На правах рукописи

Логинов Андрей Константинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОГО И КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В ЗАДАЧЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ

25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2013

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова

Научные руководители:	Доктор физико-математических наук, профессор, Калинин Виктор Васильевич
	Доктор физико-математических наук, профессор, Владов Михаил Львович
Официальные оппоненты:	Максимов Герман Адольфович, доктор физико-математических наук, Акустический институт им. Н.Н.Андреева, Ведущий научный сотрудник.
	Хохлов Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, главный научный сотрудник
Ведущая организация:	ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита диссертации состоится 18 декабря 2013 года в 14 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д.501.001.64 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д.1, ГЗ МГУ, зона «А», Геологический факультет, аудитория 308.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки (Ломоносовский проспект, 27, сектор А, 8 этаж, к. 812)

Автореферат разослан   ноября 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Никулин Борис Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Методы прогноза геолого-геофизической модели среды с использованием сейсмических данных разрабатываются на протяжении последних 50 лет. Особенно актуальны эти методы при разведке на акваториях, где бурение большого количества разведывательных скважин технически невозможно или экономически нецелесообразно.

Существует несколько подходов к решению этой задачи. В случаях отсутствия большого количества скважинной информации и профильной системе наблюдения единственным доступным методом, позволяющим получить прогноз параметров среды с достаточной для практических целей детальностью, является метод сейсмической инверсии редких импульсов с ограничениями(CSSI -Constrained Sparse-Spike Inversion).

На основании широкого круга исследований последних лет, можно сделать вывод, что, зачастую, параметры геологической среды распределены не хаотично, а демонстрируют квазипериодический, авто-коррелированный характер изменения значений с глубиной и, могут быть описаны, как реализация процесса обобщенного броуновского движения. Что делает актуальным исследования возможности осуществления сейсмической инверсии для подобных моделей сред.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются геологические среды с квазипериодическим характером изменения акустических импедансов с глубиной, а именно, вопросы, связанные с прогнозом значений акустических импедансов для таких сред по материалам сейсмических исследований.

Цель диссертационной работы. Установить возможность использования алгоритмов инверсии редких импульсов в задаче прогноза акустических импедансов в предположении квазипериодического, авто- коррелированного строения среды. Разработка эффективного алгоритма и программной реализаций сейсмической инверсии редких импульсов для сред подобного рода.

Задачи исследования

1. Анализ существующих подходов к решению задачи инверсии редких импульсов. Постановка оптимизационной задачи, обеспечивающая единственность решения в предположении статистической независимости значений акустического импеданса и различных моделей распределения их значений.
2. Разработка алгоритма решения оптимизационной задачи «инверсии редких импульсов с ограничениями» и методов регуляризации решения с использованием априорной модели среды и предположения о плавном изменении акустических свойств по латерали.
3. Математическое моделирование отражения плоских акустических волн от пачки слоев с квазипериодическим строением, оценка доли энергии короткопериодных кратных волн в общей отраженной энергии в зависимости от строения пачки и амплитуды изменения акустических импедансов.
4. Постановка оптимизационной задачи сейсмической инверсии в предположении авто-коррелированного: монотонного или квазипериодического характера изменения акустических свойств с глубиной.
5. Обобщение разработанного алгоритма инверсии для моделей сред включающих пачки слоев, имеющих монотонный или квазипериодический характер изменение акустического импеданса с глубиной.

Достоверность и обоснованность полученных результатов.

Теоретические утверждения, сформулированные в работе, имеют строгое формальное доказательство. Разработанные в ходе работы алгоритмы и их программные реализацией протестированы на синтетических и реальных экспериментальных данных.

Положения выносимые на защиту.

- Оптимальным, с точки зрения априорной вероятности, решением для сред со статистически независимыми коэффициентами отражения является то, что помимо соответствия исходным данным и априорной информации обладает наименьшей нормой в пространстве L0.

- Разработан и реализован метод сейсмической инверсии, позволяющий получать решения близкие к оптимальным, в предположении статистической независимости акустических параметров и с учетом априорной акустической модели среды.
- Априорно наиболее вероятное решение для среды, описываемой обобщенным броуновским движением, является решение минимальное в мере Махаланубиса специального вида, с ковариационной матрицей зависящей от показателя Херста предполагаемой статистической модели среды.
- Предложено и реализовано решение задачи сейсмической инверсии для моделей описываемых, как реализация процесса обобщенного броуновского движения, использующее оценки показателя Херста для пачек отражений как априорную информацию.

Научная новизна

В рамках работы разработан и реализован новый оптимизационный алгоритм решения задачи сейсмической инверсии с ограничениями области решений за счет учета латеральной корреляции сейсмических данных и априорной геолого-геофизической модели. Разработан алгоритм для решения задачи в предположении статистической независимости акустических параметров разреза.

Так же в рамках работы впервые рассмотрено решение задачи сейсмической инверсии в более широком классе моделей, а именно моделей, параметры которых описываются, как реализация процесса обобщенного броуновского движения.

Практическая ценность. Затраты на бурение составляют большую часть общих расходов на разведку и разработку месторождений полезных ископаемых, поэтому оптимизация размещения скважин с учетом точной геолого-геофизической модели среды позволяет существенно увеличить рентабельность разведки и добычи.

Решение задачи сейсмической инверсии в рамках более широкого класса моделей с использованием дополнительных предположений о статистических свойствах среды позволяет получить более точный прогноз геологических свойств и снижение рисков при бурении.

Реализация результатов. Разрабатываемые в ходе работы алгоритмы получили программную реализацию в рамках пакета программ Prime3D (пакет развивается ООО «Сейсмотек»)

Апробация работы. Материалы, приведенные в работе были представлены на двух международных конференциях. В Санкт-Петербурге в 2008 году, доклад на тему «Применение неортогональных разложений при изучении сейсмических границ», авторы Кузуб Н.А, Логинов А.К. И на конференции ГеоМодель в 2010 году, доклад на тему «**ИНВЕРСИОННЫЕ МЕТОДЫ В ОБРАБОТКЕ СЕСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ**», авторы Логинов А.К, Фиников Д.Б.

