

На правах рукописи

Яппарова Елена Анатольевна

СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЛН НА ОСНОВЕ
ЦИФРОВОЙ ВЕЕРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (информация и информационные системы)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2006

Работа выполнена в институте «Кибернетический центр»
Томского политехнического университета

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент В.П. Иванченков

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор, А.М. Корилов

кандидат технических наук,
доцент, В.П. Комагоров

Ведущая организация:

Институт автоматики и электрометрии Сибирского
отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита состоится 22 марта 2006 г. в 15.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.269.06 при Томском политехническом
университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84,
институт «Кибернетический центр» ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск,
ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан “__” _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета
к.т.н., доцент

_____ Сонькин М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена разработке спектральных методов и алгоритмов разделения (разрешения) пространственно-временных сигналов, основанных на направленной цифровой веерной фильтрации, и созданию на их основе программного обеспечения для обработки сложных волновых полей.

Актуальность работы

В ряде областей науки и техники актуальной является задача разработки методов разделения (разрешения) пространственно-временных сигналов, наблюдаемых на фоне помех в условиях существующей неопределенности. К числу таких областей можно, прежде всего, отнести сейсморазведку, где регистрируемые пространственно-временные сигналы (волны) характеризуются повышенной сложностью и имеют сугубо интерференционный характер. При обработке сейсмических материалов, полученных при поиске месторождений углеводородов и других полезных ископаемых, возникает целый ряд проблем, связанных с необходимостью анализа больших массивов данных в условиях априорной неопределенности относительно формы сейсмических сигналов и среды их распространения. Поэтому, имеется значительная сложность, трудоемкость и многостадийность решения обратных задач сейсморазведки - определение геологического строения Земли по зарегистрированному полю упругих колебаний. Одним из важнейших элементов создания современных комплексов обработки сейсмических данных является разработка эффективных методов и алгоритмов разделения волн, т.к. многие задачи сейсморазведки решаются на основе анализа монотипных волн (отраженных, преломленных, обменных и т.п.).

В настоящее время при решении задач разделения волн наиболее широкое распространение получили так называемые интерференционные системы и алгоритмы, основанные на пространственно-временной фильтрации. Их применение позволяет производить разделение волн с повышением их разрешенности и отношения сигнала к помехе. Однако, как показывают проведенные исследования и практическое применение известных алгоритмов, при обработке сложных волновых полей их эффективность в ряде случаев существенно снижается. В условиях интенсивной интерференции сигналов и низком отношении сигнала к шуму часто не удается надежно разделить волны.

Синтез существующих оптимальных алгоритмов разделения обычно осуществляется с привлечением большого числа априорных сведений о свойствах разрешаемых волн и помех, которые на практике, как правило, известны приближенно и не в полном объеме. При большом числе выделяемых волн предложенные алгоритмы отличаются повышенной трудоемкостью, их сходимость и надежность оказывается невысокой.

Все это предопределяет актуальность развития методов разделения сейсмических волн, которые, с одной стороны, базировались бы на фактически имеющейся априорной информации относительно свойств выделяемых волн и помех, с другой стороны, обладали бы повышенной помехоустойчивостью

(а значит, разрешающей способностью), возможностью обучения и адаптации в процессе обработки данных. В этом плане значительный интерес представляет развитие спектральных методов. Здесь значительными возможностями по созданию эффективных алгоритмов разделения сейсмических волн, обладают методы, основанные на направленной веерной фильтрации.

Веерная фильтрация уже получила достаточно широкое применение при предварительной обработке сейсмической информации. Обычно, известные алгоритмы веерной фильтрации реализуются в пространственно-временной области с конечной импульсной характеристикой. При малых базах наблюдения и небольшой полосе пропускания фильтра по кажущейся скорости волн такая реализация дает большие погрешности в реализации требуемой частотной характеристики веерного фильтра, и, что как следствие приводит, к существенному ухудшению его помехоустойчивости и разрешающей способности, внесению значительных искажений в спектр выделяемых сигналов.

В литературе отсутствует достаточно полный анализ характеристик волн на выходе веерного фильтра. Не рассмотрены важные вопросы по оценке помехоустойчивости и разрешающей способности веерной фильтрации, по разработке спектральных методов разделения волновых полей на основе фильтров с переменными параметрами и адаптивных веерных фильтров. Не освещены проблемы и особенности цифровой реализации веерных фильтров в спектральной области.

Цель работы и задачи исследований

Целью диссертационной работы является создание спектральных методов и эффективных цифровых алгоритмов разделения волн, основанных на направленной веерной фильтрации, исследование их эффективности на статистических моделях волновых полей, а также применение разработанных алгоритмов при обработке сложных сейсмических волновых полей. В данной работе решаются следующие задачи:

1. Провести анализ отклика веерного фильтра при разделении волн, имеющих линейные и параболические уравнения годографов. Со статистических позиций рассмотреть задачу разделения сложных волновых полей на основе направленной веерной фильтрации. Разработать методику выбора параметров фильтра, при которых достигается наименьшее искажение разрешаемых волн, наибольшее отношение сигнала к помехе на выходе фильтра.

2. Разработать спектральные методы разделения сложных волновых полей на базе процедур веерной фильтрации, способных устойчиво функционировать в условиях априорной неопределенности относительно характеристик сигнала и помех. Дать оценку влияния различных факторов на их эффективность.

3. Создать методику синтеза цифровых веерных фильтров в частотной области и на ее основе разработать цифровые алгоритмы разделения волн и необходимые программные средства для их реализации на ЭВМ.

4. Провести исследования предложенных алгоритмов на статистических моделях сейсмических волновых полей и опытно-методическую обработку сейсмических материалов.

Методы исследования

В настоящей диссертационной работе используются методы спектрального анализа, теория фильтрации, теория преобразования Фурье, теория оптимального приема, статистического разрешения и восстановления пространственно-временных сигналов, восстановления сигналов, методы математического и статистического моделирования.

Научную новизну работы определяют

1. Анализ влияния различных факторов на частотные характеристики отклика веерного фильтра при выделении пачек волн с линейным и параболическим уравнением годографа. Оценка помехоустойчивости и разрешающей способности веерной фильтрации при разделении пачек волн по критерию максимального отношения сигнала к помехе и критерию обеспечения минимума среднеквадратической погрешности восстановления формы выделяемых волн. Методика определения основных параметров веерного фильтра по заданным критериям разделения волн.

2. Новые спектральные методы разделения волн, основанные на полосовой веерной фильтрации с режекцией высших порядков спектра и фильтрации с переменными параметрами, синтез адаптивного веерного фильтра и построение на его основе системы, способной эффективно разделять пачки волн при различных условиях априорной неопределенности относительно формы разрешаемых пространственно-временных сигналов и распределения их кинематических параметров.

3. Новые способы реализации цифровой веерной фильтрации в частотной области, позволяющие синтезировать цифровые фильтры с требуемой частотной характеристикой наиболее близкой к идеальному веерному фильтру.

4. Оригинальные алгоритмы разделения сложных волновых полей на основе методов цифровой направленной веерной фильтрации.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Анализ отклика веерного фильтра может быть положен в основу методики выбора его основных параметров, обеспечивающих наименьшее искажение спектра разрешаемых сигналов. Введение определения эквивалентной передаточной функции веерного фильтра при разделении волн с линейным и параболическим уравнением годографа существенно упрощает анализ его отклика.

2. Методика оценки разрешающей способности веерного фильтра при разделении пачек волн со случайными параметрами. При обработке сложных волновых полей (интерференция волн, наложения порядков их спектра, перекрытия областей кажущихся скоростей полезных и мешающих волн) наибольшую разрешающую способность обеспечивают предложенные спектральные методы, основанные на полосовой веерной фильтрации с режекцией высших порядков спектра и веерная фильтрация с переменными параметрами.

