Национальная Академия наук Украины
Институт геофизики им. С.И.Субботина

На правах рукописи

Тяпкин Юрий Константинович

УСЛОЖНЕННЫЕ МОДЕЛИ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ЭВМ

Специальность 04.00.22 "Геофизика"

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Киев-1994

…ртация является рукописью

Работа выполнена в Киевском геофизическом отделении Украинского государственного геологоразведочного института (КГО УкрГГРИ) Госкомгеологии Украины.

Официальные оппоненты :

1. Доктор технических наук И.К.Кондратьев
2. Доктор геолого-минералогических наук С.А.Лизун
3. Доктор физико-математических наук, профессор С.В.Мостовой

Ведущая организация : Кафедра геофизических методов разведки Киевского госуниверситета им.Т.Г.Шевченко

Защита состоится 30 сентября 1994 г. в 11 часов на заседании специализированного ученого совета Д016.02.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в Институте геофизики им.С.И.Субботина НАН Украины по адресу : 252680, г.Киев-142, проспект Палладина, 32

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "__"__________1994 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета
доктор физико-математических наук В.С.Гейко

В В Е Д Е Н И Е

Актуальность темы. Переход сейсморазведки на решение более сложных задач прогнозирования лито-фациальной обстановки осадконакопления и нетрадиционных ловушек углеводородов пред"являет повышенные требования к результатам обработки сейсмических материалов на ЭВМ. Качество последних определяется двумя взаимосвязанными характеристиками - степенью разрешенности и отношением сигнал/помеха. Обычно улучшение одной из них в процессе обработки сопровождается ухудшением другой. Тем не менее, последовательное оптимизированное применение различных процедур борьбы с помехами и увеличения разрешенности может привести к одновременному существенному увеличению обоих показателей качества записи на окончательных этапах ее преобразования.

При реализации графа обработки сейсмических данных необходимо к началу каждого этапа располагать достаточным об"емом априорной информации о модели среды и порожденного ею сейсмического волнового поля. Только детальное и надежное решение этого вопроса, определяемое достигнутой на данном этапе степенью разрешенности и помехозащищенности записи, позволит оптимизировать последующие операции обработки, обоснованно привлечь принципиально новые процедуры, а также осуществить эффективную коррекцию ранее выполненных.

При разработке алгоритмов и положенных в их основу критериев оптимальности необходимо придерживаться комплексного подхода, учитывающего существо решаемой задачи, характер имеющихся данных о помехах и априорную информацию об искомом решении, а также возможность получения эффективного решения рассматриваемой задачи оптимизации. Поэтому алгоритмы должны удовлетворять тесно взаимосвязанным требованиям оптимальности, адаптивности, максимально возможного усложнения положенной в их основу модели записи, эффективности с вычислительной точки зрения.

Оптимальность предполагает получение "наилучшего" решения в рамках физически, математически и геологически хорошо обоснованного (возможно, нетрадиционного) критерия.

Адаптивность проявляется в легкой настраиваемости алгоритма на конкретную запись, в возможности легко и максимально учитывать априорную информацию о получаемом решении.

Максимальная адекватность модели реальной записи предназначена минимизировать ошибки спецификации, вызванные отклонением реальных условий решения задачи от первоначальных теоретических построений.

Целью настоящей диссертационной работы являлась разработка теоретико-методических основ повышения разрешенности и борьбы с помехами при обработке сейсмической информации на ЭВМ, использующих комплекс взаимосвязанных принципов оптимальности, адаптивности, максимальной адекватности модели записи реальной ситуации и максимальной вычислительной эффективности.

В соответствии с поставленной целью решались следующие основные задачи:

I. Разработка теории фильтрации многоканальных сейсмических записей, оптимизирующей взвешенные нормированные квадратичные функционалы сигнала как меру разрешенности.

2. Теоретический анализ причин часто наблюдаемой в реальных ситуациях низкой эффективности оценок сигнальной составляющей многоканальной сейсмической записи, основанных на ее упрощенных моделях.

3. Разработка теоретико-алгоритмических основ и обоснование преимуществ оптимизированной оценки сигнальной составляющей многоканальной сейсмической записи на основе усложненных моделей, допускающих произвольное варьирование уровней и временных подвижек идентичных по форме сигналов и произвольные по корреляционным /спектральным/ свойствам нерегулярные помехи на различных каналах.

4. Обоснование возможности решения обратной задачи деконволюции /корректирующей фильтрации/ в ограниченном диапазоне частот и оценка его оптимальных параметров, разработка теории корректирующей фильтрации, оптимизирующей семейство обобщенных радиусов инерции в качестве меры разрешенности записи.

5. Разработка теории оптимальной винеровской фильтрации разночастотных записей как средства преодоления основного препятствия на пути эффективного повышения разрешенности сейсмического волнового поля - его узкополосности в спектральной области.

6. Разработка теоретико-алгоритмических основ оценки амплитудных и фазовых характеристик элементарного сейсмического сигнала в полиспектральной области.

7. Анализ и теоретико-методическое обоснование использования

мгновенных динамических характеристик сейсмических записей для решения различных геологических задач.

8. Оценка эффективности программно-методических средств, реализующих комплекс предложенных теоретических разработок, на модельных и реальных материалах в различных сейсмогеологических условиях.

В процессе решения перечисленных задач получены результаты, обладающие научной новизной:

I. Разработана теория фильтрации многоканальных сейсмических записей, свободной от некоторых недостатков винеровского аналога и основанной на оптимизации взвешенных нормированных квадратичных функционалов сигнала как меры разрешенности записи.

2. Теоретически доказано, что низкая эффективность алгоритмов оценки сигнальной составляющей многоканальной сейсмической записи, основанных на упрощенных моделях, связана с неизбежными в этом случае ошибками спецификации.

3. Разработана теория оптимизированной оценки сигнальной составляющей многоканальной сейсмической записи на основе ее усложненной модели. Последняя допускает произвольное варьирование уровней и временных подвижек идентичных по форме сигналов и произвольные корреляционные свойства нерегулярных помех на разных каналах. Для реализации этого подхода предложен ряд регуляризованных итерационных и прямых алгоритмов оценки необходимых параметров сигналов и помех по корреляционной матрице или непосредственно по самой записи. Как частный случай общего решения предложена оптимизация весового суммирования и сингулярного разложения.

4. Теоретически показано преимущество решения обратной задачи деконволюции /корректирующей фильтрации/ в ограниченном частотном интервале, где сигнал преобладает над помехой, что связано с резко нарастающими и не поддающимися учету ошибками оценки параметров сигнала вне этого интервала. Предложен алгоритм выбора границ интервала преобразования записи. Разработана теория полосовой корректирующей фильтрации, оптимизирующей в качестве меры разрешенности записи семейство обобщенных радиусов инерции сигнала или его огибающей.

5. Разработана теория и доказаны преимущества над упрощенными преобразованиями оптимальной многоканальной винеровской

2-4-2605

фильтрации разночастотных записей как средства преодоления основного препятствия на пути эффективного повышения разрешенности сейсмического волнового поля - его узкополосности в спектральной области.

6. Предложены удобные для реализации и ввода априорной информации итерационные алгоритмы оценки амплитудных и фазовых характеристик элементарного сейсмического сигнала, использующие связь этих характеристик с полиспектрами записи.

7. Разработано два принципиально отличающихся по конечной цели подхода к преобразованию мгновенной частоты сейсмической записи.

Первый представляет собой непрерывную оценку интегральных спектральных параметров записи и сводится к взвешенному сглаживанию мгновенных частот с учетом огибающей трассы. Для упрощения решения этой же задачи предложены алгоритмы, позволяющие оценить интегральные спектральные параметры непосредственно по самой записи с помощью операций типа свертки.

Второй подход основан на впервые установленном факте преимущественной связи мгновенных частот сейсмической трассы /при отсутствии помех/ с характером тонкой слоистости геологического разреза и направлен на подчеркивание этой связи.

8. Разработано теоретическое обоснование и намечены новые пути использования мгновенной когерентности сейсмической записи.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается математической строгостью постановок и решений задач, достаточно большим об"емом опробований на модельных и реальных материалах, положительным опытом внедрения научных положений работы при решении производственных проблем.

Практическая ценность и реализация работы. Выполненные исследования помимо теоретической значимости имеют в основном своем содержании практическую направленность. Детальность и полнота описания определяют возможность непосредственной программной реализации всех рассмотренных приемов повышения разрешенности и помехозащищенности сейсмической записи. Теоретическое обоснование и демонстрируемая в диссертационной работе эффективность алгоритмов на модельных и реальных материалах позволяют рекомендовать их как в виде самостоятельных процедур на различных этапах обработки, так и в качестве элементов, обеспечивающих благоприятные условия для более успешного решения ряда обратных сейсмических задач.

Изложенные в диссертационной работе теоретико-методические принципы реализованы в виде программно-алгоритмического комплекса оптимизированного повышения разрешенности и помехозащищенности сейсмических записей на различных этапах их обработки на ЭВМ. Программы вписаны в систему СЦС-ЗМП, переданы для внедрения в ряд геофизических организаций Украины /Крымгеология, Укргеофизика/, стран СНГ /Главтюменгеология, Дальморнефтегеофизика, Казрудгеология, Краснодарнефтегеофизика, Печорагеофизика, Саратовнефтегеофизика, Севморнефтегеофизика, Сибнефтегеофизика, Тюменнефтегеофизика, Узбекгеофизика, Центргеофизика/ и опробованы в различных сейсмогеологических условиях.

Апробация работы. Основные теоретико-методические и практические результаты выполненных исследований докладывались на международных /Мурманск, I99I; Восс, Норвегия, I992/, всесоюзных /Киев, I982-I992; Чимкент, I988/ и республиканских /Баку, I979; Киев, I985; Красноярск, I990, I99I; Ленинакан, I980, I983; Пермь, I990; Тбилиси, I985; Тверь, I99I; Тюмень, I99I/ совещаниях и семинарах.

Публикации. По теме исследований опубликовано 46 работ, в том числе I депонированная монография, 3 брошюры ВИЭМС и Геоинформмарк, статьи и тезисы докладов.

Структура и об"ем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Об"ем работы 323 страницы, в том числе 47 рисунков, 8 таблиц. Библиографический список включает 232 наименования.

Исходные материалы и личный вклад автора. Диссертация отражает результаты исследований, проведенных автором в КОМЭ ГГП "Укргеофизика" и КГО УкрГГРИ по госбюджетным и прямым договорам с геофизическими организациями Украины и России.

Большинство теоретических и методических исследований выполнено лично автором. Программная реализация алгоритмов осуществлена Гонтовым С.В., Калединым А.Г., Найко Г.Г., Хименко Б.Е., Шатыло Е.И., Шейнисом А.Д., Эчкенко-Савко Н.П. Без их участия создание законченного технологичного программного продукта было бы невозможным.