Описание метода инверсии было опубликовано в журнале «Вестник МГУ» за 2012 году в статье «Подход к решению задачи расширения Фурье спектра сейсмической записи.», авторы Логинов А.К, Фиников Д.Б.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из шести глав введения и заключения, Материалы диссертации изложены на 105 страницах машинописного текста, проиллюстрированы 37 рисунками, список литературы содержит 60 наименований.

Благодарности. Работа выполнена на кафедре Сейсмометрии и Геоакустики Геологического факультета Московского университета имени М.В. Ломоносова в период обучения в аспирантуре под руководством доктора физ.-мат. наук, профессора Калинина В.В., которому автор выражает свою искреннюю благодарность.

Автор выражает благодарность кандидату тех. наук Финикову Д.Б. за консультации и дискуссии в вопросах построения алгоритмов сейсмической инверсии, совместную работу, критику и опробование созданных программных реализаций.

Так же автор хочет выразить признательность компании «ООО Деко-Геофизика», Гофману П.А. и Токареву М.Ю. за поддержку и помощь в ходе трех лет работы над диссертацией.

Светлая память Николаю Алексеевичу Кузубу, оказавшему неоценимое влияние на научное мировоззрение автора и направление его научной работы в целом, и этой диссертации в частности.

Глава 1. Обзор методов прогноза свойств геологической среды с использованием данных сейсмических исследований.

В первой главе работы приведен обзор различных подходов к прогнозированию свойств геологического разреза с использованием сейсмических данных. Показаны достоинства и ограничения этих методов, история их развития и указана область применения инверсии редких импульсов, как метода оценки свойств геологического разреза на ранних этапах разведки на акваториях при профильной системе наблюдения и малом количестве скважинной информации.

В настоящие время существует несколько подходов к решению задачи определения свойств геологической среды с использованием сейсмических данных, условно их можно разделить на три группы:

1. Геостатистическая инверсия.
2. Многоатрибутный анализ.
3. Сейсмическая инверсия.

Подход геостатистической инверсии, предложен впервые в работе (Haas , Dubrule, 1994), он позволяет вплотную приблизиться к решению задачи интеграции разнородной и разномасштабной информации (скважинной, сейсмической, геологической) в рамках единой модели. Этот подход является комбинацией инструментов геологического моделирования и решения прямой задачи сейсмики на основе скважинных данных. Метод позволяет получить недостижимую при иных подходах детальность модели, но успех подобного прогноза зависит от количества и качества скважинных данных и практически не реализуем при отсутствии трехмерных сейсмических наблюдений (К.Е. Филиппова и др,2011)

Описание многоатрибутного анализа приведено в работе (Dan Hampson и др 2001). Анализируемые данные состоят из ряда каротажных записей привязанных к кубу сейсмических данных. Прогнозируемый параметр может быть любого типа, в том числе и акустический импеданс, однако, наибольшего успеха удается добиться в прогнозировании пористости. По сейсмическим данным рассчитывается большой набор различных атрибутов. Далее по значениям сейсмических атрибутов и полученным корреляционным связям между сейсмическими и скважинными данными, значение целевого параметра предсказывается для всего объема куба сейсмических данных. Как отмечают авторы статьи, подобная процедура не является сейсмической инверсией в классическом понимании этого термина, так как, оператор инверсии L^{-1} заменяется некоторой линейной или нелинейной переходной функцией сейсмических атрибутов «обученной» на скважинных данных и, описывающей обнаруженные закономерности.

В подходе, называемом сейсмическая инверсия, сейсмические данные играют ключевую роль, а целевым прогнозируемым параметром геологической среды являются упругие импедансы, именно к этому классу относятся алгоритмы, рассматриваемые далее в данной работе.

В главе приведены ссылки и описания нескольких подходов к решению задачи сейсмической инверсии на основе обращения волнового уравнения для сейсмограмм разных удалений.

Но, как отмечается в ряде работ последних лет (Ампилов, 2009;Delprat-Jannaud & Lailly 2005) методы упругой инверсии на основе несуммированных данных в полноволновой постановке, имеют ряд недостатков, среди которых, слабая устойчивость, обусловленная объединением процессов миграции и инверсии в одну оптимизационную процедуру, что делает невозможным решение без жестких априорных ограничений на строение среды или практически невыполнимых требований к количеству и качеству экспериментальных данных, вследствие чего, эти методы не получили широкого распространения.

В тоже время, технологическое развитие получили алгоритмы инверсии полно- или частично-кратных суммированных сейсмических данных, базирующиеся на Борновской аппроксимации волнового уравнения. При этом компенсация всех возникающих при таком допущении некорректностей (наличие кратных волн и других помех, сложное распределение точек отражения, замешивание при суммировании данных, соответствующих разным углам падения, анизотропия свойств среды) проводится на этапе предварительной обработки, параметры которой, определяются в зависимости от характеристик съемки и геолого-физических условий района исследований(Ампилов, 2009).

Но, даже в такой постановке, задача сейсмической инверсии является некорректной, т.е одному набору сейсмических данных может соответствовать множество решений. А.Н. Тихонов (А.Н Тихонов,1986) предложил общий подход к решению подобных проблем, состоящий в замене исходной некорректной задачи, задачей отыскания минимума некоторого функционала, т.е решением задачи оптимизации с использованием того или иного критерия регуляризации.

В главе приведены описания ряд работ, опирающихся на оптимизационную постановку задачи инверсии, все эти работы предлагают ту или иную реализацию подхода получившего сейчас название CSSI(Constrained Sparse-Spike Inversion) или Инверсия Редких Импульсов с Ограничениями. В рамках этих методов ищется минимум функционала, определенного на основе исходных данных, априорных предположений и дополнительного условия малости решения в той или иной метрической норме или некоторой их комбинации — критерия максимальной разрежённости решения, так как, именно это - дополнительное условие, гарантирует единственность решения.