3. Адаптивные методы разделения пачек волн, реализованные на базе поисковой узкополосной фильтрации по направлению и веерной фильтрации с переменной структурой и параметрами.

4. Общепринятые схемы реализации двумерных цифровых направленных

фильтров в частотной области неприменимы при обработке волновых полей малого размера. Разработанные способы реализации цифровых веерных фильтров, основанные на выборе согласованной сетки дискретизации спектра, устраняют недостатки общепринятого подхода и обладают большим быстродействием.

5. Результаты исследования разработанных алгоритмов на модельных и реальных материалах подтверждают их высокую эффективность при разделении сложных волновых сейсмических полей.

Практическая ценность и внедрение результатов работы

Разработанные спектральные алгоритмы разделения пачек волн на основе цифровой веерной фильтрации внедрены в виде отдельного модуля в программно-алгоритмический комплекс «Геосейф-ВСП», предназначенный для детальной обработки данных скважинной сейсморазведки. Алгоритмы были использованы при выполнении контрактов с ОАО "Томскнефть" для обработки материалов вертикального сейсмического профилирования (ВСП) полученных в восьми разведочных скважинах. Применение этих алгоритмов в условиях существенной априорной неопределенности относительно параметров выделяемых сигналов позволило существенно повысить детальность обработки, разрешающую способность, уменьшить искажения волн при их разделении, увеличить надежность решения геофизических задач по прослеживанию сейсмических волн, стратиграфической привязки опорных горизонтов, построению временных и глубинных разрезов и прогнозу свойств околоскважинного пространства. Разработанные процедуры могут быть встроены и в другие комплексы обработки сейсмической информации, т.к. при их написании использовались общие принципы объектно-ориентированного программирования.

Предлагаемые алгоритмы также могут быть использованы при обработке радиолокационной и акустической информации, аэрокосмических и топографических изображений с целью выделения линияментов и оценки их направления.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на: региональной конференции «Наука. Техника. Инновации» (Новосибирск, 2002), Восьмой и Девятой международных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технология» (Томск, 2002, 2003), Седьмом международном симпозиуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2003), Пятой международной молодежной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2003» (Москва, 2003), Второй международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2005), а также на семинарах кафедры прикладной математики Томского политехнического университета.

Работа выполнялась в рамках «Индивидуального гранта Томского политехнического университета».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 3 статьи и 6 тезисов докладов на конференциях и симпозиумах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка используемой литературы из 100 наименований. Объем основного текста составляет 189 страниц машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показывается актуальность разработки новых методов разделения волн на примере решения ряда важных научных и практических задач разведочной геофизики. Сформулированы основные цели и задачи. Описывается научная новизна и практическая ценность работы.

В первом разделе диссертации со статистических позиций формулируется задача разделения волн, исходя из следующих двух подходов. В первом случае при синтезе системы разделения волн в качестве критерия может служить критерий отношения сигнала к шуму на выходе системы. При втором подходе критерий разрешения определяется из тех или иных функциональных задач (обнаружения сигналов, оценки их параметров), решаемых при последующей обработке данных. Здесь критерий формируется, базируясь на методах статистических решений.

В разделе рассматриваются вопросы математического описания и структуры статистических моделей волновых полей применительно к задачам обработки сейсмической информации.

Дается анализ существующих методов разрешения сейсмических сигналов, на основании которого делается вывод о перспективности разработки спектральных методов разделения волн, основанных на процедурах перестраиваемой и адаптивной веерной фильтрации.

Второй раздел диссертации посвящен вопросам анализа и разработки спектральных методов разделения волн, базирующихся на частотных методах веерной фильтрации.

При исследовании в общем случае используется аддитивная модель смеси пачки полезных волн, регулярных и нерегулярных помех. Исходя из рассматриваемых ситуаций, параметры полезных волн принимаются известными либо случайными с заданным законом их распределения.

Получены спектральные характеристики пачки плоских регулярных волн с линейным уравнением годографа. При этом пачка волн задавалась в виде:

$$S(t, x) = \sum_{i=1}^{Ks} a_i S_i(t - \Delta t_i(x)) \sum_{n=-N}^N \delta(x - n\Delta x), \quad (1)$$

где a_i – амплитуда волны; $S_i(t)$ – форма импульса i -ой волны; Ks – число волн, $U = (2N + 1)\Delta x$ – база наблюдения; $\Delta t_i(x)$ – годограф i -ой волны, определенный уравнением:

$$\Delta t_i(x) = t_i + x \cdot \gamma_i, \quad (2)$$

где γ_i – величина, обратная кажущейся скорости V_i (либо выражается через тангенс кажущегося угла наклона волны $\gamma = 1/V = \tan(\varphi)$).

При анализе волны с нелинейным уравнением годографа вводится его параболическая аппроксимация, наиболее часто используемая в теории сигналов:

$$\Delta t_i(x) = t_i + x \cdot \gamma_i + x^2 \cdot \lambda_i, \quad (3)$$

где λ_i – коэффициент кривизны годографа.

Показано, что в области нулевого порядка дискретизации спектра **область максимальных значений двумерного спектра (ОМЗС)** пачки волн или волны с параболическим уравнением годографа, можно в первом приближении ограничить неравенствами типа $-\gamma_v ft \leq fx \leq -\gamma_n ft$, где γ_n и γ_v соответствует максимальной и минимальной кажущимся скоростями выделяемых волн, ft, fx – временные и пространственные частоты.

На этом основании задачу выделения пачки волн или волны с нелинейным уравнением годографа можно представить как задачу пространственно-временной фильтрации по заданному направлению. В условиях априорной неопределенности относительно формы выделяемых сигналов можно реализовать фильтр, область пропускания которого наиболее полно согласована с ОМЗС полезной составляющей волнового поля.

Подобный фильтр, получил название **веерный фильтр (ВФ)**. Если считать, что фильтрация проводится в области нулевого порядка дискретизации спектра, то его частотная характеристика имеет вид (рис. 1):

$$H(ft, fx) = \text{rect} \left[\frac{fx + \gamma_\Phi |ft|}{\Delta\gamma_\Phi |ft|} \right], \quad (4)$$

где $\text{rect} \left[\frac{x}{a} \right] = \begin{cases} 1, & |x| \leq a/2 \\ 0, & |x| > a/2 \end{cases}$ – прямоугольная функ-

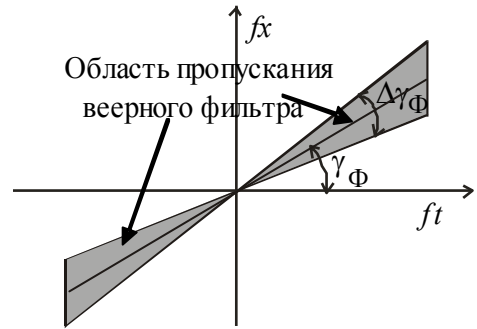


Рис. 1. Частотная характеристика веерного фильтра

ция, γ_Φ – коэффициент, определяющий тангенс угла наклона ВФ; $\Delta\gamma_\Phi$ – раствор фильтра, определяющий ширину диапазона пропускаемых скоростей. Исходя из условия согласования ОМЗС выделяемых волн с полосой пропускания веерного фильтра по γ , параметры фильтра могут быть заданы в следующей форме

$$\Delta\gamma_\Phi = \gamma_v - \gamma_n, \quad \gamma_\Phi = (\gamma_v + \gamma_n)/2. \quad (5)$$

При малой базе наблюдения эффект Гиббса оказывает значительное влияние и параметры фильтра необходимо задавать в виде:

$$\Delta\gamma'_\Phi = \gamma_v - \gamma_n + 2/(f_{\text{верх}} U), \quad \gamma_\Phi = (\gamma_v + \gamma_n)/2, \quad (6)$$

где $f_{\text{верх}}$ – верхняя частота сигнала.

