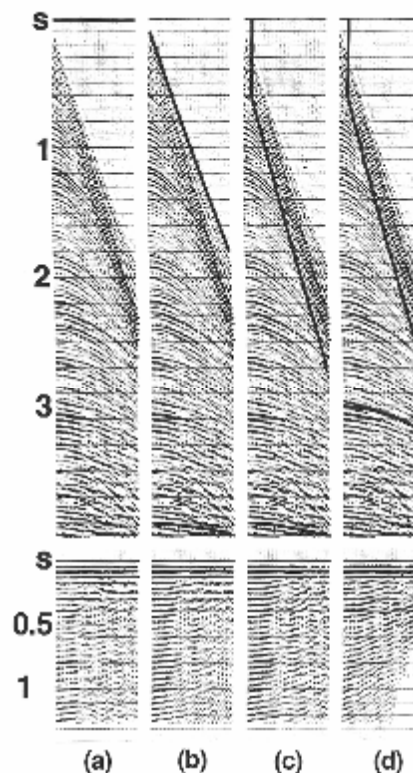


Рис.2.66 Опробование окна автокорреляции с целью разработки операторов деконволюции. Сплошные линии означают границы окна. В выборке (а) включена полная длина (6мс). Под записями отображены автокоррелограммы.

Сопоставляя автокоррелограммы этих различных окон, можно видеть, что третий выбор наилучшим образом представляет характер многократных отражений (рис.2.66с) в большинство выносов. Все трассы в автокоррелограмме в пределах первых 150мс выглядят одинаково. Эта верхняя часть автокоррелограммы характеризует основной сейсмический импульс, содержащийся в данных. В общем случае окно автокорреляции должно включать часть записи, которая содержит полезные отражения и исключать когерентные или некогерентные помехи. Функция автокорреляции, осложненная помехами, является нежелательной, т.к. процесс деконволюции наиболее эффективен на данных свободных помех (допущение 3).

Другим аспектом окна автокорреляции является длина окна. На рис.2.66d показана автокоррелограмма, оцененная по узкому окну. Автокоррелограмма, оцененная по более узкой части временного окна (правая часть записи) в некоторых случаях может потерять характеристики многократных отражений и основного сейсмического им-

пульса. В общем случае происходит смещение ФАК, т.к. величина первой задержки рассчитывается, например, по n нулевым выборкам, величина второй задержки – по $(n - 1)$ нулевым выборкам и т.д. Если n недостаточно велико, может возникнуть нежелательное смещение. Насколько большим должно быть окно данных, чтобы избежать такого смещения? Если наибольшая задержка автокорреляции, используемая при разработке оператора деконволюции, равна m , следует руководствоваться правилом, что количество выборок данных должно быть не менее $8m$.

Сейчас, когда окно автокорреляции определено, исследуем длину оператора. На рис.2.67 выбраны: задержка предсказания – 4мс (т.е. она равна шагу дискретизации), предварительное отбеливание – 0.1%. Автокоррелограммы (под каждой выборкой) отображены для диагностических целей. По результатам анализа моделей отдельного единичного импульса, рассредоточенных единичных импульсов и отражательной способности короткий (40мс) оператор оставляет некоторое количество энергии, которая соответствует последовательности основного импульса ее реверберирующей волны в записи. Для деконволюции сжатия с оператором длиной 160мс нет остаточной энергии, ассоциированной с основным импульсом и реверберационными волнами. Любой оператор длиннее 160мс не дает существенного изменения выходных данных. Что касается результата оператора длиной 160мс, то следует отметить, что открыты отражения на временах 1.1, 1.35, 1.85, и 2.15 на ближнем выносе, сейсмический импульс сжат, а многократные отражения в тонком слое от части подавлены. длина оператора равно 160мс, а предварительное отбеливание – 0.1%; задержка предсказания изменяется. Если она возрастает, процесс деконволюции будет менее эффективным в расширении спектра, а автокоррелограммы содержат возрастающее количество энергии при нулевых задержках. При задержке предсказания, равной 128мс, процесс деконволюции становится неэффективным. На практике обычно берутся единичные величины задержки предсказания (деконволюция) или первый или второй переход через нуль, функции автокорреляции (прогнозируемая деконволюция).

Наконец, будем изменять предварительное отбеливание при фиксированных задержке предсказания (4мс) и длине оператора (160мс) – рис.2.69. При увеличении предварительного отбеливания процесс деконволюции становится менее эффективным. Высокочастотный конец спектра не сглаживается (так же как и его остальная часть – рис.2.54). Обратите внимание, что в автокоррелограмме возрастает содержание энергии по мере увеличения предварительного отбеливания при нулевых задержках. На практике не рекомендуется задавать большой процент предварительного отбеливания: обычно величина от 0.1 до 1% гарантирует устойчивость при разработке оператора деконволюции.

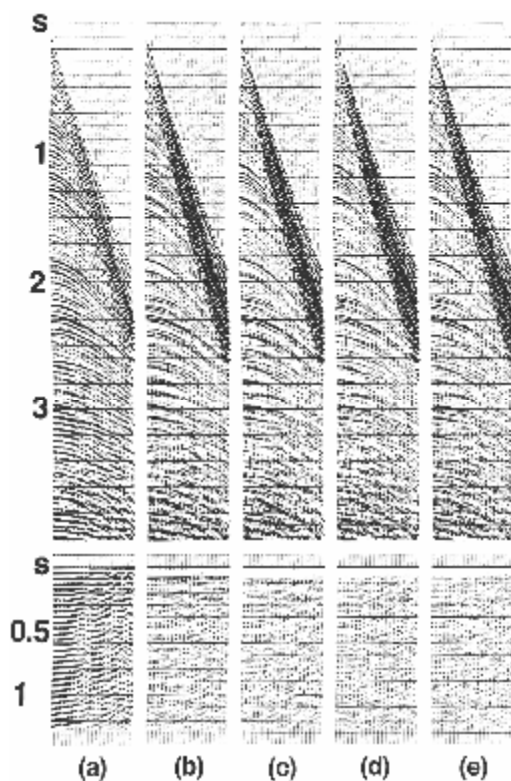


Рис.2.67 Опробование длины оператора. Под каждой записью находится соответствующая автокоррелограмма. Окно, используемое в оценке автокорреляции, показано на рис.2.66с. (а) Входная выборка. В деконволюции используется задержка предсказания 4мс (деконволюция сжатия), предварительное отбеливание 0.1%, длина оператора фильтра предсказания: (b) 40мс, (c) 80мс, (d) 160мс, (e) 240мс.

Нестационарность была рассмотрена в Разделах 1.5 и 2.2. Изменяющийся во времени характер сейсмического импульса (рис.2.9) часто требует многооконной деконволюции. На рис.2.70 показана полевая запись, подвергнутая деконволюции с применением трех временных окон. Автокоррелограммы из окон 1, 2, 3 показаны на рис.2.71. Обратите внимание на различный характер ревербирующей энергии при переходе от одного окна к другому. Окно (1), соответствующее малой глубине, имеет более высокочастотный сигнал, чем среднее окно (2); в свою очередь, окно (2), соответствующее средней глубине (большей, чем окно (1)), имеет более высокочастотный сигнал, чем окно (3), соответствующее большей глубине. Чтобы получить лучшие результаты, необходимо разработать различные операторы деконволюции по различным участкам записи и затем применить их к соответствующим временным окнам. Обычно трех окон бывает достаточно, чтобы оперировать нестационарным характером сейсмического сигнала. Другой пример однооконной и многооконной деконволюции показан на рис.2.72 – 2.73. Здесь автокоррелограммы по различным окнам не по-

казывают существенных изменений. Следовательно, возможно, нет разницы, какую деконволюцию использовать: однооконную или многооконную (сравните результаты обоих опробований). На этих рисунках показана запись после деконволюции, сопровождаемой применением широкополосного фильтра. Поскольку амплитудный спектр входных данных сглажен в результате деконволюции сжатия, усилены как высокочастотные компоненты сигнала. Следовательно, результат деконволюции сжатия часто фильтруется широкополосным оператором.

Иногда данные должны быть предварительно подготовлены к деконволюции. Если данные слишком сильно осложнены помехами, перед деконволюцией следует применить широкополосный фильтр. Если в данных присутствует значительное количество когерентных помех, перед деконволюцией может быть применена пространственная фильтрация (как рассмотрено в Разделах 1.6.2 и 7.4), чтобы когерентные помехи не были включены в оценку автокорреляции.

Деконволюция после суммирования часто рассматривается по нескольким причинам. Первая: на суммированном разрезе почти всегда присутствует остаточный импульс. Это связано с тем, что в реальных данных не бывает всех допущений, на которых основывается деконволюция. Следовательно, деконволюция никогда не может полностью сжать основной импульс, содержащийся в данных перед суммированием, до единичного. Вторая причина: поскольку сумма ОСТ представляет собой аппроксимацию разреза с нулевым выносом, прогнозируемая деконволюция, направленная на удаление кратных отражений, может оказаться жизнеспособным процессом после сумми-

рования Рис.2.74 представляет собой пример деконволюции после суммирования. После деконволюции происходит дальнейшее сжатие импульса, и опорные горизонты лучше характеризуются.

Наконец, на рис.2.75 показан пример деконволюции сигнатуры. В морской сейсморазведке может быть зарегистрирована сигнатура поля в дальней зоне расстановки источников. Идея состоит в применении детерминистической деконволюции с целью удаления сигнатуры источника, а затем в применении прогнозируемой деконволюции. Модель фильтрации задается уравнением:

$$x(t) = s(t) * w(t) * e(t) \quad 2.31$$

где $s(t)$ – сигнатура источника, зарегистрированная в поле в поле в дальней зоне перед прохождением разрез, который имеет импульсный отклик $e(t)$. Поскольку $s(t)$ зарегистрирована, обратный фильтр может быть разработан детерминистическим способом, как было рассмотрено в Разделе 2.4, а затем применим к сейсмограмме для удаления $s(t)$ из уравнения (2.31). Неизвестный импульс $w(t)$ включает эффекты распространения в разрезе и отклик регистрирующей системы. Этот оставшийся импульс затем удаляется статистическим методом деконволюции сжатия, как рассмотрено в Разделе 2.6. Если уравнение (2.31) сравнить с уравнением (2.2), можно видеть, что $w(t)$ в уравнении (2.2) разделяется на две части, т.е. сигнатуру источника $s(t)$ – известная компонента, и новый $w(t)$, который представляет собой неизвестную компоненту.

