

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки Прикладная математика и информатика
Кафедра прикладной математики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**Разработка и исследование методов сжатия сложных сигналов на
основе оптимальной и субьоптимальной обработки фазочастотных
характеристик**

УДК 550.34.01:004

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
--------	-----	---------	------

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
-----------	-----	---------------------------	---------	------

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
-----------	-----	---------------------------	---------	------

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
-----------	-----	---------------------------	---------	------

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	Гергет Ольга Михайловна	К.Т.Н.	Подпись	Дата
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

Томск – 2016 г.

Запланированные результаты

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Способность проводить научные исследования и получать новые научные и прикладные результаты с использованием углубленных теоретических и практических знаний в области прикладной математики и информатики
P2	Умение использовать междисциплинарные знания при определении задач математического моделирования объектов и явлений в различных предметных областях
P3	Способность применять полученные <i>профессиональные</i> знания для определения, формулирования и решения производственных задач и обоснованно выбирать <i>эффективные</i> методы проектирования для достижения <i>новых</i> результатов.
P4	Способность осуществлять социально-ориентированную деятельность в соответствии с корпоративной политикой, с соблюдением норм профессиональной этики
P5	Способность осуществлять педагогическую деятельность по профилю специализации и разрабатывать учебно-методические комплексы для электронного и мобильного обучения.
P6	Способность эффективно осуществлять организационно-управленческую, консалтинговую и консорциумную деятельность
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P7	<i>Свободно</i> владеть <i>иностранным языком</i> на уровне, позволяющем работать в международных проектах.
P8	Эффективно работать <i>индивидуально (или в качестве члена команды)</i> или <i>руководителем</i> производственного или научного коллектива по междисциплинарной тематике, демонстрировать ответственность за результаты работы.
P9	<i>Самостоятельно учиться</i> и непрерывно <i>повышать квалификацию</i> в течение всего периода профессиональной деятельности, расширять и углублять свое научное мировоззрение. Способность к интеллектуальному, культурному, нравственному и профессиональному саморазвитию.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки Прикладная математика и информатика
Кафедра Прикладной математики

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
8БМ41	Злобиной Елене Вячеславовне

Тема работы:

Утверждена приказом директора Института кибернетики (дата, номер)	
---	--

Срок сдачи студентом выполненной работы: (дата)

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <small>(наименование объекта исследования; документы конференции и отчеты НИИР; программное обеспечение).</small>	
	Фазочастотные характеристики функции известных импульсов, фрагменты разреза Крапивинское месторождения, Результаты ранее разработанных алгоритмов на фазочастотного прослеживания, лгоритм корректирующей деконволюции Е.А, Козлова, Г.Н. Гогоневкова

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования; содержательная, концептуальная, математическая структурная модель; разработка алгоритма решения задачи; выбор программного обеспечения; индивидуальные выводы о практической значимости проведенных исследований; дополнительные разделы, подлежащие разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Известные алгоритмы деконволюции, в частности алгоритм корректирующей деконволюции, новый алгоритм фазочастотного прослеживания, анализ разрешающей способности на моделях и реальных данных.</p>
--	--

<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
--	--

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>

Раздел	Консультант
<p>Финансовый менеджмент. Ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Конотопский Владимир Юрьевич</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Анищенко Юлия Владимировна</p>
<p>Английский язык</p>	<p>Сидоренко Татьяна Валерьевна</p>

<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>
<p>2.3 Разработка алгоритма фазочастотного прослеживания сейсмических волн</p>
<p>3 Разработка алгоритма корректирующей деконволюции сейсмических</p>

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>доцент</p>	<p>Кочегуров А.И.</p>	<p>К.Т.Н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>8БМ41</p>	<p>Злобина Е.В.</p>		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 128 с., 29 рис., 11 табл., 62 источников, 3 прил.

Ключевые слова: сейсмическая разведка, сложные сигналы, фазочастотные характеристики, деконволюция (обратная фильтрация), алгоритм корректирующей деконволюции, оптимальные и субоптимальные методы, алгоритм фазочастотного прослеживания.

Объектом исследования является интерференционное волновое сейсмическое поле

Цель работы – разработка алгоритмического и программного обеспечения для сжатия сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик, а также исследования эффективности предложенных методов на статистических моделях волновых полей.

В процессе исследования проводились анализ существующих методов обработки сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной фазочастотных характеристик, а также алгоритмов деконволюции.

В результате исследования выявлено, что использование алгоритмов фазочастотного прослеживания в задачах обработки и интерпретации сейсмических данных позволяет добиться большего разрешения на записи при исследовании тонкослоистых сред, где существующие методы деконволюции не всегда обеспечивают требуемую точность восстановления отражающих границ.

Степень внедрения: Разработанные в рамках магистерской диссертации методы и алгоритмы будут использованы для проведения обработки реальных сейсмических данных в программно-алгоритмическом комплексе «Геосейф», созданным сотрудниками кафедры прикладной математики.

Область применения: разработанные алгоритмы могут применяться в задачах обработки и интерпретации сейсмических данных, при сжатии сложных сигналов.

Экономическая эффективность работы, в высокой научной значимости и актуальности поставленной задачи.

В будущем планируется проводить исследование и улучшение разрешающей способности алгоритмов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик.

Обозначения и сокращения

АЧХ – амплитудночастотная характеристика;

АКФ – автокорреляционная функция;

ДПФ – дискретное преобразование Фурье;

И – исполнитель;

МОВ – метод отраженных волн;

НИР – научно-исследовательская работа;

НР – научный руководитель;

ОГТ – общая средняя точка;

ОТВ – общая точка возбуждения;

ОТП – общая точка приема;

ПВ – пункт взрыва;

ПП – пункт приема;

ФЧП – фазочастотное прослеживание;

ФЧХ – фазочастотная характеристика;

Содержание

Введение.....	10
1 Анализ существующих методов сжатия сложных сигналов при обработке и интерпретации данных сейсморазведки.....	14
1.1 Понятие сложных сигналов	14
1.2 Задачи сжатия сигналов при обработке и интерпретации сейсмической информации	17
1.3 Методы деконволюции для повышения разрешения сейсмических записей.....	22
1.3.1 Деконволюция сжатия (импульсная деконволюция).....	23
1.3.2 Предсказывающая деконволюция.....	25
1.3.3 Поверхностно-согласованная деконволюция	26
1.4 Проблемы, возникающие при реализации алгоритмов деконволюции. Постановка задачи.....	29
2.1 Метод фазочастотного прослеживания сейсмических сигналов.....	30
2.1.1 Оптимальная обработка ФЧХ.....	30
2.1.2 Равновесная обработка	34
2.1.3 Неравновесная обработка.....	35
2.2 Применение метода фазочастотного прослеживания для сжатия сейсмических сигналов.....	36
2.3 Разработка алгоритма фазочастотного прослеживания сейсмических волн	37
2.3.1 Построение математической модели волнового сейсмического поля	37

2.3.2 Разработка и реализация алгоритма фазочастотного прослеживания в математическом пакете MATLAB	43
3 Разработка алгоритма корректирующей деконволюции сейсмических записей.....	53
3.1 Метод корректирующей деконволюции.....	53
3.2 Разработка алгоритма корректирующей деконволюции для принятой модели сейсмического поля	55
3.3 Реализация алгоритма корректирующей деконволюции в математическом пакете MATLAB.....	59
4 Исследование надежности разработанных алгоритмов на модели сейсмических записей.....	62
4.1 Оценка разрешающей способности алгоритма корректирующей деконволюции.....	62
4.2 Оценка разрешающей способности фазочастотных алгоритмов	64
4.3. Сопоставление рассмотренных алгоритмов	67
5 Примеры реализации фазочастотных алгоритмов на реальных данных	68
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективности ресурсосбережение	71
6.1 Организация и планирование работ.....	71
6.1.2 Расчет накопления готовности проекта.....	75
6.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта	76
6.2.1 Расчет затрат на материалы	77
6.2.2 Расчет заработной платы.....	77
6.2.3 Расчет затрат на социальный налог	78
6.2.4 Расчет затрат на электроэнергию	79

6.2.5 Расчет амортизационных расходов.....	80
6.2.6 Расчет прочих расходов	81
6.2.7 Расчет общей себестоимости разработки.....	81
6.2.8 Расчет прибыли	81
6.2.9 Расчет НДС	82
6.2.10 Цена разработки НИР	82
6.3 Оценка экономической эффективности проекта.....	82
6.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР	83
7 Социальная ответственность	86
7.1 Производственная безопасность	86
7.2 Экологическая безопасность	91
7.3 Защита в чрезвычайных ситуациях.....	92
7.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .	93
Заключение	95
Список публикаций студента	97
Список использованных источников	98
Приложение А. Английская часть.....	104
Приложение Б. Программная реализация алгоритма фазочастотного прослеживания сейсмических волн в математическом пакете MATLAB	124
Приложение В. Программная реализация алгоритма корректирующей деконволюции в математическом пакете MATLAB.....	126

Введение

В настоящее время для передачи и приема информации в таких областях, как радиолокация и навигация, акустика и геофизика и т.д. достаточно широко используются сложные сигналы. Особое место они занимают при проведении сейсмических исследований в задачах поиска нефтяных и газовых месторождений.

Сейсмическая разведка является одним из важнейших видов геофизической разведки. Она основана на изучении распространения созданных искусственно упругих волн в земной коре, которые распространяются через земную толщу и регистрируются приемниками, расположенными по профилю наблюдения. Учитывая, что источником возникновения волн, является взрыв, основная энергия формируемых сейсмических сигналов сосредоточена в полосе от 10 до 80 Гц, а их длительность составляет порядка 100 мс. Поэтому данные сигналы, безусловно, относятся к классу сложных сигналов. Исследование с их помощью разнообразных физических явлений на поверхности земли, в горных выработках и скважинах позволяет делать выводы о структурных особенностях и составе горных пород, наличии залежей полезных ископаемых [1]. Измеряя время распространения волн, и исследуя характер колебаний почвы, можно определить глубину залегания и форму тех геологических границ, на которых произошло преломление или отражение волны, а также составить суждение о составе пород, через которые прошла волна [2].

Относительно неглубоко залегающие месторождения постепенно истощаются, а поиск и разработка новых нефтегазовых структур существенно сложнее из-за глубины залегания, поверхностных условий и геологического строения. При этом поиск месторождений особенно усложняются, когда приходится исследовать тонкослоистые среды, с мощностью пластов 30-40 метров. В этих условиях регистрируемые сейсмические волны от отражающих горизонтов накладываются друг на друга, образуя сложную

интерференционную картину. В зонах интерференции существенно усложняется задача прослеживания волн, в которую входит обнаружение волн, их идентификация и оценка временного положения сигнала. Кроме того, как правило, приходится осуществлять прослеживание волн, когда форма сигналов неизвестна. В таких ситуациях трудно идентифицировать отражающие горизонты, а, следовательно, для решения задач прослеживания нужны новые методы, использующие всю априорную информацию о комплексных спектрах сложных сигналов. К сожалению, в настоящее время при прослеживании волновых сейсмических полей широко применяют лишь одну составляющую спектров, связанную с их амплитудой. Относительно фазовых соотношений вводятся лишь некоторые предпосылки, например линейная фазочастотная характеристика (ФЧХ). На таких принципах построены практически все методы деконволюции, служащие для сжатия сигналов, с целью их разрешения в зонах интерференции. Однако, именно в фазу сейсмических сигналов, а вернее, в сложный закон изменения их фазовых спектров, заложена важная информация о местоположении отражающих границ, типе скоростного разреза, поглощающих и дисперсионных свойствах слоистых сред [3,4,5,6]. На этой основе могут быть синтезированы фазочастотные алгоритмы прослеживания сейсмических волн, позволяющие в условиях априорной неопределенности относительно формы исследуемых волн обнаруживать и разрешать сигналы на фоне интенсивных помех и получать надежные оценки их параметров.