Определение отклика на выходе веерного фильтра является сложной задачей. Для упрощения анализа было введено понятие эквивалентной передаточной функции (ЭПФ), определяющей изменение спектра волны на выходе фильтра в каждой точке приема в зависимости от расстройки фильтра по параметру γ . Для случая пачки волн с линейным уравнением годографа ЭПФ фильтра имеет вид:

$$B_i(ft, \gamma'_i, \Delta\gamma_\Phi) = \frac{1}{\pi} e^{-j2\pi\gamma'_i |ft|} \left[\text{Si} \left[\pi U |ft| \left(\gamma'_i + \frac{\Delta\gamma_\Phi}{2} \right) \right] - \text{Si} \left[\pi U |ft| \left(\gamma'_i - \frac{\Delta\gamma_\Phi}{2} \right) \right] \right], \quad (7)$$

где $\gamma'_i = \gamma_\Phi - \gamma_i$ - расстройка фильтра относительно направления i -ой волны, $\text{Si}[u]$ – интегральный синус. При выделении волны с параболическим уравнением годографа ЭПФ равна:

$$B(ft, \gamma_\Phi \Delta\gamma_\Phi, \gamma', \lambda) = \Delta\gamma_\Phi |ft| \int_{\gamma_\Phi - U/2}^{\gamma_\Phi + U/2} e^{-j2\pi ft(\eta^2 \lambda - 2\eta \lambda \gamma_\Phi - \gamma' \eta)} \text{Sinc}(\pi \Delta\gamma_\Phi |ft| \eta) d\eta. \quad (8)$$

Используя определение ЭПФ фильтра был проведен анализ сигналов, наблюдаемых на выходе фильтра, и получены соотношения оценки погрешностей, вносимых при веерной фильтрации. Анализ показал, что в общем случае наибольшие искажения спектра отмеченных выше сигналов на выходе веерного фильтра наблюдаются в области низких частот, а в области средних и высоких может происходить как усиление, так и подавление гармоник выделяемых волн. Вносимые искажения в спектр волн существенно зависят от выбора параметров фильтра $(\Delta\gamma_\Phi, \gamma_\Phi)$. При малых базах наблюдения выбор параметров фильтра в соответствии с (6) обеспечивает наименьшее искажение спектров выделяемых сигналов на его выходе (порядка 10%).

Для оценки помехоустойчивости веерной фильтрации была рассмотрена модель аддитивной смеси полезных волн и нерегулярного белого шума, имеющего нормальный закон распределения. Получены основные выражения для отношения сигнала к шуму на выходе ВФ при выделении пачки плоских волн:

$$\rho_{\text{вых}}(\Delta\gamma_\Phi, \gamma_\Phi) = \frac{\rho_{\text{вх}}}{E_S} P_\xi(\Delta\gamma_\Phi) \int_{-\infty}^{\infty} |S_0(ft)|^2 J_B[ft; p(\gamma_S); \gamma_\Phi, \Delta\gamma_\Phi] dft, \quad (9)$$

и среднего квадрата ошибки восстановления спектра сигнала на выходе ВФ

$$\varepsilon^2(ft, \Delta\gamma_\Phi, \gamma_\Phi) = d^2 G_S^{\text{вх}}(ft) J[ft; p(\gamma_S), \Delta\gamma_\Phi, \gamma_\Phi] + d^2 G_\xi^{\text{вх}}(ft), \quad (10)$$

где E_S , $\rho_{\text{вх}}$ - энергия сигнала и отношение сигнала к шуму на входе ВФ, $p(\gamma_S)$ - плотность распределения значений γ полезных волн, $P_\xi(\Delta\gamma_\Phi)$ - коэффициент подавления шума на выходе ВФ, $G_S^{\text{вх}}(ft)$ и $G_\xi^{\text{вх}}(ft)$ - спектральные плотности сигнала на входе ВФ и помехи на выходе ВФ, $J[ft; p(\gamma_S), \Delta\gamma_\Phi, \gamma_\Phi]$ - функция, определяющая уровень искажения спектра сигнальной составляющей на частоте ft , $J_B[ft; p(\gamma_S), \Delta\gamma_\Phi, \gamma_\Phi]$ - функция, определяющая уровень пропускания сигнальной составляющей по частоте ft на выходе ВФ,

Результаты исследования (9-10) показали, что при оптимальном выборе параметров фильтра удастся увеличить отношение сигнала к шуму в $4 \div 10$ раз в диапазоне значений $\Delta\gamma_S = \gamma_S^S - \gamma_n^S$ от $3 \cdot 10^{-5}$ с/м до $8 \cdot 10^{-5}$ с/м. В случае шумов высокой интенсивности на входе фильтра ($\rho_{\text{вх}} \leq 1$) удастся выделить сигнал с относительной погрешностью не превышающей $15 \div 20\%$. При более высоких отношениях сигнала к шуму ($\rho_{\text{вх}} > 2$) среднее значение квадрата ошибки восстановления спектра сигнала не превышает приблизительно 10%. По результатам исследований выработаны рекомендации по эмпирическому выбору $\Delta\gamma_\Phi$ и γ_Φ , обеспечивающих наилучшее приближение к оптимальным значениям

этих параметров.

Оценка разрешающей способности ВФ проводилась на модели, в которой выделяемая пачка полезных волн со случайными параметрами наблюдается на фоне пачки волн-помех. За **относительную величину разнесения** одной пачки волн от другой принималось отношение

$$\gamma_r = (\gamma_\epsilon^S - \gamma_\epsilon^P) / (\gamma_\epsilon^S - \gamma_n^S), \text{ при } \gamma_\epsilon^S > \gamma_\epsilon^P \quad (11)$$

где $\gamma_\epsilon^S, \gamma_n^S, \gamma_\epsilon^P$ - верхняя и нижняя граница диапазона значений γ полезных и мешающих волн. Из анализа двумерного спектра сформированной модели волнового поля в области нулевого порядка дискретизации показано, что спектры пачки полезных и мешающих волн будут **разнесены** в частотной области, если $\gamma_r > 1$.

В результате проведенных исследований были найдены отношение сигнала к помехе на выходе ВФ:

$$\rho_{\text{вых}}(\gamma_\Phi, \Delta\gamma_\Phi) = \psi_{S_{\text{вых}}}^2 / \psi_{P_{\text{вых}}}^2 = \rho_{\text{вх}} K[p(\gamma_S), p(\gamma_P); \gamma_\Phi, \Delta\gamma_\Phi] \quad (12)$$

и ошибка восстановления спектра сигнала:

$$\varepsilon^2(ft; \gamma_\Phi, \Delta\gamma_\Phi) = d^2 \left[G_S^{6x}(ft) J[ft; \rho(\gamma_S), \Delta\gamma_\Phi, \gamma_\Phi] + G_P^{6x}(ft) J_B[ft; \rho(\gamma_P), \Delta\gamma_\Phi, \gamma_\Phi] \right], \quad (13)$$

где $G_P^{6x}(ft)$ - спектральная плотность помехи на входе ВФ, $p(\gamma_P)$ - плотность распределения значений γ мешающих волн, $J_B[ft; \rho(\gamma_P), \Delta\gamma_\Phi, \gamma_\Phi]$ - функция, определяющая уровень пропускания помех на частоте ft . Таким образом, $\rho_{\text{вых}}(\gamma_\Phi, \Delta\gamma_\Phi)$ можно рассматривать как произведение отношения сигнала к помехе на входе фильтра $\rho_{\text{вх}}$ на коэффициент $K[\gamma_\Phi, \Delta\gamma_\Phi]$, определяющий подавления помех, заданный отношением средних мощностей нормированного сигнала и помехи на выходе ВФ. Погрешность восстановления спектра сигнала определяется, в соответствии с (13), искажениями, вносимыми ВФ в сигнальную составляющую волнового поля, и уровнем помех на выходе фильтра.