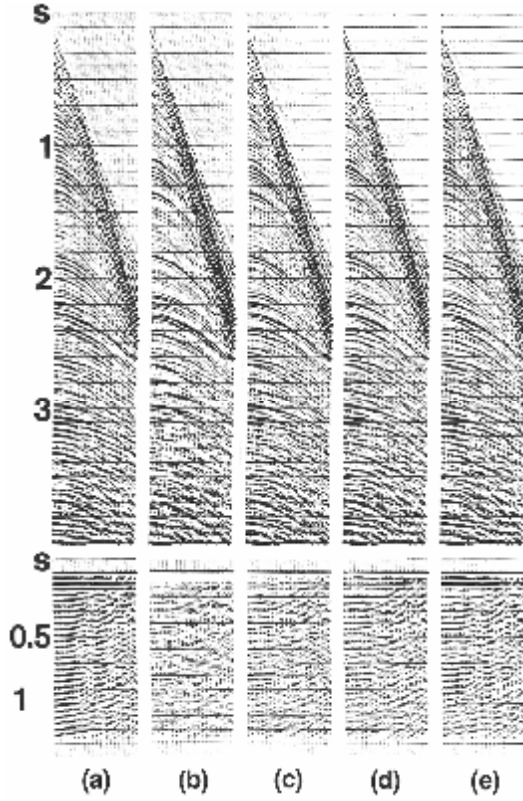


Рис.2.68 Опробование задержки предсказания. Под каждой записью находится соответствующая автокоррелограмма. Окно, используемое в оценке автокорреляции, показано на рис.2.66с. (а) Входная выборка. Деконволюция использует оператор фильтра предсказания длиной 160мс, предварительное отбеливание 0.1% и задержки предсказания: (b) 12мс, (c) 32мс, (d) 64мс, (e) 128мс.

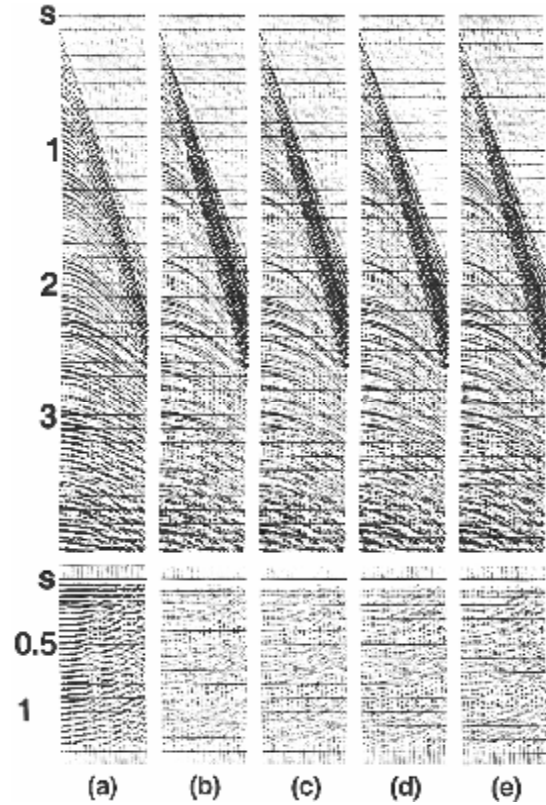


Рис.2.69 Опробование предварительного отбеливания. Под каждой записью находится соответствующая автокоррелограмма. Окно, используемое в оценке автокорреляции, показано на рис. 2.66с. (а) Входная выборка. Деконволюция использует оператор фильтра предсказания длиной 160мс, задержку предсказания 4мс (деконволюция сжатия) и предварительное отбеливание: (b) 1%, (c) 4%, (d) 16%, (e) 32%.

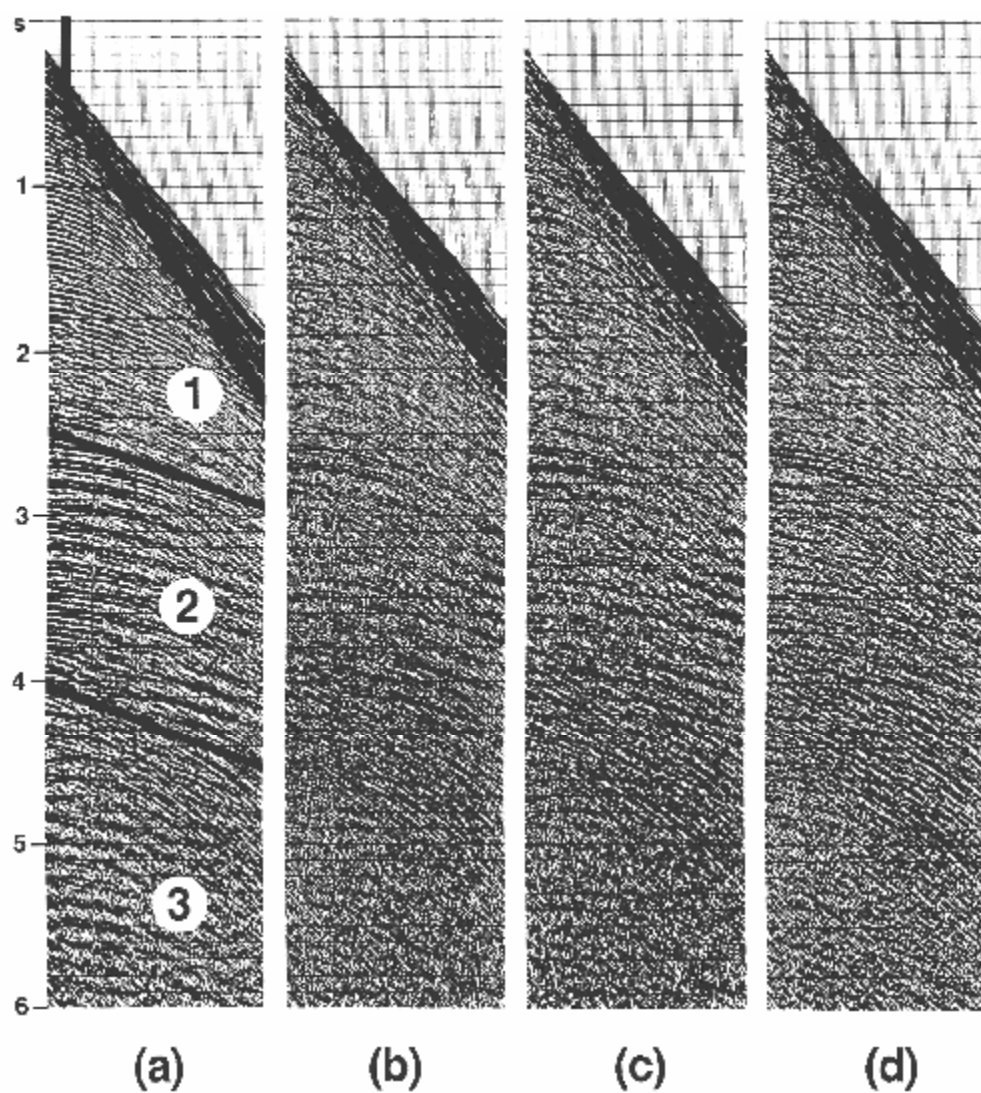


Рис.2.70 Трехоконная деконволюция. Сплошные линии обозначают границы окон. Оператор деконволюции разработан по данным каждому окне и применен к данным в этом окне. Операторы смешиваются при переходе границ окна. (а) Входная выборка. Деконволюция использует оператор длиной 160мс и задержки предсказания: (b) 4мс, (c) 12мс, (d) 32мс.

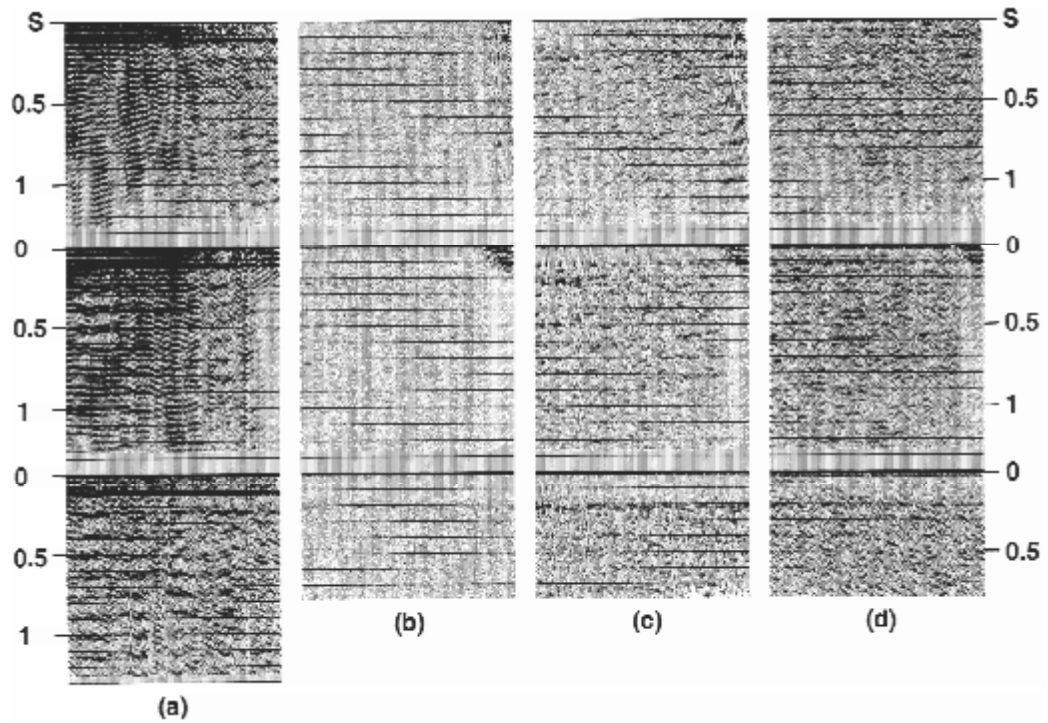


Рис.2.71 Автокоррелограммы, ассоциированные с рекордами, показанными на рис.2.70. Отметим различный характер для окон 1, 2, 3 (сверху вниз в левом изображении). Окна обозначены на рис.2.70а.