Глава 2. О связи критерия максимальной разряженности решения с предположением о статистических свойствах среды

Использования критерия максимальной разрежённости решения является реализаций принципа максимума энтропии предложенного Эдвином Джайнесом, как способа обработки физических экспериментов в случае, когда экспериментальных данных недостаточно, для выделения той или иной гипотезы

(Джайнис,1957). Это принцип гласит, что если ряд объектов соответствуют одному и тому же наблюдению, то каждому объекту приписывают некоторую априорную вероятность его реализации и, в качестве оценке искомого объекта, берут тот, априорная вероятность которого максимальна(Л.М. Сороко,1981).

Исходя из этого можно установить связь между конкретным видом критерия максимальной разрежённости— используемого ограничения на решение, и предполагаемой статистической моделью среды.

В главе сформулированы и доказаны следующие утверждения:

У(2.1) *Пусть* $R_n=(r_{1.}..r_m)$ *есть множество векторов длины m, задающих модель коэффициентов отражения, являющихся решением обратной задачи* $R_n=L^{(-1)}(U)$ *(здесь под* $L^{(-1)}$ *мы подразумеваем некоторый оператор решения обратной задачи, учитывающие, кроме результатов эксперимента, так же все доступные априорные данные), при этом все компоненты этого вектора являются* ***статистически независимыми*** *случайными величинами, плотность вероятности распределения значений которых, соответствует* ***нормальному закону****. Тогда для любой пары векторов* $R_i,R_j\in R_n$ *верно следующие: Если* $\|R_i\|_2<\|R_j\|_2$ *,то априорная вероятность* $P(R_i)>P(R_j)$.

У(2.2) *Пусть* $R_n=(r_{1.}..r_m)$, $R_n=L^{(-1)}(U)$, *компоненты этого вектора являются* ***статистически независимыми*** *случайными величинами, плотность вероятности распределения значений которых, соответствует* ***экспоненциальному закону****. Тогда для любой пары векторов* $R_i,R_J\in R_n$ *верно следующие: Если* $\|R_i\|_1<\|R_j\|_1$ *,то* $P(R_i)>P(R_j)$.

У(2.3) *Пусть* $R_n=(r_{1.}..r_m)$, $R_n=L^{(-1)}(U)$, *компоненты этого вектора являются* ***статистически независимыми*** *случайными величинами, с* **произвольной плотностью вероятности** *распределения значений. Тогда для любой пары векторов* $R_i,R_J\in R_n$ *верно следующие: Если* $\|R_i\|_0<\|R_j\|_0$ *,то* $P(R_i)>P(R_j)$ *, где .* $\|\|_0$, *задается следующим выражением* $\|R\|_0=\sum_1^n V(R), V(R)=\begin{matrix}1,|R|>0\\0,|R|=0\end{matrix}$.

Таким образом, предположение о статистической независимости коэффициентов отражения является **достаточным** условием для корректности инверсии редких импульсов с ограничениями , при этом, решение минимальное в норме $\|\|_0$ является оптимальным, так как корректно при любой плотности вероятности распределения значений акустического импеданса. Нужно отметить, что задача минимизации в норме $\|\|_0$ относится к классу NP-полных задач и не решаема за полиномиальное время.

Глава 3. Алгоритм инверсия редких импульсов с сохранением корреляции и учетом априорной модели импедансов

В третей главе приведена формальная постановка и метод итеративного решения задачи инверсии редких импульсов с ограничениями, позволяющая получить решение близкое к оптимальному за приемлемое время. Так же показан способ регуляризации с учетом априорной модели среды и, регуляризация на основе предположения о слабой латеральной изменчивости акустических импедансов. Приведены результаты тестирования алгоритма на синтетических данных, показана зависимость качества решения от корректности выбора параметров регуляризации .

В работе предполагается, что всеми средствами обработки сейсмическую трассу удается привести к виду, который удовлетворительно описывается следующей моделью(3.1) :

(3.1) $$\tilde{R}=AR+Q$$

Где A *- свёрточная матрица идеального нуль-фазового полосового фильтра с частотами среза* F_l *и* F_h *,* Q *- фильтрованная этим же фильтром помеха.*

$\tilde{R}$ *- вектор-столбец размерности m измеренных отсчетов трассы*

R *- неизвестный вектор размерности m отсчетов импульсной трассы*

Таким образом задача состоит в том, что бы по известным значениям $\tilde{R}$

найти R. Пусть $\Lambda=(\lambda_1,\lambda_2,\dots\lambda_m)$ - вектор собственных значений матрицы A отсортированных по возрастанию. Пусть Ψ_i - собственные вектора матрицы A. Тогда задав некоторое *k* запишем (3.2)

$$\beta_i=(\Psi_i,\tilde{R}),i=1\dots k$$
$$\tilde{\tilde{R}}=\sum_{i=1}^{k}\Psi_i\beta_i$$
$$\bar{R}=\sum_{i=1}^{m-k}\alpha_i\Psi_i+\tilde{\tilde{R}}$$

(3.2)

Исходя из свойств собственных значений свёрточной матрицы полосового фильтра можно утверждать, что при достаточно больших k любые значения α_i обеспечат удовлетворительное отображение в исходные данные. Таким образом, исходная задача сводится к нахождению коэффициентов (α_i) удовлетворяющих априорным предположениям и критерию максимальной разрежённости решения.