В соответствии с предложенными критериями разрешения сигналов при разделении волновых полей введено понятие разрешающей способности ВФ. Согласно первому критерию, за разрешающую способность, в смысле обеспечения заданного отношения сигнала к шуму на выходе фильтра, была взята величина γ_r , при которой отношение сигнала к помехе на выходе достигает заданного значения ρ_0 . Согласно второму критерию, за разрешающую способность, в смысле восстановления сигнала, взята величина γ_r , при которой нормированная усредненная ошибка восстановления спектра сигнала не превышает заданного значения ε_0 . Таким образом, под задачей разрешения подразумевается подбор параметров фильтра $(\gamma_\Phi, \Delta\gamma_\Phi)$, при которых будет достигаться наилучшая его разрешающая способность.

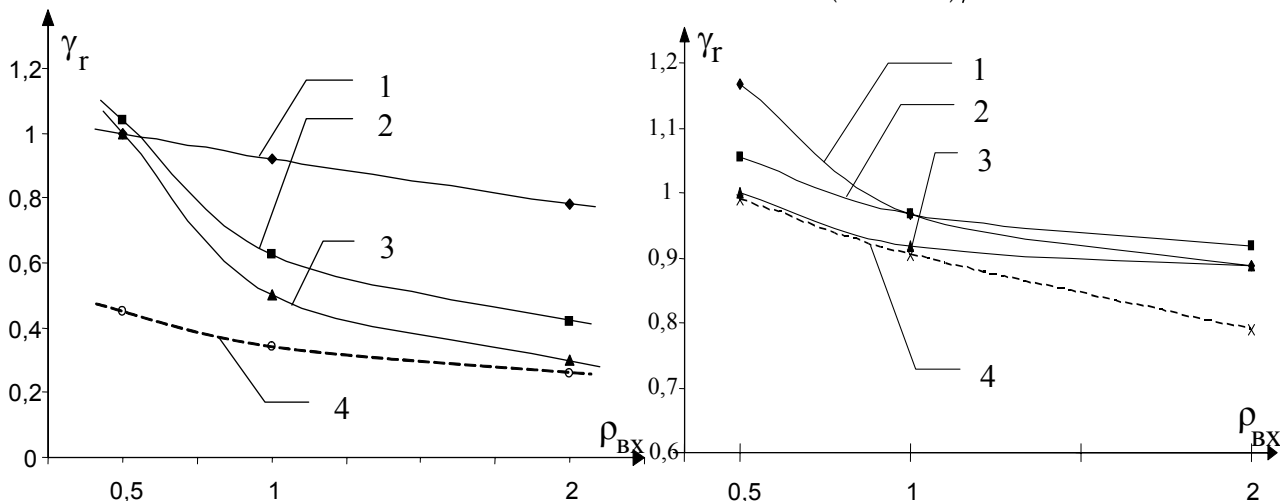
Для определения оптимальных параметров фильтра необходима априорная информация о свойствах входного сигнала и помехи. На практике, при взрывных источниках сейсмических колебаний, данная информация отсутствует, что

значительно затрудняет нахождение оптимальных значений γ_Φ и $\Delta\gamma_\Phi$. Поэтому, предложено параметры фильтра задавать эмпирически. Для случая, когда спектры пачек полезных и мешающих волн налагаются ($\gamma_r < 1$), необходимо учитывать область распространения значений γ мешающих волн:

$$\Delta\gamma_\Phi = \gamma_\epsilon^S - \gamma_\epsilon^P, \quad \gamma_\Phi = (\gamma_\epsilon^S + \gamma_\epsilon^P)/2; \text{ при } \gamma_\epsilon^S > \gamma_\epsilon^P \quad (14)$$

При обработке полей малого размера, учитывая эффект Гиббса, параметры фильтра следует задавать согласно выражениям:

$$\Delta\gamma'_\Phi = \gamma'^S_\epsilon - \gamma'^P_\epsilon + 2/(f_{\text{верх}}U), \quad \gamma'_\Phi = (\gamma^S_\epsilon + \gamma^P_\epsilon)/2 + 1/(f_{\text{верх}}U). \quad (15)$$



а) первый критерий ($\rho_0 = 20$) б) второй критерий ($\epsilon_0 = 0.1$)

Рис. 2. Разрешающая способность ВФ в зависимости от $\rho_{\text{вх}}$

Примечание: 1 – параметры ВФ задавались согласно выражению (5), 2 – выражению (10), 3 – выражению (11), 4 – оптимальные параметры ВФ.

В этой связи рассматривается задача, насколько приближаются значения γ_Φ и $\Delta\gamma_\Phi$, определяемые согласно выражениям (5, 6, 14, 15), к оптимальным параметрам фильтра. В соответствии с выражениями (11,12,13) для принятой модели волнового поля были проведены исследования разрешающей способности γ_r , в зависимости от отношения сигнала к помехе на входе $\rho_{\text{вх}}$, по отмеченным выше критериям разрешения. На рис. 2 в качестве примера приведены графики $\gamma_r(\rho_{\text{вх}})$ для двух принятых критериев разрешения и рассматриваемых случаев выбора параметров фильтра.

Из анализа графиков и проведенных исследований следует:

- в том случае, когда спектры разрешаемых пачек волн разнесены, то в соответствии с первым критерием разрешения выбор параметров фильтра целесообразно осуществлять согласно выражению (5). В том случае, когда спектры пачек налагаются, то выбор γ_Φ и $\Delta\gamma_\Phi$ требуется проводить согласно (15);
- в том случае, когда спектры разрешаемых волн налагаются и отношение сигнала к помехе на входе ВФ большое ($\rho_{\text{вх}} > 2$), то согласно второму критерию разрешения волн выбор параметров фильтра целесообразно осуществлять согласно (5). В остальных случаях γ_Φ и $\Delta\gamma_\Phi$ необходимо выбирать согласно (15).

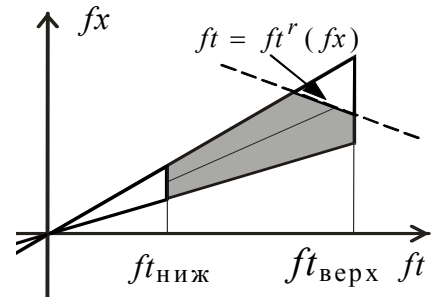
В общем случае проведенные исследования показали, что ВФ обеспечивает достаточно высокое разрешение пачек волн даже в условиях их интенсивной интерференции. Так, например, в соответствии с первым критерием удастся разрешить волны с $\gamma_r = 0.5$ при $\rho_{ex} = 1$ (рис. 2.а график 3).