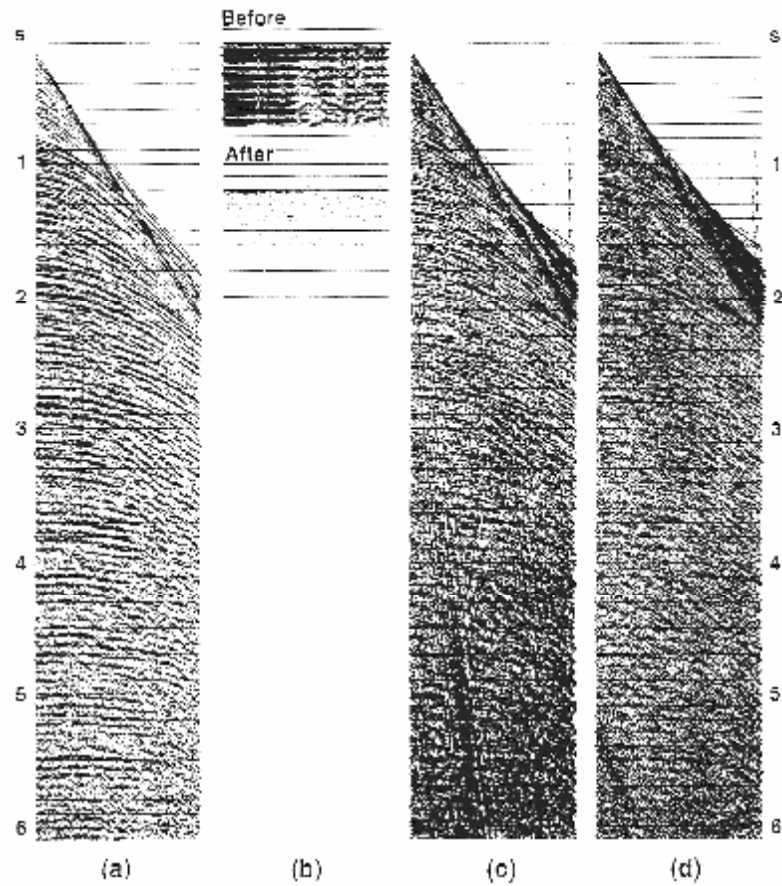


Рис.2.72 Деконволюция сжатия (с) на записи ПВ (shot record) (а), сопровождаемая полосовой фильтрацией (d). Автокоррелограммы до и после деконволюции.

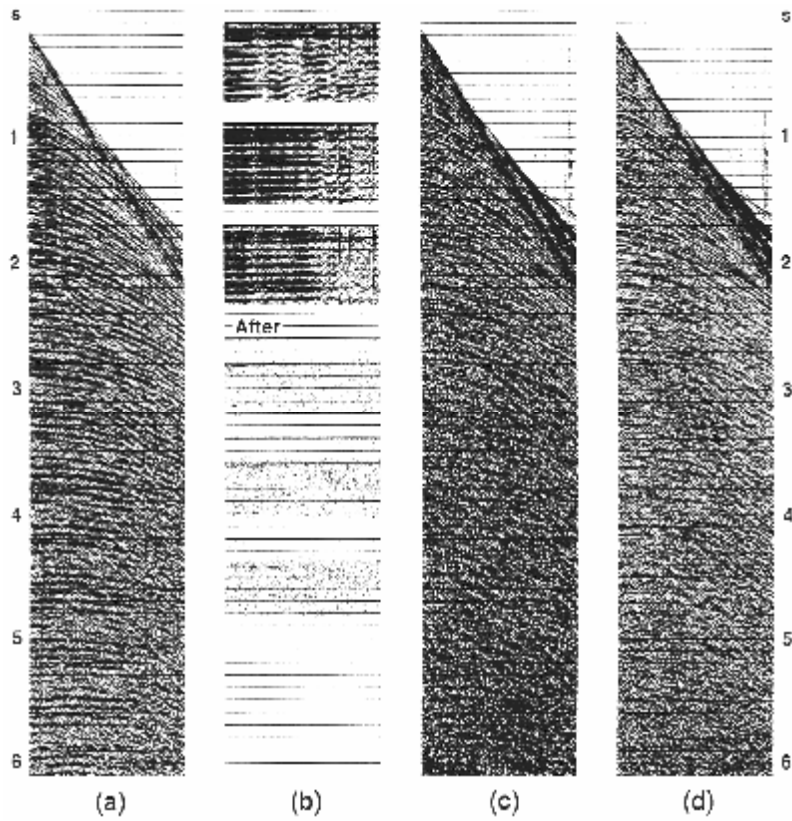


Рис.2.73 Трехконная деконволюция на той же записи ПВ, что и на рис.2.72. В этом случае нет значительного различия между характеристиками автокоррелограмм, оцененных по трем окнам. (a) Входной импульс, (b) автокоррелограмма до и после деконволюции сжатия, (c) трехконная деконволюция сжатия на (a), (d) полосовая фильтрация на (c).

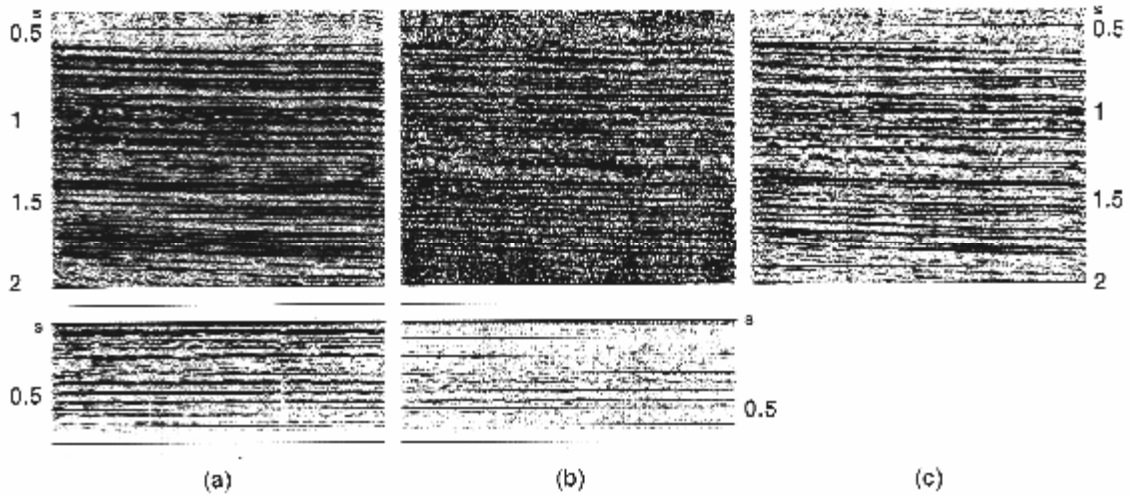


Рис.2.74 Деконволюция после суммирования. Нижние изображения представляют собой автокоррелограммы разрезов, показанных выше. (a) Сумма ОСТ без деконволюции; (b) деконволюция сжатия после суммирования, сопровождаемая полосовой фильтрацией (c).

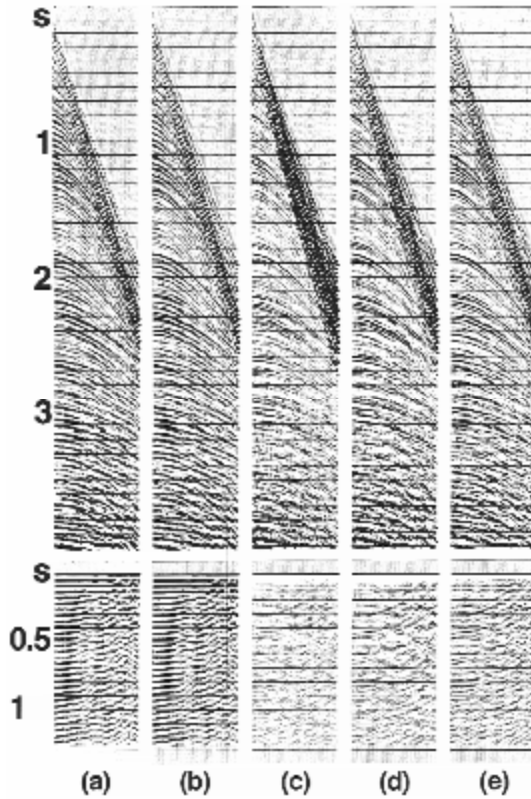


Рис.2.75 Обработка сигнатуры. Формирующий фильтр разработан с целью преобразования зарегистрированной сигнатуры $[s(t)]$ в ее минимально-фазовый эквивалент и применения ко входной записи (а). Отметим, что результат (b) имеет такую же ширину полосы пропускания, что и (а). Затем результат (b) обработан прогнозируемой деконволюцией с длиной оператора 160мс и задержками: (c) 4мс (деконволюция сжатия), (d) 12мс, (e) 32мс.

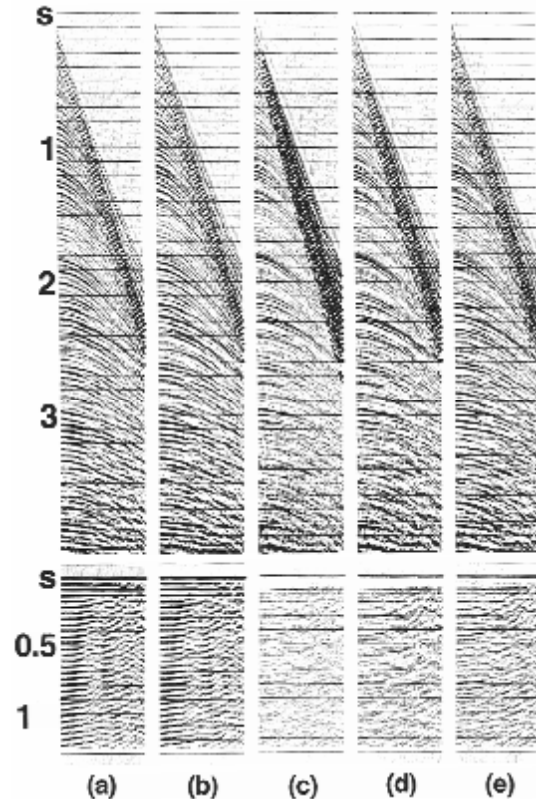


Рис.2.76 Обработка сигнатуры. Формирующий фильтр разработан с целью преобразования зарегистрированной сигнатуры $[s(t)]$ в единичный импульс и применения к входной записи (а). Затем результат (b) был обработан прогнозируемой деконволюцией с длиной оператора 160мс и задержками предсказания: (c) 4мс (деконволюция сжатия), (d) 12мс, (e) 32мс. Результат обработки сигнатуры (b) не выглядит как имеющий белый спектр; компоненту $w(t)$ (уравнение (2.31)) необходимо удалить.

Имеется два способа обработки $s(t)$. Первый способ преобразования $s(t)$ в минимально-фазовый эквивалент, а затем выполнить прогнозируемую деконволюцию (рис.2.75). Второй способ – преобразовать $s(t)$ в единичный импульс, а затем выполнить прогнозируемую деконволюцию (рис.2.76). Результаты, показанные на рис.2.75 и 2.76 (центральные изображения) нужно сопоставить с рис.2.67d. Поскольку в этом случае источник не является минимально-фазовым, рис.2.75с должен быть лучше, чем рис.2.76d. Так ли это?