Поскольку использование критерия малости в норме $\|\|_0$ не возможно на практике, для реализации критерия используется гладкая аппроксимация в виде

$$F(\bar{R})=\sum_{i=1}^{m}U(\bar{R}_i)$$
$$U(x)=\begin{cases}1,|x|\geq\epsilon_1\\0,|x|<\epsilon_1\end{cases}$$

(3.3)

В качестве метода оптимизации используется так называемый метод вариционно-взвешенных мажорант Ньютона (Мудров В.И., Ивлев А.А, 1987). Который сводится к построению параболоидов мажорирующих функционал в точке $(R_i)_n$, экстремум построенного параболоида принимается за новое положения $(R_i)_{n+1}$ для следующий итерации, процесс продолжается пока норма разности решений на соседних шагах не станет меньше наперед заданного порога $\|(R_i)_{n+1}-(R_i)_n\|_2<d$. Система уравнений определяющих минимум такого параболоид для n+1-го шага оптимизации имеет следующую матричную запись(Мудров В.И.,

Ивлев А.А 1987):

(3.4) $$(B^T*Y)*X^{(n+1)}=G$$

Здесь B^T это матрица составлена из собственных векторов Ψ_i соответствующих малым собственный числам(с номерами более k) , $X^{(n+1)}$ - вектор неизвестных коэффициентов α_i . Матрица Y и вектор G имеют следующий вид:

(3.5) $$Y=\begin{pmatrix} \Psi_{k1}*U_1^{(n)} & ... & \Psi_{km}*U_1^{(n)} \\ ... & ... & ... \\ \Psi_{m1}*U_m^{(n)} & ... & \Psi_{mm}*U_m^{(n)} \end{pmatrix}\ ;\ G=g1_{1.}..g_{m-k}:g_l=\sum \Psi_{(k+n)\,j}*U_j^{(n)}*\tilde{\bar{R}}_j$$

Таким образом, получается система из m-k линейных уравнений на каждой итерации.

Пусть так же задана некоторая априорная модель, соответствующая сейсмической трассе R имеющей набор неизвестных коэффициентов (a_i) . Модель задана вектором значений импедансов $P=p_1...p_m$. Разложив ее производную в базисе собственных векторов матрицы A получим, так же, как в выражение 3.2 коэффициенты базового разложения, и коэффициенты соответствующие искомым.

(3.6) $$P'=\sum_1^k G_i*\Psi_i+\sum_k^M g_j*\Psi_j$$

Теперь зададим систему уравнений , описывающую функционал, минимум которого соответствует модельному решению:

(3.7) $$Y_2*X^{(n+1)}=G_2$$
$$Y_2=\begin{pmatrix} 1 & ... & 0 \\ ... & 1 & ... \\ 0 & ... & 1 \end{pmatrix}\ ;\ G_2=a_j-(a_j-g_j)*\epsilon_2$$

Опираясь на то , что сумма двух мажорирующих разные функционалы параболоидов имеет минимум там же, где и параболоид мажорирующий сумму функционалов, можем дополнить выражение 3.4 следующим образом:

(3.8) $$((B^T*Y)+Y_2)*X^{(n+1)}=G+G_2$$

Выражение (3.8) задает систему уравнений, итеративное решение которой, позволяет получить максимально импульсное решение с учетом априорной модели. Практика показывает, что достаточно нескольких десятков итераций для получения удовлетворительного решения.

При этом матрица Y зависите от параметра ϵ_1 ,а векто G_2 от параметра ϵ_2 . В практических случаях первый параметр должен быть тем больше, чем больше помех в исходной трассе, а второй параметр тем больше, чем достовернее априорная модель, таким образом, большой уровень помех можно компенсировать детальной априорной моделью.

Так же в главе рассмотрено применение когерентной фильтрации весовых функций 3.3, как метод регуляризации решений по пространству, вопросы программной реализации и способы повышения скорости вычисления для современных процессорных архитектур.

Приведен пример применение алгоритма для синтетических данных, последовательность предварительной обработки и результаты на различных шагах описанных выше вычислений. Показана и описана зависимость качества решения — коэффициент корреляция истиной модели с полученной, в зависимости от параметров регуляризации и соотношения сигнал\шум в исходных данных.

В заключении главы приведен способ и результаты применения алгоритма на этапе обработки данных для решения задачи повышения видимого разрешения сейсмической записи.

Глава 4. Квазипереодический, случайный и монотонный характер изменения акустических свойств с глубиной.

В четвертой главе рассмотрено ряд публикаций за последние 20 лет, демонстрирующих наличие эффектов статистической зависимости между акустическими параметрами среды.

Так в работах (A. Frankel,R. Clayton 1986), (Садовский Писаренко, 1991) приводятся выводы о глобальном самоподобном строении литосферы в масштабах десяток и сотен километров, имеющем проявление в низкочастотных сейсмических полях, порожденных искусственными и естественными землетрясениями.

Ряд работ(Gritto и др,1994, Kneib и др 1995, Holliger, 1996) посвящены оценке статистических и спектральных свойств распределения акустических параметров по каротажным данным. В этих работах отмечается наличие статистической зависимости значений параметров на разных глубинах, и предложена модель обобщенного броуновского движения, как способ описания подобных сред.

Обобщение классического броуновского движения, то есть процесса характеризуемого случайным в момент времени(а в рассматриваемом случае на интервале глубин) приращением значения, было введено в работе(Мандельброт,Ван Несс, 1968), как случайный гауссов процесс с математическим ожиданием равным нулю и автоковариационной функцией описываемой следующим выражением(5.1):

(5.1) $$A(t,\tau)=(|t|^{2H}-|t+\tau|^{2H}+|t-\tau|^{2H})$$

Где H это действительное число, называемое в работе(Мандельброт,Ван Несс, 1968) показатель Херста.

В работах (T. Browaeys, S. Fomel , 2007;Herrman,2002; Кузуб, 2003; Кузуб Н.А. , Логинов А.К., 2006; Anstey, 2002 и др.) показано, что наличие статистической зависимости и корреляции между коэффициентами отражения имеет проявления в сейсмическом диапазоне частот, и предложена модель описывающая изменения акустических параметров с глубиной, как реализацию процесса обобщенного броуновского движения с нестационарными по глубине параметрами.