При обработке сложных волновых полей возникает ряд проблем, определенных тем, что часто диапазоны кажущихся скоростей разделяемых волн могут перекрываться в разных точках наблюдения. Эффективность разделения пачек волн также снижается, когда порядки в спектрах разрешаемых волн налагаются в области высоких частот. Все это предопределяет необходимость развития спектральных методов разделения волн. Так, повысить качество разделения волн в условиях, когда порядки их спектров налагаются в области высоких частот, можно с помощью **полосового всеерного фильтра с режекцией высших порядков спектра**. Частотная характеристика данного фильтра имеет вид (рис. 3):

$$H_p(ft, fx) = \text{rect}\left[\frac{fx + \gamma_\Phi |ft|}{\Delta\gamma_\Phi |ft|}\right] \text{rect}\left[\frac{ft}{2ft_{\text{верх}}}\right] \left(1 - \text{rect}\left[\frac{ft}{2ft_{\text{ниж}}}\right]\right) \text{rect}\left[\frac{ft}{2ft^r(fx)}\right], \quad (16)$$

где $ft_{\text{ниж}}$, $ft_{\text{верх}}$ – границы низкочастотной и высокочастотной режекции, соответственно;

$$ft^r(fx) = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_\Phi^P} \left(\frac{1}{\Delta x} - \frac{4}{U} - fx \right), & fx \geq 0, \\ \frac{1}{\gamma_\Phi^P} \left(\frac{4}{U} - \frac{1}{\Delta x} - fx \right), & fx < 0, \end{cases} \quad (17)$$



- следует понимать как уравнение прямой в нулевом порядке спектра, выше которой (или ниже которой, в зависимости от значений γ_S и γ_P) происходит наложение порядков спектров полезных и мешающих волн.

Рис. 3. Частотная характеристика полосового ВФ с режекцией высших порядков спектра

Для случаев, когда диапазоны кажущихся скоростей различных волн, наблюдаемых в разных точках наблюдения x , перекрываются, разработан новый метод разделения волн на основе **всеерной фильтрации с переменными параметрами (ВФПП)**. Суть метода заключается в следующем. При разделении волн проводится:

- 1) построение разделяющей функции

$$\gamma_u(x) = \left(\gamma_\Phi^S(x) + \gamma_\Phi^P(x) \right) / 2, \quad \text{при } \gamma_{cp}^S(x) < \gamma_{cp}^P(x); \quad (18)$$

- 2) определение нижней границы области пропускания фильтра

$$\gamma_d(x) = \gamma_\Phi^S(x) - 1/f_{\text{верх}} m; \quad (19)$$

- 3) выбор базы фильтрации $m < U$, согласно условию

$$\min_{x \in \left[x' m \frac{m}{2}, x' m \frac{m}{2} \right]} \gamma_\Phi^P(x) \geq \max_{x \in \left[x' m \frac{m}{2}, x' m \frac{m}{2} \right]} \gamma_\Phi^S(x), \quad \text{для } \forall x' \in \left[-\frac{U}{2}, \frac{U}{2} \right], \quad (20)$$

т.е. области определения кажущихся скоростей мешающих и полезных волн

внутри окна скольжения не должны перекрываться, где x' – центр окна скольжения;

4) проведение ВФ в скользящем окне размером m .

Для оценки эффективности предложенного метода разделения волн на основе ВФПП были проведены эксперименты на различных модельных полях. В качестве примера на рис. 4 приведены результаты численных экспериментов, когда модель волнового поля задавалась в виде аддитивной смеси пачки полезных и пачки волн-помех, причем диапазоны

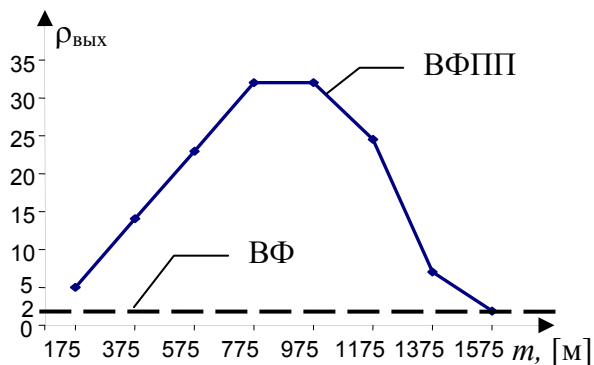


Рис. 4. Зависимость отношения сигнала к помехе на выходе фильтра от величины базы фильтрации

значения γ которых перекрываются в разных точках наблюдения. На рис. 4 пунктиром показано отношение сигнала к помехе на выходе веерного фильтра с постоянными параметрами. Как видно, применение метода ВФПП позволяет существенно повысить отношение сигнала к помехе и тем самым увеличить разрешение при разделении волн. Проведенные исследования показали, что в ряде важных практических случаев предложенный метод разделения волн позволяет повысить разрешение пачек волн почти в 2 раза.

Для эффективной реализации возможностей рассмотренных выше методов разделения сигналов необходима полная информация о значениях граничных кажущихся скоростей, полосе частот полезных и мешающих волн. При обработке сложных волновых сейсмических полей такая информация на практике либо отсутствует, либо известна только частично или приближенно.

В этой связи были предложены методы разделения волновых полей основанных на адаптивной фильтрации, общая схема которой представлена на рис. 5. В блоке «оценка параметров фильтра» решаются задачи сбора и анализа информации, определения значений параметров фильтра. На этапе обучения, для оценки кажущихся скоростей при адаптивном разделении волн предложено использовать метод, основанный на узкополосной перестраиваемой фильтрации (УПФ) по направлению. Данный метод был ранее описан в работах В.П. Иванченкова, Г.И. Посконного и Д.Ю. Степанова. Оценка кажущихся скоростей волн в нем осуществляется путем поиска максимума энергии отклика УПФ в некоторой точке наблюдения при его различных угловых положениях в некотором диапазоне Ω .

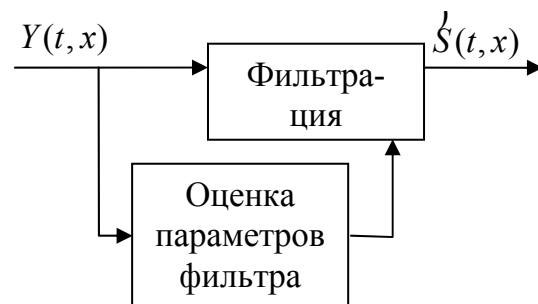


Рис. 5. Общая схема адаптивного ВФ

В зависимости от условий априорной неопределенности относительно характеристик разделяемых сигналов предложено три метода разделения волн, основанных на адаптивной веерной фильтрации, адаптивной веерной фильтрации с режекцией высших порядков спектра и адаптивной веерной

фильтрации с переменными параметрами. На синтезированных моделях сложных волновых полей были проведены исследования эффективности предложенных методов. Показано, что введение адаптации приводит к незначительному проигрышу разрешающей способности по сравнению со случаем, когда параметры веерного фильтра считаются точно известными. При соотношении сигнала к помехе на входе ВФ $\rho_{ex} = 1$, уменьшение разрешающей способности не превышает 3%.

В целом, проведенные исследования подтверждают, что использование УПФ по направлению с высокой точностью позволяет оценивать кажущиеся скорости разделяемых волн, с другой стороны, предложенные методы адаптивной веерной фильтрации обладают достаточно высокой разрешающей способностью.

На основе предложенных адаптивных методов разделения сигналов была разработана интерференционная система с переменными параметрами и структурой. В этой системе при различной априорной неопределенности относительно параметров разделяемых волн в процессе обработки данных решается задача выбора структуры применяемого адаптивного фильтра по схеме представленной на рис. 6. Предложенная система позволяет гибко решать задачи разделения сложных волновых полей, возникающих в различных практических ситуациях.

Третий раздел посвящен вопросам синтеза цифровых алгоритмов веерных фильтров в спектральной области, разработке цифровых алгоритмов разделения волн и их программной реализации на ЭВМ.

Основные проблемы, возникающие при синтезе направленных пространственно-временных фильтров в спектральной области, связаны с несогласованием их частотных характеристик с используемой прямоугольной стандартной сеткой дискретизации двумерной частотной области. Это приводит к тому, что отклик на выходе фильтра оказывается мало чувствительным к изменению параметров ВФ, что, в свою очередь, существенно снижает разрешающую способность фильтра. Для решения этих проблем предложен новый подход, который заключается в выборе нестандартной сетки дискретизации, позволяющей однозначно определить своими узлами область пропускания фильтра.