Автор глубоко признателен Будкевичу В.Б., Будкевич О.М., Булатниковой Л.В., Ващенко Г.И., Гольдину С.В., Гриню Н.Е., Грищенко В.И., Дядюре В.А., Карпенко И.В., Кияшко Л.Е., Коровниченко Е.Е.,

Кравчуку А.А., Лоссовскому Е.К., Пилипенко В.Н., Познанскому С.М., Полунину А.И., Приходченко Н.И., Резникову М.Г., Роману В.И., Сергию Ю.Б., Славинской А.В., Старостенко В.И., Старостенко Е.В., Цацко Е.Л., Шатило А.П., научно-производственные контакты с которыми, их помощь, советы и конструктивная критика способствовали успешному решению поставленных автором задач.

I. ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШЕННОСТИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ НОРМИРОВАННЫХ КВАДРАТИЧНЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ СИГНАЛА

Решение сложных задач, стоящих перед современной сейсморазведкой, требует выделения и корреляции на фоне помех относительно слабо динамически выраженных отражений при одновременном повышении разрешенности записи. Это достигается применением операторов, позволяющих регулировать компромисс между альтернативными характеристиками записи - ее разрешенностью и помехозащищенностью. Обычно такие фильтры основаны на винеровском критерии оптимальности, удобном для реализации (рекурсия Левинсона-Дербина), но не всегда приводящем к эффективным результатам, удовлетворяющим требованиям практики.

Это обстоятельство вызвано прежде всего несовпадением винеровского критерия и критерия качества изображения, определяемого физиологией зрительного восприятия человека. Поэтому винеровские фильтры приводят к чересчур сглаженным изображениям. Кроме того, недостатком использования нормы L_2 для оценки и оптимизации качества решения задачи деконволюции является ее комплексная зависимость как от степени разрешенности , так и отношения сигнал/помеха записи. Поэтому винеровский критерий, в равной степени уделяющий внимание повышению разрешенности и отношения сигнал/помеха, не позволяет прямо организовать оптимальный компромисс между этими характеристиками сейсмической записи. Кроме того, следует отметить слабую чувствительность (частичную инвариантность) винеровского критерия к перераспределению энергии преобразованного сигнала относительно положения желаемого δ - импульса (слабую компактность).

В связи с перечисленными фактами развитие методов фильтрации сейсмических записей идет по двум направлениям : совершенствование винеровского и развитие новых критериев оптимальности. Второе направление предполагает построение гибких, управляемых характеристик восстанавливающих фильтров, использование которых могло бы обеспечить оптимальный компромисс между относительным уровнем шума и разрешенностью записи. Одним из представителей этого направления является рассматриваемая в настоящем разделе фильтрация на основе оптимизации взвешенных нормированных квадратичных функционалов сигнала. Такой подход к решению задачи весьма удобен, поскольку используемая им мера разрешенности чувствительна к перераспределению энергии сигнала вдоль временной оси, а также позволяет в процессе оптимизации разделить меры разрешенности и помехозащищенности.

Одной из наиболее распространенных универсальных устойчивых мер разрешенности (длины элементарного сигнала (ЭС) $s(t)$) является взвешенный нормированный квадратичный функционал (Берхаут А. Дж., 1973)

$$L_s^{(w)} = \int_{-\infty}^{\infty} w(t)|s(t)|^2 dt \Big/ \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt, \qquad (1.1)$$

где $w(t)$ - обычно симметричная функция, предназначенная придавать монотонно возрастающий вес значениям сигнала по мере их отклонения во времени от $t=0$. Анализ различных форм весовых функций $w(t)$ позволил отдать предпочтение семейству [8, 14, 16, 17]

$$w(t) = |t|^n, \qquad (1.2)$$

где n - числа натурального ряда. В этом случае под мерой длины (1.1) понимается семейство обобщенных радиусов инерции ЭС, возведенных в соответствующую степень n.

Пусть многоканальная сейсмическая запись

$$X = C + N \quad \text{или} \quad x_{jk} = c_{jk} + n_{jk} \qquad (1.3)$$

включает стационарные центрированные случайные составляющие - сигнальную часть c_{jk} и аддитивную помеху n_{jk}, $j=\overline{1,L}$ - номер отсчета, $k=\overline{1,M}$ - номер трассы. Предположим, что в результате препроцессинга сигнальная часть записи приобрела вид свертки ЭС s_k и независимой от номера канала δ-коррелируемой импульсной сейсмограммы (ИС) f:

3-4-2605

$$c_{jk}=\sum_{i=-T}^{T} f_{j-i}\, s_{ik}, \tag{I.4}$$

где ЭС имеет структуру

$$s_{jk}=s_j a_k, \tag{I.5}$$

отражающую постоянство его формы s_j при произвольно зависящей от номера канала амплитуде a_k.

Поставим задачу найти оператор линейного стационарного многоканального фильтра h_{jk}, финитный в интервале $j=\overline{-N,N}$, суммарный результат воздействия которого на запись (I.3) позволяет наилучшим образом оценить ИС f. Под критерием оптимальности будем понимать минимум дискретного аналога меры длины (I.I) $L_\psi^{(w)}$ профильтрованного ЭС (ядра разрешения) $\psi(t)$ при дополнительном ограничении отношения энергий помеха/сигнал E_n/E_c на выходе фильтра :

$$\min_{h_{jk}} L_\psi^{(w)} \quad при \quad E_n/E_c \leq r. \tag{I.6}$$

Предположив пространственные и временные корреляционные свойства помех независимыми, нетрудно получить искомое решение в виде кронекеровского произведения векторов [7]

$$d \otimes b. \tag{I.7}$$

Здесь d - собственный вектор матрицы $\Psi_c^{-1}\Psi_n$, соответствующий ее минимальному собственному значению λ_{min}, $\Psi_c=aa^T$ и Ψ_n - пространственные корреляционные матрицы сигнальной составляющей записи и помехи, $a=\{a_1,\ldots,a_M\}^T$. В свою очередь b - собственный вектор матрицы

$$R_s^{-1}\left[R_s^{(w)}+\mu' R_n\right], \tag{I.8}$$

соответствующий ее минимальному собственному значению ω_{min}. Здесь R_s и R_n - временные корреляционные матрицы ЭС и помех, $R_s^{(w)}$-взвешенная корреляционная матрица ЭС

$$R_{s_{ij}}^{(w)}=\sum_{l=-N-T}^{N+T} W_l\, s_{l-i}\, s_{l-j}, \tag{I.9}$$

$\mu' = \mu\lambda_{min}/(\gamma\sigma^2)$, μ - неизвестный множитель Лагранжа, γ и σ^2 - плотность потока и дисперсия отсчетов искомой ИС f.

Оптимальный многоканальный фильтр (I.7) представляет собой сочетание двух процедур. Первая - суммирование записей с весами, равными отсчетам вектора d. Это оптимальное взвешенное суммирование [2I], являющееся частным случаем более общей процедуры выделения сигнала из многоканальной сейсмической записи, которой посвящен следующий раздел. В настоящем разделе основное внимание уделяется второй процедуре - оптимальной одноканальной фильтрации с оператором, весовую функцию котрого представляет собственный вектор матрицы (I.8). В частности, исследована роль неизвестного множителя μ' в выражении (I.8). Показано, что он имеет положительный знак и регулирует соотношение между разрешенностью и зашумленностью записи [I4, I7]. Об"яснена причина появления сомножителя λ_{min} в выражении μ', связанная с влиянием оптимального взвешенного суммирования на результативное отношение сигнал/помеха. Предложена геометрическая интерпретация полученного решения, которая весьма наглядно демонстрирует многие из его особенностей. Показано, что альтернативная постановка задачи с требованием минимизации относительного уровня помех при заданном ограничении на разрешенность приводит к тому же решению (I.7). Отличие заключается только в форме расчета неизвестного множителя Лагранжа, получаемого из другого условия-ограничения.

Предельные случаи полученного решения тривиальны. Первый возникает при снятии ограничения в постановке задачи (I.6). Оператор (I.8) в этой ситуации легко представить в виде $S^{-1}WS$, где S - свертка с формой ЭС $s(t)$, W - умножение на весовую функцию $w(t)$. Если собственная пара оператора W равна $\{e, \omega_{min}\}$, то аналогичная собственная пара оператора $S^{-1}WS$, возникающего в результате преобразования подобия, равна $\{b = S^{-1}e, \omega_{min}\}$. Нетрудно показать, что для весовых функций, подобно (I.2) обладающих минимумом при $t=0$, e представляет собой δ-импульс. Поэтому без регуляризующего условия - ограничения новый критерий оптимальности приводит к некорректной идеальной обратной фильтрации (Козлов Е.А., Кондратьев И.К., 1967). Способами борьбы с этим недостатком является учет условия - ограничения (I.6) или рассматриваемое в разделе 3 решение задачи в ограниченном диапазоне частот.

Второй предельный случай возникает при отсутствии ограничения на разрешенность записи в постановке задачи, альтернативной (I.6). В этой ситуации решение представляет энергетический фильтр, не нашедший применения в сейсморазведке из-за низкой разрешающей способности, но широко применяемый при обработке потенциальных полей (Никитин А.А., 1986).

Представленный материал служит основой для последующей разработки способов борьбы с помехами в разделе 2 и повышения разрешенности записи с помощью оптимальной корректирующей фильтрации в разделе 3.

2. ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ ОЦЕНКИ СИГНАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСЛОЖНЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

Существует немало седиментационных бассейнов или отдельных литостратиграфических комплексов в их пределах, для которых основным типом помех являются нерегулярные волны. Исключить из рассмотрения регулярную часть шума позволяют также эффективные процедуры вычитания этого вида помех на этапе препроцессинга (Дядюра В.А.,1975; Козлов Е.А., 1974; Нахамкин С.А., 1966).

Поэтому настоящий раздел, являющийся логическим продолжением предыдущего, посвящен разработке оптимизированных алгоритмов оценки сигнальной составляющей многоканальной сейсмической записи на фоне нерегулярных помех. Отличительной особенностью предлагаемых алгоритмов является то, что они основаны на усложненной модели записи, допускающей произвольное варьирование уровней сигнала и статистических свойств помех. Этот нетрадиционный подход позволяет создать эффективные схемы выделения сигнала, минимизируя ошибки спецификации.

Предположим, что многоканальная дискретная сейсмическая запись (I.3) имеет сигнальную составляющую

$$C = sa^T \quad \text{или} \quad c_{jk} = s_j a_k, \qquad (2.1)$$

отражающую постоянство ее формы s_j при произвольно зависящей от номера канала амплитуде a_k, $a = \{a_1, \ldots, a_m\}^T$, $s = \{s_1, \ldots, s_L\}^T$. Помехи стационарные, нормальные, независимые от сигнала, центрированные и обладающие пространственно-временной корреляционной матрицей $\Phi_{ij,km} = \langle n_{ik} n_{jm} \rangle$. В дальнейшем операцию осреднения по ансамблю $\langle \cdot \rangle$ будем для краткости опускать, а также использовать обозначение $x_k = \{x_{1k}, \ldots, x_{Lk}\}^T$.