В главе приведены ссылки на работы, в которых рассматриваются различные методы численного моделирования распространения волновых полей в подобных средах (Рок,2007; T. Browaeys, S. Fomel , 2007;). Метод, используемый в работе (T. Browaeys, S. Fomel , 2007;) предполагает сверх-детальную модель среды и численное решение волнового уравнения для упругих сред методом конечных разностей. Метод решения в работе (Рок,2007) опирается на макроскопические эффективные математические модели описания среды содержащей однородно распределенные статистически зависимые элементы.

В заключении главы описаны некоторые методы оценки статистических характеристик разреза по скважинным и сейсмическим данным. В частности, отмечено, что подобная оценка по скважинным данным весьма неустойчива и неоднозначна. Оценка по сейсмическим данным возможно только в предположении стационарности статистических характеристик процесса в больших по сравнению с длиной сейсмического импульса интервалах глубин и отсутствии интерференции отражений от пачек слоев с разными статистическими параметрами.

Глава 5. Математическое моделирование распространение нормальной плоской волны в горизонтально слоистых средах с монотонным и квазипереодическим строением

В работе было проведено математическое моделирование отражений нормальной плоской волны от пачки слоев, акустические импедансы которых описываются дробным броуновским движением с различным значением показателя Херста(H) (рис 5.1), а последовательность коэффициентов отражения производной от их логарифмов, т.е дробным гауссовым процессом.

В качестве метода построение случайной модели с заданным H был использован метод из работы (A.T.A. Wood, G. Chan,1994). Моделирования распространения сейсмических волн проводилось исходя из двух приближений: приближения Борна, позволяющего предсказать только первичные отражения, и приближения Гоупилауда(Goupillaud, 1961), позволяющего предсказать еще и кратные отражения.

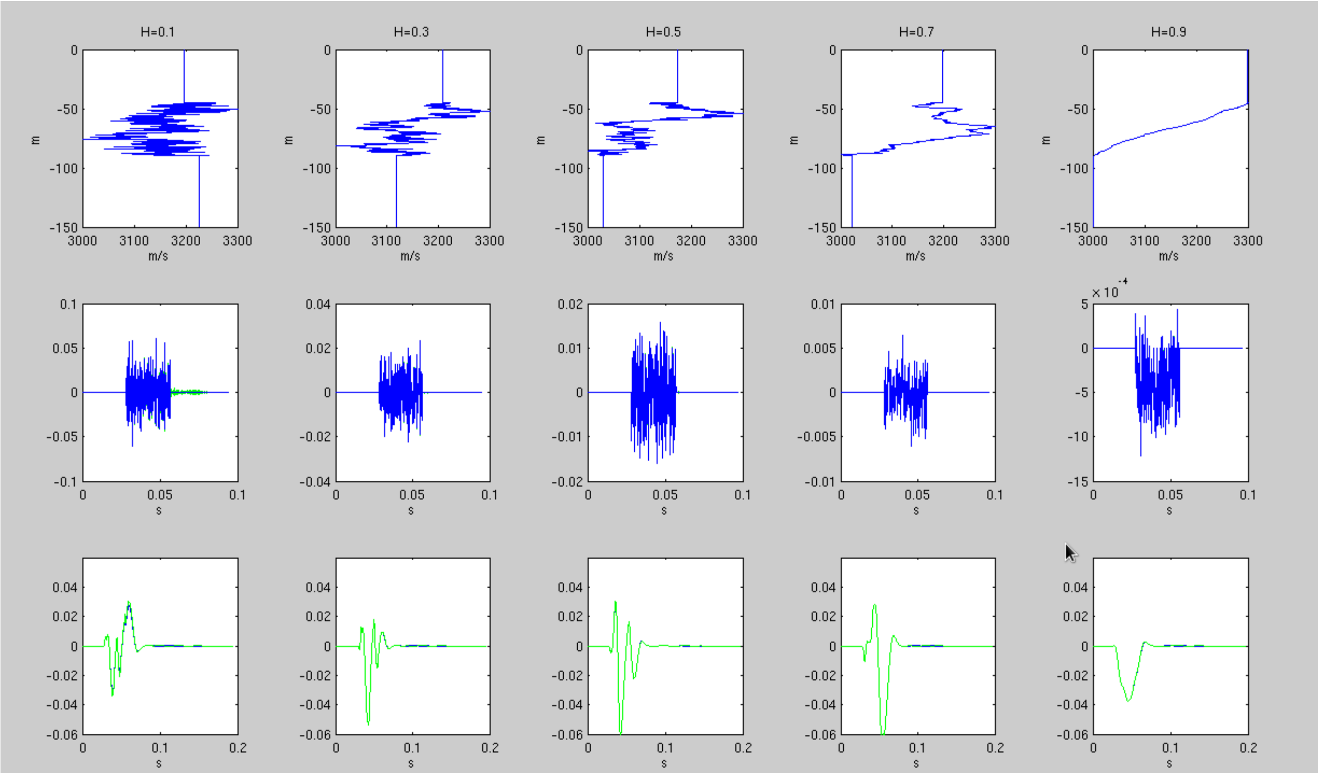

Рис. 5.1 Примеры сред и полученных сейсмических трасс. Параметр H возрастает слева направо. В верхнем ряду модели скоростей продольных волн, в глубинном масштабе. Во втором сверху ряду модели коэффициентов отражения во временном масштабе, в нижнем ряду полученные сейсмические трассы.

При расчете коэффициентов отражения предполагалась, что зависимость плотности пород от скорости продольных волн соответствует соотношению Гарднера, в качестве модельного импульса использовался импульс Пузырева (Пузырев и др, 196?) с центральной частотой 40 Гц. Моделируемая пачка (рис 5.1) слоев имеет мощность 60 м, средняя скорость продольных волн около 3000 м/с, вариация скорости в пачке 300 м/с. Глубинные модели дискретизированы с интервалом 0.15 м характерным для современных каротажных записей. Далее глубинные модели импедансов пересчитывались во временной масштаб в соответствии с модельным скоростным законом. С целью установить характерные закономерности для отражений от подобных пачек слоев, было создано в общей сложности около 10000 реализаций пачек с варьированием показателя H, и измерено ряд амплитудно-частотных характеристик по рассчитанным синтетическим трассам.