Результаты обработки сигнатуры зависят от точности зарегистрированной сигнатуры. На рис.2.77 показана сумма ОСТ с обработкой сигнатуры и без нее. Обратите внимание на различие между ОСТ без деконволюции (рис.2.77а) и с деконволюцией сжатия перед суммированием (рис.2.77б). Одни и те же данные представляют собой сигнатуру, которая сначала обработана путем преобразования измеренной сигнатуры в ее минимально-фазовый эквивалент, после чего выполнена деконволюция сжатия (рис.2.77с). При сопоставлении с рис.2.77б можно аргументировать, что в некоторых участках улучшилась непрерывность отражений. Одного преобразования сигнатуры в единичный импульс недостаточно (рис.2.77d); остается компонента $w(t)$, которая должна быть удалена [уравнение (2.31)].

2.7.7 Деконволюция вибросейса

Источник вибросейса представляет собой развертку в виде частотно-модулированной синусоиды с переходными зонами на обоих концах. Для сейсмограммы вибросейса предложена модель фильтрации, аналогичная модели, которая была предложена для морской сейсмограммы:

$$x(t) = s(t) * w(t) * e(t) \quad (2.32)$$

где $x(t)$ – зарегистрированная сейсмограмма, $s(t)$ – свип-сигнал, $w(t)$ – сейсмический импульс [с тем же значением, что и в уравнении (2.31)], $e(t)$ – импульсный отклик разреза. Свертки в уравнении (2.32) становятся умноженными в частотной области:

$$X(w) = S(w)W(w)E(w) \quad (2.33)$$

В единицах амплитудного $A(w)$ и фазового $j(w)$ спектров:

$$A_x(w) = A_s(w)A_w(w)A_e(w) \quad (2.34a)$$

и

$$j_x(w) = j_s(w) + j_w(w) + j_e(w) \quad (2.34b)$$

Взаимная корреляция зарегистрированной сейсмограммы $x(t)$ со свип-сигналом $s(t)$ эквивалентна умножению уравнения (2.34a) на $A_s(w)$ и вычитанию $j_s(w)$ из уравнения (2.34b).

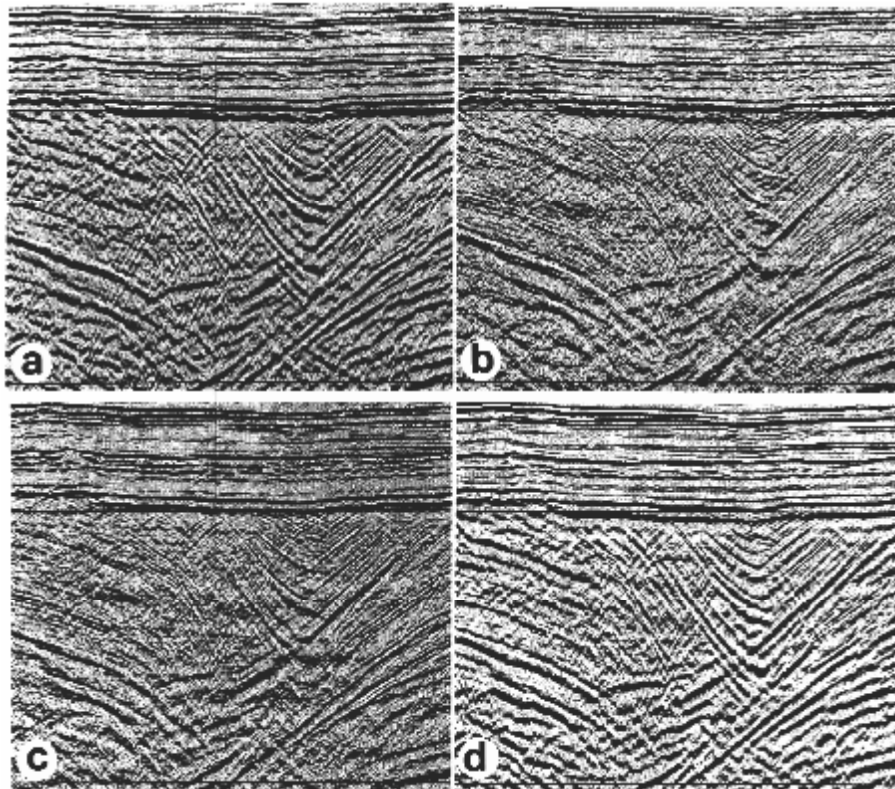


Рис.2.77 Сумма ОСТ (а) без деконволюции, (б) с деконволюцией сжатия перед суммированием, (с) с обработкой сигнатуры (минимально-фазовое преобразование измеренной сигнатуры), которая сопровождается деконволюцией сжатия, (д) только с обработкой сигнатуры (преобразование сигнатуры в единичный импульс).

Следовательно, коррелированная сейсмограмма вибросейса $x^c(t)$ должна иметь следующие амплитудный и фазовый спектры:

$$A^c(w) = A_s^2(w)A_w(w)A_e(w) \quad (2.35a)$$

и

$$j^c(w) = j_w(w) + j_e(w) \quad (2.35b)$$

Обратное преобразование Фурье $A_s^2(w)$ дает автокорреляцию свип-сигнала, называемую импульсом Клаудера $k(t)$. Возвращаясь во временную область, уравнение (2.35) дает:

$$x^c(t) = k(t)*w(t)*e(t) \quad (2.36)$$

Импульс Клаудера нуль-фазовый, т.к. он представляет собой автокорреляцию. Свертка $k(t)$ с предположительно минимально-фазовым импульсом $w(t)$ дает смешанно-фазовый импульс. Поскольку деконволюция сжатия основана на предположении о минимально-фазовом импульсе, она не может надлежащим образом восстановить $e(t)$ по данным вибросейса.

Один из подходов к деконволюции данных вибросейса состоит в применении нуль-фазового обратного импульса для удаления $k(t)$, после которой следует минимально-фазовая деконволюция для удаления $w(t)$. Амплитудный спектр обратного фильтра определен как $1/A_s^2(w)$. На практике возникают проблемы из-за присутствия нулей в спектре, поскольку импульс Клаудера имеет ограниченную полосу пропускания. Обращение амплитудного спектра, имеющего нули, дает неустойчивый результат. Чтобы обойти эту проблему, перед обращением спектра импульса Клаудера добавляется некоторое количество белого шума, например, 0.1%.

Другой подход состоит в разработке фильтра, который преобразует импульс Клаудера в его минимально-фазовый эквивалент (Ristow и Jurczyk, 1975). Способ получения минимально-фазового спектра по данному амплитудному спектру описан в Приложении В.4 и включен в обсуждение деконволюции в частотной области. Если импульс Клаудера был преобразован в его минимально-фазовый эквивалент, уравнение (2.35b) принимает вид:

$$j^c(w) = j_k(w) + j_w(w) + j_e(w) \quad (2.37)$$

Если допустить, что $w(t)$ является минимально-фазовым, и если мы сделаем $k(t)$ минимально-фазовым, результат их свертки также будет минимально-фазовым. Теперь можно применить деконволюцию сжатия, поскольку соблюдается допущение о минимально-фазовом импульсе. В некоторых системах вибраторов между контрольным свип-сигналом и откликом плиты имеется разность фаз, равная 90° . В качестве варианта мы можем вычесть эту разность фаз. На рис.2.78 показана рекомендованная последовательность операций для обработки данных вибросейса.

На рис.2.79 показано, как блок-схема, представленная на рис.2.78, используется с последовательностью синтетических коэффициентов отражения. Включая шаг преобразования импульса Клаудера в его минимально-фазовый эквивалент перед деконволюцией сжатия, можно получить более близкое представление импульсного отклика (сравните шаги k и l с m).

Однако, на практике вышеприведенная схема может иметь проблемы. Не решены фундаментальные вопросы, например: реально ли представляет модель фильтрации, данная в уравнении (2.32) то, что приходит на поверхность земли. Данные вибросейса часто подвергаются деконволюции как данные взрывного источника, без преобразования импульса Клаудера в его минимально-фазовый эквивалент. Пример деконволюции

коррелированной записи вибросейса показан на рис.2.80. В этом примере деконволюция сжатия сама по себе не дает улучшения временной разрешающей способности.

Для данных вибросейса основные допущения о нуль-фазовом импульсе (если сравнить с данными взрывного источника) не соблюдаются. Несмотря на это считается, что деконволюция сжатия без преобразования импульса Клаудера в его минимально-фазовый эквивалент работает для большинства полевых данных. На рис.2.81 и 2.82 приведены примеры данных вибросейса соответственно, до и после деконволюции сжатия. Отражения после деконволюции улучшены, а реверберационные отражения в значительной мере подавлены. Тем не менее, более сложной является проблема увязки профилей, отработанных вибратором с профилями, отработанными другими источниками, например, взрывными, если в данные вибратора не была внесена поправка за фазу. Сейчас существуют полевые системы, выполняющие в поле минимально-фазовую корреляцию вибросейса.

2.8 Проблема нестационарности

На рис.2.83 показана выборка ОСТ и ее отфильтрованные версии перед деконволюцией. Развертки фильтров показывают, что имеется сигнал между 10 и 40Гц. Более высокие частоты ограничиваются частью выборки, соответствующей меньшей глубине. Та же самая полевая запись после деконволюции сжатия показана на рис.2.84. Здесь же показаны развертки фильтров записи после деконволюции. Если сравнить записи до и после деконволюции, можно видеть действие процесса; в частности, сжатие импульса и расширение спектра. Уровень входного сигнала выше 40Гц относительно слабее, чем уровень ниже 40Гц. Тем не менее, деконволюция попыталась уменьшить разность уровней сигнала в различных полосах частот, сглаживая спектр. Сглаживание было более эффективным в части записи, соответствующей меньшей глубине, нежели в более глубокой части. Мы знаем, что эффективный импульс источника не является стационарным. Затухание высоких частот усиливается по мере прохождения импульса вглубь. Хотя в этом случае был использован процесс многооконной деконволюции, сглаживание спектра не было достигнуто по всей длине записи вследствие значительной нестационарности данных.

Нестационарность является результатом, в первую очередь, эффектов расхождения волнового фронта и затухания частот. Обычный подход, обеспечивающий уменьшение нестационарности, состоит в применении процессов, которые компенсируют вышеназванные эффекты перед деконволюцией. Расхождение волнового фронта корректируется путем применения функции геометрического расхождения (Раздел 1.5). Метод, компенсирующий затухание, не обсуждался. Затухание измеряется величиной, называемой добротностью Q . Если $Q = \infty$, это означает, что затухания нет. Этот коэффициент может изменяться с глубиной и в латеральном направлении. Если бы имелась аналитическая форма для функции затухания, этот эффект было бы просто скомпенсировать. Предложено несколько моделей для Q . Модель постоянной Q является вполне правдоподобной и с ней проще всего иметь дело (Kjartansson, 1979). Тем не менее, остается большая проблема оценки Q по сейсмическим данным. Недавно этой проблеме было уделено достаточное внимание, и в процессе обработки был введен Q -фильтр.