Оценка неизвестного вектора s по критерию максимального правдоподобия (МП) с учетом гауссова распределения помех предполагает минимизацию квадратичной формы

$$\sum_{i,j=1}^{L} \sum_{k,m=1}^{M} \Phi_{ij,km}^{-1} (x_{ik} - a_k s_i)(x_{jm} - a_m s_j). \tag{2.2}$$

В случае

$$\Phi_{ij,km} = \Psi_{kij} \delta_{km}, \tag{2.3}$$

отражающем зависимость временных корреляционных свойств от номера канала при отсутствии корреляции между каналами, решение имеет вид [33, 36]

$$As = b, \tag{2.4}$$

$$A = \sum_{k=1}^{M} a_k^2 \Psi_k^{-1}, \qquad b = \sum_{k=1}^{M} a_k \Psi_k^{-1} x_k. \tag{2.5}$$

Таким образом, для оценки вектора s необходима информация об уровнях сигнала и корреляционных свойствах помех.

Учитывая некоррелируемость помех между каналами и приравняв энергию сигнала $s^T s$ единице, нетрудно показать, что корреляционная матрица записи $R(x) = X^T X$ имеет элементы

$$R(x)_{km} = a_k a_m + \sigma_k^2 \delta_{km}, \tag{2.6}$$

где σ_k^2 - дисперсия помех на k канале.

Обоснованное предположение о лапласовом законе распределения $f_L(\Delta)$ помех Δ ,осложняющих внедиагональные элементы матрицы (2.6) и связанных с рядом неучтенных в модели записи факторов, в первую очередь - остаточными регулярными помехами, а также предположение о гауссовом законе распределения $f_G(a)$ отсчетов искомого вектора a позволили сформулировать проблему его оценки как задачу математической статистики и использовать для этих целей критерий максимума апостериорной вероятности (MAB) [35]:

4-4-2605

$$\max_{a}\left[f_L(R_{(x)}|a)f_G(a)\right]. \qquad (2.7)$$

Это эквивалентно минимизации функционала

$$\sum_{\substack{k,m\\k\neq m}} W_k W_m \left|R_{(x)km} - a_k a_m\right| + \lambda \sum_m (a_m - \bar{a})^2, \qquad (2.8)$$

где $W_{k(m)}$ – весовая функция, обратная ожидаемому среднеквадратическому уровню помех Δ на $k(m)$ канале; $\lambda = (2\sigma_a^2)^{-1}$, σ_a^2 – ожидаемая дисперсия вектора a; $\bar{a} = \sum_k a_k$. Отсюда возникает итерационная процедура

$$a_k^{(i+1)} = \frac{\sum\limits_{m\neq k} a_m^{(i)}\left[\dfrac{W_k W_m R_{(x)km}}{\left|R_{(x)km} - a_k^{(i)} a_m^{(i)}\right|} + \dfrac{2\lambda(M-1)}{M^2}\right]}{W_k \sum\limits_{m\neq k} \dfrac{W_m a_m^{(i)2}}{\left|R_{(x)km} - a_k^{(i)} a_m^{(i)}\right|} + 2\lambda\left(\dfrac{M-1}{M}\right)^2}. \qquad (2.9)$$

Отказ от статистического характера учета априорной информации об искомом решении $(\lambda = 0)$ приводит к МП-оценкам [28]. Необходимую в этом случае детерминированную априорную информацию вследствие итерационного характера алгоритма (2.9) удобно вводить путем использования универсального математически строгого аппарата проекций на замкнутые выпуклые множества, образованные условиями-ограничениями (Брегман Л.Н., 1965). В качестве таковых предложено использовать ограничение среднего квадратического уровня и требование положительности отсчетов вектора a, что повышает устойчивость получаемых оценок.

Выделен и детально рассмотрен класс оптимизированных в L_1 и L_2 прямых и итерационных оценок вектора a, основанных на положительности всех отсчетов матрицы $R_{(x)}$ [35]. Такая ситуация возникает при отсутствии в записи каналов с обратной полярностью и относительно слабом влиянии факторов, отклоняющих реальную запись от предполагаемой модели.

Для оценки корреляционных свойств помех предложено два способа. Первый из них [36] предполагает предварительный расчет матрицы функций взаимной корреляции (ФВК) между каналами записи X, которая с учетом выбранной нами модели имеет элементы

$$R_{(x)kml} = a_k a_m R_{(s)l} + R_{(n)kl}\delta_{km}, \qquad (2.10)$$

где l - величина задержки; $R_{(s)}$ и $R_{(n)k}$ - функции автокорреляции (ФАК) сигнала и помехи на k трассе. Деление каждого из внедиагональных элементов (2.10) на предварительную оценку $a_k a_m$ и осреднение по всем k и m при $k \neq m$ позволяет оценить $R_{(s)}$. Затем из этого же уравнения (2.10) нетрудно получить оценки

$$R_{(n)kl} = R_{(x)kkl} - a_k^2 R_{(s)l} \qquad (2.11)$$

и на их основе построить временные корреляционные матрицы Ψ_k для решения системы уравнений (2.4).

Второй, более сложный, способ предполагает предварительный расчет разностных трасс [33,36].

Процесс оценки вектора S существенно упрощается в случае, когда временные корреляционные матрицы (функции) помех на различных каналах тождественны по форме с точностью до постоянного множителя - дисперсии:

$$\Psi_k = \sigma_k^2 \Psi. \qquad (2.12)$$

Подстановка (2.12) в (2.4) приводит к

$$S = \sum_{k=1}^{M} \frac{a_k x_k}{\sigma_k^2} \Big/ \sum_{k=1}^{M} \frac{a_k^2}{\sigma_k^2}. \qquad (2.13)$$

Это известная формула оптимального взвешенного суммирования (ОВС) [21], которая позволяет избежать времяемкого решения системы уравнений (2.4) и предварительного обращения матриц Ψ_k. Необходимая для функционирования алгоритма (2.13) дисперсия помех может быть получена из (2.6):

$$\sigma_k^2 = R_{(x)kk} - a_k^2. \qquad (2.14)$$

Другой класс способов [37], на которые наложена дополнительная функция устранения взаимных временных подвижек между каналами, определяет необходимые параметры непосредственно по самой записи, основываясь на модели ее сигнальной части

$$C_{jk} = a_k s_{j-\tau(k)}. \qquad (2.15)$$

Последняя отражает наличие зависящих от номера канала временных сдвигов, формирующих вектор $\tau = \{\tau_1, \ldots, \tau_M\}^T$.

Учет априорной информации о статистических распределениях векторов $P(a)$, $P(s)$ и $P(\tau)$ позволяет использовать для их оценки критерий МАВ, имеющий в предположении о их независимости вид [37]

$$\max_{a,s,\tau}\{P(X|a,s,\tau)P(a)P(s)P(\tau)\}, \quad (2.16)$$

где $P(X|a,s,\tau)$ – условная плотность вероятности имеющейся многоканальной записи. Для реализации критерия (2.16) предполагаемая известной на этапе постановки задачи корреляционная матрица шума выбрана в виде $\Phi_{ij,km}=\sigma_k^2\delta_{ij}\delta_{km}$. Отсчеты вектора a –независимые в совокупности и нормальные с дисперсией σ_a^2. $P(s)$– лапласово с параметром $\beta=\sigma_s/\sqrt{2}$, где σ_s – среднее квадратическое отклонение s. Такая форма распределения оправдана при высокой разрешенности записи (см.раздел 4). При низкой разрешенности $P(s)$ стремится к гауссову закону (Левин Б.Р.,1978). $P(\tau)$ аппроксимировано равномерным в интервале $[-\tau_{max},\tau_{max}]$.

После конкретизации всех сомножителей выражения (2.16) его дифференцирование по a_k, s_j и $\tau(k)$ приводит к системе нелинейных уравнений [37]

$$a_k=\frac{\sigma_k^{-2}\sum_{j=1}^{L}x_{j+\tau(k),k}s_j+\frac{2}{\sigma_a^2}\left(\frac{M-1}{M^2}\right)\sum_{m\neq k}a_m}{\sigma_k^{-2}\sum_{j=1}^{L}s_j^2+\frac{2}{\sigma_a^2}\left(\frac{M-1}{M}\right)^2}, \quad (2.17)$$

$$s_j=\frac{\sum_{k=1}^{M}a_k\sigma_k^{-2}x_{j+\tau(k),k}}{\sum_{k=1}^{M}a_k^2\sigma_k^{-2}+2(\beta|s_j|)^{-1}},\ s_j\neq 0, \quad (2.18)$$

$$\max_{\tau(k)}\left|\sum_{j=1}^{L}x_{j+\tau(k),k}s_j\right|,\ \tau(k)\in[-\tau_{max},\tau_{max}]. \quad (2.19)$$

Проанализирован физический смысл выражений (2.17) - (2.19) и роль статистической регуляризации в них.

Необходимая для (2.17) и (2.18) информация о дисперсиях помех может быть получена после предварительной оценки a и s:

$$\sigma_k^2=\frac{1}{L}\sum_{j=1}^{L}n_{jk}^2=\frac{1}{L}\sum_{j=1}^{L}[x_{j+\tau(k),k}-a_k s_j]^2. \quad (2.20)$$

Система нелинейных уравнений (2.17) - (2.19) позволяет построить итерационную процедуру, на каждом шаге включающую

- расчет ФВК между x_k и s в ожидаемом диапазоне задержек $[-\tau_{max},\tau_{max}]$;

- оценку $\tau(k)$ по формуле (2.19) ;
- введение временных сдвигов в записи: $x_{jk} \to x_{j+\tau(k),k}$;
- оценку амплитуд сигналов по формуле (2.17) ;
- оценку формы сигнала по формуле (2.18) ;
- оценку дисперсий помех по формуле (2.20) .

Другой путь решения задачи предполагает использование априорной информации в детерминированной форме. В этом случае параметры векторов a, S, τ определяются по критерию МП, что соответствует σ_a, β и $\tau_{max} \to \infty$ в формулах (2.17) - (2.19) , а априорная информация вводится путем использования метода проекций на замкнутые выпуклые множества [37] .

Разработанная итерационная схема обобщает предложенные ранее способы, основанные на упрощенных вариантах модели, предполагающих $a_k = const$ (Гимлин Д.Р. и др.,1982) или $\sigma_k^2 = const$ (Урсин Б.,1979) , которые, как это показано ниже, неустойчивы к ошибкам спецификации.

Несмотря на то, что ввод значений σ_k^2 в вектор неизвестных параметров не позволяет, строго говоря, считать полученные оценки удовлетворяющими критерию МП, по аналогии с упрощенным вариантом (Гимлин Д.Р. и др.,1982) можно строго доказать, что предлагаемая итерационная схема имеет хотя бы одну фиксированную точку. Поэтому хороший выбор начального приближения и соответствующих ограничений позволяет получить эффективные оценки S.