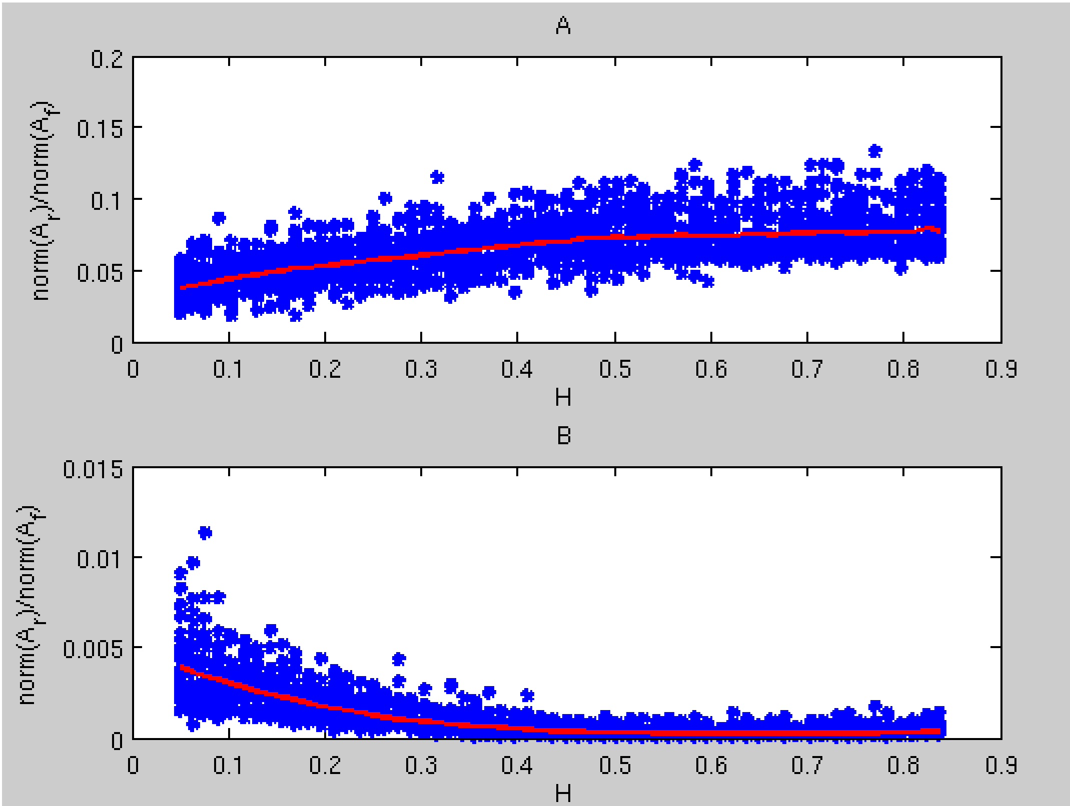

Рис 5.2 По оси абсцисс показатель H соответствующей модели, по оси ординат отношение энергии падающего и отраженного импульса, сверху(A) вся отраженная энергия, снизу(B) только энергия кратных волн, максимальное изменение скорости в пачки для всех моделей 300 м\с.

Из результатов моделирования (рис 5.2) видно, что энергия отражения находится в зависимости от корреляционных свойств пачки слоев, при этом, при увеличении параметра H количество отраженной энергии увеличивается. Здесь можно отметить, что абсолютные значения коэффициентов отражения (рис 5.1) для пачек с монотонным характером изменения импеданса напротив меньше, т.е для пачек, строение которых, удовлетворяет монотонному или квазипериодическому закону наблюдается обратная зависимость между средним значением коэффициента отражения и отраженной энергией.

Объяснением этого эффекта может служить анализ спектров отраженных сигналов, для сред с квазипериодическим строением максимум энергии приходится на высокие частоты, т.е. максимум спектра отраженного импульса смещается по сравнению с максимум падающего в сторону высоких частот, для сред с монотонным, напротив, смещается в сторону низких.

Анализируя соотношение полной энергии отраженного сигнала к энергии короткопериодных кратных волн генерируемых внутри пачки(рис 5.2), можно отметить наличие эффекта увеличения вклада кратных волн с убыванием показателя Херста. Но, при колебаниях скоростей в пределах сотней метров в секунду, этот вклад менее 10 процентов для квазипериодических (H<<0.5) сред и приближается к нулю для хаотических(H=0.5) и монотонных(H>0.5) . Как показал дальнейший анализ, этот вклад может достигать половины суммарной энергии при колебаниях скорости в масштабах первых тысяч метров в секунду, и ярко выраженным квазипереодическим строением пачки.

Глава 6. Сейсмическая инверсия для сред с монотонным или квазипереодическим характером изменения параметров.

В главе сформулирован критерий гарантирующий оптимальность решения с точки зрения априорной вероятности для сред с монотонным и квазипериодическим строением. Показано, что этот критерий зависит от конкретных корреляционных свойств среды, в частности, различен для сред, параметры которых могут быть описаны как реализация процесса обобщенного броуновского движения с разным показателем H. Сформулировано и доказано следующие утверждение:

У6.1 *Пусть* $R_n = (r_1 .. r_m)$ *множество векторов-решений обратной задачи , удовлетворяющих экспериментальным данным и всем априорным предположениям, кроме того, предположим, что* R_n *представляет собой стационарный коррелированный гауссов процесс и известна его ковариационная* *функция* $\Psi(R_n, \tau) = \mathrm{A}(\tau)$ *тогда наибольшей априорной вероятностью реализации имеет та последовательность* , *мера Махаланобиса которой, для заданной автоковариационной функции, наименьшая. Утверждение 2.1 является частным случаем для единичной автокорреляционной функции.*

Поскольку минимум в мере Махаланубиса с ковариационной матрицей отличной от единицы и минимум в мере $\|\|_0$, не могут совпадать, можно сделать вывод, что решение в рамках традиционного подхода инверсии редких импульсов может давать неверный результат для сред характеризуемых монотонным или квазипериодическим строением.