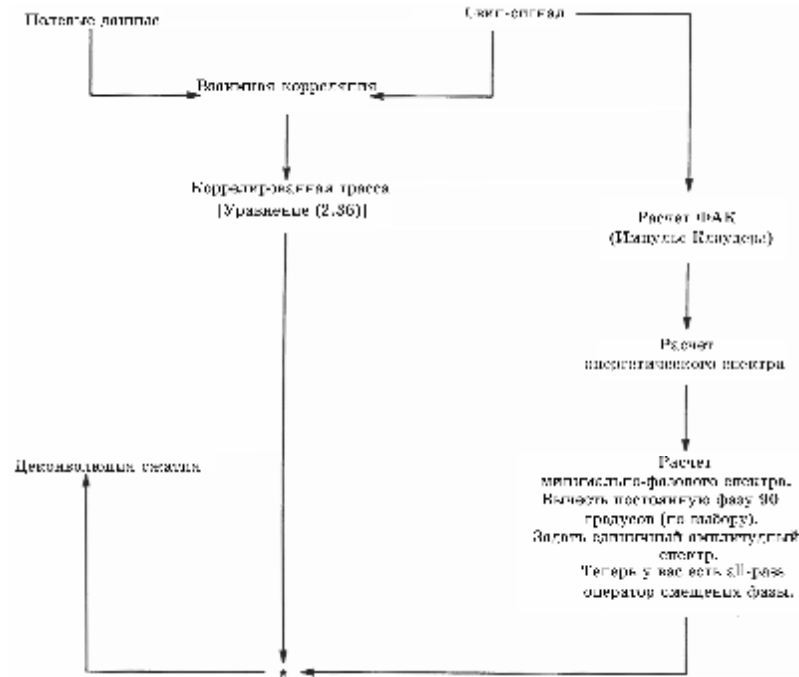


Рис.2.78 Блок-схема деконволюции данные вибротрейса.

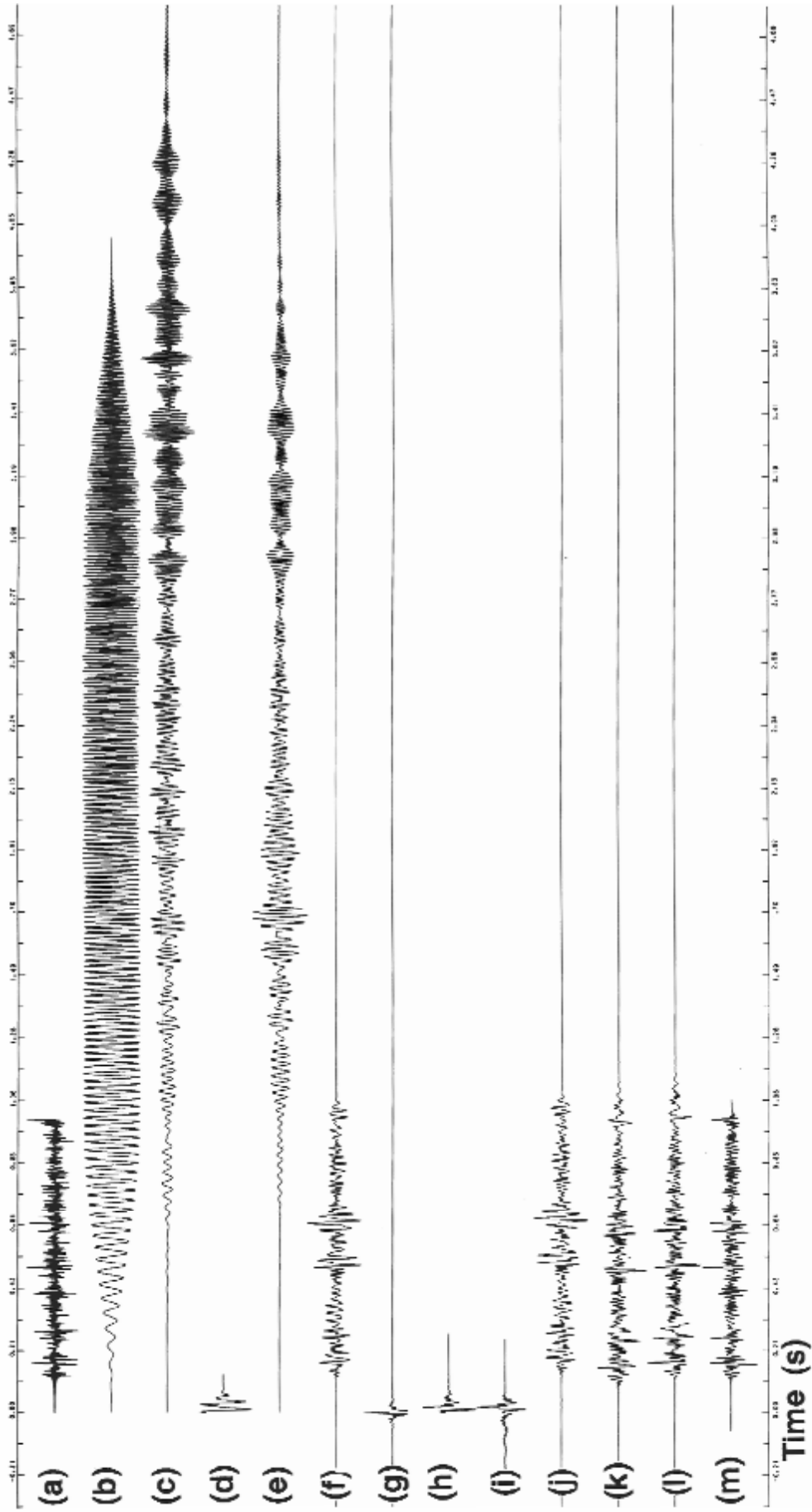


Рис. 2.79 Иллюстрация декомпозиции данных вибротейса (см. рис. 2.78). (а) Последовательность импульсных откликов; (б) свип-сигнал вибротейса (ширина полосы пропускания 10-120Гц); (с) свертка (а) с (б); (d) минимально-фазовый импульс источника; (е) свертка (d) (е); (f) ФВК свип-сигнала (б) с (е); (g) импульс Клаулера; (h) минимально-фазовый эквивалент (g); (i) оператор, который преобразует (g) в (h); (j) оператор (i), примененный к (f); (k) декомпозиция сжатия (j); (m) версия (а) после нуль-фазовой фильтрации в полосе 10-120Гц.

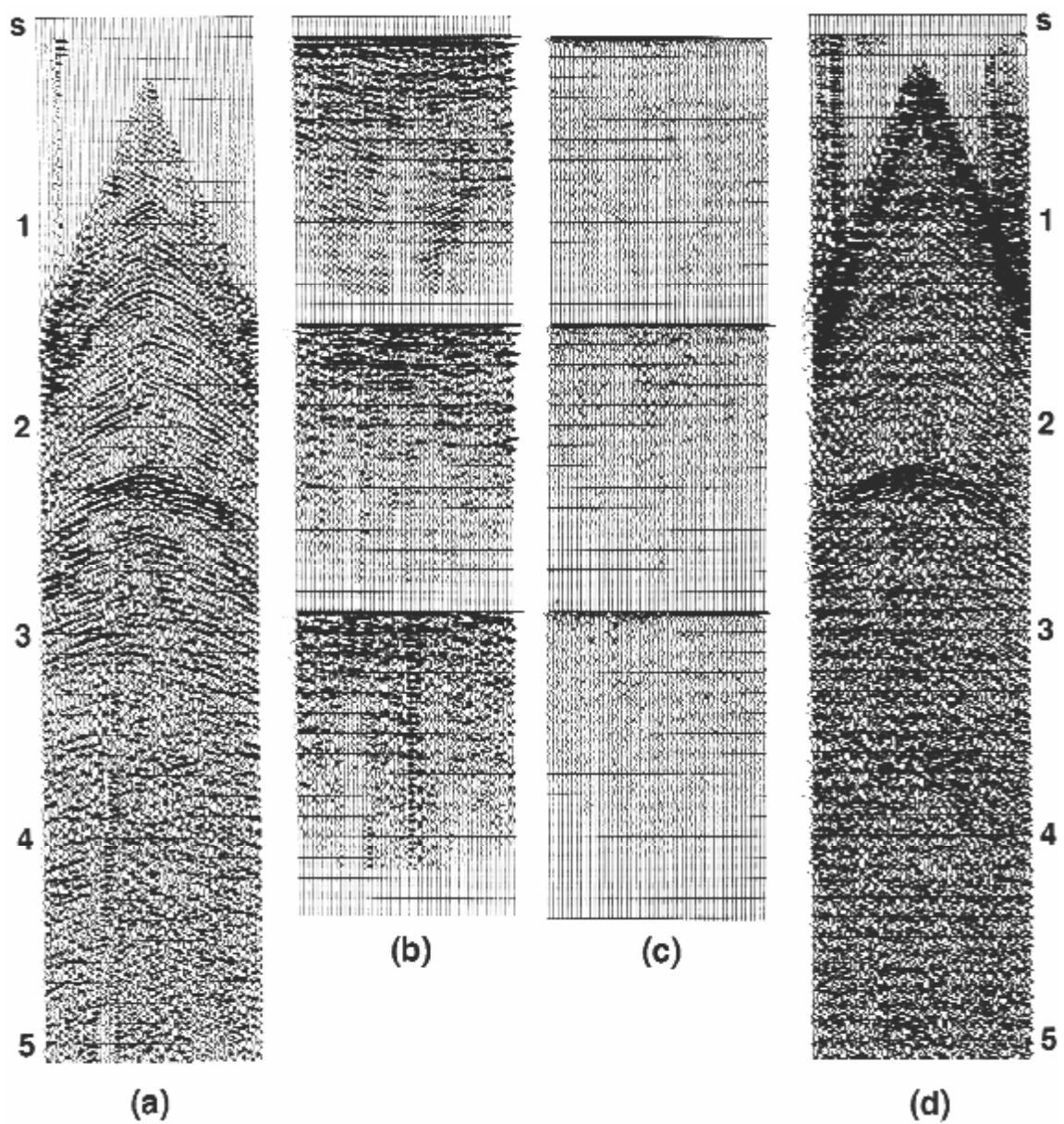


Рис.2.80 Деконволюция записи виброрейса. Используются три окна. (а) Коррелированная запись виброрейса и его автокоррелограммы (b), (d) результат деконволюции сжатия и его автокоррелограммы.