Количественные оценки преимущества ОВС над обычным суммированием, полученные на статистических и детерминированных моделях [21], показывают, что оно тем ощутимее, чем больше разброс значений $a_k \sigma_k^{-2}$ на разных каналах. Получаемое в результате ОВС отношение сигнал/помеха $\sum_{k=1}^{M} a_k^2 \sigma_k^{-2}$ является монотонной функцией количества используемых каналов, что не свойственно в общем случае обычному суммированию. Несмотря на теоретическую бесспорность преимущества ОВС над обычной суммой, его реализация предполагает наличие надежных оценок оптимальных весовых множителей. Последнее возможно только при достаточно высоком в среднем отношении сигнал/помеха и значительном разбросе этого параметра на суммируемых трассах (Быков И.А.,1984; Уайт Р.Е.,1984) . В связи с этим обсуждаются методические вопросы, способствующие повышению эффективности ОВС (выбор интервала "настройки" процедуры, необходимость предварительного редактирования записей, деконволюции и коррекции статических поправок).

Использование сложной модели сейсмической записи (2.I) вызвано стремлением минимизировать влияние ошибок спецификации, связанных с отклонением реальной записи от исходных предположений. Такого рода ошибки характерны для алгоритмов, основанных на упрощенных вариантах модели (2.I) и предполагающих фиксированные значения a_k или σ_k^2 [2I].

В первом случае по мере снижения относительного уровня шумов на трассах непредвиденный разброс a_k приводит к тому, что результат суммирования все меньше коррелируется с сигналом (Быков И.А., I982).

Аналогично проявляется непредвиденный разброс σ_k^2 [2I,25,29]. В этом случае оптимальные весовые множители пропорциональны отсчетам соответствующего максимальному собственному значению собственного вектора d матрицы $R(x)=X^TX$, имеющей структуру (2.6) .Отсюда по мере возрастания среднего значения и степени разброса σ_k^2 собственный вектор d все больше отличается от a, пропорционального оптимальному решению $a\|a\|^{-2}$, которое следует из (2.I3) при $\sigma_k = const$. Если относительный уровень сигнала стремится к нулю $(a_k a_m \to 0)$, то $R(x)_{km} \to \sigma_k^2 \delta_{km}$. Собственный вектор d такой диагональной матрицы заполнен нулями кроме единицы, помещенной в отсчет k, соответствующий максимальному значению σ_k^2. Поэтому алгоритмы, предполагающие $\sigma_k = const$, при появлении пусть только одной трассы с повышенной дисперсией помех вместо подавления этой трассы выделяют ее.

Результат воздействия непредвиденного разброса σ_k^2 на эффективность данного класса алгоритмов ОВС количественно демонстрируют неравенства, выражающие связь собственных значений матрицы (2.6) и составляющих ее членов, имеющих эрмитову структуру [2I,25]

$$a^Ta + \sigma_{max}^2 \geq \lambda_{max} \geq \begin{cases} \sigma_{max}^2, \\ a^Ta + \sigma_{min}^2. \end{cases} \qquad (2.2I)$$

При постоянной дисперсии $\sigma^2 = \sigma_{min}^2 = \sigma_{max}^2$ λ_{max} - максимальное значение энергии записи после ОВС (Непомнящих И.А., I977) - равно $a^Ta + \sigma^2$. Из системы неравенств (2.2I) отчетливо видно, что появление даже одной резко аномальной по дисперсии помех трассы приводит к ее превалирующему влиянию на результат.

В связи со сложностью выделения сигнала по критерию МП на основе формулы (2.4) в системе СЦС-ЗМП реализован частный вариант - ОВС по формуле (2.13). Его опробование в различных сейсмогеологических условиях Украины (Днепровско-Донецкая впадина (ДДВ), северо-западный шельф Черного моря, Волыно-Подолия) и России (Тимано-Печорская провинция) показало высокую эффективность и преимущество над отечественными и зарубежными аналогами (Быков И.А., 1984; Рич Е.,1980).

В последнее время за рубежом для выделения сигналов из многоканальной сейсмической записи широко применяется сингулярное разложение (СР) (Гюров Ч.П., 1983; Джоунс И.Ф., Леви Ш.,1987 и др.), позволяющее произвольную матрицу записи X представить в виде произведения трех матриц или, что эквивалентно, суммы k матриц единичного ранга :

$$X = V\Gamma U^T = \sum_{j=1}^{k} \gamma_j V_j U_j^T. \qquad (2.22)$$

Здесь $k \leq min(L,M)$ - ранг матрицы X ; Γ - диагональная матрица размерности $k \times k$ с положительными элементами - сингулярными числами матрицы X ,упорядоченными по невозрастанию ($\gamma_{11} \geq \cdots \geq \gamma_{kk}$, $\gamma_{jj} = \gamma_j$). Столбцы матриц $V(L \times k)$ и $U(M \times k)$ представлены ортонормированными собственными векторами матриц XX^T и X^TX , упорядоченными в соответствии с сингулярными числами γ_j .

Поскольку эта операция предложена формально, без должного теоретического обоснования, представляет интерес исследование ее возможностей и ограничений при выделении сигналов из многоканальной сейсмической записи [21, 25, 29] .

Если аддитивные помехи в выражении (1.3) представлены пропущенным через произвольный фильтр двумерным белым шумом с независимой от номера канала дисперсией, а сигнальная часть записи имеет структуру (2.1), то в соответствии с теоремой Экарта-Юнга наилучшей в среднеквадратическом смысле оценкой сигнала (2.1) является первый член СР матрицы X,откуда следует

$$a = \gamma_1 U_1, \qquad S = V_1. \qquad (2.23)$$

Умножая уравнение (2.22) справа на вектор U_1 и учитывая ортонормированный характер системы векторов $U_j (U_i^T U_j = \delta_{ij})$, а также (2.23), получим

$$S = \gamma_1^{-1} X U_1. \qquad (2.24)$$

При аппроксимации матрицы X матрицей единичного ранга по критерию невзвешенного метода наименьших квадратов (МНК) не учитываются корреляционные свойства помех. Согласно фундаментальной теореме Гаусса этот упрощенный вариант МНК действительно оптимален только в присутствии некоррелируемых между каналами и с сигналом помех, обладающих тождественной корреляционной функцией. В этом и только в этом случае первые собственные векторы матриц $X^T X$ и $X X^T$ равны с точностью до постоянного множителя искомым векторам a и S' соответственно. С другой стороны, согласно (2.13), суммирование (2.24) с весами, пропорциональными a_k, является оптимальной процедурой выделения сигнала для данного случая. Отсюда же понятна неустойчивость этого класса алгоритмов к непредвиденному разбросу σ_k^2.

Представление сейсмической записи матрицей единичного ранга (2.1) оправдано только для исходных сейсмограмм (преимущественно ОГТ). В случае временны́х разрезов такая аппроксимация, как правило, приводит к неадекватным результатам и заставляет формулировать задачу поиска способов трансформации всего ряда сингулярных членов (2.22), позволяющих наилучшим образом выделить сигнальную часть записи [29]. Если решение допускает ограничение ряда (2.22), то индекс последнего члена $j=z$ определяется из условия минимума неотрицательного значения $\gamma_z^{(c)} - \sigma$, где $\gamma_j^{(c)} = (\gamma_j^2 - \sigma^2)^{1/2}$ - сингулярные числа сигнальной составляющей записи, σ^2 -дисперсия шума. Если решение требует трансформации всего ряда сингулярных чисел, то последовательность γ_j в (2.22) необходимо заменить на $\gamma_j^{(c)}$.

Алгоритм СР реализован в системе СЦС-ЗМП и опробован в различных сейсмогеологических условиях Украины и России. Обработка выполнялась как по исходным сейсмограммам, так и временны́м разрезам. Помимо повышения регулярности отражений обращает на себя внимание сохранение динамических особенностей сигнальной составляющей записи по латерали, что об"ясняется структурой матриц единичного ранга (2.22), которыми аппроксимируется запись. Эти матрицы доспускают произвольное варьирование уровней сигнала между каналами, что обеспечивает основное преимущество данного подхода над его аналогами. На модельных и реальных материалах продемонстрирована эффективность вычитания регулярных помех с помощью СР.

3. ОПТИМАЛЬНАЯ КОРРЕКТИРУЮЩАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Настоящий раздел является логическим продолжением раздела I, поскольку развивает идею фильтрации сейсмических записей, оптимизирующей взвешенные нормированные квадратичные функционалы сигнала как меру разрешенности.

Необходимым условием корректной деконволюции является ее устойчивость к различного рода помехам на входе процедуры (Тихонов А.Н., 1943) . Одним из широко распространенных способов получения такого решения является корректирующая фильтрация (Козлов Е.А., Гогоненков Г.Н. и др., 1973) , использующая ограниченный диапазон частот, обычно выбираемый из соображений преобладания сигнала над помехой. По поводу того, что такой подход не удовлетворяет одному из условий классической корректности - требованию однозначности, заметим следующее. В реальных ситуациях при решении задачи деконволюции помимо аддитивных помех весьма существенную роль играют ошибки в оценке прямого оператора (формы ЭС) . Последний фактор практически не поддается строгому учету, что приводит к значительным ошибкам спецификации. Поэтому в условиях большой неопределенности прямого оператора не имеет смысла разделять и независимо рассматривать проблемы однозначности и устойчивости решения обратной задачи. В таком случае приходится сознательно (и практики - сейсморазведчики давно интуитивно пришли к этому выводу) выбирать пусть неоднозначное ("загрубленное") , но по возможности минимально искаженное совокупностью аддитивных помех и ошибок спецификации решение. Это служит обоснованием корректирующей фильтрации в ограниченном диапазоне частот, что подтверждается количественными расчетами [26].

Частотная характеристика одноканального винеровского фильтра

$$H(\omega)=S^*(\omega)/[R_s(\omega)+R_n(\omega)R_f^{-1}(\omega)], \qquad (3.1)$$

где $S(\omega)$ и $R_s(\omega)=|S(\omega)|^2$ - комплексный спектр и спектр мощности ЭС $s(t)$, $R_n(\omega)$ и $R_f(\omega)$ - спектры мощности помех и искомой ИС, является строго оптимальной при использовании точных значений $S(\omega)$. Если оценки $S(\omega)$ известны с некоторой погрешностью $\delta S(\omega)$, то в случае представления последней величины реализацией случайного процесса оптимальная частотная характеристика имеет вид (Френкс Л. 1974)

$$H(\omega)=\langle S^*(\omega)\rangle / [|\langle S(\omega)\rangle|^2+\Theta(\omega)+R_n(\omega)R_f^{-1}(\omega)], \quad (3.2)$$

где $\Theta(\omega)=\langle|\delta S(\omega)|^2\rangle$ - средний квадрат ошибки $\delta S(\omega)$.