В тоже время сконструировать некоторое общее решение без информации о статистических свойствах среды не представляется возможным, так как критерий на основе априорной вероятности зависит от этой характеристики среды. В связи с этим, был разработан обобщенный алгоритм инверсии, способный учитывать особенности сигнала вызванные корреляционными свойствами среды, как новый, дополнительный вид априорной информации.

Показано, что решение задачи прогноза акустических свойств для сред с авто-коррелированным строением может быть найдено как решение системы уравнений имеющих следующую матричную запись:

$$(\tilde{R} - Q) * C^{-1} = A\breve{R} \qquad (6.1)$$
$$R = \breve{R} * C$$

Где A *- сверточная матрица идеального нуль-фазового полосового фильтра с частотами среза* F_l *и* F_h *,* Q *- фильтрованная этим же фильтром помеха.*

$\tilde{R}$ *- вектор-столбец размерности m измеренных отсчетов трассы*

R *- неизвестный вектор размерности m отсчетов импульсной трассы*

— *ковариационная матрица процесса обобщенного броуновского движения m x m, и обратная ей.*

Априорные корреляционные свойства заданные матрицей С могут описываться гладкой по времени и глубине функцией, что позволяет производить прогноз акустических свойств в рамках нестационарной априорной статистической модели. Для решения системы уравнения (6.1) может использоваться тот же метод, что описан в главе 3.

Далее в главе рассмотрено применение алгоритма для синтетических сейсмических данных полученных на основание реальной глубинно-скоростной модели, построенной по результатам каротажных исследований в скважине на восточном шельфе северной Америки.

На основании анализа каротажной кривой была построена статистическая модель (рис 6.1). На основании которой, вычислена ковариационная матрица C и обратная ей входящие в систему уравнений 6.1.

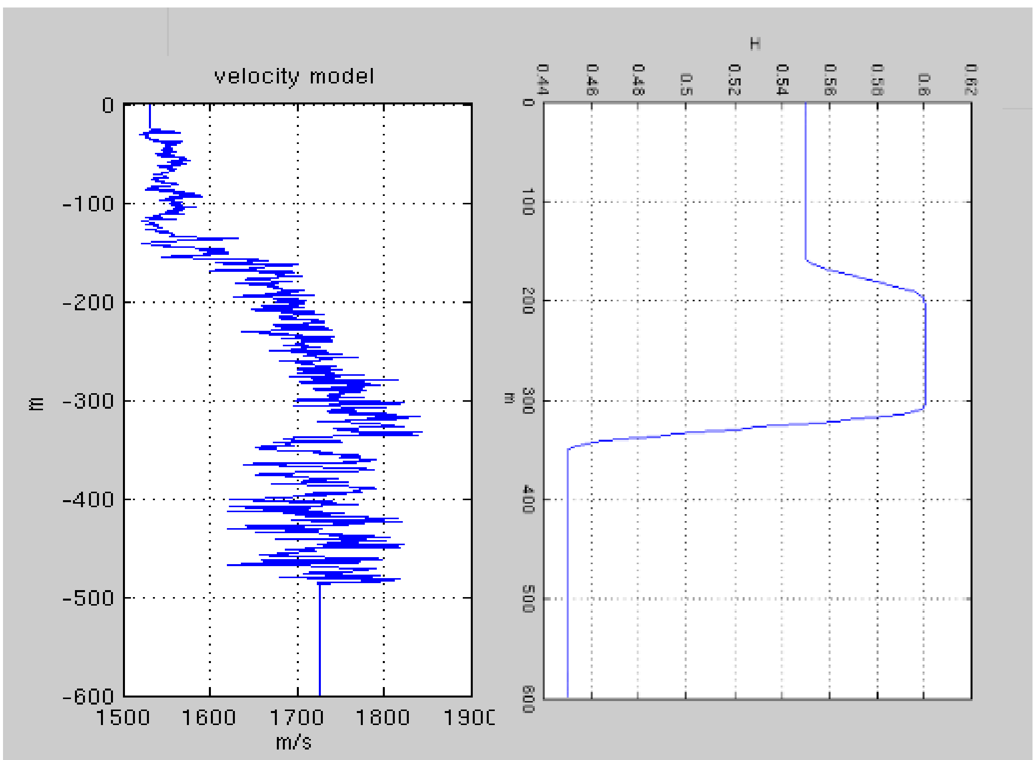

Рис 6.1 Слева- каротажная кривая скоростей продольных волн скважина ODP 164_994, справа - априорная статистическая модель.

Было предпринято две попытки решения задачи сейсмической инверсии. В первом случаи инверсия проводилась в предположение статистической независимости акустических параметров, а во втором с учетом построенной нестационарной статистической модели.