Целью работы является разработка алгоритмического и программного обеспечения для сжатия сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик, а также исследования эффективности предложенных методов на статистических моделях волновых полей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ существующих методов сжатия сложных сигналов;
- 2) построить математическую модель сейсмической записи;

3) выбрать базовый метод деконволюции и на его основе построить алгоритм для реализации в пакете Matlab;

4) разработать алгоритмы для сжатия сложных сигналов на основе ранее разработанных методов фазочастотного прослеживания;

5) исследовать разработанные алгоритмы на моделях сейсмических записей, получаемых при поиске нефтяных и газовых месторождений;

6) провести сравнение эффективности новых алгоритмов с алгоритмом деконволюции.

Объектом исследования является интерференционное волновое сейсмическое поле. **Предметом исследования** являются спектральные и временные характеристики интерференционного волнового поля.

Научная новизна работы заключается в поиске новых способов реализации алгоритмического и программного обеспечения для сжатия сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик, позволяющие увеличить разрешение сейсмических данных и повысить отношение сигнал/шум.

Практическая значимость работы заключается в разработке алгоритмов и их программной реализации для исследования тонкослоистых геологических сред.

Реализация работы. Разработанные в рамках магистерской диссертации методы и алгоритмы будут использованы для проведения обработки реальных сейсмических данных в программно-алгоритмическом комплексе «Геосейф», созданным сотрудниками кафедры прикладной математики.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на III Международной научной конференции «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине» и опубликованы в журнале «Известия ТПУ».

Первый раздел в области постановки задачи выполнен совместно с руководителем (50%). Обзор литературы проведен самостоятельно.

Составление математической модели, выбор метода расчета и обсуждение результатов работы проведены совместно с руководителем (50%). Разработка алгоритма, программная реализация и вычислительные эксперименты выполнены самостоятельно.

1 Анализ существующих методов сжатия сложных сигналов при обработке и интерпретации данных сейсморазведки

Сложные сигналы достаточно широко используются для передачи и приема информации в радиолокации, навигации, акустики, широкополосной связи, геофизике и т.д. Особую роль они играют при проведении сейсмических исследований, проводимых при поиске нефтяных и газовых месторождений. Рассмотрим предварительно, какие сигналы относятся к классу сложных.

1.1 Понятие сложных сигналов

Прежде всего, отметим, что сигналом называется материальный носитель информации. Теперь определим базу сигнала. Базой называется произведение ширины спектра на его длительность[6]:

$$B = \Omega \cdot T .$$

Сигналы с $B \leq 1$ называются простыми, а с $B > 1$ – сложными. Сложные сигналы, в свою очередь можно разделить на дискретные, частотные и дискретные частотные. Такое разделение основывается на том, что любой сложный сигнал может быть представлен в виде суммы простых ортогональных функций, причем выбор ортогональных функций определяется характером исходного сигнала. В то же время частотные сигналы разделяются на широкополосные и узкополосные. Сигнал называется широкополосным, если

$$\Omega \geq \omega_0 ,$$

и узкополосным, если

$$\Omega \ll \omega_0 ,$$

где ω_0 – основная частота сигнала, т.е. частота, на которой сосредоточен максимум энергии.

Следует отметить, что к классу широкополосных сигналов относятся и шумоподобные сигналы, спектр которых является сплошным и практически равномерным [8]. Широкополосные сигналы могут быть односторонними и двусторонними функциями времени. Сигнал является односторонним, если $s(t) \equiv 0, t < 0$, и двусторонним, когда $s(t) \neq 0, t < 0$.

Двусторонние сигналы, в свою очередь, могут быть условно разделены на сигналы с произвольной и линейной ФЧХ, а односторонние – на минимально-фазовые и смешанно-фазовые. Общее выражение линейной ФЧХ имеет вид [9]:

$$\varphi_s(\omega) = \omega\tau + b. \quad (1.1.1)$$

Тогда, к классу сигналов с ФЧХ вида (1.1.1) относятся нуль-фазовые (симметричные) и антисимметричные ($\varphi_s(\omega) = \frac{\pi}{2}$) сигналы. Принадлежность сигнала к классу минимально-фазовых можно определить, рассчитав корни на комплексной плоскости $(\alpha_k, j\omega)$, $k = \overline{1, n}$,

$$F\{s(t)\} = \sum_k s(t) \cdot e^{-j\omega k \Delta t} = a \prod_k (j\omega - \alpha_k),$$

где F – символ преобразования Фурье.

Отсутствие нулей в правой полуплоскости комплексной плоскости говорит о принадлежности односторонних сигналов к классу минимально-фазовых [10]. Характерной особенностью минимально-фазовых сигналов является однозначная связь между амплитудной и фазовой характеристиками [1], что позволяет непосредственно найти $\varphi_s(\omega)$ из автокорреляционной функции (АКФ) регистрируемых колебаний. Грубо можно считать, что минимально-фазовый сигнал имеет меньшую задержку энергии, чем любой односторонний сигнал с таким же спектром. Это означает, что энергия, суммируемая до любого момента времени, для минимально-фазового сейсмического сигнала больше или равна энергии в том же интервале любого другого сейсмического сигнала с таким же спектром. Данные особенности минимально-фазовых сигналов эквивалентны определенному поведению $\varphi_s(\omega)$

Действительно, информацию о задержке энергии несет групповое время запаздывания $t_{gp}^s(\omega)$ [11], которое определяется первой производной фазового спектра:

$$t_{gp}^s(\omega) = -\frac{d\varphi_s(\omega)}{d\omega}.$$

Тогда для минимально-фазовых сигналов должны наблюдаться минимальные значения $t_{gp}^s(\omega)$ для всех $\omega_0 \in \Omega$.

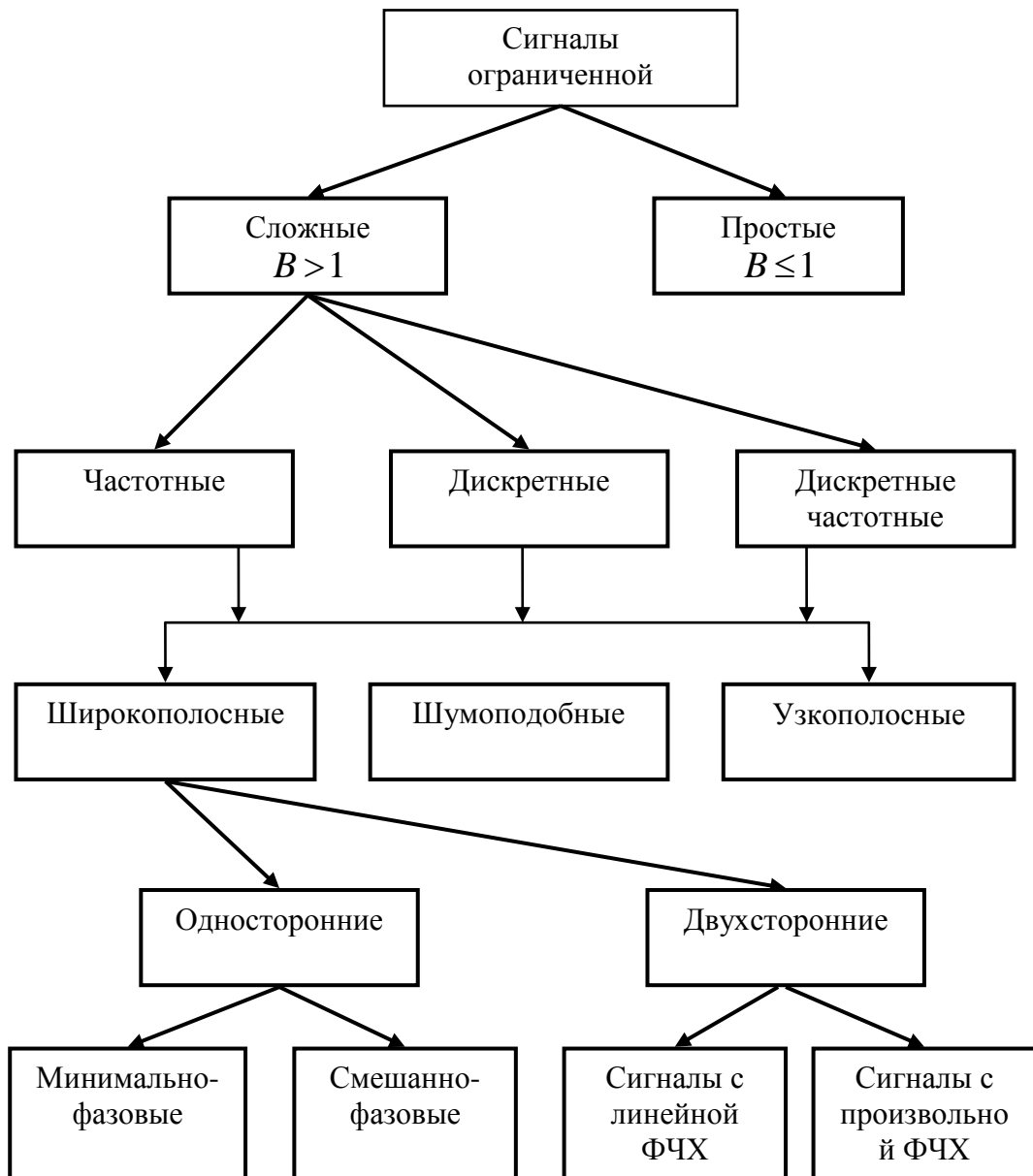


Рисунок 1 – Схема классификации сигналов

Проведенные выше рассуждения позволяют построить схему классификации сигналов ограниченной длительности, которая изображена на рисунке 1, и определить по этой схеме особенности сложных сигналов.

1.2 Задачи сжатия сигналов при обработке и интерпретации сейсмической информации

Сейсмическая разведка (сейсморазведка) является одним из важнейших видов геофизической разведки и включает совокупность методов исследований геологического строения земной коры, основанных на изучении распространения в ней искусственно возбужденных упругих волн [2,12]. Вызванные взрывом или ударом упругие волны распространяются во все стороны от источника возбуждения и проникают в толщу коры на большую глубину. Здесь они претерпевают преломление и отражение и частично возвращаются к поверхности земли, где создаваемые ими колебания регистрируются (рисунк 2). Измеряя время распространения волн, и, изучая характер колебаний, определяют глубину залегания и форму тех геологических границ, на которых произошло преломление или отражение волны, а также судят о составе пород, через которые прошла волна [2,12].

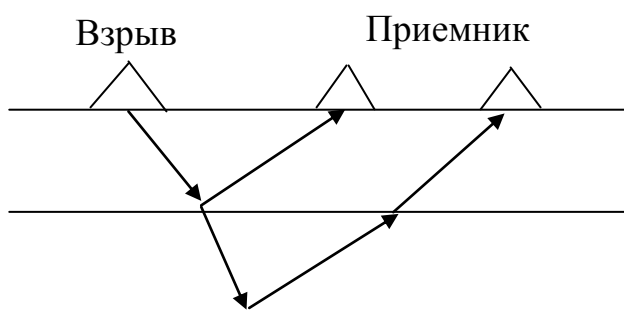


Рисунок 2 – Распространение сейсмической волны в двухслойной геологической среде

В настоящее время в сейсморазведке наибольшее распространение получил метод отраженных волн (МОВ), основанный на изучении упругих волн, отразившихся от границы раздела двух геологических пластов. В общем

виде формирования сейсмического волнового поля МОВ представлено на рисунке 3.