Ошибки оценки $S(\omega)$ в некоторой степени пропорциональны отношению помеха/сигнал (Уайт Р.Е., 1984):

$$\Theta(\omega)=\kappa[R_n(\omega)/R_c(\omega)]^{\alpha}, \quad (3.3)$$

где $R_c(\omega)=R_s(\omega)R_f(\omega)$, $\kappa>0$ и $\alpha>0$ - константы, зависящие от конкретного алгоритма оценки $S(\omega)$. Структура выражения (3.3) заставляет величину $\Theta(\omega)$ резко возрастать вне основного диапазона частот, где сигнал преобладает над помехой. Поэтому неучет члена $\Theta(\omega)$ при использовании (3.I) вместо (3.2) может привести к существенным ошибкам восстановления ИС, далеким от оптимальных. По этой же причине идеальная корректирующая фильтрация $H(\omega)=S^{-1}(\omega)$ в основном диапазоне частот может оказаться более эффективной, поскольку она, не учитывая менее весомый фактор - аддитивные помехи, в то же время берет во внимание и значительно ослабляет влияние более значительных ошибок спецификации - неточно определенной формы ЭС. Сказанное подтверждают модельные сопоставления ошибок восстановления ИС по формуле (3.I) с неучтенным членом $\Theta(\omega)$ (Савелова Т.И., 1972) и с помощью идеальной корректирующей фильтрации в полосе $\Omega=[\omega_1,\omega_2]$ [26] :

$$\sigma^2_{f\,пол}=\int_{\omega\notin\Omega}R_f(\omega)d\omega+\int_{\omega\in\Omega}R_n(\omega)R_s^{-1}(\omega)d\omega+ \quad (3.4)$$
$$+\int_{\omega\in\Omega}\frac{\Theta(\omega)}{R_s(\omega)}\left[R_f(\omega)+\frac{R_n(\omega)}{R_s(\omega)}\right]d\omega.$$

В этой ситуации возникает вопрос выбора оптимального диапазона частот Ω, минимизирующего (3.4). Дифференцирование (3.4) по ω_1, ω_2 и приравнивание результата нулю приводит к

$$R_c(\omega_{1,2})=R_n(\omega_{1,2})+\Theta(\omega_{1,2})R_x(\omega_{1,2})/R_s(\omega_{1,2}), \quad (3.5)$$

где $R_x(\omega)=R_c(\omega)+R_n(\omega)$ - спектр мощности всей записи. Поскольку мы, как правило, не располагаем информацией о $\Theta(\omega)$, то неучет этого эффекта вместо (3.5) приводит к [13]

$$R_c(\omega_{1,2})=R_n(\omega_{1,2}). \quad (3.6)$$

Дополнительную информацию о полученном решении можно извлечь из анализа вторых производных по ω_1 и ω_2 от (3.4) при $\Theta(\omega)=0$:

$$R_c'(\omega_1)>R_n'(\omega_1), \qquad R_c'(\omega_2)<R_n'(\omega_2). \quad (3.7)$$

Эффективность алгоритма выбора оптимального диапазона частот демонстрируется на реальном материале.

Очевидные недостатки $\sqcap$-образной частотной характеристики (явления Гиббса, медленное во времени затухание боковых лепестков соответствующего ядра разрешения) заставляют некоторых авторов сглаживать ее форму на границах используемого интервала, руководствуясь при этом эвристическими или плохо физически обоснованными соображениями.

Проблема успешно решается при оптимизации в финитном интервале частот $|\omega|\in[\omega_1,\omega_2]$ меры разрешенности профильтрованной записи (I.I)

$$L_\psi^{(w)}=\int_{-\infty}^{\infty} w(t)|\psi(t)|^2dt \Big/ \int_{-\infty}^{\infty}|\psi(t)|^2dt \qquad (3.8)$$

преимущества которой обоснованы в разделе I. В формуле (3.8) $\psi(t)=s(t)*h(t)$ -ядро разрешения, $h(t)$ -искомый оператор. Перевод (3.8) в спектральную область [I6] приводит к громоздкому и неудобному для дальнейших преобразований выражению, которое существенно упрощается при замене сигнала $\psi(t)$ на его огибающую как модуль аналитического аналога $\psi(t)$ (Габор Д., I946). В этом случае (3.8) приобретает вид обобщенного отношения Релея

$$L_\psi^{(w)}=(\tilde{h},S^*WS\tilde{h})/(\tilde{h},S^*S\tilde{h}), \qquad (3.9)$$

где $\tilde{h}$ - искомая частотная характеристика $H(\omega)$ в интервале $[\omega_1,\omega_2]$, S и W - операторы Фредгольма в этом же интервале с ядрами $S(\omega)\delta(\omega-\nu)$ и $W(\omega-\nu)$ соответственно. По аналогии с разделом I искомое решение имеет вид

$$\tilde{h}=S^{-1}e, \qquad (3.10)$$

при котором $L_\psi^{(w)}$ достигает ω_{min} -минимального собственного значения оператора W в интервале $[\omega_1,\omega_2]$, e - соответствующий ω_{min} собственный вектор.

Выберем в качестве весовой функции $W(t)$ семейство (I.2) и рассмотрим отдельно непрерывный и дискретный случаи.

В непрерывном случае при четных n задача сводится к поиску в интервале $[\omega_1,\omega_2]$ соответствующего собственного вектора оператора W, порожденного дифференциальным ядром.

$$W(\omega-\nu)=i^n\delta^{(n)}(\omega-\nu) \qquad (3.11)$$

(дифференцирование степени n с дополнительным множителем i^{-n}) и краевыми условиями, чтобы степень разрыва искомой функции на границах интервала $[\omega_1, \omega_2]$ была не менее $(n-1)/2$ [8,16]. Расчет оптимальной частотной характеристики при $n=2$ на вариационной основе [6] приводит к

$$E(\omega) = \sin[\pi(\omega-\omega_1)/(\omega_2-\omega_1)], \ |\omega| \in [\omega_1, \omega_2]. \quad (3.12)$$

Дифференциальный характер оператора (3.11) при четных n позволяет отказаться от необходимости перехода к огибающим в выражении (3.8), поскольку задача сжатия сигнала имеет тождественное решение.

При нечетных значениях n задача сводится к поиску соответствующего собственного вектора оператора, обладающего ядром

$$W(\omega-\nu) = \frac{i^{n-1}}{\pi}\int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{\delta^{(n)}(\nu'-\nu)}{\omega-\nu}d\nu' \quad (3.13)$$

(сочетание преобразования Гильберта и дифференцирования степени n с дополнительным множителем i^{1-n}) [8,16].

Поскольку в реальных ситуациях мы оперируем дискретными значениями сейсмического волнового поля, отсчеты оператора W необходимо определять с учетом свойств дискретного преобразования Фурье (Рабинер Л., Гоулд Б., 1978):

$$W_n(m) = \int_{-\pi}^{\pi} |t|^n \exp(imt)dt = 2\int_0^{\pi} t^n \cos mt\,dt \quad (3.14)$$

где $m=\overline{-M,M}$ - порядковый номер отсчета оператора. Нетрудно показать, что

$$W_n(0) = 2\int_0^{\pi} t^n dt = 2\pi^{n+1}/(n+1), \quad (3.15)$$

а остальные отсчеты $(m \neq 0)$ этого симметричного оператора удовлетворяют рекуррентному соотношению [16]

$$W(n)m = \frac{2n\pi^{n-1}\cos m\pi}{m^2} - \frac{(n-1)n}{m^2}W(n-2)m, \quad (3.16)$$

позволяющему по значениям $W(n)m$ при $n=0$ и $n=1$ получить отсчеты оператора при любом значении $n \geq 2$.

Анализ оптимальных ядер разрешения позволил отдать предпочтение случаю $n=1$, поскольку он характеризуется минимальным относительным уровнем боковых лепестков [16].

Описанный алгоритм корректирующей фильтрации реализован в системе СЦС-ЗМП. Результаты качественного и количественного сопоставления его эффективности с аналогами из отечественных систем обработки позволили отдать предпочтение предлагаемому оптимизированному варианту.

Эффективному решению стоящей перед деконволюцией задачи восстановления ИС препятствует узость спектрального интервала, в пределах которого сигнал преобладает над помехой. Выполнять же деконволюцию вне этого диапазона, как показано ранее в настоящем разделе, нецелесообразно, поскольку такая операция приводит не столько к повышению разрешенности записи, сколько сопровождается резким возрастанием шумов на ней.

Преодолеть это препятствие можно путем искусственного возбуждения и последующей оптимизированной обработки разночастотных записей. Под разночастотными понимаются записи $x_j(t)$, $j=\overline{1,M}$, которые за счет изменения условий возбуждения колебаний характеризуются смещенными друг относительно друга информативными диапазонами частот, но зарегистрированы при одной и той же системе наблюдений. Это позволяет выбрать для последующей разработки алгоритмов ту же модель записи в виде стационарных случайных процессов, которые при тождественной ИС $f(t)$ отличаются ЭС $S_j(t)$ и некоррелируемыми между каналами и с ИС аддитивными помехами $n_j(t)$.

Задача расчета M линейных фильтров с весовыми функциями $h_j(t)$, оптимизирующих по МНК отклонение суммарного результата их воздействия на $x_j(t)$ от $f(t)$, в частной области приводит к решению

$$H_j(\omega)=\frac{S_j^*(\omega)}{R_j^s(\omega)+\frac{R_j^n(\omega)}{R_f(\omega)}+R_j^n(\omega)\sum\limits_{i\neq j}\frac{R_i^s(\omega)}{R_i^n(\omega)}}, \quad (3.17)$$

где $S_j(\omega)$, R_j^s и $R_j^n(\omega)$ - комплексный спектр ЭС и спектры мощности ЭС и помехи на j канале. По существу это частный вариант многоканального винеровского фильтра. В отличие от одноканального варианта (3.I) многоканальный (3.I7) имеет в знаменателе дополнительный член, учитывающий уровень помех на данном канале и суммарное отношение сигнал/помеха на смежных каналах.

На практике разночастотные записи просто суммируются в поле или на ЭВМ (Кострыгин Ю.П.,I99I; Зиолковский А.,I979 и др.) . Чтобы показать, что такой подход далек от оптимального, проведено сопоставление среднеквадратических ошибок восстановления ИС с помощью такой процедуры, сопровождаемой одноканальной винеровской фильтрацией (3.I) , и предлагаемой многоканальной фильтрации (3.I7) . Анализ соответствующих аналитических выражений показывает, что их разница тем ощутимее, чем сильнее отличаются характеристикой $|S_j(\omega)|/|R_j^n(\omega)$ разночастотные записи. Самый эффективный способ повышения такого различия - искусственное смещение основных диапазонов частот в используемых для преобразования записях.