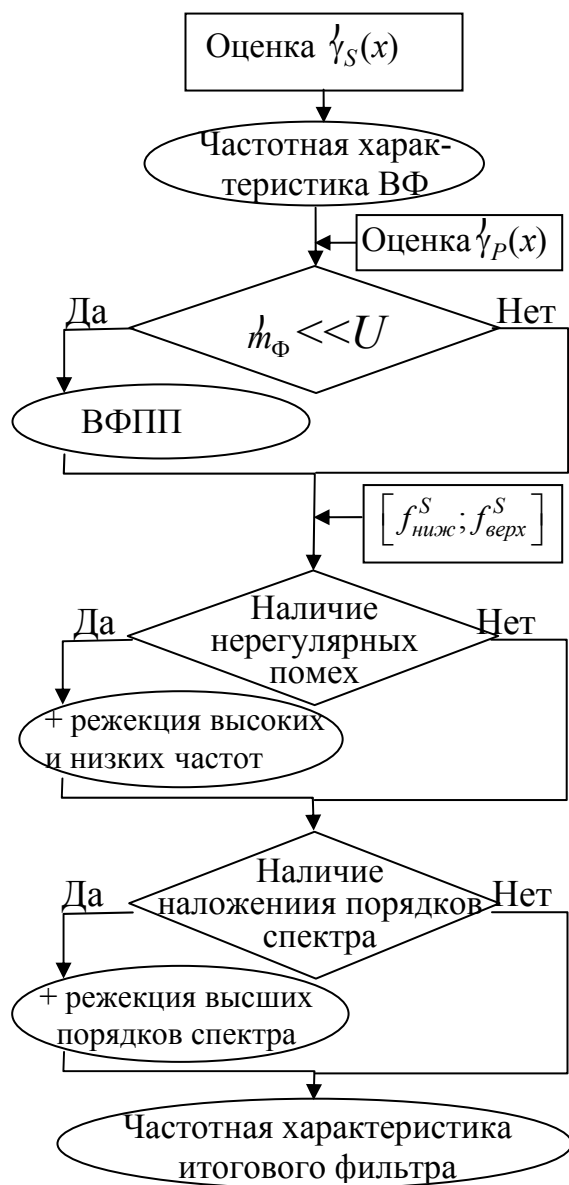


Рис.6. Схема выбора структуры в интерференционной системе

На рис. 7 представлена новая сетка дискретизации, где положение каждого (n,k)-ого узла будет определяться как:

$$\begin{cases} ft' = f_{k,p}^t = k\Delta ft, \\ fx' = f_{k,p}^x = p\Delta fx - \gamma_{\Phi} f_{k,p}^t, \end{cases} \quad (21)$$

Данная сетка дискретизации двумерного спектра получила название модифицированная сетка, согласованная по направлению (СМ). В случае, когда необходимо обрабатывать участки волнового поля малого размера и с узкой полосой пропускания фильтра предложено реализовывать фильтр по модифицированной нестандартной сетке дискретизации двумерного спектра (НМ), которая согласована не только по направлению, но и по параметру $\Delta\gamma_{\Phi}$

$$\begin{cases} fx' = f_{k,p}^x = p\Delta fx \left(1 \mp \frac{\gamma_{\Phi}}{\Delta\gamma_{\Phi}}\right) - \gamma_{\Phi} k\Delta ft, \\ ft' = f_{k,p}^t = k\Delta ft \pm \frac{p\Delta fx}{\Delta\gamma_{\Phi}}, \end{cases} \quad (22)$$

Шаги дискретизации Δft и Δfx по соответствующим частотам ft и fx для обеих сеток дискретизации выбираются согласно теореме Котельникова ($\Delta ft = 1/T$, $\Delta fx = 1/(\Delta x(2N+1))$).

Цифровые фильтры, синтезированные на основе данных сеток, получили название **СМВ** и **НМВ** фильтров.

В работе были проведены исследования по оценке затрат на реализацию разработанных и известных алгоритмов ВФ. На рис. 8 представлена диаграмма, которая отражает связь количества комплексных умножений и величины раствора фильтра. Размер волнового поля составлял 11×32 . В результате исследований показано, что разработанные способы реализации ВФ позволяют сократить время выполнения преобразований, уменьшить требования к ресурсам ЭВМ, при обработке полей малого размера и при узком растворе ВФ.

На базе разработанных цифровых способов реализации ВФ рассмотрены вопросы реализации на ЭВМ алгоритма разделения волн с переменными параметрами и адаптивных алгоритмов, объединенных в предложенную интерференционную систему обработки данных. Для оценки кинематических параметров разделяемых волн при реализации адаптивных методов предложено использовать оригинальный алгоритм комплексного выделения осей синфазности волн. Данный алгоритм базируется на отмеченном выше методе УПФ и позволяет совместно оценивать времена прихода волн и значения их кажущихся

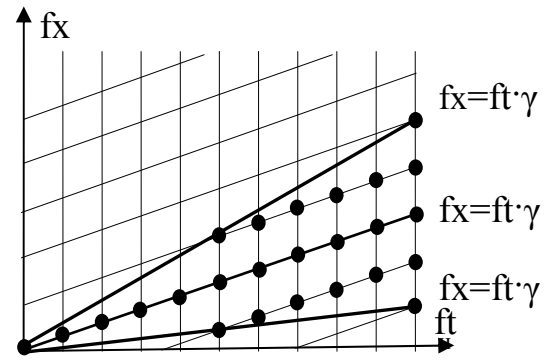
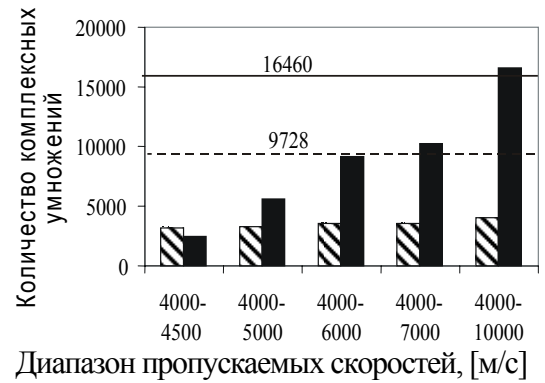


Рис. 7. Модифицированная согласованная сетка дискретизации



Диапазон пропускемых скоростей, [м/с]
 ▨ СМВ фильтр ■ НМВ фильтр
 — Веерный КИХ фильтр
 --- Стандартный веерный фильтр, реализованный в частотной области

Рис. 8. Оценка быстродействия алгоритмов ВФ

скоростей в различных точках приема.

Разработанные алгоритмы разделения волн были реализованы в виде потоков (нитей) и внедрены в программно-алгоритмический комплекс (ПАК) «Геосейф-ВСП», который был создан на кафедре прикладной математики института «Кибернетический центр» Томского политехнического университета и используется для детальной обработки сейсмических материалов метода ВСП. ПАК «Геосейф-ВСП» предназначен для использования на IBM PC под операционной системой семейства Win32.

В четвертом разделе обсуждаются результаты проведенных исследований разработанных спектральных методов разделения волн на основе алгоритмов ВФ. Исследования проводились на различных моделях синтезированных волновых полей. Приводятся данные применения предложенных спектральных методов для обработки материалов метода вертикального сейсмического профилирования (ВСП), полученных в 8 скважинах на месторождениях углеводородов Томской и Тюменской областей.