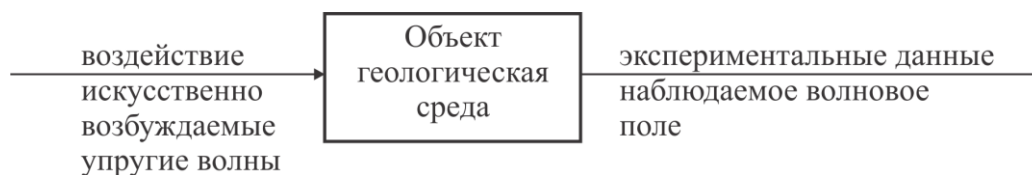


Рисунок 3 – Общая схема формирования сейсмического волнового поля

Извлечение полезной информации из полевых сейсмических записей МОВ происходит в процессе их обработки и интерпретации. Основное содержание этого процесса составляет решение обратных кинематических и динамических задач с целью определения структуры сейсмологической среды и упругих свойств составляющих ее слоев с границами любой формы по зарегистрированному на поверхности наблюдений полю искусственно возбужденных упругих волн.

Теперь, учитывая, что экспериментальный материал при работе с МОВ формируется из отраженных сейсмических сигналов, регистрируемых на профиле наблюдения, для построения оптимальных алгоритмов обработки и интерпретации данных необходимо на основе имеющейся априорной информации об этих сигналах понимать, к какому классу они относятся. Поэтому на основе, проведенной в разделе 1.1 классификации сигналов, покажем место сейсмических сигналов в этой схеме.

Прежде всего, отметим, что форма сейсмического сигнала зависит от особенностей источника, поглощающего действия среды, явлений на границах, а также от особенностей приема и регистрации волн [10]. Поэтому из-за сложности строения геологической среды, изменчивости свойств источников и условий приема, форму сейсмического сигнала в каждом случае можно определить только экспериментально. Однако можно указать некоторые общие характерные особенности, присущие всем сейсмическим сигналам МОВ, получаемым при взрывном методе возбуждения [9]:

1. длительность сигналов не превышает длительности 2-3 преобладающих периодов волны и составляет 0,06-0,09 сек;

2. полоса частот, занимаемая сейсмическими сигналами при работе МОВ на суше, составляет 15-120 Гц.

В отношении ширины полосы частот сейсмических сигналов, приведенной выше, следует дать пояснения. Как любой сигнал конечной длительности, сейсмический сигнал имеет бесконечный спектр, т.е. его энергия распределена на бесконечной полосе частот. Однако основная часть энергии сигнала сосредоточена именно в полосе 15-120 Гц. Поэтому, именно эту полосу частот и будем считать шириной спектра сейсмического сигнала. Обозначим ее Ω . Для сейсмических сигналов при работе МОВ на суше, $\Omega \approx 100$ Гц, а длительность элементарного сигнала $T \approx 0,06 \div 0,09$ сек, тогда $B \approx 6 \div 9$ и, следовательно, сейсмические сигналы являются сложными. Основная частота сейсмического сигнала соизмерима с Ω , поэтому точным представлением сейсмического сигнала является его разложение на простые функции с различными частотами (как правило, ряд Фурье). Тогда назовем сейсмический сигнал частотным. Спектр сейсмических сигналов перекрывает частотный диапазон в 4 октавы, а ω_0 соизмерима с Ω , поэтому их можно отнести к широкополосным. Амплитудные спектры сейсмических сигналов обычно имеют простую колокольную форму с выраженным экстремумом на основной частоте [9, 13], что даже на первый взгляд отличает их от шумоподобных. Также по виду ФЧХ, можно выделить минимально-фазовые сейсмические сигналы и сейсмические сигналы с линейной ФЧХ. Таким образом, видно, что внутренняя структура сейсмических сигналов такова, что эти сигналы имеют возможность переносить достаточно большой объем информации о среде их распространения. Следовательно, на основе измерения кинематических и динамических параметров регистрируемых сейсмических сигналов могут быть построены эффективные алгоритмы обработки и интерпретации данных с целью решения, как структурных задач, так и прогноза вещественного состава и коллекторских свойств геологических сред.

На рисунке 4 показана общая схема решения обратных задач в сейсморазведке при работе с МОВ [10,14]. Исходными данными являются априорная информация о геологической среде и возбуждаемых сейсмических сигналах, а также экспериментальный материал. Исходя из поставленной задачи, на основе априорных данных формируются модели среды и сейсмограммы. Следует отметить, что эти модели взаимосвязаны, так как они отображают две стороны формирования сейсмического поля под воздействием геологических объектов. Затем исходный экспериментальный материал обрабатывается с целью извлечения полезной информации. В зависимости от конкретной задачи полезная информация может быть различной. Иногда она дает лишь качественную характеристику состояний объекта исследований, например, простое обнаружение сигнала на фоне помех, когда необходимо решить есть сигнал или его нет. В других случаях информация оказывается лишь количественной, если речь идет о численных оценках параметров сигнала, например определения временного положения сейсмического сигнала, существование которого не вызывает сомнений. Наконец, информация может иметь сложный характер, когда требуется произвести качественный и количественный анализ [2]. Далее осуществляется интерпретация, т.е. физико-геологическое истолкование результатов обработки.

Поскольку, как правило, априорной информации недостаточно, при интерпретации часто приходится не только уточнять модели, но и разрешать неоднозначность некоторых результатов обработки. Поэтому многие приемы обработки и интерпретации взаимно переплетаются, что приводит к решению обратных задач в несколько этапов. В конечном итоге многоэтапность решения обусловлена двумя принципиальными обстоятельствами – недостаточностью априорной информации и вычислительной сложностью.

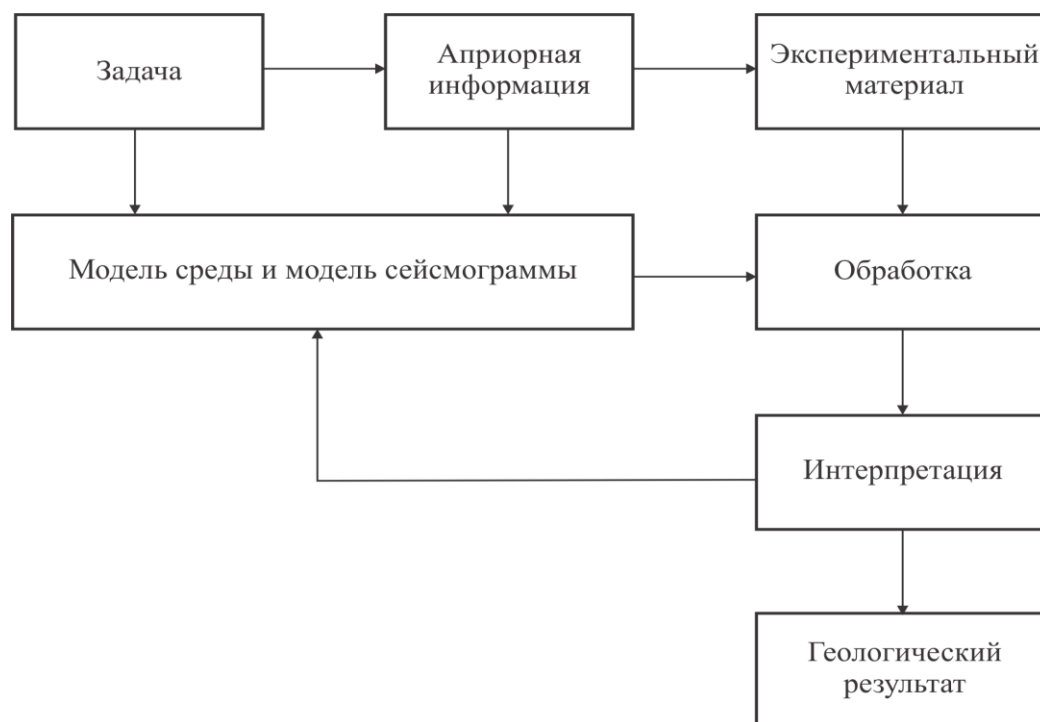


Рисунок 4 – Общая схема решения обратных задач в сейсморазведке

В этих условиях, особо значение приобретает построение оптимальных и субоптимальных в статистическом смысле и эффективных в вычислительном отношении алгоритмов обработки и интерпретации экспериментальных данных, работающих достаточно надежно при малой априорной информации.

Остановимся теперь на одной из важных задач обработки сейсмической информации – численных оценках параметров сигнала, а именно определения временного положения сейсмического сигнала. Такие оценки крайне необходимы для построения структурных карт отражающих границ. От качества построения таких границ существенно зависят все остальные этапы обработки и интерпретации. В принципе задача определения временного положения сейсмического сигнала решается достаточно просто и надежно, когда форма сигнала известна, уровень помех не велик, и самое главное, отсутствует интерференция от соседних отражений. Ситуация кардинально изменяется в условиях отражений от границ раздела тонкослоистых сред. Здесь наблюдается интенсивная интерференция и оценить временное положение сейсмического сигнала ставится весьма затруднительно. Для получения надежных оценок временного положения сейсмических сигналов используют,

как правило, алгоритмы сжатия, позволяющие увеличивать разрешение сигналов на записях.

1.3 Методы деконволюции для повышения разрешения сейсмических записей

Основное назначение методов деконволюции (обратная свертка) – восстановление истинной формы сигнала, который несет в себе информацию об исследуемом объекте, процессе, явлении и т.п., после его искажения или сжатия при регистрации данных с помощью измерительного прибора или канала связи.

Для восстановления истинной формы сигнала необходимо выделить основные характеристики искажающей системы. К ним относятся, в первую очередь, импульсный отклик системы или его частотная передаточная функция. Методы деконволюции реализуются с помощью цифровых фильтров, у которых частотные характеристики обратны частотным характеристикам искажающей системы [15]. Иногда реализация таких фильтров не возможна. Так, например, восстановление в сигнале частот, которые были полностью подавлены, а при восстановлении частотных составляющих, ослабленных до уровня шумов, одновременно происходит значительное усиление дисперсии шумов, в которых полезный сигнал может полностью затеряться.

Также деконволюция (обратная свертка) используется для решений многих задач по обработке данных. Так, в геофизике она используется для сжатия сложных сигналов с целью повешения результатов измерения временного или пространственного разрешения. В ядерной геофизике методы деконволюции выполняют основную роль при количественной интерпретации результатов измерений, чему способствует принцип суперпозиции ядерно-физических полей. В грави- и магниторазведке с применением деконволюции выполняются расчеты аномальных полей вниз[16].

Деконволюция с математической точки зрения является операцией основанной на обратной свертке сигналов. То есть, если для прямой свертки дискретного сигнала $x(t)$ с импульсным откликом $h(t)$ линейной системы (фильтра) имеем уравнение:

$$y(t) = h(t) \otimes x(t) \Leftrightarrow H(\omega)F(\omega) = Y(\omega), \quad (1.3.1)$$

где $Y(\omega) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} y_t e^{-jt\varphi}$, то задача деконволюции в общей форме –

определение сигнала на входе линейной системы по значениям выходного сигнала, то есть снятие реакции (импульсного отклика) системы на сигнал и восстановление исходной формы сигнала:

$$F(\omega) = Y(\omega) / H(\omega) = Y(\omega)H^{-1}(\omega) \Leftrightarrow y(t) \otimes h^{-1}(t) = x(t), \quad (1.3.2)$$

где индексом "-1" обозначена передаточная функция оператора обратного фильтра (оператор деконволюции) $H^{-1}(\omega) = \frac{1}{H(\omega)}$, инверсного прямому оператору свертки (импульсному отклику системы) [17].

Сейсмическая деконволюция применяется с целью коррекции спектра импульса, увеличения разрешающей способности данных и повышения отношения сигнал/шум. Рассмотрим более подробно алгоритмы, которые используют обратную свертку сигналов (метода деконволюции).