Если ЭС удовлетворяет модели (I.5) при различающихся по форме $R_j^n(\omega)$, предлагаемая многоканальная процедура вырождается в МП - оценку сигнала (2.4) или эквивалентное ей частотно-зависимое ОВС и последующую одноканальную винеровскую фильтрацию. Если кроме того корреляционные свойства помех тождественны с точностью до постоянного множителя-дисперсии (2.I2), то частотно-зависимое ОВС вырождается в упрощенный вариант (2.I3).

Раздел завершается анализом влияния взаимных статических сдвигов между разночастотными записями и неточных оценок разночастотных ЭС $s_j(t)$ как основных факторов, понижающих эффективность процедуры.

4. ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТАРНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ПОЛИСПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ И ФАЗОВАЯ ДЕКОНВОЛЮЦИЯ

Для решения многих задач, стоящих перед сейсморазведкой, в частности - предложенных в разделах I и 3 способов деконволюции, необходима оценка параметров ЭС. Однако в настоящее время за исключением морских работ отсутствуют надежные методы контроля за его формой. Учитывая, что традиционные минимально-фазовая и нуль-фазовая модели не всегда адекватно отражают реальную ситуацию, задача оценки произвольного ЭС непосредственно по сейсмической записи актуальна. Одним из основных факторов, препятствующих надежному решению этой задачи, является аддитивный шум, свойства которого после вычитания регулярных волн-помех близки к гауссовским. Поэтому настоящий раздел посвящен развитию способов оценки параметров ЭС в полиспектральной области, что позволяет успешно бороться с шумом указанного типа. Основное внимание при этом уделяется оценке фазового спектра ЭС как менее исследованной проблеме.

Анализ свойств реальных волновых полей (Уолден А.Т.,1986 и др.) позволяет использовать модель сейсмической записи

$$x(t)=\sum_j a_j s(t-\tau_j)+n(t)=s(t)*\sum_j a_j\delta(t-\tau_j)+n(t)= \quad (4.1)$$
$$=s(t)*f(t)+n(t)=c(t)+n(t),$$

где последовательность коэффициентов отражения a_j и времена их расположения τ_j на ИС $f(t)$ представляют совокупность взаимно независимых случайных величин. Времена τ_j образуют пуассоновский поток с плотностью μ, а коэффициенты a_j имеют одинаковую отличающуюся от нормальной плотность распределения $W(a)$, близкую к лапласовой. Аддитивный шум $n(t)$ - стационарный и нормальный с нулевым средним (Лимбах Ю.Н. и др.,1962).

Негауссовская модель сигнальной части записи положена в основу минимально-энтропийной деконволюции (МЭД) (Виггинс Р.А.,1978) и ее усовершенствованных вариантов, оптимизирующих функционал (варимаксную "норму")

$$V=\sum_j y_j^4 \Big/ \Big(\sum_j y_j^2\Big)^2, \tag{4.2}$$

где y_j - дискретная профильтрованная трасса. Учитывая недостатки МЭД, основным из которых является плохое выравнивание амплитудного спектра, ряд авторов предлагает декомпозицию задачи. При этом коррекция амплитудного спектра возлагается на традиционные методы фильтрации, а коррекция фазового спектра выделяется в отдельный этап обработки - фазовую деконволюцию. В настоящее время она развивается в двух направлениях. Первое основано на аппроксимации фазового спектра ЭС в основном диапазоне частот функцией $\beta\, \mathrm{sign}\, \omega$, $\mathrm{sign}\, \omega=\omega/|\omega|$ и последующей оптимизации функционала (4.2) по параметру β (Лонгботтом Дж. и др.,1988; Олденбург Д.У., Леви Ш.,1986; Фурман Дж.,1985). Второе направление использует аппроксимацию фазового спектра ЭС конечным рядом Фурье и оптимизацию по его параметрам состоятельной оценки варимаксной "нормы" ЭС (Малкин А.Л. и др.,1988).

Дальнейшее развитие указанных направлений связано с использованием такого мощного аппарата исследования негауссовских процессов как кумулянтный анализ (Малахов А.Н.,1978). В его пользу говорят следующие факты [32,34].

1. Основным недостатком упрощенных методов расчета характеристик ЭС, основанных на корреляционном преобразовании набора реализаций, является их низкая помехоустойчивость и смещенность.

2. Кумулянтные функции сохраняют информацию об амплитудной и фазовой характеристике ЭС.

3. Все кумулянтные функции высших порядков (более двух) гауссовского случайного процесса, которым вполне обоснованно аппроксимируют помехи, тождественно равны нулю.

4. Кумулянтные функции рационально выражаются через смешанные моменты процесса, что дает возможность получать их несмещенные и состоятельные оценки по трассе (Сорин А.Я., Фиников Д.Б., 1983).

Для процесса (4.1) справедливы формулы (Малахов А.Н., 1978)

$$Q_3^{(x)}(\omega_1,\omega_2)=\mu\overline{a^3}S(\omega_1)S(\omega_2)S^*(\omega_1+\omega_2), \tag{4.3}$$

$$|Q_3^{(x)}(\omega_1,\omega_2)|=\mu\overline{a^3}|S(\omega_1)||S(\omega_2)||S(\omega_1+\omega_2)|, \tag{4.4}$$

$$\Psi(\omega_1,\omega_2)=\varphi(\omega_1)+\varphi(\omega_2)-\varphi(\omega_1+\omega_2), \tag{4.5}$$

где $Q_3^{(x)}(\omega_1,\omega_2)=|Q_3^{(x)}(\omega_1,\omega_2)|\exp[i\Psi(\omega_1,\omega_2)]$ - биспектр записи $x(t)$ (двумерный спектр ее кумулянтной функции третьего порядка $q_3^{(x)}(\tau_1,\tau_2)$), $S(\omega)=|S(\omega)|\exp[i\varphi(\omega)]$ - спектр ЭС $s(t)$,

$$\overline{a^3}=\int_{-\infty}^{\infty}a^3W(a)\,da. \tag{4.6}$$

Значения (4.6) стремятся к нулю в случае близости распределения $W(a)$ к симметричному с нулевым средним, что приводит к низкой устойчивости алгоритмов, использующих биспектры (4.3). В этой ситуации имеет смысл перейти к триспектрам, для которых выполняются соотношения

$$Q_4^{(x)}(\omega_1,\omega_2,\omega_3)=\mu\overline{a^4}S(\omega_1)S(\omega_2)S(\omega_3)S^*(\omega_1+\omega_2+\omega_3), \tag{4.7}$$

$$|Q_4^{(x)}(\omega_1,\omega_2,\omega_3)|=$$
$$=\mu\overline{a^4}|S(\omega_1)||S(\omega_2)||S(\omega_3)||S(\omega_1+\omega_2+\omega_3)|, \tag{4.8}$$

$$\Psi(\omega_1,\omega_2,\omega_3)=\varphi(\omega_1)+\varphi(\omega_2)+\varphi(\omega_3)-\varphi(\omega_1+\omega_2+\omega_3), \tag{4.9}$$

$$\overline{a^4}=\int_{-\infty}^{\infty}a^4W(a)\,da. \tag{4.10}$$

Формулы (4.5) и (4.9) позволяют построить итерационные процессы оценки неизвестных значений φ_j по известным значениям полиспектров [23,32,34]. На примере триспектра эти оценки удовлетворяют критерию

$$\min_{\varphi}\sum_{i,j,k}W_iW_jW_k(\Psi_{ijk}-\varphi_i-\varphi_j-\varphi_k+\varphi_{i+j+k-2})^2, \tag{4.11}$$

где $W_{i(j,k)}$ - весовые функции, в расчет которых могут быть положены принципы, используемые при работе с обычными спектрами (Гогоненков Г.Н., 1987).

Оптимальные в L_2 решения эффективны, когда помехи в оценках полиспектров близки к гауссовским. Однако обязательная перед этими оценками операция получения непрерывного фазового спектра записи может породить погрешности, носящие скорее импульсный характер. В этой ситуации более эффективной может оказаться оптимизация решения в L_1, хотя соответствующая ей итерационная процедура существенно более сложная [32,34].

Преимущества предложенных алгоритмов над существующими аналогами заключаются в следующем. В отличие от рекурсивных алгоритмов (Бриллинджер Д.Р., 1977; Ли К.С., Розенблат М., 1982; Пэн Р., Никиас С.Л., 1987) они оптимальны, могут работать с финитными в спектральной области записями, не приводят к накапливанию систематических ошибок, возникающему вследствие рекуррентной формы расчета. В отличие от оптимизированных по МНК оценок (Мацуока Т., Ульрих Т. Дж., 1984; Пэн Р., Никиас С.Л., 1987) предложенные алгоритмы просты в реализации (в частности, не требуют обращения матриц большой размерности), а также удобны для ввода различных ограничений в получаемое решение путем использования проекций на замкнутые выпуклые множества. К ним могут относиться ограничения фазового спектра "сверху" и "снизу" (в частности - фиксация его значений в некоторых точках), ограничение на его разброс, степень гладкости, отклонение от некоторого (например, минимально-фазового) эталона и т.д.

В связи с большой времяемкостью оптимальных в L_1 способов тестировались только оптимальные в L_2 варианты. Эта процедура включала фазовую деконволюцию на основе полученных оценок фазовой характеристики ЭС без изменения амплитудного спектра записи и последующий расчет коэффициента корреляции между известной ИС и результатом деконволюции (Гогоненков Г.Н., 1987).

Сопоставление на моделях эффективности различных способов восстановления непрерывного фазового спектра ЭС (Гогоненков Г.Н., 1987; Митрофанов Г.М., 1986; Нокс К.Т., Томсон Б.Т., 1974; Тимошин Ю.В., Шатило А.П., 1989; Триболе Дж.М., 1977; Шафер Р.В., 1969) с последующим осреднением по реализациям и сочетания алгоритма Шафера с предложенными полиспектральными преобразованиями позволило отдать предпочтение последним.

Результаты тестирования предлагаемых алгоритмов на стохастических моделях позволили определить предельно допустимые значения относительного уровня шума и количества осреднений, обеспечивающие эффективные оценки фазового спектра ЭС.

В системе СЦС-ЗМП реализован алгоритм фазовой деконволюции на основе оптимальных в L_2 оценок в биспектральной области. Сопоставление его эффективности на реальном материале с выполняющей аналогичные функции программой $DECORP$ (Малкин А.Л., Фиников Д.Б., 1988) позволило отдать предпочтение предлагаемому варианту.

На аналогичных принципах строятся оптимальные в L_1 и L_2 алгоритмы оценки амплитудных характеристик ЭС в полиспектральной области, использующие соотношения (4.4) и (4.8) [38].

5. РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МГНОВЕННЫХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ

Стремление повысить временну́ю разрешающую способность динамического анализа заставило сейсморазведчиков обратить внимание на мгновенные характеристики записи (Бельфер И.К., 1983; Птецов С.Н., Гогоненков Г.Н., 1982; Пуздровский Е.П., 1973; Тенер М.Т. и др., 1979; Тяпкин Ю.К., 1983 и др.) .