Исследования на моделях проводились для известных алгоритмов ВФ (КИХ алгоритм и стандартный спектральный алгоритм) и предложенных алгоритмов разделения волн. При этом проводился сравнительный анализ влияния параметров фильтра на его отклик. Показано, что предложенные цифровые алгоритмы обладают свойством непрерывности изменения отклика при варьировании параметров γ_{Φ} , $\Delta\gamma_{\Phi}$ и вносят наименьшие искажения в спектр сигнала, наблюдаемого на выходе фильтров. В качестве примера на рис. 9 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) НМВ фильтра (рис. 9.а) и 24-х канального КИХ фильтра (рис. 9.б), полученные при равных условиях. Область пропускания идеального ВФ на рисунках отмечена черными линиями. Из рисунка видно, что НМВ фильтр обеспечивает наилучшее приближение АЧХ цифрового фильтра к АЧХ идеального всеерного фильтра. В работе показывается, что отмеченные выше свойства для предложенных фильтров сохраняются для небольших размеров обрабатываемых полей и малых значений полосы пропускания всеерного фильтра.

В работе, так же проводятся исследования эффективности спектральных алгоритмов при выделении сигналов, наблюдаемых на фоне нерегулярных помех. Показано, что спектральный алгоритм, реализованный на основе НМВ фильтра, обеспечивает наименьшую погрешность восстановления формы

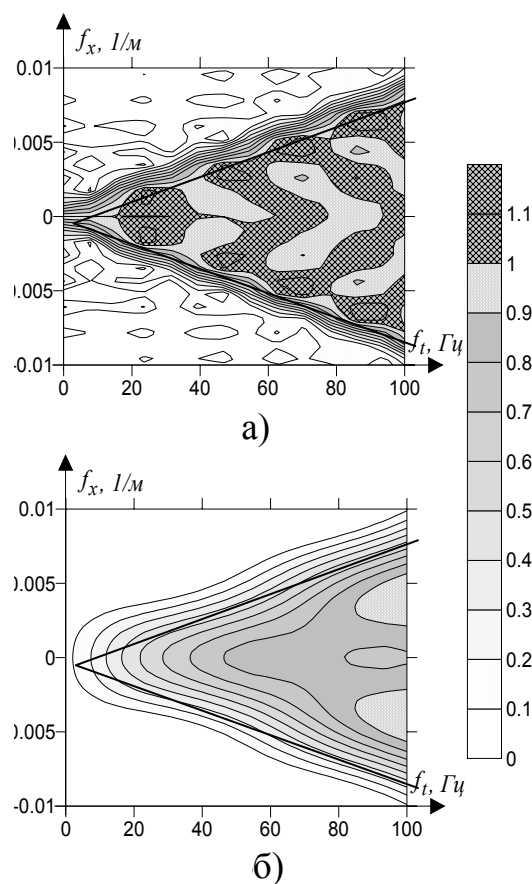


Рис. 9. АЧХ НМВ фильтра (а) и АЧХ КИХ фильтра (б)

сигнала и наибольшее отношение сигнала к шуму по сравнению с алгоритмом КИХ фильтрации. Так, при применении НМВ фильтра ошибка восстановления сигнала оказывается в среднем в 2 раза ниже, а отношение сигнала к шуму на выходе фильтра примерно в 1.5 раз выше.

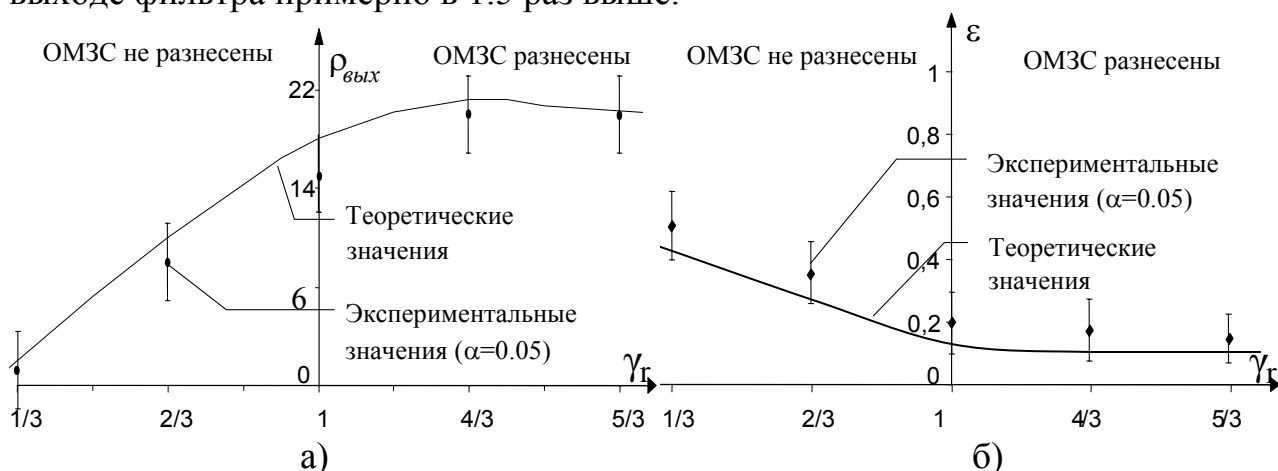


Рис. 10. Отношение сигнала к помехе (а) и нормированное усредненное значение ошибки восстановления спектра сигнала (б) в зависимости от величины разнесения γ_r ($\rho_{\text{вх}} = 0.5$)

Для проведения исследований разрешающей способности предложенных алгоритмов были синтезированы волновые поля, представляющие собой аддитивную смесь случайного количества полезных и мешающих волн со случайными параметрами. Исследования проводились в условиях интенсивной интерференции волн. В качестве примера, на рис. 10 приведены полученные результаты исследования отношения сигнала к помехе и погрешность восстановления спектра сигнала на выходе НМВ фильтра в зависимости от величины разнесения пачек волн γ_r . На рисунках также приведены аналитические графики, рассчитанные по результатам аналитических исследований разрешающей способности ВФ. Как видно из рисунков экспериментальные и аналитические результаты хорошо согласуются между собой. Анализ результатов показал, что при значительном перекрытии спектров разделяемых пачек волн ($\gamma_r < 1$) предложенные спектральные алгоритмы обеспечивают существенное подавление помех. Так, при $\gamma_r \approx 0.8$ и $\rho_{\text{вх}} = 0.5$ отношение сигнала к шуму равно 14. В этих условиях нормированная усредненная ошибка восстановления спектра сигнала на выходе фильтра не превышает 18%. При разнесении пачек волн $\gamma_r > 1$ она не превышает 12%.

Реализованные алгоритмы нашли практическое применение при проведении производственной обработки сложных волновых сейсмических полей, полученных при скважинных исследованиях на ряде площадей Томской и Тюменской областей. Исходными материалами для обработки послужили данные ВСП. Созданные алгоритмы применялись при детальной обработке сейсмических материалов с целью уточнения скоростного разреза, стратиграфической привязки горизонтов и исследования и прогноза свойств околоскважинного пространства.