1.3.1 Деконволюция сжатия (импульсная деконволюция)

Импульсная деконволюция является видом обратной фильтрации, после использования которой, сигнал сжимается до дельта-импульса. Также ее желаемым результатом является устранение влияния кратных отражений и импульса источника. Рассмотрим основные математические действия, в ходе которых сигнал сжимается. Для этого сначала необходимо перейти из временной области в спектральную [18]. Амплитудный спектр входного сигнала и спектр (амплитудный) оператора фильтра:

$$x(t) \rightarrow X(\omega),$$

$$h(t) \rightarrow H(\omega).$$

Тогда уравнение свертки во временной области, есть перемножение соответствующих спектров:

$$x(t) \otimes h(t) \rightarrow X(\omega)H(\omega).$$

Известно, что дельта-импульсу во временной области соответствует единичный спектр в частотной, тогда входной сигнал $x(t)$ сворачивается с оператором, у которого спектр равен обратному спектру $x(t)$:

$$H(\omega) = \frac{1}{X(\omega)}, \quad (1.3.1.1)$$

тогда результатом $F(\omega)$ является:

$$F(\omega) = X(\omega)H(\omega) = 1.$$

Для устранения нулевых значений в амплитудном спектре входного сигнала, используются следующие действия:

1. Домножим и разделим правую часть (1.3.1.1) на комплексно-сопряженный спектр ($\overline{X}(\omega)$):

$$H(\omega) = \frac{\overline{X}(\omega)}{\|X(\omega)\|^2}, \quad (1.3.1.2)$$

где $\|X(\omega)\|^2$ – энергетический спектр $x(t)$.

2. Для устранения неопределенности при делении на 0, к энергетическому спектру (1.3.1.2) добавляем переменную $\xi(t)$:

$$H(\omega) = \frac{\overline{X}(\omega)}{\|X(\omega)\|^2 + \xi(t)},$$

где $\xi(t)$ – это «белый шум», который представляет собой сигнал, имеющий автокорреляционную функцию, математически являющейся функцией Дирака, а также спектр мощности, которого имеет постоянную плотность.

Для нахождения оператора фильтра, соответствующего условию (1.3.1.1), используют уравнение Колмогорова - Винера:

$$\sum_{i=0}^N h(i) \cdot b_x(\tau - i) = x(0), \quad (1.3.1.3)$$

где $h(i)$ – оператор фильтра в дискретной форме, $b_x(\tau - i)$ –

автокорреляционная функция временного ряда $x(i)$, $x(0)$ – единичная функция [19].

Выражения решается с помощью составления системы линейных алгебраических уравнений относительно $h(i)$.

1.3.2 Предсказывающая деконволюция

Предсказывающая деконволюция основывается на сокращении длительности сигнала за счет подавления его хвостовой части. Это происходит за счет того, что полезные отражения представляют собой случайный процесс. Поэтому кратные отражения могут быть выражены, как спрогнозированные. Таким образом, зная полезную составляющую сигнала – $x(t)$ в определенный момент времени t , можно предугадать его появление в будущем времени $x(t + \alpha)$,

где α – временной интервал, через которое необходимо получить предсказанный сигнал $x(\tau)$, то есть интервал предсказания.

Из вышесказанного следует, что конечным, желанным сигналом является сам сигнал, только в будущем времени [20]. Таким образом, уравнение Колмогорова-Вингера для реализации предсказывающей деконволюции запишется следующим образом:

$$\sum_{i=0}^N h(i) \cdot b_x(i-j) = b(i+\alpha), \quad (1.3.2.1)$$

где $h(i)$ – оператор фильтра в дискретной форме, $b_y(i-j)$ – автокорреляционная функция временного ряда $x(t+\alpha)$, $b(i+\alpha)$ – желаемый сигнал в будущем времени.

При решении выражение (1.3.2.1) с помощью составления системы алгебраических уравнений, получаем, что сигнал на выходе $(t+\alpha)$ после использования предсказывающей деконволюции преобразовывается в α , то есть непредсказуемые значения сохраняются, остальные либо обнуляются, либо проходят фильтрацию [21].

1.3.3 Поверхностно-согласованная деконволюция

В наземной сейсморазведке приповерхностные условия часто изменяются вдоль профиля, что приводит к изменению мощности колебаний, запускаемых в среду, а так же оказывает влияние на форму генерируемого импульса. Также наблюдается различие между соседними трассами общей точкой приема (ОТП) и общей точкой возбуждения (ОТВ) по спектрам колебаний, из-за неодинаковых условий регистрации. Данные различия формируются между соседними трассами ОТП и ОТВ в амплитудах колебаний, их форме и временных сдвигах. Так как формируемые сейсмограммы общей средней точки (ОГТ), включают в себя трассы, зарегистрированные на разных пунктах приема (ПП) от разных пунктов взрыва (ПВ), то описанные выше различия приводят к снижению качества получаемого суммарного разреза [20]. С помощью алгоритма поверхностно-согласованной деконволюции можно компенсировать эти факторы.

Основной принцип работы данного вида деконволюции, удаления воздействия влияния латеральных вариаций, связанных с местоположением ПВ и ПП.

С математической точки зрения поверхностно-согласованную деконволюцию можно описать, как сейсмическую трассу, представленную в виде 4-х факторной конволюционной модели вида:

$$x(t) = h_B(t) \cdot h_P(t) \cdot h_{\text{ДИСТ}}(t) \cdot \xi(t) + n(t), \quad (1.3.3.1)$$

где $h_B(t)$ – компонента формы волны, связанная поверхностными условиями в точке положения приемника пункта взрыва;

$h_P(t)$ – компонента формы волны, связанная поверхностными условиями в точке положения приемника, а также с влиянием аппаратурных помех;

$h_{\text{ДИСТ}}(t)$ – компонента, связанная с зависимостью формы волны от выноса;

$\xi(t)$ – импульсный отклик разреза в положении средней точки между источником и приемником;

$n(t)$ – шумовая компонента трассы, которая настолько мала, что далее учитываться не будет [22].

Выражение (1.3.3.1) можно переписать в виде:

$$x(t) = \omega_k \cdot \xi(t) + n(t),$$

где ω_k – сложный волновой импульс:

$$\omega_k = h_B(t) \cdot h_{II}(t) \cdot h_{ДИСТ}(t).$$

Перепишем уравнение (1.3.3.1) в спектральной области:

$$X(\omega) = H_B(\omega)H_{II}(\omega)H_{ДИСТ}(\omega)E(\omega). \quad (1.3.3.2)$$

В работе [23] Morley и Claelbout видоизменили модель (1.3.3.1), добавив сигнал средней амплитуды, регистрируемый на трассе при i -м ПП и j -м ПВ – $f(t)$, или для частотной области $A(\omega)$: $X(\omega) = H_B(\omega)H_{II}(\omega)H_{ДИСТ}(\omega)E(\omega)A(\omega)$. (1.2.3.3)

Выражение (1.3.3.3) можно разбить на амплитудную и фазочастотную составляющие:

$$A_X(\omega) = A_B(\omega)A_{II}(\omega)A_{ДИСТ}(\omega)A_E(\omega)A_{Ср_Ампл}(\omega) \quad (1.3.3.4)$$

и

$$\varphi_X(\omega) = \varphi_B(\omega) + \varphi_{II}(\omega) + \varphi_{ДИСТ}(\omega) + \varphi_E(\omega) + \varphi_{Ср_Ампл}(\omega). \quad (1.3.3.5)$$

Учтем, что сигнал является минимально-фазовым, тогда к рассмотрению примем только амплитудную составляющую, так как фазовый спектр минимально-фазового сигнала принимается таким, что его значения на всех частотах наименее отличаются от нуля.

Логарифмируя обе части уравнения (1.3.3.4) получаем:

$$\ln A_X(\omega) = \ln A_B(\omega) + \ln A_{II}(\omega) + \ln A_{ДИСТ}(\omega) + \ln A_E(\omega) + \ln A_{Ср_Ампл}(\omega). \quad (1.3.3.6)$$

Выражение (1.3.3.6) определяет зависимость амплитудного спектра сеймотрассы $A_X(\omega)$ с амплитудными спектрами различных компонент, оказывающее влияние на формирование формы сигнала.

Отсюда следует, что уравнение (1.3.3.6) представляет собой уравнение с пятью неизвестными: $A_B(\omega)$, $A_{II}(\omega)$, $A_{ДИСТ}(\omega)$, $A_E(\omega)$, $A_{Ср_Ампл}(\omega)$.

Выражение (1.3.3.6), в общем случае, решается с помощью прямого преобразования Фурье по всем сеймотрассам. Формируется система линейных алгебраических уравнений в количестве, равном произведению числа каналов на число пунктов взрыва, а количество неизвестных определяется суммой числа пунктов взрыва, пунктов приема, величине дистанции и средних точек, кроме того неизвестным является спектр сигнала средней амплитуды $A_{Cp_Aмпл}(\omega)$.

Для многокилометровых профилей рассматриваемая система решается по методу наименьших квадратов итерационным способом с использованием известных вычислительных схем.

После определения амплитудных спектров всех компонент из (1.3.3.6), рассчитываются уже рассматриваемые ранее прогностические обратные фильтры по следующей схеме:

1. Рассчитывается квадрат амплитудного спектра (спектр мощности), компоненты, которую нужно удалить (допустим, компоненту ПВ) – $A_B^2(\omega)$.

2. Выполним следующую:

$$A_B^2(\omega) = B(\omega),$$

где спектр $B(\omega)$ – автокорреляционная функция (АКФ) временной характеристики компоненты, которую мы собираемся удалить.

3. С помощью обратного преобразования Фурье вычислим АКФ – $b(\tau)$:

$$B(\omega) \rightarrow b(\tau).$$

И уже по полученной АКФ рассчитываем оператор обратного прогностического фильтра, которым следует обработать трассу $x(t)$ чтобы получить трассу $\bar{x}(t)$. Затем рассчитывается следующий оператор (например, за пункт приема). С его помощью обрабатываем уже существующий результат $\bar{x}(t)$ и получаем новый, и т.д. Следует отметить, что оператор рассчитывается на всех частотах ω (с малым шагом $\Delta\omega = \omega_n - \omega_{n-1}$). Во временной области это соответствует длине всей записи [23].

1.4 Проблемы, возникающие при реализации алгоритмов деконволюции. Постановка задачи.

Как следует из рассмотренных выше методов деконволюции, при их синтезе используют в основном только априорную информацию об амплитудно-частотных характеристиках сейсмических сигналов. Относительно фазовых соотношений вводятся лишь некоторые предпосылки, например, линейная фазочастотная характеристика, минимально-фазовая и т.д. Если данные предпосылки оказываются верными, то алгоритмы деконволюции позволяют получать надежные оценки временного положения сигналов, если нет, то результаты прослеживания приводят к существенным погрешностям. Это связано с тем, что именно в фазовые спектры сигналов заложена основная информация о их временных задержках. Поэтому в ряде практических случаев, данные алгоритмы не могут в достаточной степени обеспечить необходимое разрешение сейсмического сигнала, что вызывает необходимость разработки новых алгоритмов сжатия сейсмических данных, основанных на использовании всей априорной информации о комплексных спектрах сложных сигналов. Одним из возможных путей построения таких алгоритмов является их синтез на основе оптимальной и субоптимальной обработки ФЧХ сейсмических сигналов.

Таким образом, необходимо построить алгоритмическое и программное обеспечения для сжатия сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки их фазочастотных характеристик, а также провести исследования эффективности предложенных алгоритмов и сравнить их результаты с результатами деконволюции.