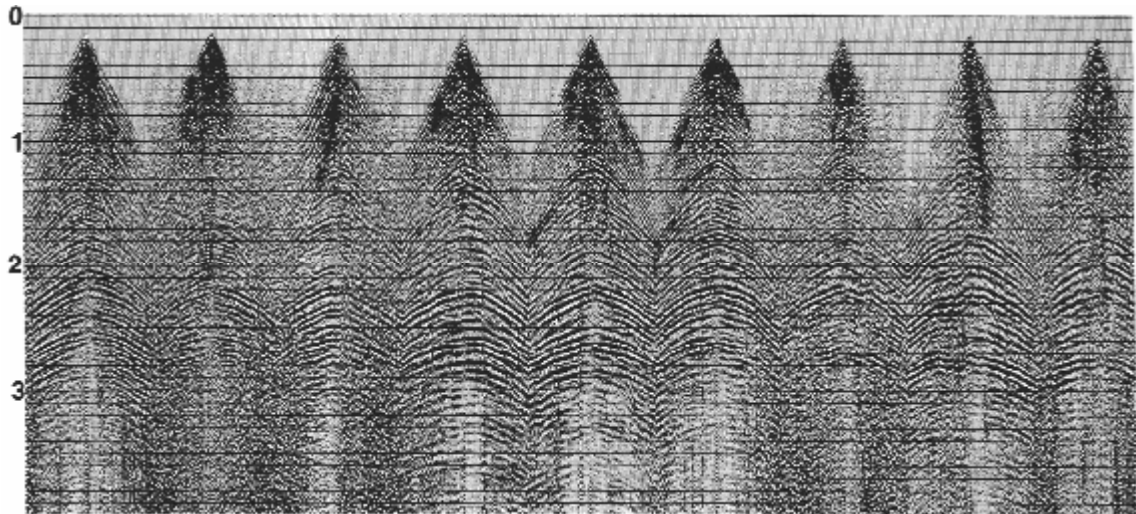


Рис.2.81 Выборки ОПВ без деконволюции (источник – вибротейс). Применены поправки за геометрическое расхождение и выравнивание трасс.

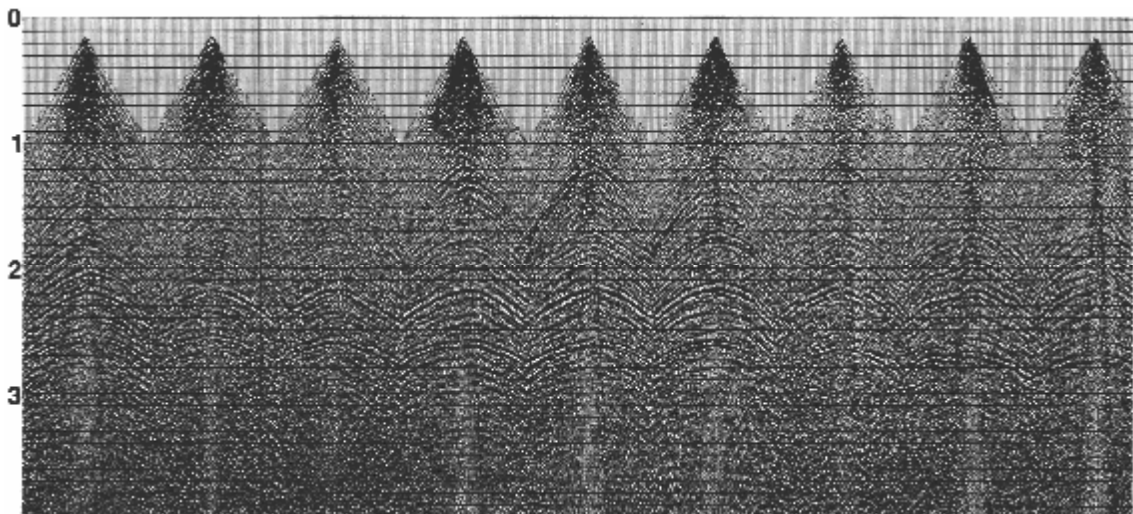


Рис.2.82 Деконволюция сжатия, примененная к данным вибротейса на рис.2.81.

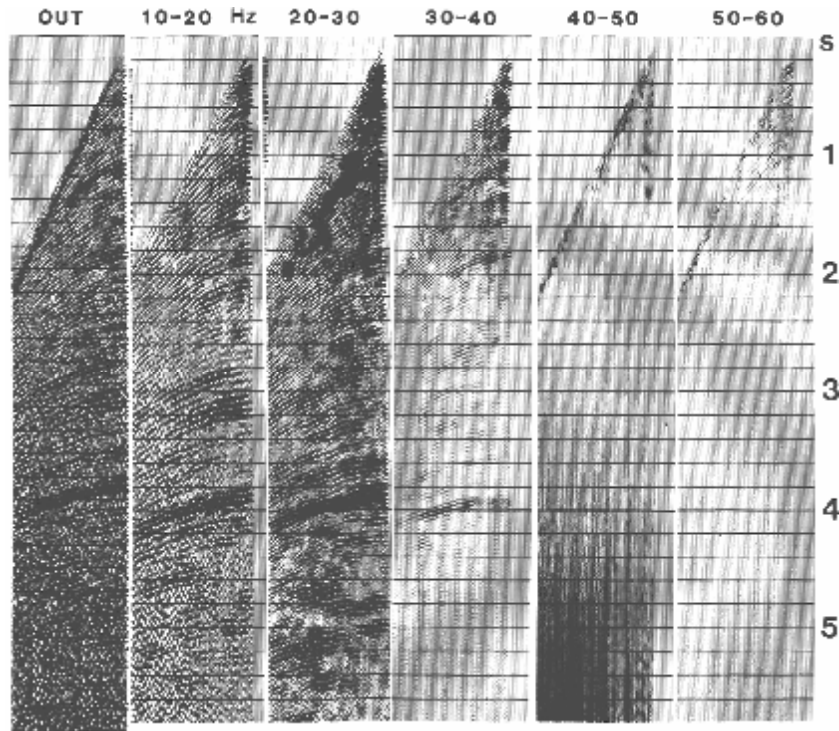


Рис.2.83 Полевая запись (крайнее левое изображение) и ее версии после полосовой фильтрации.

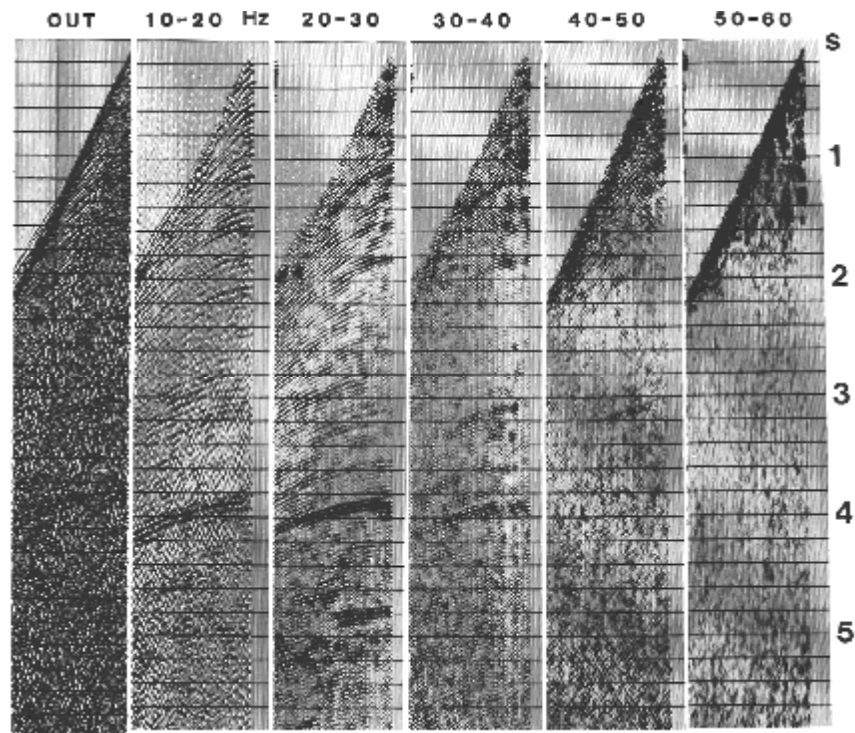


Рис.2.84 Деконволюция сжатия, примененная к полевой записи на рис.2.83 (крайнее левое изображение) и сопровождаемая применением последовательность полосовых фильтров.

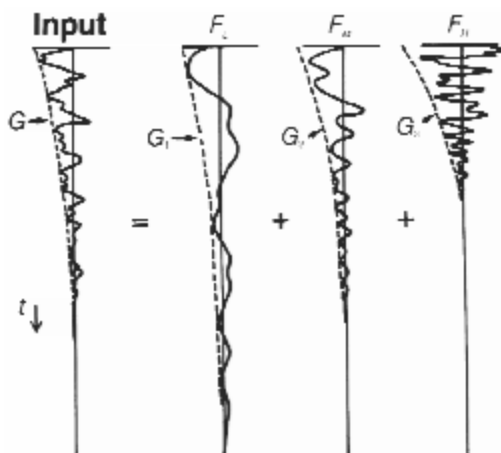


Рис.2.85 Схематическая иллюстрация скорости затухания частот в сейсмической трассе (Gibson и Lerner, 1982).

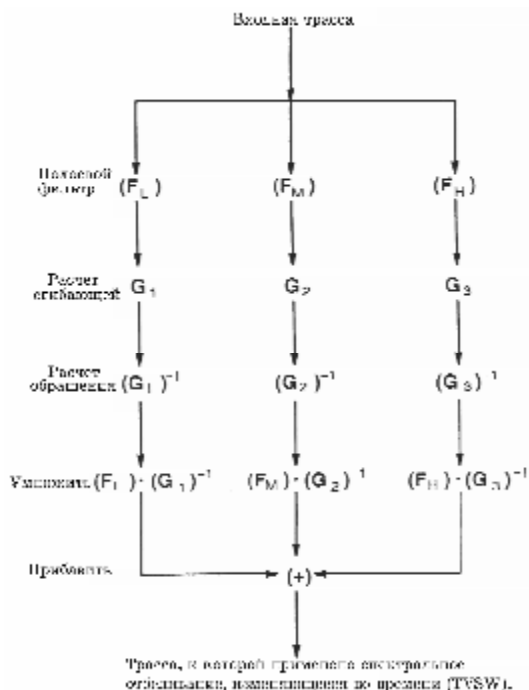


Рис.2.86 Блок-схема спектрального отбеливания изменяющегося во времени.