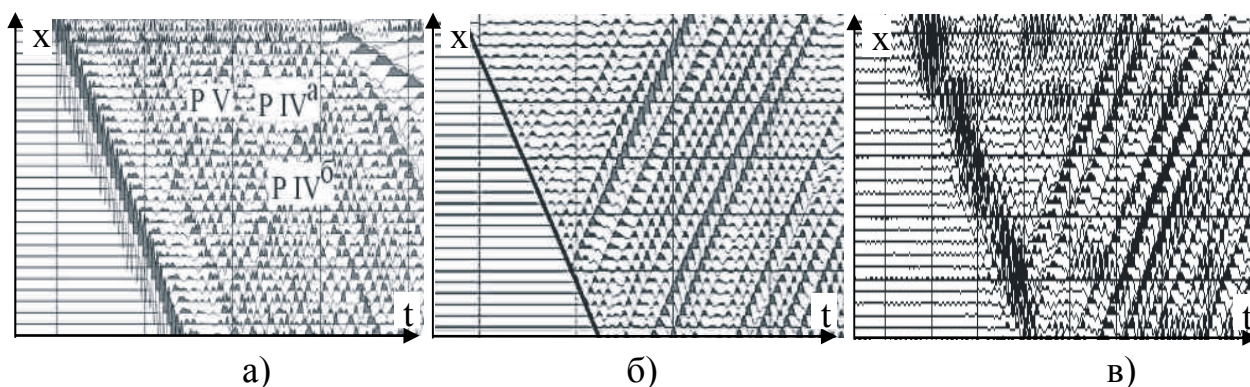


Рис. 11

а – сейсмограмма ВСП после введения статических поправок, АРУ и полосовой фильтрации; б – поле восходящих волн, полученное с помощью МВ фильтрации; в – поле восходящих волн, полученное с помощью КИХ фильтра

Анализ результатов обработки показал, что применение разработанных алгоритмов позволило значительно улучшить разрешение волн (в 2 – 5 раз), более качественно провести разделение полей ВСП на отраженные и падающие волны (рис. 11). Тем самым повысить детальность при стратиграфической привязке отражающих горизонтов, надежность построения временных и глубинных разрезов околоскважинного пространства и увеличить на 50-100 м протяженность его отображения, более уверенно выделять области тектонических нарушений.

Основные результаты работы

Теоретические и экспериментальные исследования, приведенные в данной работе, позволяют сделать следующее заключение.

1. При решении задач разрешения (разделения) волновых полей большой научный и практический интерес представляют спектральные методы, основанные на процедурах веерной фильтрации. Но к настоящему времени эти методы развиты еще недостаточно: неполно рассмотрены теоретические основы веерной фильтрации, не проведены оценки их помехоустойчивости и разрешающей способности, не освещены в полном объеме вопросы влияния различных факторов на эффективность спектральных методов реализуемых процедур обработки. Не рассмотрены важные вопросы по разработке спектральных методов разделения волновых полей на основе фильтров с переменными параметрами и адаптивных веерных фильтров. Не освещены проблемы и особенности цифровой реализации веерных фильтров в спектральной области, вопросы разработки программного и алгоритмического обеспечения спектральных методов разделения волновых полей. Указанные обстоятельства определили направления дальнейших исследований, проводимых в работе.

2. Проведен анализ влияния различных факторов на частотные характеристики отклика веерного фильтра при выделении пачек волн с линейным и параболическим годографом. Определены ошибки восстановления спектра сигнала. Разработана методика выбора параметров фильтра, при которых достигается наименьшее искажение в спектре сигналов, наблюдаемых на выходе фильтра.

3. Дана оценка отношения сигнала к шуму при выделении веерным

фильтром пачек волн с линейным уравнением годографа и одиночной волны с параболическим уравнением годографа, наблюдаемых на фоне гауссовского нерегулярного шума. Найдены для данной ситуации ошибки восстановления спектра выделяемых сигналов и проведены исследования влияния параметров фильтра на ее величину. Рассмотрены вопросы разрешающей способности и выбора параметров фильтра, обеспечивающих, исходя из выбранных критериев, наибольшее разрешение выделяемых волн.

4. Предложены методы разделения волновых полей на базе веерной фильтрации, повышающие разрешение сигналов, при анализе сложных волновых полей. Разработаны адаптивные процедуры веерной фильтрации, способные устойчиво функционировать в условиях априорной неопределенности относительно свойств разрешаемых волн. На базе предложенных адаптивных процедур была предложена система обработки данных, позволяющая в различных условиях ее применения гибко изменять структуру и параметры используемых фильтров.

5. Разработан новый подход к цифровой реализации веерных фильтров в частотной области, позволяющий значительно уменьшить влияние дискретизации на их разрешающую способность и погрешность восстановления сигналов на выходе фильтров. Данный способ сокращает затраты времени и уменьшает требуемые ресурсы на ЭВМ при обработке полей малого размера.

6. На основе разработанных методов веерной фильтрации созданы оригинальные цифровые алгоритмы для разделения сложных волновых полей, базирующиеся на адаптивной веерной фильтрации и фильтрации с переменными параметрами.

7. Разработаны программные модули, реализующие предложенные алгоритмы. Они внедрены в программно-алгоритмический комплекс "Геосейф-ВСП", предназначенный для обработки материалов вертикального сейсмического профилирования (ВСП).

8. Проведено экспериментальное исследование разработанных алгоритмов на статистических моделях сейсмических волновых полей, показавшее хорошее согласование с аналитическими расчетами. Реализованные алгоритмы были использованы при обработке материалов ВСП, полученных на ряде скважин, месторождений углеводородов Томской и Тюменской областей. В целом, результаты исследования и применения подтверждают высокую эффективность и практическую значимость разработанных алгоритмов разделения сейсмических волн, реализованных на основе спектральных методов веерной фильтрации, и перспективность их применения при решении задач обработки и интерпретации сложных волновых полей.

Публикации

1. Степанов Д.Ю., Яппарова Е.А. Новый подход к реализации направленных фильтров при анализе сложных волновых полей // Технологии сейсморазведки, 2005. №1, С.32-37
2. Yapparova E.A., Stepanov D.Yu. Application of the modified algorithms of fan filtering // The ninth International Scientific and Practical Conference of Students,

Post-graduates and Young Scientist "Modern Techniques and Technologies" (MTT' 2003), Tomsk Polytechnic University, P.218-220

Яппарова Е.А., Степанов Д.Ю. Результаты применения модифицированных алгоритмов веерной фильтрации //Материалы Девятой международной конференции «Современная техника и технология» (СТТ 2003). Томск: Изд-во ТПУ, 2003. С.218-220

3. Yapparova E.A, Stepanov D.Yu. Digital algorithms of wave field fan filtration // The eight International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientist "Modern Techniques and Technologies" (MTT'2002), Tomsk Polytechnic University, P.178-180

Яппарова Е.А., Степанов Д.Ю. Цифровые алгоритмы веерной фильтрации волновых полей //Материалы Восьмой международной конференции «Современная техника и технология» (СТТ 2002). Томск: Изд-во ТПУ, 2002. С.178-180

4. Яппарова Е.А. Условие наложения пространственных частот на сейсмической записи //Современное развитие и применение математических методов: Сб. студентов и аспирантов. Томск: ООО «Издательство РАСКО», 2002. С.63-69

5. Яппарова Е.А. Исследование алгоритмов веерной фильтрации сейсмических волновых полей //Современное развитие и применение математических методов: Сб. студентов и аспирантов. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СОРАН, 2001. С.79-86

6. Яппарова Е.А. Анализ обработки данных ВСП с помощью пространственно-временных фильтров //Материалы конференции «Наука. Техника. Инновации», часть 1. Новосибирск: Изд-во НГТУ 2002. С.102-103

7. Яппарова Е.А. Некоторые аспекты веерной фильтрации при обработке данных ВСП //Материалы конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2003», Москва. Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2003. С.178-180

8. Иванченков В.П., Степанов Д.Ю., Яппарова Е.А. Проблемы восстановления динамических характеристик при разделении волновых полей //Материалы конференции «Седьмой международный научный симпозиум имени академика М.А. Усова». Томск: Изд-во ТПУ, 2003. С.103-105

9. Иванченков В.П., Степанов Д.Ю., Яппарова Е.А. Оценка эффективности интерференционных систем при разрешении сейсмических волн //Материалы конференции «Перспективы развития фундаментальных наук». Томск: Изд-во ТПУ. 2005. С.116-119