2 Разработка алгоритмов сжатия сейсмических сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик

2.1 Разработка алгоритмов сжатия сейсмических сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик

Алгоритмы сжатия сейсмических сигналов используются в основном для повышения разрешения сигналов на сейсмотрассах с целью выделения отражающих горизонтов, замаскированных зонами интерференции и интенсивными помехами. При этом основным оцениваемым параметром является временное положение сигнала, приуроченное к его максимальной амплитуде. Поэтому рассмотрим методы оценки временного положения сложных сигналов, когда оптимальной обработке подвергается их ФЧХ.

2.1 Метод фазочастотного прослеживания сейсмических сигналов

Обычное решение задачи определения временного положения сигнала сводит ее к оценке одного из неэнергетических параметров нормального случайного процесса и не учитывает специфики временного параметра. В тоже время представление временного положения сигнала в экспоненциальном базисе полностью определяется его ФЧХ. Поэтому оптимальная обработка ФЧХ сигнала реализует оптимальный метод определения его временного положения[24].

2.1.1 Оптимальная обработка ФЧХ

Для рассмотрения данного алгоритма, примем математическую модель участка сейсмотрассы, которая представлена следующим образом:

$$x(t) = S(t - \tau) + N(t), \quad (2.1.1.1)$$

где $S(t - \tau)$ – регистрируемый сейсмический сигнал;

τ – временное положение сигнала;

$N(t)$ – аддитивный нерегулярный шум, распределенный по закону Гаусса с числовыми характеристиками m_x, σ_x^2 .

Теперь необходимо построить алгоритм определения временного положения сигналов, когда оптимальной обработке подвергается лишь ФЧХ смеси сигнала и шума.

Оптимальную оценку временного положения сигнала $\hat{\tau}_{opt}$ в смысле минимизации среднеквадратической ошибки [25], можно найти, решив уравнение правдоподобия:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\ln L[\phi_x \setminus \tau]]|_{\tau=\tau_{opt}} = 0. \quad (2.1.1.2)$$

В качестве функции правдоподобия в (2.1.1.2) примем статистику отношения правдоподобия:

$$L[\varphi_x \setminus \tau] = \frac{L_{\varphi_x}(\tau)}{L_{\varphi_x}(\tau_0)}, \quad (2.1.1.3)$$

где τ_0 – фиксированное значение τ ;

$L_{\varphi_x}(\tau) = W(\varphi_x \setminus \tau)$ – условная апостериорная многомерная функция распределения ФЧХ смеси;

φ_x – вектор с компонентами $\varphi_x(\omega_k)$.

Будем рассматривать наиболее интересный случай, когда сигнал слабый, т.е. $\delta(\omega_k) \ll 1$ для всех ω_k . Также будем считать, что значения в выборке ФЧХ являются независимыми. Тогда, принимая выражение плотности вероятности $\Delta\varphi(\omega_k)$ в условиях нормальных помех из [26] и, рассматривая ее как функцию от τ , а также учитывая, что временное положение сигнала является неэнергетическим параметром [5], получим:

$$\begin{aligned}
W(\Delta\phi(\omega_k) \setminus \tau) &= \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{\delta^2(\omega_k)}{2}\right) + \frac{\delta(\omega_k)}{\sqrt{2\pi}} \cdot \\
&\cdot \cos(\Delta\phi(\omega_k, \tau)) \cdot \phi\left[\delta(\omega_k) \cdot \cos(\Delta\phi(\omega_k; \tau))\right] \cdot \\
&\cdot \exp\left(-\frac{\delta^2(\omega_k)}{2} \cdot \sin^2(\Delta\phi(\omega_k; \tau))\right)
\end{aligned} \tag{2.1.1.4}$$

Используя известную теорему о временном сдвиге [27], выражение (2.1.1.4) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}
W(\square\phi(\omega_k) \setminus \tau) &= \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{\delta^2(\omega_k)}{2}\right) + \frac{\delta(\omega_k)}{\sqrt{2\pi}} \cdot \\
&\cdot \cos(\square\phi(\omega_k) - \omega_k \cdot \tau) \cdot \phi\left[\delta(\omega_k) \cdot \cos(\square\phi(\omega_k) - \omega_k \cdot \tau)\right] \cdot \\
&\cdot \exp\left[-\frac{\delta^2(\omega_k)}{2} \sin^2(\square\phi(\omega_k) - \omega_k \cdot \tau)\right],
\end{aligned} \tag{2.1.1.5}$$

где ϕ – преобразование Лапласа.

Так как значения ФЧХ на различных частотах ω_k статистически независимы, то на основе (2.1.1.4) и (2.1.1.5), получим

$$\begin{aligned}
L(\tau) &= \prod_{k=1}^m \left\{ \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{\delta^2(\omega_k)}{2}\right) + \frac{\delta(\omega_k)}{\sqrt{2\pi}} \cdot \right. \\
&\cdot \cos(\Delta\phi(\omega_k) - \omega_k \cdot \tau) \cdot \phi\left[\delta(\omega_k) \cdot \cos(\Delta\phi(\omega_k) - \omega_k \cdot \tau)\right] \cdot \\
&\cdot \left. \exp\left(-\frac{\delta^2(\omega_k)}{2} \cdot \sin^2(\Delta\phi(\omega_k) - \omega_k \cdot \tau)\right) \right\}.
\end{aligned} \tag{2.1.1.6}$$

Прологарифмируем (2.1.1.6) и далее запишем

$$\ln L(\tau) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^m \left(-\frac{\pi}{8} \delta^2(\omega_k) + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \delta(\omega_k) \cdot \cos(\Delta\phi(\omega_k) - \omega_k \tau) \right). \tag{2.1.1.7}$$

При получении (2.1.1.7) не учитывались члены с более высокими степенями, чем $\delta^2(\omega_k)$, т.к. при $\delta(\omega_k) \ll 1$ ими можно пренебречь. Тогда опустим в (2.1.1.7) члены, не зависящие от τ и получим:

$$\ln L(\tau) \cong \sum_{k=1}^m (\delta(\omega_k) \cdot \cos(\Delta\phi(\omega_k) - \omega_k \tau)). \tag{2.1.1.8}$$

Выражение (2.1.1.8) может быть непосредственно использовано для построения оптимального фазочастотного алгоритма прослеживания волн [4]. В этом случае за оценку временного положения принимается оценка $\hat{\tau}_{opt} = \tau$, при

которой достигается максимум функции (2.1.1.8). Практически реализация данного алгоритма осуществляется как процедура поиска положения максимума $L(\tau)$ при перемещении некоторого окна анализа заданной протяженности вдоль сейсмической трассы. При этом дисперсия оценки составляет [5]:

$$\sigma_{\hat{\tau}_{\text{опт.}}}^2 = \frac{4}{\pi(q_{\Sigma}^*)^2 \cdot (\sigma\omega)^2}, \quad (2.1.1.9)$$

где $(\sigma\omega)^2$ – среднеквадратическая ширина спектра сигнала;
 $(q_{\Sigma}^*)^2$ – суммарное отношение сигнал/помеха.

Оптимальная оценка из (2.1.1.8) для случая слабого сигнала является оптимальной и для сильного сигнала, но не наоборот [28]. Поэтому в дальнейших исследованиях в качестве оптимальной процедуры определения временного положения сейсмических сигналов будем использовать максимизацию выражения $LnL(\tau)$ из (2.1.1.8). Проведем анализ данного выражения. Для этого запишем обратное дискретное преобразования Фурье (ДПФ)[29]:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)| \cdot e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (2.1.1.10)$$

и преобразуем его к следующему виду:

$$\begin{aligned} X(n) &= \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)| \cdot e^{-j\varphi(k)} \left[\cos \varphi\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sin \varphi\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] = \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)| \cdot [\cos \varphi(k) - j \sin \varphi(k)] \cdot \left[\cos \varphi\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sin \varphi\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] = \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)| \cdot \left[\cos \varphi(k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + \sin \varphi(k) \cdot \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - \right. \\ &\quad \left. - j \cdot [\sin \varphi(k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - \cos \varphi(k) \cdot \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)] \right] \end{aligned} \quad (2.1.1.11)$$

Так как мнимая часть в (2.1.1.11) обращается в ноль [29], то оставим только вещественную часть:

$$\begin{aligned}
X(n) &= \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)| \left[\cos \varphi(k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + \sin \varphi(k) \cdot \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] = \\
&= \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)| \left[\frac{1}{2} \left(\cos\left(\varphi(k) - \frac{2\pi kn}{N}\right) + \cos\left(\varphi(k) + \frac{2\pi kn}{N}\right) + \right. \right. \\
&\left. \left. + \cos\left(\varphi(k) - \frac{2\pi kn}{N}\right) - \cos\left(\varphi(k) + \frac{2\pi kn}{N}\right) \right) \right] = \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)| \cos\left(\varphi(k) - \frac{2\pi kn}{N}\right).
\end{aligned} \tag{2.1.1.12}$$

Сравним выражение (2.1.1.12) с видом функции правдоподобия (2.1.1.8) и увидим, что отличия наблюдаются только в весовых множителях, так как $\omega_k = \frac{2\pi kn}{N}$. Эти отличия можно интерпретировать как результат линейной фильтрации цифровым фильтром с частотной характеристикой[30]:

$$\begin{aligned}
H(\omega_k) &= \frac{\delta(\omega_k)}{|X(k)|}, \\
k &= \overline{1, m},
\end{aligned} \tag{2.1.1.13}$$

где m – количество частотных компонент.

Таким образом, выражение функции правдоподобия ФЧХ слабого сигнала (2.1.1.8) можно рассматривать как обратное ДПФ от результата фильтрации исходного процесса в частотной области цифровым фильтром с частотной характеристикой (2.1.1.13).

Практическое применение оптимальных фазочастотных алгоритмов (2.1.1.8) часто трудно реализовать, так как требуется знать распределение отношение сигнал/помеха $\delta(\omega_k)$ в исследуемом диапазоне частот. Поэтому, рассмотрим, субоптимальные фазочастотные алгоритмы, которые получены из оптимальных путем изменения их весовых коэффициентов.

2.1.2 Равновесная обработка

Примем в выражении (2.1.1.8) $\delta(\omega_k) = 1 \quad \forall k = \overline{1, m}$ и запишем[30,31]:

$$LnL(\tau) = \sum_{k=1}^m \cos[(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau)] \tag{2.1.2.1}$$

Для нахождения точности оценок, получаемых путем максимизации функции (2.1.2.1) рассмотрим максимальные потери в суммарном отношении сигнал/помеха при равновесной обработке, которые могут быть охарактеризованы параметром η , равным [глава диссертация]:

$$\eta_{\max} = (q_{\Sigma} / q'_{\Sigma})^2 - 1 = \sum_{K=1}^m (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})^2 - 1, \quad (2.1.2.2)$$

где η_{\max} – верхняя граница потерь;

q_{Σ} – величины суммарного отношения сигнал/помеха;

k – номер отсчета.

Тогда, дисперсия оценки составит:

$$\sigma_{\hat{\tau}}^2 = \frac{4 \sum_{K=1}^m (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})^2}{\pi \cdot q_{\Sigma}^2 \cdot (\sigma \omega)^2}. \quad (2.1.2.3)$$

Как и следовало ожидать, при уменьшении априорных сведений о сигнале, точность получаемой оценки снижается, однако, при практически используемом числе частотных компонент m снижается незначительно. Так, при $m=3$ дисперсия возрастает в 1.27 раз, при $m=10$, в 1.58 в раз, при $m=20$, в 1.75 раза. В тоже время, равновесная обработка позволяет получать оценки временного положения с достаточно высокой степенью точности [32,33], когда известна лишь априорная информация о значениях ФЧХ сигналов в исследуемом диапазоне частот.