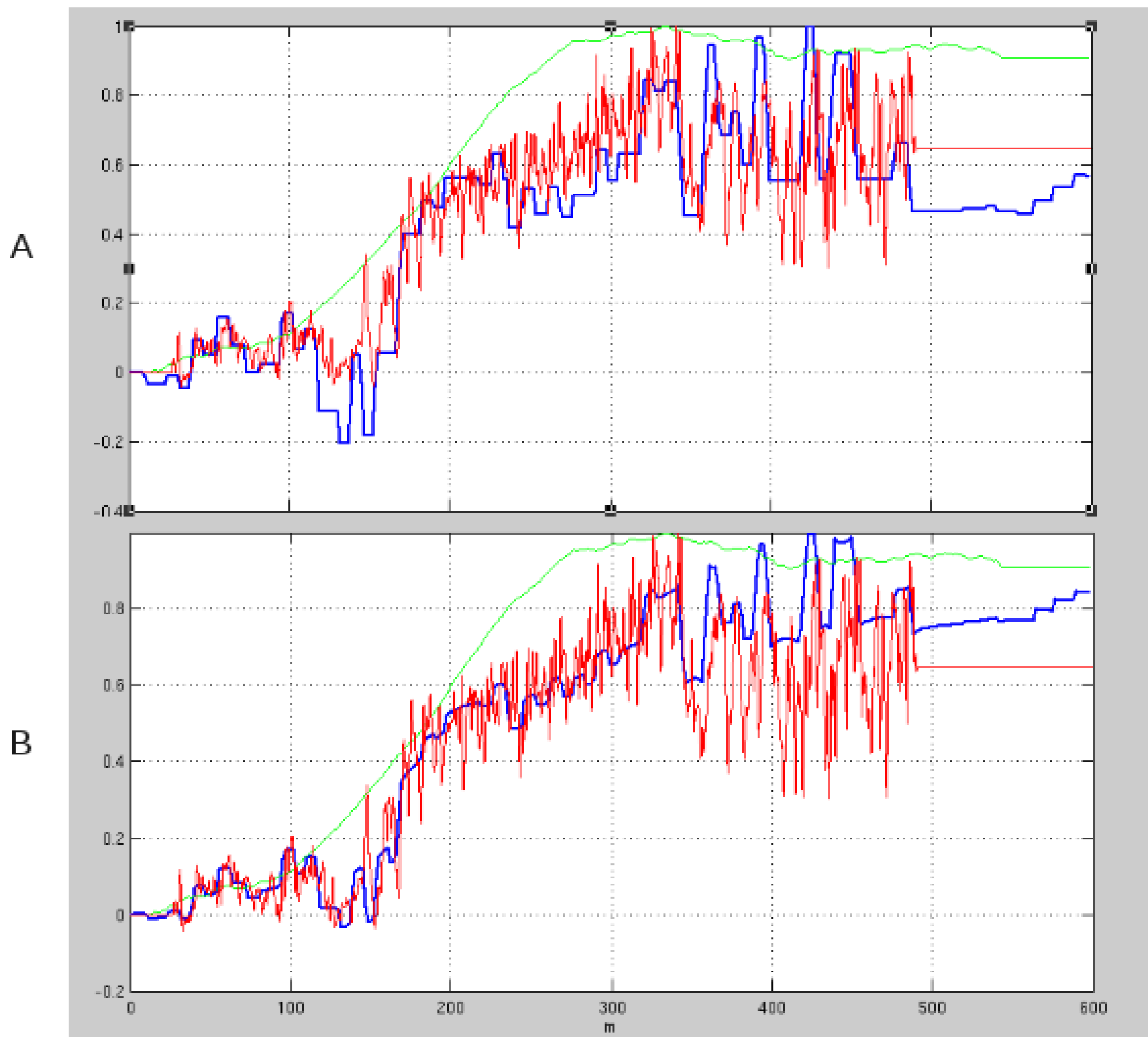

Рис 6.2 Зеленым начальная априорная модель импедансов, красным истинная, синим — полученное решение. A — в предположении о независимости акустических параметров. B — с учетом априорной статистической модели.

Сравнение результатов приведено на (рис 6.2). Как можно видеть, решение с учетом нестационарной статистической модели среды имеет лучшую корреляцию с истинной моделью.

Заключение

В заключении перечислены основные результаты работы.

- Решена задача разработки алгоритма сейсмической инверсии,, было сформулировано и строго доказано ряд утверждений, из которых следует, что наиболее вероятное решение для сред с статистически независимыми параметрами находятся в минимуме функционалов, заданных различными векторными нормами, при том, порядок нормы связан с предполагаемыми статистическими параметрами распределения значений. Вектор-решение минимальное в норме L0 является наиболее вероятным при любом распределении значений параметров — и потому оптимально, но минимизация в этой норме не осуществима за приемлемое время.
- Разработан алгоритм, реализующий близкое приближение к оптимальному решению. Алгоритм показал хорошие результаты на синтетических данных, позволяет учитывать априорные данные в виде грубых и сглаженных моделей акустических импедансов, и строить устойчивые решения за счет использования различного рода способов регуляризации решений.
- На основе разработанного алгоритма была реализована программа для обрабатывающей системы Prime3D, позволяющая расширить частотный диапазон сейсмической записи и повысить видимое разрешение, то есть использовать инверсионный подход в задаче построения сейсмического изображения.
- Проведено математическое моделирование распространения нормально падающей плоской волны на пачку слоев в среде описываемой, как реализация процесса обобщенного броуновского движения с

различными значениями показателя Херста. На основе проведенного моделирования показано, что, несмотря на то, что среды с квазипериодическим строением генерируют большое количество энергии короткопериодных кратных волн, чем монотонные и хаотичные среды, их суммарная энергия относительно мала по сравнению с энергией первичных отражений.

- Далее доказано, что для сред, параметры которых описываются как реализация процесса обобщенного броуновского движения с показателем Херста отличным от 0.5, инверсия редких импульсов, может давать неверный результат. Для таких сред наибольшей априорной вероятностью обладают решения минимальные в мере Махаланубиса, с ковариационной матрице соответствующей рассматриваемому процессу и характеру корреляции.
- Разработан алгоритм решения, позволяющий использовать известную нестационарную статистическую модель среды в качестве дополнительных априорных данных в процессе прогноза акустических свойств разреза.

Публикации по теме диссертации.

Логинов А.К, Фиников Д.Б. «Подход к решению задачи расширения Фурье спектра сейсмической записи». Вестник МГУ, сер. N4, Геология, Москва 2012 г.

Кузуб Н.А.. Логинов А.К.. «Применение неортогональных разложений при исследовании сейсмических границ», EAGE, Международная конференция <Санкт-Петербург 2008>, тезисы докладов.

Логинов А.К., Фиников Д.Б. «Инверсионные методы в обработке сейсмических данных», EAGE, Международная конференция <Геленджик 2010>, тезисы докладов.