2.8.1 Спектральное отбеливание, изменяющееся во времени

Затухание частот и способ его компенсации показаны на рис.2.85. Предположим, что у нас имеется входная сейсмограмма с амплитудами, затухающими во времени. Применим к этой трассе последовательность узкополосных фильтров. Исследуем полевую запись на рис.2.83. Низкочастотная компонента трассы F_L характеризуется более медленным затуханием, чем умеренно-частотная компонента F_M . Аналогично, умеренно-частотная компонента характеризуется меньшей скоростью затухания, чем высокочастотная компонента сигнала F_H . Чтобы описать скорости затухания для каждой полосы частот, можно рассчитать последовательность функций усиления, таких как G_1 , G_2 , G_3 . Это делается путем расчета огибающей трасс, пропущенных через полосовой фильтр. Затем к каждой полосе частот применяются результаты обращения этих функций усиления и полученные данные суммируются. Этот процесс называется спектральным отбеливанием, изменяющимся во времени (TVSW – time variant spectral whitening). Количество полос фильтра, ширина каждой полосы и общая ширина полосы, в которой применяется TVSW, представляют собой параметры, которые могут быть предписаны для конкретной задачи. На рис.2.86 показаны шаги процесса TVSW, который можно представить как процесс, который вносит поправку за эффекты затухания и выполняет частичную деконволюцию эффективного импульса источника.

На рис.2.87 и.28.8 показаны некоторые полевые записи соответственно до и после деконволюции сжатия. Обратите внимание, что этот процесс не только сжал импульс, но и попытался подавить реверберационные отражения в данных. С другой стороны, TVSW в основном сжало импульс, не изменив существенно реверберационный характер данных (рис.2.89). Отметим также, что фаза изменилась незначительно. Следовательно, действие TVSW может быть близким к нуль-фазовой деконволюции, хотя строгое теоретическое доказательство этого отсутствует. На практике одно из основных различий между TVSW и общепринятой деконволюцией состоит в том, что TVSW

и общепринятой деконволюцией состоит в том, что TVSW, как кажется, лучше сглаживает амплитудный спектр. Это различие может оказаться значительным для широкополосных данных с большим динамическим диапазоном.

Спектральное сглаживание можно получить, применив другой подход в частотной области. Как рассмотрено в Приложении В.4, минимально-фазовая деконволюция сжатия может быть сформирована в частотной области. Кроме того, мы можем сгладить амплитудный спектр, не затрагивая фазу. Это называется нуль-фазовой деконволюцией в частотной области. Такая деконволюция, выполняемая в нескольких временных окнах на трассу, в сущности, эквивалентна TVSW. Если мы хотим только сгладить спектр, можно применить подход, показанный на рис.2.90.

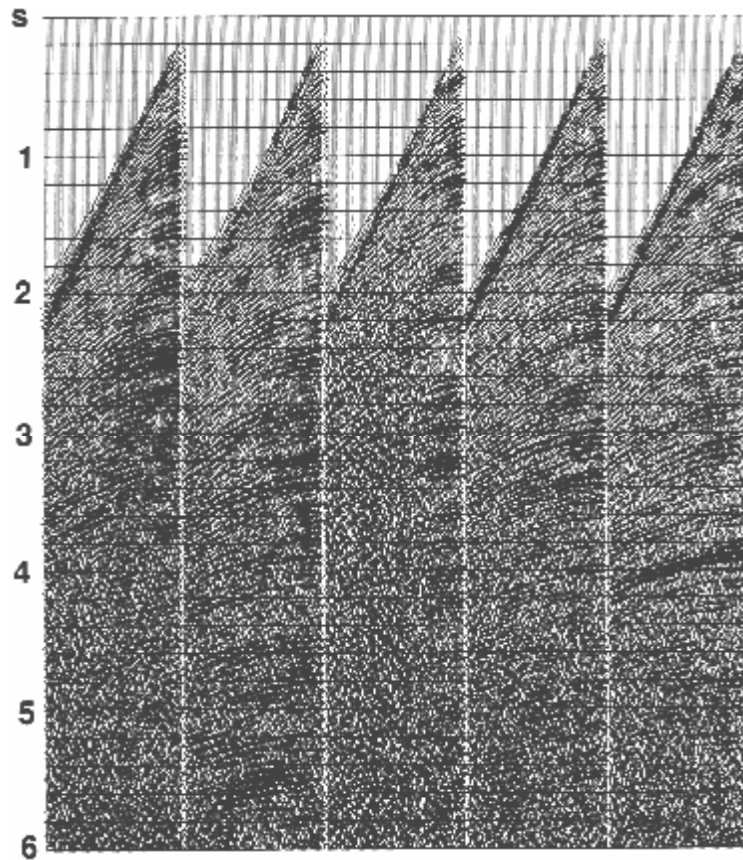


Рис.2.87 Выборки ОСТ без деконволюции.

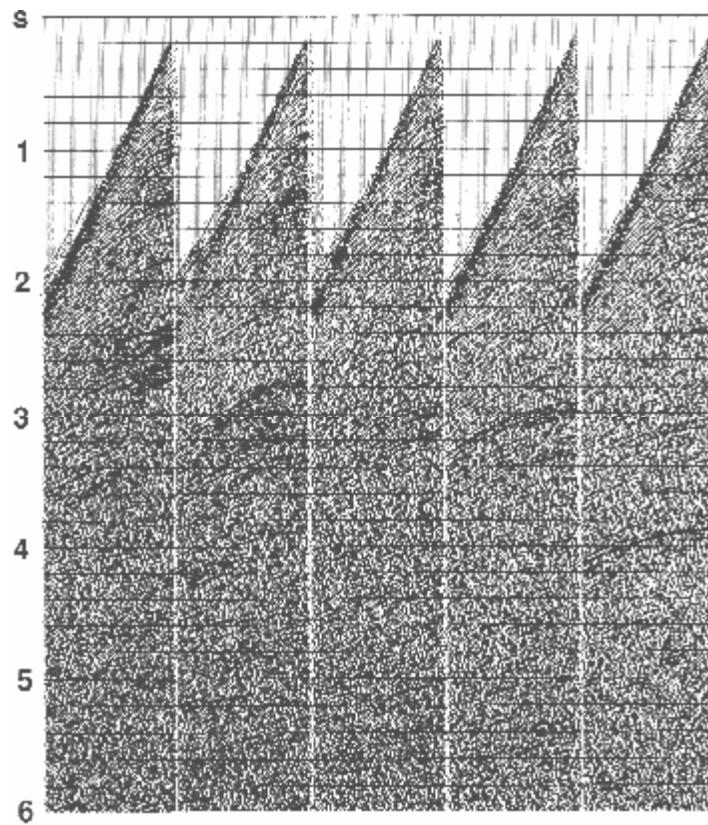


Рис.2.88 Деконволюция сжатия, примененная к выборкам ОСТ На рис.2.87.

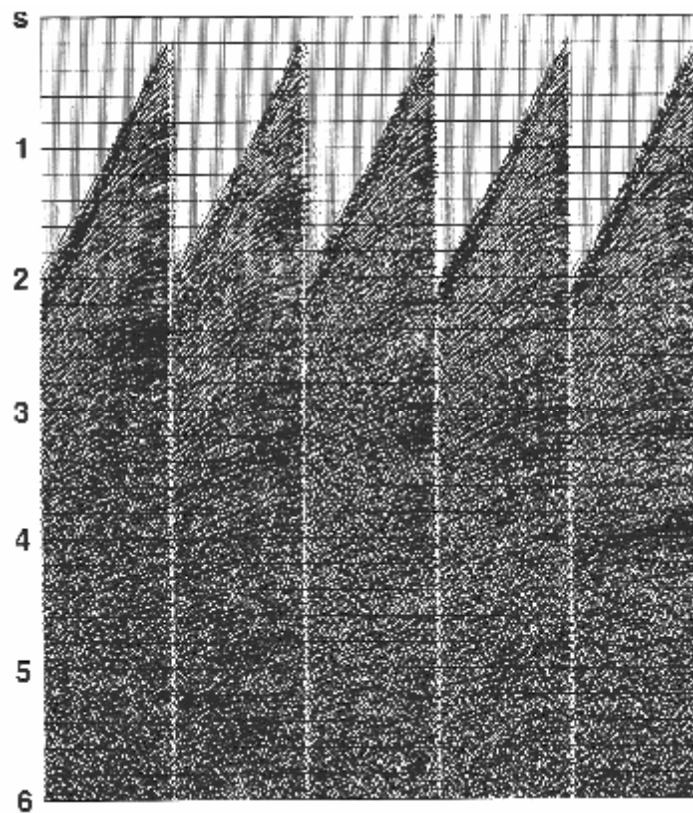


Рис.2.89 Спектральное отбеливание, изменяющееся во времени (TVSW), примененное к выборкам ОСТ на рис.2.87. Сравните с рисунками 2.88, 2.91 и 2.92.

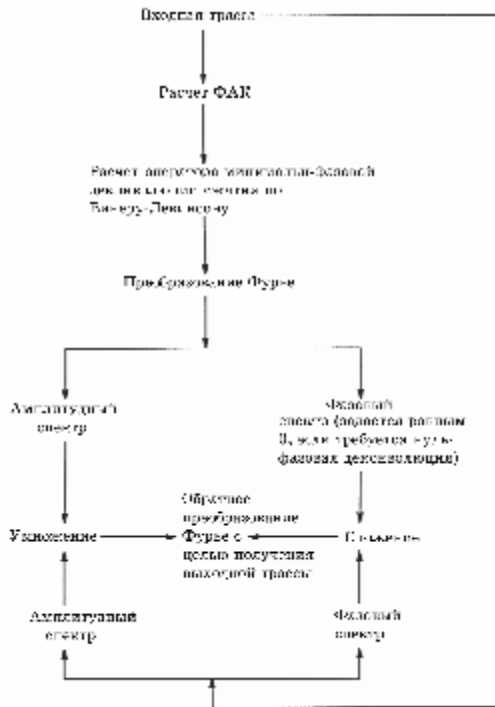


Рис.2.90 Блок-схема деконволюции.

Хотя области операций могут различаться, обе деконволюции (минимально-фазовая в частотной области и деконволюция Винера-Левинсона) должны давать эквивалентные результаты. Различия между результатами, показанными на рис.2.88 и 2.91 связаны в основном с процессом вычисления.

Нуль-фазовая деконволюция в частотной области, направленная на достижение спектрального отбеливания, изменяющегося во времени, требует разделения входной сейсмограммы на небольшие временные окна, а также разработки и применения процесса, описанного на рис.2.90 к каждому окну отдельно. На рис.2.92 показаны полевые записи после нуль-фазовой деконволюции в частотной области. Результат сопоставим с результатом TVSW, представленным на рис.2.89.