2.1.3 Неравновесная обработка

В случае неравновесной обработки выражение (2.1.1.8) переписется в виде:

$$L(\tau) = \sum_{k=1}^N W(\omega_k) \cdot \cos[(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau)], \quad (2.1.3.1)$$

где $W(\omega_k)$ – искусственно задаваемые весовые коэффициенты, отличные от $\delta(\omega_k)$.

Для случая слабого сигнала дисперсии оценок временного положения сигнала удастся оценить только экспериментальным путем.

В качестве весовых функций при неравновесной обработке можно использовать любые частотно-зависимые функции. Однако основной смысл неравновесной обработки заключается в повышении разрешающей способности сейсмической записи, а, следовательно, снижении уровня боковых лепестков прямоугольной функции, используемой при равновесной обработке. В этом плане значительный интерес вызывает весовая функция в виде треугольника со смещенным максимумом [34]:

$$W(f_k) = \frac{125}{2 \cdot f_C^2} \cdot \begin{cases} 0, & f_k < f_H \\ 2 \cdot (f_k - f_H), & f_H < f_k \leq f_C \\ (-1) \cdot (f_k - f_B), & f_C < f_k \leq f_B \end{cases} \quad (2.1.3.4)$$

Вопросы эффективности применения треугольной функции при неравновесной обработке ФЧХ будут рассмотрены в следующем разделе настоящей работы.

2.2 Применение метода фазочастотного прослеживания для сжатия сейсмических сигналов

Как уже отмечалось выше, довольно часто приходится решать задачи прослеживания волн в условиях их интенсивной интерференции. Такая ситуация наиболее характерна при исследованиях тонкослоистых сред. При этом, как правило, приходится осуществлять прослеживание волн в условиях, когда форма сигналов неизвестна. В этой связи реализуемые алгоритмы прослеживания сейсмических волн должны обладать повышенной разрешающей способностью и позволять достаточно надежно осуществлять оценку их кинематических параметров в условиях неполной априорной информации о свойствах выделяемых сигналов. С этих позиций рассмотрим возможность увеличения разрешающей способности методов фазочастотного прослеживания сейсмических волн. Напомним, что в основу синтеза методов фазочастотного прослеживания с равновесной и неравновесной обработкой,

положено установленное ранее свойство стационарности фазовых спектров импульсов однократно-отраженных волн, что дает возможность синфазного сложения гармоник, и, следовательно, уже в какой-то мере сжимает сигнал. Также, обратим внимание на определенную аналогию между процедурой оценки временного положения сигналов в фазочастотных методах прослеживания и их низкочастотной фильтрацией (см. раздел выше). Рассмотрим влияние действия фильтра. Прежде всего, отметим, что данный фильтр сначала выравнивает амплитудный спектр (АЧХ) исследуемого колебания, а затем взвешивает его с помощью заданных весовых коэффициентов. При этом фазовые соотношения в исходной записи не изменяются. Известно [35], что выравнивание АЧХ при линейной ФЧХ приводит к сжатию сигнала, а, следовательно, к повышению разрешенности записи, что позволяет выделить отражение не заметные на исходной записи и еще более усилить амплитудно-выраженные отражения. Кроме того, при реализации такого фильтра появляется реальная возможность с помощью задания весовых коэффициентов управлять частотной характеристикой фильтра, усиливая или ослабляя те или иные частотные составляющие сигнала. Таким образом, переход к неравновесной обработке позволяет увеличить разрешение сигналов на записи, и в определенной мере управлять этим процессом, подбирая параметры весовых функций.

2.3 Разработка алгоритма фазочастотного прослеживания сейсмических волн

Для построения алгоритма сжатия сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки ФЧХ предварительно рассмотрим формирование математической модели сейсмической записи.

2.3.1 Построение математической модели волнового сейсмического поля

Сейсмическое волновое поле – это есть отклик среды на источник возбуждения, который можно представить, как совокупность упругих

колебаний возникших в среде и описать функцией времени. Сейсмическую модель волнового поля обычно представляют в виде аддитивная модель [36, 37, 38], то есть такая модель, в которой результаты измерения поля $Y(t)$ представляют собой сумму полезной составляющей $S(t)$ и осложняющей ее помехи $L(t)$:

$$Y(t) = S(t) + L(t), \quad (2.3.1.1)$$

где t – временная координата.

Понятие сигнала и помехи в сейсморазведке носят не абсолютный, а относительный характер. Поэтому, в каждом конкретном случае следует выяснить, что принимать за сигнал и что считать помехой. В целом под сигналом понимается форма проявления поля, в которой сосредоточена полезная информация, а под помехой – всякие возмущения поля, препятствующие выделению сигнала [38].

Предположим, что на некотором интервале записей наблюдаются сейсмические сигналы, регистрируемые на фоне нерегулярных помех. По сейсмотрассе перемещается окно анализа, которое в каждый момент вырезает фиксированный участок записи. Математическая модель такого участка может быть представлена в виде:

$$x(t) = S_1(t - \tau) + S_2(t - \tau) + N(t), \quad (2.3.1.2)$$

где $S_1(t - \tau)$ – полезные сейсмические сигналы, по которым ведется интерпретация;

$S_2(t - \tau)$ – регулярные волны-помехи;

$N(t)$ – аддитивный нерегулярный шум, с числовыми характеристиками математическим ожиданием (m_x) и средним квадратичным отклонением (σ_x^2);

τ – временное положение сейсмического сигнала.

В свою очередь полезные сейсмические сигналы представляют собой суперпозицию однократно отраженных волн и тогда выражение (2.3.1.2) для сейсмограммы можно переписать в виде:

$$x(t, l) = \sum_i a_i \cdot f(t - \tau_i - \Delta t_i(l)) + N(t, l), \quad (2.3.1.3)$$

где $f(t)$ - форма отдельной волны;

a_i - амплитуда i -ой волны;

τ - время прихода i -ой волны в точку профиля $l = 0$;

$\Delta t_i = l / v_i$ - приращение времени от трассы к трассе;

v_i - кажущаяся скорость i -ой волны.

Таким образом, любую сейсмотрассу можно рассматривать как сумму двух независимых процессов: сигнального, представляющего собой наложение большого числа волн одинаковой формы, и шумового.

Далее сделаем некоторые допущения относительно сигналов и помех. Будем считать, что в (2.3.1.2) сигналы $S_1(t - \tau)$ и $S_2(t - \tau)$ имеют заданную форму и интенсивность, неизвестный параметр - только τ .

Заданный сейсмический сигнал может быть описан с помощью функции с «колокольной» огибающей:

$$S(t - \tau) = a_0 e^{-\beta^2(t - \tau)^2} \cos(\omega_0(t - \tau) + \varphi), \quad (2.3.1.4)$$

где a_0 - амплитуда;

β - коэффициент, определяющий затухание импульса;

ω_0 - основная частота;

φ - начальная фаза.

На рисунке 5 представлен график функции заданного в виде суммы импульсов с «колокольной» огибающей в точках $[-0.02; 0; 0.02]$, амплитудой $a_0 = 1$, коэффициентом затухания $\beta = 60$, начальной фазой равной 0.

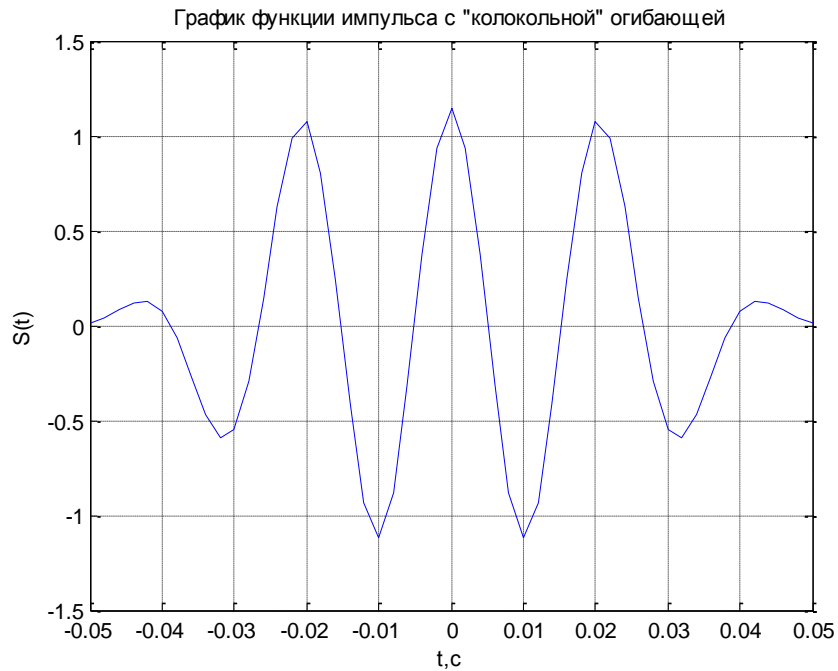


Рисунок 5 – График функции заданного в виде суммы импульсов с «колокольной» огибающей в точках [- 0.02; 0;0.02]

Соотношение между амплитудой сигнала и средним квадратичным отклонением шума определяет отношение сигнал к шуму:

$$\gamma = \frac{a_0^2}{\sigma_x^2}. \quad (2.3.1.5)$$

Шумовой процесс $L(t)$ имеет сложный характер и определяется действием большого числа независимых причин. Поэтому можно считать, что подчиняется $L(t)$ нормальному закону распределения.

На рисунке 6 представлен график функции математической модели сейсмотрассы (2.3.1.2) в виде аддитивной смеси последовательности импульсов с «колокольной» огибающей и нормального шума. В качестве примера показана реализация сгенерированного нормального шума с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1.



Рисунок 6 – График функции исходного сигнала с добавлением шума

В соответствии с общей спектральной теорией сигналов, любой процесс может быть полностью описан во временной области в виде функции времени $x(t)$ и в частотной в виде комплексного спектра $X(f)$. Обе эти формы представления процессов равноправны и связаны между собой парой преобразований Фурье [39]:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j2\pi\omega t} d\omega, \quad (2.3.1.6)$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi\omega t} dt,$$

где $X(\omega)$ – комплексная функция $x(t)$.

Комплексная функция может быть представлена в виде:

$$X(\omega_k) = A(\omega_k) - jB(\omega_k) = A(\omega_k) e^{j\varphi(\omega_k)} \quad (2.3.1.7)$$

для всех $k = \overline{1, m}$,

где m – число анализируемых частотных компонент;

$A(\omega_k)$ – амплитудный спектр (2.3.3);

$\varphi(\omega_k)$ – фазовый спектр (2.3.4).

На рисунках 7, 8 представлены графики амплитудного и фазочастотного спектров импульсов с «колокольной» огибающей на диапазоне от 20 – 60 Гц.

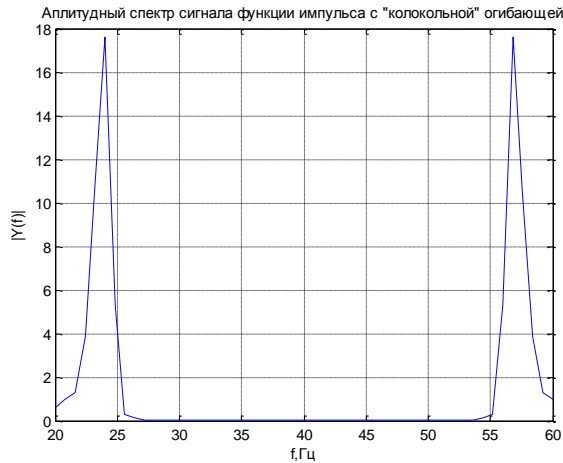


Рисунок 7 – Амплитудный спектр функции импульса с «колокольной» огибающей

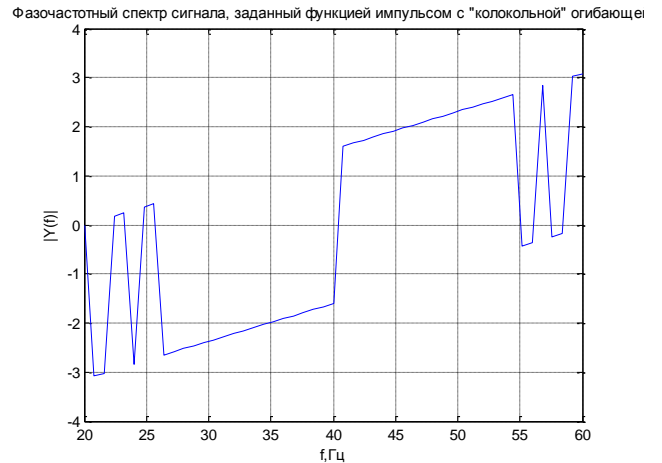


Рисунок 8 – Фазочастотный спектр функции импульса с «колокольной» огибающей

На рисунках 9, 10 представлены графики амплитудного и фазочастотного спектров импульсов с «колокольной» огибающей с добавлением сгенерированного нормального шума. Математическое ожидание, которого равно 0, а дисперсия равна 1 на диапазоне от 20 – 60 Гц.