В настоящее время существует множество алгоритмов определения мгновенных динамических характеристик [4, 10, 12, 15, 18, 27]. Большинство из них строится на следующей формальной основе. Если сейсмическую трассу $x(t)$ считать действительной частью некоторого комплексного сигнала

$$W(t) = x(t) + i\,y(t), \tag{5.1}$$

где $y(t)$ - функция, сопряженная с $x(t)$, то можно определить огибающую как модуль комплексного сигнала:

$$A(t) = |W(t)| = [x^2(t) + y^2(t)]^{1/2} \tag{5.2}$$

и мгновенную частоту как производную по времени от полной мгновенной фазы:

$$\Omega(t) = \frac{d\{arctg[x(t)/y(t)]\}}{dt} = \frac{y'(t)x(t) - x'(t)y(t)}{x^2(t) + y^2(t)}. \tag{5.3}$$

Единственным оператором $y(t) = L[x(t)]$, удовлетворяющим ряду естественных требований математического, физического и технического характера, является преобразование Гильберта [4, 10, 12, 15, 18, 27].

Как правило, диапазон частот спектра Фурье произвольного сигнала и множество значений его мгновенной частоты не совпадают. Тем не менее существует ряд свойственных широкому классу реальных сигналов и перечисленных ниже особенностей взаимосвязанного поведения $A(t)$ и $\Omega(t)$.

I. Большинство значений $\Omega(t)$ лежит в пределах полосы частот, близких к средней частоте спектра процесса.

2. По мере расширения спектра процесса отклонения $\Omega(t)$ в обе стороны от среднего значения становятся все более интенсивными, чаще встречающимися и протяженными.

3. Чем больше величина локального отклонения $\Omega(t)$, тем меньшего его протяженность во времени.

4. Любое локальное отклонение $\Omega(t)$ сопровождается уменьшением огибающей процесса. Чем больше величина отклонения, тем меньше значение огибающей.

5. При относительно больших значениях огибающей мгновенная частота ведет себя стабильно и близка к средней частоте спектра процесса.

Об"ективность и некоторые количественные стороны перечисленных закономерностей отчетливо проявляются на примере узкополосного нормального случайного процесса [10, 18]. Эти же закономерности находят об"яснение с позиций строгих интегральных соотношений между спектральными (по Фурье) и мгновенными характеристиками сейсмической записи (Финк Л.М., 1966) :

$$\omega_1 = \Omega_1, \tag{5.4}$$

$$(\delta\omega)^2 = (\delta\Omega)^2 + \int_{-\infty}^{\infty} A'^2(t)dt \Big/ \int_{-\infty}^{\infty} A^2(t)dt, \tag{5.5}$$

где

$$\omega_1 = \int_0^{\infty} |X(\omega)|^2 \omega\, d\omega \Big/ \int_0^{\infty} |X(\omega)|^2 d\omega, \tag{5.6}$$

$$(\delta\omega)^2 = \int_0^{\infty} |X(\omega)|^2 (\omega - \omega_1)^2 d\omega \Big/ \int_0^{\infty} |X(\omega)|^2 d\omega, \tag{5.7}$$

– первый начальный и второй смещенный моменты спектра мощности $x(t)$,

$$\Omega_1 = \int_{-\infty}^{\infty} A^2(t)\Omega(t)dt \Big/ \int_{-\infty}^{\infty} A^2(t)dt, \tag{5.8}$$

$$(\delta\Omega)^2 = \int_{-\infty}^{\infty} A^2(t)[\Omega(t) - \Omega_1]^2 dt \Big/ \int_{-\infty}^{\infty} A^2(t)dt. \tag{5.9}$$

Наиболее простое об"яснение перечисленных закономерностей предложено нами [10,18] на основе связи поведения параметров аналитического сигнала $W(t)$ с положением нулей Z - преобразования спектра Фурье на комплексной области $t+i\tau$.

Неустойчивое поведение мгновенных частот заставляет исследователей искать способы сглаживания, которые в основном сводятся к формально-эвристическим преобразованиям. Физически более обоснованным является взвешенное сглаживание с учетом огибающей, построенное на строгом соотношении (5.4) и позволяющее осуществлять непрерывную оценку ω_1 в скользящем временно́м интервале [11,18]. На этих же принципах с использованием формулы (5.5) может быть построена скользящая оценка $(\delta\omega)^2$. Данное направление в преобразовании мгновенных частот условно названо прямопоисковым, поскольку информация об ω_1 и $(\delta\omega)^2$ позволяет оценить декремент поглощения сейсмических волн (Авербух А.Г. и др.,1987) и тем самым повысить надежность прогноза нефтегазонасыщения потенциальных коллекторов.

Необходимо заметить, что такой путь оценки ω_1 и $(\delta\omega)^2$ далеко не самый краткий, поскольку он предполагает предварительный трудоемкий расчет $A(t)$ и $\Omega(t)$. Более эффективный в вычислительном отношении способ [11,18] основывается на представлении функционала (5.6) с помощью соотношения Парсеваля во временно́й области. С учетом того, что $i\omega$ и $-i\,sign\,\omega$ - частотные характеристики операторов дифференцирования D и преобразования Гильберта Н (Рабинер Л., Гоулд Б.,1978), (5,6) можно записать как нормированный квадратичный функционал

$$\omega_1 = \int_{-\infty}^{\infty} HD[x(t)]x(t)dt \Big/ \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t)dt. \qquad (5.10)$$

Для дискретной реализации (5.10) с помощью обратного преобразования Фурье получим весовую функцию оператора $HD \equiv DH$:

$$h_m = \frac{\Delta t}{2\pi}\int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} \omega\,sign\,\omega \exp(i\omega m\Delta t)d\omega =$$

$$= \begin{cases} \pi/(2\Delta t), & m=0 \\ -2/(\pi m^2\Delta t), & m=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots, \\ 0, & m=\pm 2, \pm 4, \pm 6, \dots, \end{cases} \qquad (5.11)$$

где m - порядковый номер отсчета, Δt - интервал дискретизации. Отсюда следует алгоритм непрерывной оценки ω_1 в скользящем интервале $2T$:

$$\omega_1^{(2T)}(t) = \int_{-T}^{T} \tilde{u}_1(t-\tau) u(t-\tau) d\tau \Big/ \int_{-T}^{T} u^2(t-\tau) d\tau, \quad (5.12)$$

где $\tilde{u}_1(t) = HD[u(t)]$. На аналогичных принципах строится оценка $(\delta\omega)^2$, использующая дополнительный расчет дискретного аналога оператора $(-1)D^2$. Для оптимизации финитных в интервале $[-T, T]$ операторов HD и $(-1)D^2$ применяется [18] метод взвешенной чебышевской аппроксимации (Рабинер Л. и др.,1975). Эффективность алгоритма оценки ω_1 демонстрируется на реальном материале в районе нефтегазовой залежи.

Если описанный подход предполагает изучение свойств ЭС при максимально возможном отрешении от осложняющей интерференционности записи, то альтернативный вариант основан на анализе характеристик ИС. Он использует впервые отмеченный нами факт [4] взаимосвязанного поведения мгновенных параметров сейсмической записи и характера тонкой слоистости геологического разреза, который в дальнейшем нашел воплощение во многих методиках изучения цикличности и лито-фациальной обстановки осадконакопления (Бельфер И.К.,Мушин И.А.,1987; Шаталов Г.Г.,1990 и др.). В рамках такого подхода, условно названного сейсмостратиграфическим [18,27], относительно однородные участки поля мгновенных частот временного разреза связываются с зонами выдержанных в пространстве и во времени лито- фациальных условий осадконакопления, а перепады между такими участками - с границами этих зон. При этом возникает проблема борьбы со свойственным мгновенным частотам импульсным шумом при одновременном сохранении перепадов между относительно однородными участками поля. Одним из алгоритмов, эффективно решающих такую задачу, является медианная фильтрация (Юстуссон Б.И.,1984), для выбора размеров апертуры которой могут быть использованы статистические характеристики мгновенных частот узкополосного нормального случайного процесса [10,18].

Раздел завершается теоретическим обоснованием мгновенной когерентности, формально предложенной (Тенер М.Т. и др.,1979) для изучения свойств сейсмических волновых полей. Показано, что эта операция представляет собой оценку огибающей тождественной по форме сигнальной составляющей многоканальной сейсмической записи в присутствии нерегулярных помех [24]. Такой подход более чувствителен к разбросу статических поправок по сравнению с аналогичной по принципам оценкой модуля сигнала (Карпенко И.В. и др.,1982). Помимо традиционного изучения внутреннего строения акустически контрастных интервалов разреза демонстрируется применение этой процедуры для получения информации о глубинных разломах кристаллического фундамента, контролирующих зоны лито-фациального замещения и неантиклинальные ловушки углеводородов [18,19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполненных исследований получены следующие результаты.

1. Сформулирован ряд принципиальных недостатков традиционного винеровского критерия оптимальности, лежащего в основе одноименных фильтров. Среди них в первую очередь следует назвать плохую согласованность с механизмом зрительной системы человека и комплексную зависимость от степени разрешенности и отношения сигнал/помеха. Последнее обстоятельство серьезно препятствует оптимальному согласованию разрешенности и помехозащищенности сейсмической записи.

2. С целью преодоления основных недостатков винеровского критерия впервые предложен и исследован нетрадиционный подход к фильтрации сейсмических записей, основанный на оптимизации произвольных взвешенных нормированных квадратичных функционалов сигнала как меры разрешенности записи.

3. Впервые предложена и исследована корректирующая фильтрация сейсмических записей в ограниченном диапазоне частот, оптимизирующая меру разрешенности в виде семейства обобщенных радиусов инерции сигнала (его огибающей). Такой подход к оптимизации взвешенных нормированных квадратичных функционалов сигнала рассматривается как способ регуляризации решения, альтернативный прямому ограничению уровня помех. Для обоснования правомочности использования полосового решения обратной задачи деконволюции показано, что оно может привести к меньшим ошибкам, чем полночастотный вариант. Разработан алгоритм оценки оптимального диапазона частот корректирующей фильтрации, который минимизирует совместное влияние полосового характера преобразования, аддитивных помех и неточной оценки формы сигнала.

4. Для эффективного повышения разрешающей способности сейсмического метода впервые предложена оптимальная многоканальная фильтрация разночастотных записей, позволяющая преодолеть основной недостаток реальных волновых полей - узость спектрального интервала, в пределах которого сигнал преобладает над помехой.