На протяжении развития деконволюции были предложены несколько альтернативных решений. Так, прогнозируемая деконволюция используется больше других методов, хотя допущения о минимально-фазовом импульсе и о случайности процесса отражения являются ключевыми. Оптимальные результаты должна давать следующая формальная последовательность обработки:

1. Примените функцию v^2t компенсации геометрического расхождения. Это устранил потерю амплитуд, обусловленную расхождением волнового фронта.
2. Примените экспоненциальное усиление или минимально-фазовый обратный Q -фильтр (Hale, 1982). Это скомпенсирует затухание частот.
3. По выбору примените к морским данным деконволюцию сигнатуры. Для данных вибросейса примените фильтр, который преобразует импульс Клаудера в его минимально-фазовый эквивалент.
4. Примените деконволюцию с учетом изменения поверхностных условий (Приложение В.6), которая принимает во внимание действие на импульс латеральных изменений, обусловленных неоднородностями в окрестности источников и сейсмоприемников. В шаге 2 мы имеем дело с изменениями в вертикальном направлении.
5. Примените TVSW после суммирования и перед TVF. Это обеспечивает дальнейшее сглаживание спектра в полосе пропускания сигнала, не затрагивая фазу.
6. По выбору примените прогнозируемую деконволюцию после суммирования, чтобы устранить короткопериодные многократные отражения в слое.

В основном идея заключается в том, чтобы выполнять по возможности больше детерминистической деконволюции. Результат обращения Q , деконволюция сигнатуры и фильтр, который преобразует импульс Клаудера в его минимально-фазовый эквивалент, представляют собой детерминистические операторы. Оставшиеся проблемы решаются статическими средствами. Однако, для большинства данных адекватным является введение поправки за геометрическое расхождение, сопровождаемое деконволюцией. Это все, что требуется в большинстве случаев. Польза или практичность схемы, приведенной выше, остается неопределенной. Обратный Q -фильтр является темой исследования, поскольку имеются проблемы, касающиеся его фазочастотных характеристик.

Список литературы:

- Bachus, M. M., 1959, Water reverberations: Their nature and elimination: *Geophysics*, **24**, 235-261.
- Clairbout, J. F., 1976, *Fundamentals of geophysical data processing*: McGraw Hill Book Co.
- Gibson, B. and Larner, K. L., 1982, Comparison of spectral flattening techniques: unpublished technical document, Western Geophysical Company.
- Gossilaud, P., 1981, An approach to inverse filtering of near-surface layer effects from seismic records: *Geophysics*, **26**, 754-760.
- Hale, J. D., 1982, Q-adaptive deconvolution: Stanford Exploration Project, Report Number 30, 133-158.
- Kjartansson, E., 1979, Constant Q -wave propagation and attenuation: *J. Geophys. Res.*, **84**, 4737-4748.
- Peacock, K. L. and Treitel, S., 1969, Predictive deconvolution—theory and practice: *Geophysics*, **34**, 155-169.
- Ratow, D. and Jurczyk, D., 1975, Vibroseis deconvolution: *Geophys. Prosp.*, **23**, 363-379.
- Robinson, E. A., 1967, Multichannel time series analysis with digital computer programs: Holden-Day.
- Robinson, E. A., 1966, Multichannel z -transforms and minimum-delay: *Geophysics*, **31**, 482-500.
- Robinson, E. A. and Treitel, S., 1980, *Geophysical signal analysis*: Prentice-Hall, Inc.
- Talner, M. F. and Coburn, K., 1981, Surface-consistent deconvolution. Presented at the 51st Ann. Int. Soc. Explor. Geophys. Mtg.
- Treitel, S. and Robinson, E. A., 1966, The design of high resolution filters: *Inst. Electr. Electron. Eng.*, **GE-4**, 7.
- Walden, A. T. and Hosken, J. W. J., 1984, An investigation of the spectral properties of primary reflections coefficients: Presented at the 46th Ann. Eur. Assoc. Explor. Geophys. Mtg.
- Yilmaz, O., 1974, The problems of resolution and reverberations in reflection seismology: *J. Geophys. Soc. Turkey*, **5**, 2.

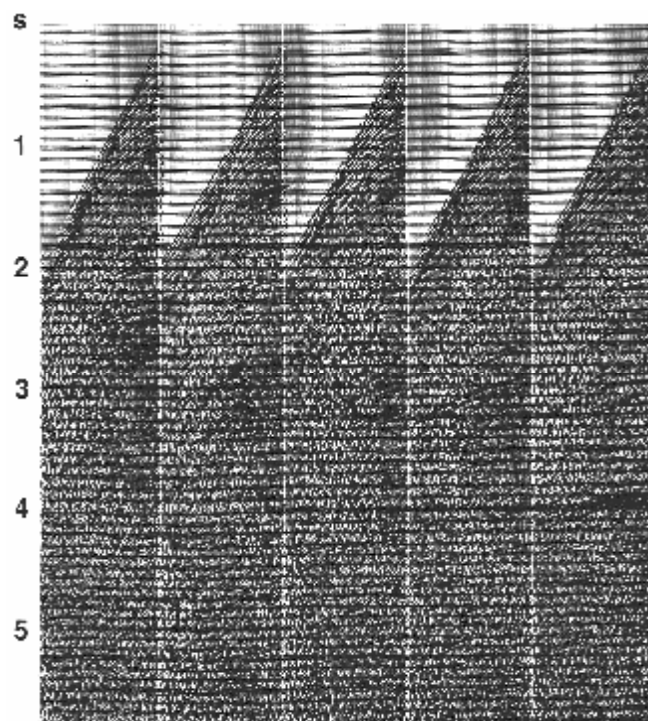


Рис.2.91 Минимально-фазовая деконволюция в частотной области, примененная к выборкам ОСТ на рис.2.87. Сравните с рис.2.88, 2.89 и 2.92.

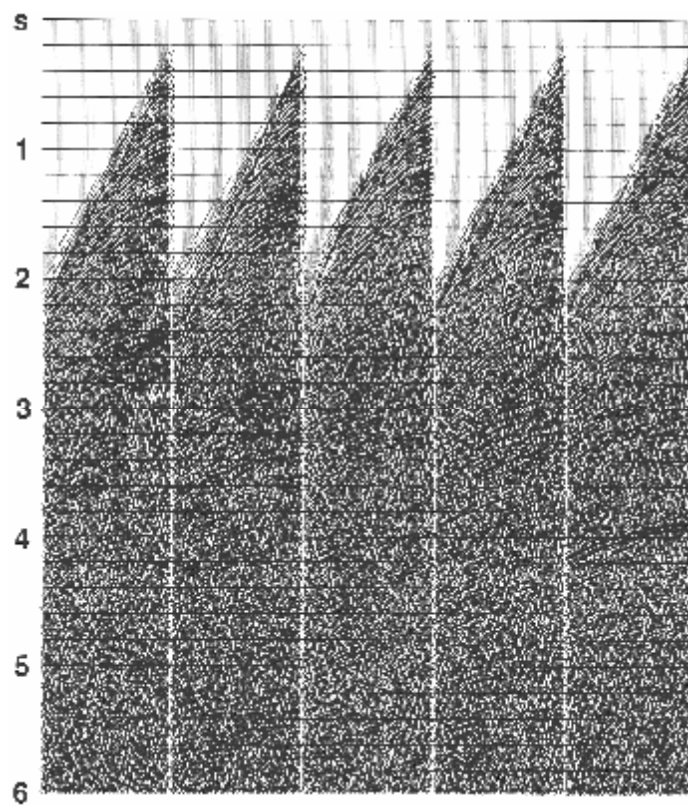


Рис.2.92 Нуль-фазовая деконволюция в частотной области, примененная к выборкам ОСТ на рис.2.87. Сравните с рис.2.88, 2.89 и 2.91.

УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 2-1. Запомните Z-преобразование импульса $[1, 0, (-\frac{1}{4})]$. Разработайте трехэлементный обратный фильтр и примените его к первоначальному импульсу. Совет: Z-преобразование импульса можно записать как произведение двух дублетов: $[1, (-\frac{1}{2})z]$ и $[1, (\frac{1}{2})z]$.

Упражнение 2-2. Рассмотрим следующий набор импульсов:

Импульс А: (3, -2, 1)

Импульс В: (1, -2, 3)

- Постройте кумулятивную энергию (в процентах) в функции временной задержки. Используя теорему Робинсона о задержке энергии (energy delay), определите минимально- и максимально-фазовый импульс.
- Задайте матричное уравнение (2.21) для каждого импульса рассчитайте операторы деконволюции сжатия и примените их.
- Предположим, что желаемый результат (0, 0, 1, 0). Задайте матричное уравнение (2.20) для каждого импульса, рассчитайте формирующие фильтры и примените их. Найдите наименьшую ошибку для импульса А с единичным импульсом с нулевой задержкой и для импульса В с задержанным единичным импульсом.

Упражнение 2-3. Рассмотрим импульс А в упражнение 2-2. Задайте матричное (2.22), где $\epsilon = 0.001, 0.01$ и 0.1 . В упражнении 2-2 $\epsilon = 0$. По мере увеличения предварительного отбеливания результат деконволюции становится меньше похожим на всплеск.

Упражнение 2-4. Рассмотрим последовательность кратных волн, ассоциированных с дном водного слоя; коэффициент отражения равен s_w , полное время пробега t_w . Разработайте обратный фильтр для подавления кратных волн (он называется фильтром Бэкаса (Backus, 1959) или обратным фильтром).

Упражнение 2-5. Рассмотрим следующую модель разреза:

Полное время пробега

мс

0 _____ поверхность

500 _____ дно водного слоя

750 _____ глубокая отражающая поверхность

Какую задержку предсказания и длину оператора нужно выбрать, чтобы подавить:

- кратные отражения от дна и
- многократные отражения в тонком слое?

Упражнение 2-6. Обратимся к рис.2.86 и рассмотрим следующие три полосы пропускания с применением TVSW:

FL: 10 – 30 Гц

FH: 30 – 50 Гц

FM: 50 – 70 Гц

Какую крутизну вы присвоите каждой полосе пропускания, чтобы амплитудный спектр выходной трассы был единичным по всей полосе 10 – 70 Гц?

Упражнение 2-7. Если происходит быстрое изменение характера сигнала по трассе (сильная нестационарность), какие полосы пропускания вы используете для фильтров в TVSW: узкие или широкие?

Упражнение 2-8. Рассмотрим минимально-фазовый импульс и следующие два процесса, примененные к нему:

- а) Деконволюция сжатия, сопровождаемая нуль-фазовой полосовой фильтрацией 10-50Гц.
- б) Формирующий фильтр для преобразования минимально-фазового импульса в 10-50Гц нуль-фазовый импульс.

В чем заключается различие между двумя результатами?

Упражнение 2-9. Как вы разработаете оператор минимально-фазового полосового фильтра?

Упражнение 2-10. Рассмотрим:

- а) свертку минимально-фазового импульса с нуль-фазовым импульсом,
- б) сложение двух минимально-фазовых импульсов.

Являются ли результирующие импульсы минимально-фазовыми?

Упражнение 2-11. Рассмотрим синусоиду на рис.1.1 (изображение 1) в качестве входной для деконволюции сжатия.

Что получим на выходе?