Рисунок 9 – Амплитудный спектр функции импульса с «колокольной» огибающей с добавлением шума

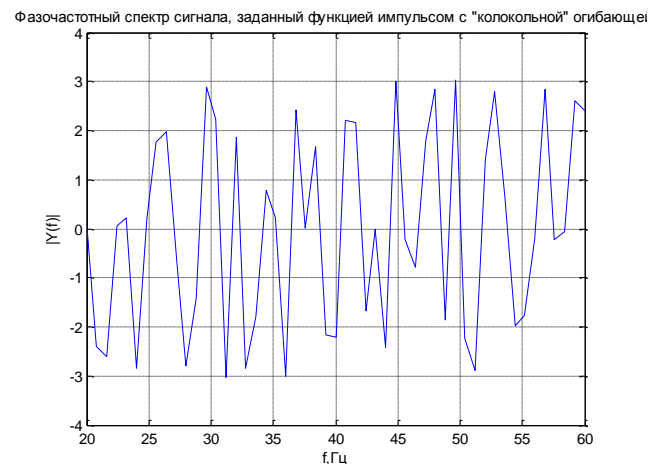


Рисунок 10 – Фазочастотный спектр функции импульса с «колокольной» огибающей с добавлением шума

Построенные графики необходимы для дальнейшего анализа эффективности разработанных алгоритмов сжатия сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик, а также для существующих алгоритмов деконволюции.

2.3.2 Разработка и реализация алгоритма фазочастотного прослеживания в математическом пакете MATLAB

Для построения алгоритмов прослеживания сделаем ряд допущений. Будем считать, что сигнал предварительно обнаружен и полностью расположен на участке сейсмической трассы, протяженностью Th . Примем, что форма сигнала неизвестна, а известна лишь его фазочастотная характеристика (ФЧХ) в полосе частот от 20 до 60 Гц. Такие допущения имеют место при обработке практически любых сейсмических записей, так, как время отражений обычно известно, с точностью до длительности сигнала (60 – 90мс) [40], а фазовые спектры сейсмических сигналов имеют характерный вид (область стационарности в полосе частот, где сосредоточена основная энергия сигнала). Теперь воспользуемся выражением (2.1.3.1), описывающим функцию правдоподобия для определения временного положения сигналов по оценке их ФЧХ с неравновесной обработкой и построим на его основе алгоритмы прослеживания сейсмических волн. Для этого обратим внимание на следующее. С одной стороны, как показано в разделе 2.1.3, положение максимума функции правдоподобия (2.1.3.1) определяет временное положение сигналов на трассе. С другой стороны, сама функция качества, формируемая при фазочастотном прослеживании, представляет сейсмическую запись с более высоким разрешением сигналов и повышенным отношением сигналов к нерегулярным помехам по отношению к исходной сейсмической трассе. При этом в функции качества сохраняется вся информация о петрофизических характеристиках слоистых толщ, кинематических параметрах среды распространения, и появляется дополнительная возможность управлять процессом прослеживания волн, путем формирования весовых функций с заданными параметрами.

Таким образом, алгоритм фазочастотного прослеживания волн должен представлять последовательность действий, в результате которых будут построены функции качества (2.1.3.1) для различных точек наблюдений на

профилях. При этом положения максимумов функции качества будут определять временное положение сигналов, по которым и будут прослеживаться отражающие границы на временных разрезах.

Теперь обратимся еще раз к выражению (2.1.3.1), из которого следует, что для построения алгоритма фазочастотного прослеживания необходимо:

1. задать длительность окна анализа и диапазон частот, в котором сосредоточена основная энергия сигнала;
2. установить окно анализа в исходное положение на сейсмической трассе;
3. выбрать вид весовой функции и вычислить ее значения в заданном диапазоне частот;
4. вычислить в заданном окне анализа отклонения ФЧХ участка сейсмотрассы от ФЧХ сигнала для выбранного диапазона частот;
5. вычисленные отклонения подвергнуть тригонометрическому преобразованию (взять косинус угла);
6. произвести взвешивания преобразованных отклонений;
7. просуммировать взвешенные преобразованные отклонения по всему диапазону частот, формируя тем самым значение функции правдоподобия (2.1.3.1) для конкретного времени t ;
8. переместить окно анализа по сейсмической трассе и повторять операции, описанные в пп.4-7 до тех пор, пока не будет прослежен весь анализируемый участок.

Для построения структурной схемы алгоритма рассмотрим более подробно каждый этап алгоритма. Понятно, что для получения надежных оценок ФЧХ сейсмических сигналов, необходимо чтобы длительность окна анализа равнялась длительности сигнала. В свою очередь, длительность элементарного сигнала, как показал анализ, составляет 2-3 видимых периода колебаний. Поэтому для оценки длительности окна анализа необходимо определить видимый период колебаний. Существует ряд методик измерения видимого периода сейсмических сигналов. Выберем одну из них [41], наиболее

используемую до сих пор на практике, а именно определение видимого периода по автокорреляционной функции (АКФ) трассы. Теперь, зная видимый период, нетрудно задать длительность окна анализа, а также определить основную частоту колебаний:

$$f_0 = \frac{1}{T_{\text{вид}}}.$$

Тогда диапазон частот, в котором сосредоточена основная энергия сигналов можно задать как:

$$(0,5-1,5)f_0.$$

Интервал прослеживания, как уже отмечалось выше, определяется длительностью сигнала в области отражений, поэтому начальное положение окна анализа установить не сложно. Однако, при этом, чтобы обеспечить высокую точность получаемой оценки временного положения сигнала, шаг перемещения окна анализа по трассе, должен быть равен шагу дискретизации сейсмической трассы.

Как показали исследования [34], результаты которых будут приведены ниже, весовые функции вида (2.1.3.4) обладают всеми необходимыми свойствами для увеличения разрешения сигналов, поэтому именно эти функции были использованы в разрабатываемых алгоритмах. Значения весовых функций рассчитываются до начала прослеживания во всем диапазоне частот.

Учитывая, что окно анализа перемещается по сейсмической трассе с шагом, равным шагу дискретизации трассы, речь идет о вычислении мгновенной (текущей) ФЧХ [42]. Мгновенная ФЧХ находится «скользящим» интегрированием, при этом, интервал интегрирования имеет постоянную длительность T , равную длительности сигнала. Тогда для расчета ФЧХ будем использовать дискретное преобразование Фурье (ДПФ) [33], в соответствии с которым процесс вычисления АЧХ и ФЧХ имеет вид:

$$\text{Re}(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot \cos((T_0 + \Delta t \cdot n)(\omega_H + k \cdot \Delta \omega)), \quad (2.3.1)$$

$$\text{Im}(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot \sin((T_0 + \Delta t \cdot n)(\omega_H + k \cdot \Delta \omega)), \quad (2.3.2)$$

$$A(\omega_k) = \sqrt{\text{Re}^2(\omega_k) + \text{Im}^2(\omega_k)}, \quad (2.3.3)$$

$$\varphi(\omega_k) = -\text{arctg} \frac{\text{Im}(\omega_k)}{\text{Re}(\omega_k)}, \quad (2.3.4)$$

для всех $k = \overline{1, m}$,

где m – число анализируемых частотных компонент;

N – число дискретных точек в окне анализа;

$T_0 = -T/2$ – шаг дискретизации по времени;

ω_k – начальная круговая частота;

$\Delta \omega$ – шаг дискретизации по частоте.

Как видно из выражений (2.3.1) и (2.3.2), дискретное преобразование Фурье (ДПФ) производится в интервале от $-T/2$ до $T/2$, что позволяет обеспечить стационарность ФЧХ сейсмических сигналов. При этом следует отметить, что базисные функции рассчитываются всегда в интервале от $-T/2$ до $T/2$, независимо от положения окна анализа.

Расчет ФЧХ осуществляется, как правило, в области главных значений в интервале от $-\pi$ до π , что приводит к появлению скачков в фазовом спектре. С одной стороны, для построения алгоритмов прослеживания, это не важно, так как в дальнейшем от фазы берется косинус, с другой стороны, для оценки дисперсионных и поглощающих свойств геологических сред по ФЧХ отраженных волн, скачки нужно удалять. Поэтому в алгоритмах прослеживания для удаления скачков в ФЧХ предусмотрена процедура доопределения фазового спектра. При этом процедура доопределения ФЧХ выбрана на основе анализа, проведенного в [33] и имеет вид:

$$\phi_{\text{исп}}(\omega_k) = \phi_{\text{исп}}(\omega_{k-1}) + [\phi_p(\omega_k) - \phi_p(\omega_{k-1})] + A, \quad (2.3.5)$$

где A – треугольная функция вида:

$$A = \begin{cases} 0, & |\phi_p(\omega_k) - \phi_p(\omega_{k-1})| < \pi \\ 2\pi, & (\phi_p(\omega_k) - \phi_p(\omega_{k-1})) \leq -\pi; \\ -2\pi, & (\phi_p(\omega_k) - \phi_p(\omega_{k-1})) \geq \pi \end{cases}$$

для всех $k = \overline{2, m}$,

где m – количество отсчетов;

$\phi_{ист}$ – истинная ФЧХ;

ϕ_p – расчетная ФЧХ.

Такая процедура непрерывного продолжения ФЧХ законна, так как ФЧХ является многозначной функцией с периодом 2π . На рисунке 11 приведена иллюстрация устранения скачков ФЧХ в соответствии с (2.3.5).