5. Впервые разработана теория оптимизированной оценки сигналов, основанная на усложненной модели многоканальной сейсмической записи. Последняя допускает произвольные изменения уровней и временных подвижек тождественных по форме сигналов и произвольные корреляционные (спектральные) свойства нерегулярных помех на различных каналах. Получены решения задачи в статистической и детерминированной постановках с соответствующими формами регуляризации. Предложены прямые (непосредственно по самой записи) и косвенные (посредством анализа корреляционной матрицы) способы оценки параметров, необходимых для функционирования алгоритмов. Как частные случаи рассмотрены способы оптимизации взвешенного суммирования и сингулярного разложения. Показана связь низкой эффективности алгоритмов, основанных на упрощенных моделях записи (фиксации уровней сигналов или статистических характеристик помех), с их чувствительностью к отклонениям реальной записи от предполагаемой модели (ошибкам спецификации). Получены количественные оценки преимуществ оптимизированных алгоритмов выделения сигнала над традиционными неоптимизированными. Сформулированы условия эффективного применения предлагаемых алгоритмов.

6. Впервые предложены оптимизированные в L_1 и L_2 устойчивые к нерегулярным помехам простые в реализации и удобные для учета разнообразной априорной информации итерационные способы оценки параметров элементарного сейсмического сигнала в полиспектральной области.

7. Проанализированы свойства алгоритмов оценки мгновенных динамических характеристик сейсмической записи и из всего их многообразия обоснованно выделен единственный, использующий преобразование Гильберта. Впервые сформулирована задача и предложены алгоритмы сглаживания мгновенных частот как непрерывная оценка интегральных спектральных параметров сейсмической записи. Разработаны алгоритмы непосредственной оценки этих параметров записи, построенные на операциях типа свертки. Сформулировано два подхода к использованию мгновенных частот при решении различных геологических задач, стоящих перед сейсморазведкой. Первый из них заключается в непрерывной оценке первых двух моментов спектра мощности записи и позволяет судить о поглощающих свойствах среды. Второй подход использует впервые отмеченный нами факт преимущественной связи мгновенных частот сейсмической записи с характером тонкой слоистости геологического разреза при относительно низком уровне аддитивных помех и направлен на

подчеркивание этой связи. Такой подход позволяет получить дополнительную информацию о лито-фациальной обстановке осадконакопления в пространстве и во времени.

8. Разработана теория мгновенной когерентности сейсмических записей и сформулированы геологические задачи, решению которых может способствовать анализ этого динамического параметра.

Основные защищаемые положения:

I. Оптимизация взвешенных нормированных квадратичных функционалов сигнала с ограничениями позволяет избавиться от некоторых недостатков винеровской фильтрации и организовать рациональный компромисс между разрешенностью и помехозащищенностью сейсмических записей.

2. Усложненные модели многоканальной сейсмической записи повышают эффективность процедур выделения сигнала за счет снижения влияния ошибок спецификации.

3. Оптимальная корректирующая фильтрация в специально подобранном диапазоне частот является эффективным способом повышения разрешенности сейсмической записи.

4. Оптимальная многоканальная фильтрация разночастотных записей позволяет преодолеть основное препятствие на пути эффективного повышения их разрешенности - узость спектрального диапазона частот, в пределах которого сигнал преобладает над помехой.

5. Оптимизированное использование полиспектральных оценок позволяет сконструировать устойчивые к нерегулярным помехам, простые в реализации и удобные для учета априорной информации итерационные процедуры оценки параметров элементарного сейсмического сигнала и создать на их основе эффективные алгоритмы деконволюции.

6. Предлагаемые традиционные и нетрадиционные подходы к использованию и трансформации мгновенных и интегральных динамических параметров сейсмических записей определяются характером решаемой геологической задачи.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

I. Об определении минимально-фазового сигнала по его функции автокорреляции // ДАН УССР.Сер.Б.-1978.-№8.-С.703-706.

2. Способ повышения разрешенности сейсмической записи при линейной зависимости фазового спектра элементарного сигнала от часто-

ты // Там же. -1981.-№5.-С.20-23. (соавтор И.В.Карпенко) .

3. Связь интегральных параметров сейсмической трассы с начальными моментами спектра мощности сигнала //Там же.-1981.-№9.-С.31-34. (соавтор И.В.Карпенко) .

4. Связь мгновенных параметров сейсмической трассы с характером тонкой слоистости геологического разреза // Там же.-1983.-№6. - С.18-22.

5. Оптимальная линейно-фазовая корректирующая фильтрация как средство повышения разрешенности сейсмической записи // Геофиз.журн. -1983.-5,№4.-С.43-50 (соавтор Г.Г.Найко) .

6. Оптимальная линейно-фазовая полосовая фильтрация сейсмических записей // Геология и геофизика.-1984.-№3.-С.99-105.

7. Оптимальный векторный энергетический фильтр для выделения сигнала на фоне случайных помех // ДАН УССР.Сер.Б.-1984.-№9.-С.22-25.

8. Один класс квадратичных функционалов в задаче повышения разрешенности сейсмического волнового поля // Там же.-1984.-№10.-С. 23-26.

9. Изучение рассеивающих свойств среды для решения задач прогнозирования геологического разреза// Разведочная геофизика: теория, методика, результаты.-Киев: Наукова Думка,1984.-С.39-50.

10. Мгновенные динамические характеристики сейсмической записи // Геофиз.журн.-1985.-7,№1.-С.31-40. (соавтор С.М.Познанский) .

11. Сглаживание мгновенной частоты и непрерывная оценка интегральных характеристик спектра сейсмической записи // Изв.ВУЗов. Геология и разведка.-1985.-№8.-С.102-107. (соавтор В.И.Грищенко) .

12. Оценка возможностей использования мгновенных динамических характеристик сейсмических записей при поисках нефти и газа //Обзор. информ. Сер.Разведочная геофизика.-М.:ВИЭМС,1986.-76 с. (соавторы И.К.Бельфер, В.М.Погожев, Г.М.Митрофанов, И.А.Мушин) .

13. Оптимальный частотный интервал корректирующей фильтрации// ДАН УССР.Сер.Б.-1987.-№7.-С.35-38.

14. Фильтрация сейсмических записей с оптимизацией взвешенных нормированных квадратичных форм сигнала // Геофиз.журн.-1987.-9,№5. - С.30-35.

15. Гармоническая модель сейсмической трассы при изучении ее динамических характеристик // ДАН УССР.Сер.Б.-1988.-№5.-С.19-22. (соавтор Е.П.Пуздровский) .

16. Фильтрация сейсмических записей с оптимизацией взвешенных

нормированных квадратичных форм сигнала. 2// Геофиз.журн.-1988.-10, №3.-С.63-69.

17. Взвешенные нормированные квадратичные функционалы в задаче оптимальной фильтрации сейсмических записей //Геология и геофизика.-1988.-№6.-С.125-131.

18. Мгновенные динамические характеристики сейсмической записи при решении различных геологических задач.-Киев,1988.-98 с.-Рукопись деп. в ВИНИТИ,№60-В89.

19. Комплексирование данных сейсмо- и гравиразведки при поисках нефти и газа // Нефтяная и газовая промышленность.-1990.-№1.-С.16-19. (соавторы В.Е.Бураковский, С.М.Познанский).

20. Один критерий оптимальности корректирующей фильтрации сейсмических записей // ДАН УССР.Сер.Б.-1990.-№1.-С.14-18.

21. Оптимальное взвешенное суммирование сейсмических записей при нерегулярной помехе // Обзор. информ. Сер.Разведочная геофизика.-М.:ВИЭМС,1989.-56 с. (соавтор И.В.Карпенко).

22. Адаптивное оптимальное взвешенное суммирование сейсмических записей // Техника и технология геофизических работ на нефть и газ.-Львов:УкрНИГРИ,1989.-С.23-30.

23. Итерационные алгоритмы оптимальной оценки фазовых характеристик сейсмического сигнала с помощью спектров высокого порядка // ДАН УССР. Сер.Б.-1990.-№8.-С.19-22.

24. Мгновенная когерентность сейсмического волнового поля// Прикладная геофизика.-1989.-Вып.120.-С.86-93 (соавторы В.И.Грищенко, С.М.Познанский).

25. Сингулярное разложение сейсмических записей как метод борьбы с помехами // Изв.ВУЗов. Геология и разведка.-1990.-№10.-С.102-109.

26. Оптимальный диапазон частот корректирующей фильтрации сейсмических записей// Геофиз.журн.-1991.-13,№1.-С.62-69.

27. Особенности использования мгновенных динамических характеристик записи в сейсморазведке //Сейсмостратиграфические исследования в СССР.-М.: Наука,1990.-С.48-56.

28. Устойчивый итерационный алгоритм адаптивного оптимального взвешенного суммирования сейсмических записей // Геология и геофизика.-1991.-№5.-С.122-125.

29. Использование сингулярного разложения сейсмических записей для борьбы с помехами //ДАН Украины.-1992.-№4,-С.77-80.

30. Adaptive optimum weighted stacking of seismic data // Expanded abstracts of papers

(Russian-Norwegian Oil Exploration Workshop II, Voss, Norway, May 5-7, 1992). -Bergen (Norway), 1992. - 7p.

31. Программно-алгоритмический комплекс оптимизированного преобразования сейсмических записей на ЭВМ для повышения разрешенности и борьбы с помехами // Новые методы, системы обработки и интерпретации сейсморазведочной информации на ЭВМ.-М.: Геоинформмарк, 1992.-С.38-45. (соавторы С.В.Гонтовой.А.Г.Каледин,Б.Е.Хименко).

32. Итерационные алгоритмы оптимальной в L_1 и L_2 оценки фазовой характеристики сейсмического сигнала с помощью триспектра записи //Геофиз.журн.-1993.-15,№2.-С.85-92.

33. Выделение сигнала из многоканальной сейсмической записи по критерию максимального правдоподобия //ДАН Украины.-1993.-№7. -С.88-92.

34. Оценка формы элементарного сейсмического сигнала на основе нетрадиционных моделей записи //Обзор.информ.Сер.Разведочная геофизика.-М.:Геоинформмарк,1993.-60 с. (соавторы И.В.Карпенко, А.П.Шатило).

35. Оптимизация процесса суммирования сейсмических записей при нерегулярной помехе //Геофиз.журн.-1993.-15,№6.-С.74-83.

36. Оценка сигнала многоканальной сейсмической записи по критерию максимального правдоподобия //Изв.ВУЗов.Геология и разведка.- - 1994.-№2.-С.114-118.

37. Оптимизированные оценки усложненной модели многоканальной сейсмической записи со статистической и детерминированной регуляризацией // Геология и геофизика.-1994.-№1.-С.128-135.

38. Итерационные алгоритмы оптимальной оценки амплитудных характеристик сейсмических сигналов с помощью полиспектров записи // Нові дані з методики і технології геологорозвідувальних робіт на нафту і газ в Україні.-Львов: УкрГГРИ,1993.-С.57-65.

Подп. к печ. 03.06.94 Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага тип. № 3. Способ печати офсетный. Условн. печ. л. 2,09
Условн. кр.-отт. 2,20. Уч.-изд. л. 2,0.
Тираж 150. Зак. № И-2806

Фирма «ВИПОЛ»
252151, г. Киев, ул. Волынская, 60.