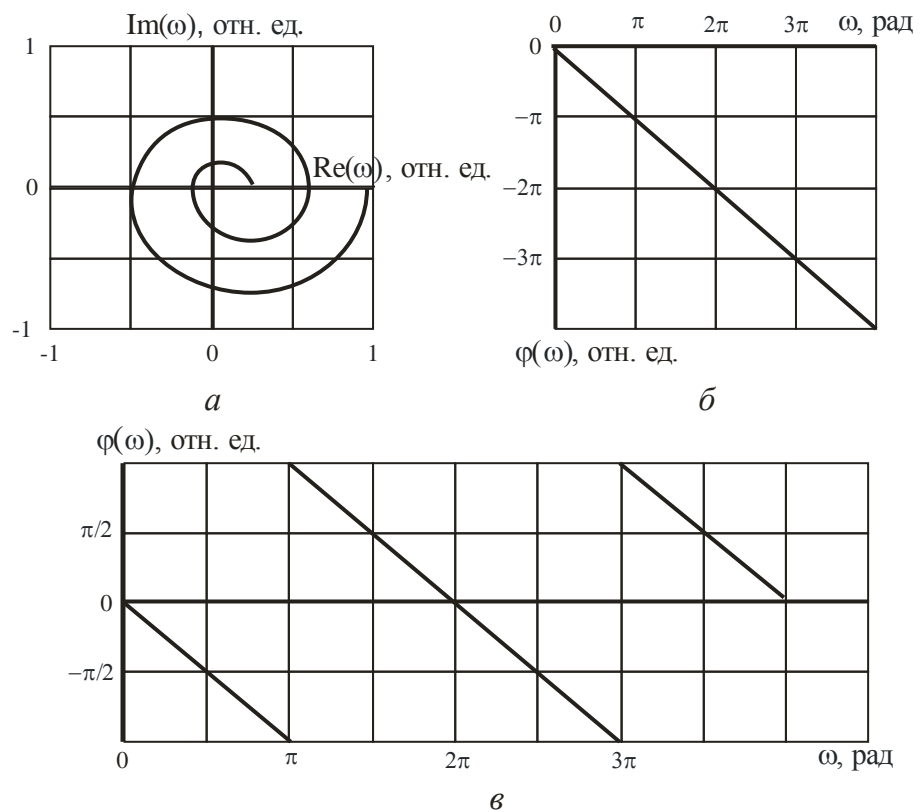


Рисунок 11 – Развертывание фазочастотной характеристики методом Шафера: а) амплитудно-фазочастотная характеристика (АФЧХ); б) развернутая ФЧХ (истинная); в) расчетная ФЧХ

Теперь с учетом изложенного, структура алгоритма прослеживания имеет вид, представленный на рисунке 12.

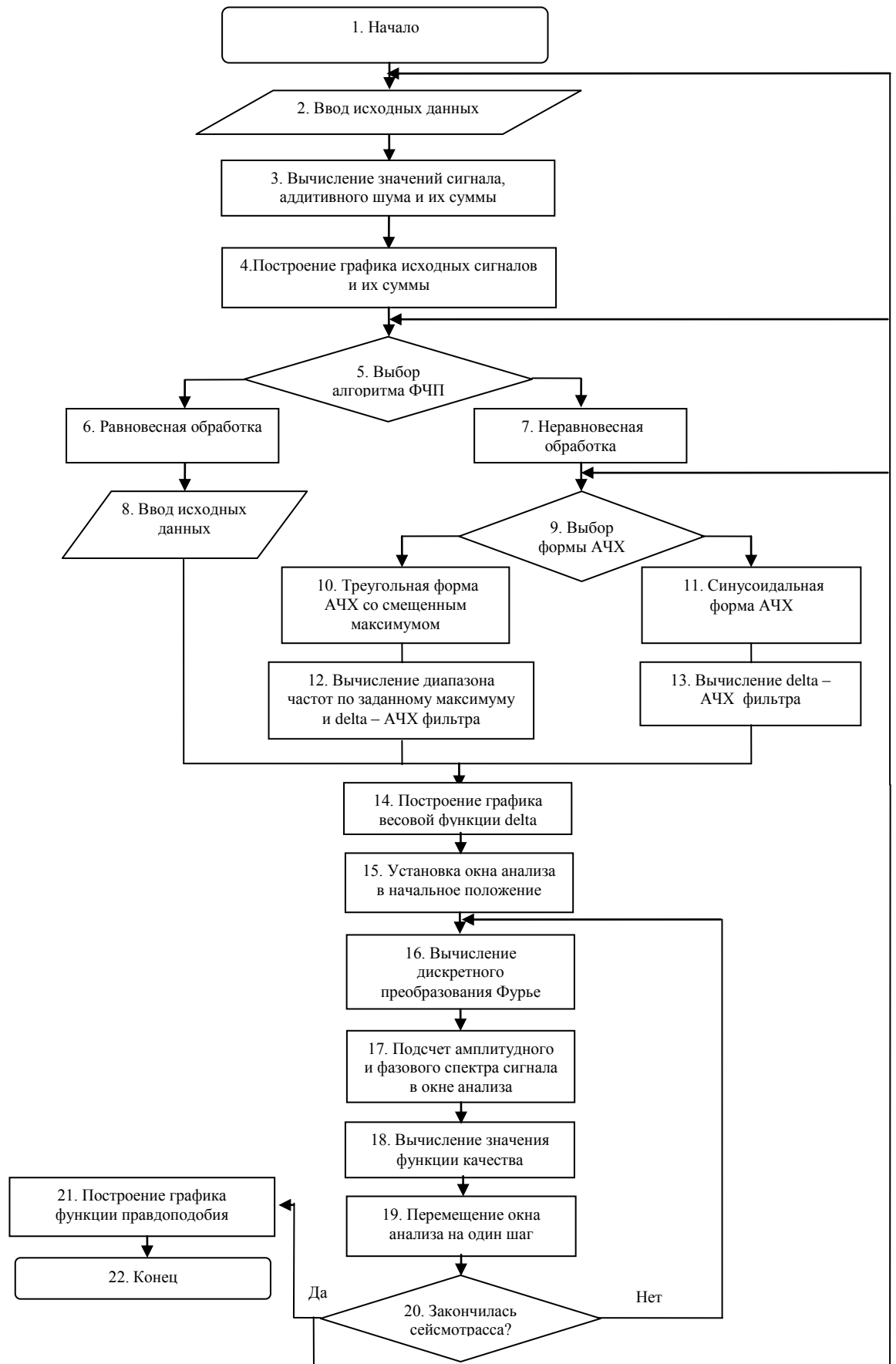


Рисунок 12 – Структурная схема алгоритма

В качестве примера, иллюстрирующего последовательность выполнения операций в алгоритме прослеживания, на рисунке 13 приведена диаграмма для модельного сейсмоимпульса [5]. Из диаграммы видно, что при прохождении окна анализа через импульс (рисунок 13 б), наклон фазового спектра меняется на противоположный (рисунок 13 в). При этом, в тот момент, когда центр окна анализа совпадает с максимумом импульса, фазовый спектр становится стационарным, и функция правдоподобия достигает своего максимума (рисунок 13 д).

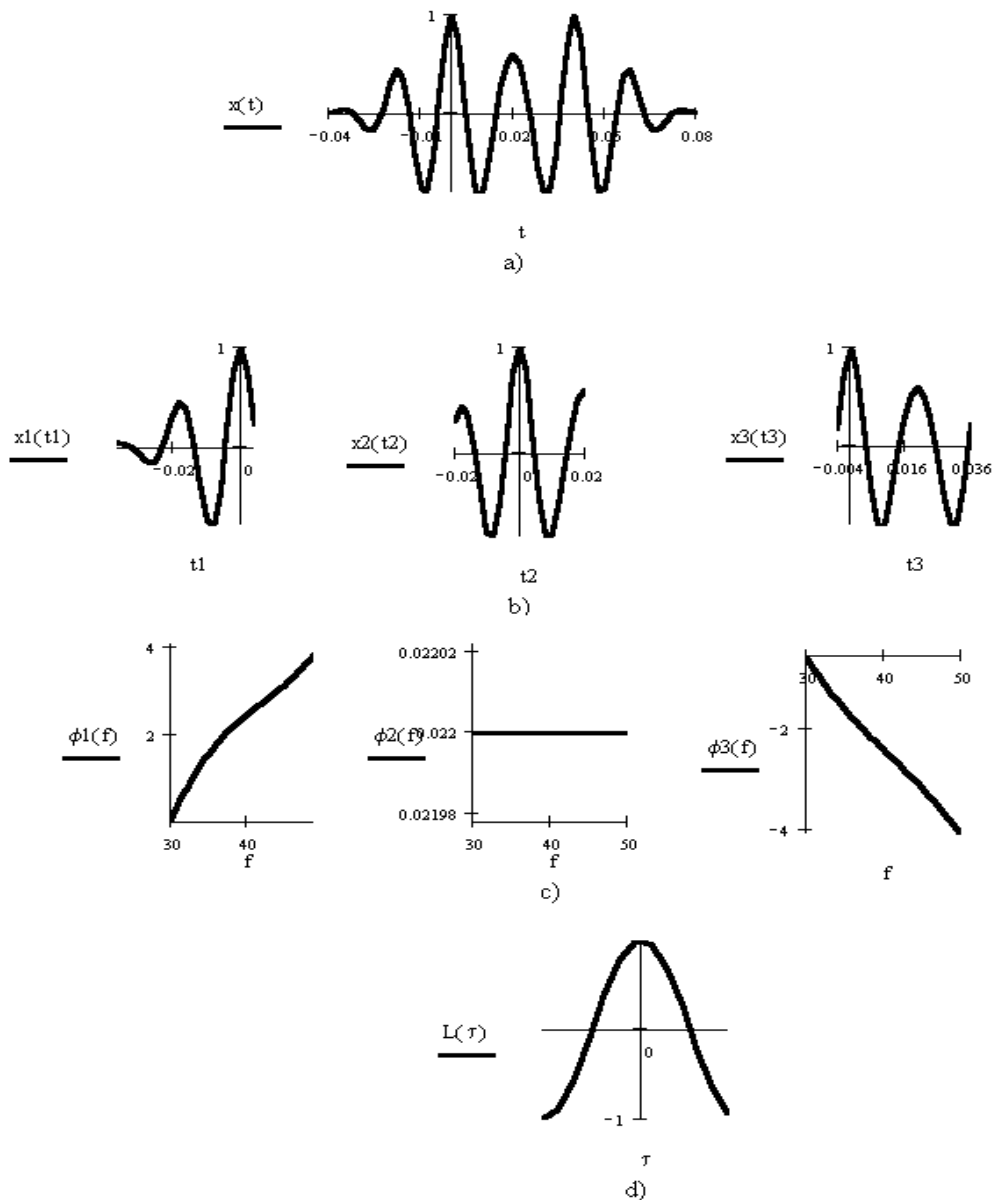


Рисунок 13 – Диаграмма, поясняющая алгоритм фазочастотного прослеживания волн

Для реализации разработанного алгоритма можно использовать различные пакеты: MATLAB, Mathcad, C++ Builder и др. В данной работе применяется математический пакет MATLAB.

Язык MATLAB является высокоуровневым интерпретируемым языком программирования, включающим основанные на матрицах структуры данных, интегрированную среду разработки, широкий спектр функций, интерфейсы к программам на других языках программирования и объектно-ориентированные возможности написанным.

MATLAB имеет большое количество (несколько сотен) встроенных функций для анализа данных, которые покрывают практически все области математики, в частности: математическая статистика и анализ данных — статистические функции, цифровая фильтрация, статистическая регрессия, быстрое преобразование Фурье и другие.

Еще стоит выделить одну из сильных сторон MATLAB – визуализация данных. Пользователю предоставляется большой выбор функций для построения графиков, в том числе трёхмерных и наглядного анализа данных [43].

С помощью математического пакета MATLAB написана программа, реализующая алгоритм фазочастотного прослеживания.

Программа состоит из двух файлов-функций и основного m-файла. Листинги программы представлены в Приложении Б.

В функции *triangular.m* (Приложение Б Листинг 1) рассчитывается весовая функция в виде треугольника со смещенным максимумом по формуле (2.1.3.4). Входными параметрами данной функции являются: верхние и нижние частоты; средняя точка, полученная исходя от максимальной и минимальной заданной частоты; частота, которая меняется в пределах установленной верхней и нижней частот. Выходным параметром является весовая функция в виде треугольника со смещенным центром.

В функции *sum.m* вычисляется выражение (2.1.3.1), которое необходимо непосредственно для построения оптимального фазочастотного алгоритма

прослеживания волн. В качестве искусственно задаваемого весового коэффициента, выбрана треугольная функция, определенная в файле-функции *triangular.m*. Входными параметрами являются: верхние и нижние частоты; средняя точка, полученная исходя от максимальной и минимальной заданной частоты; частота, которая меняется в пределах установленной верхней и нижней частот; количество отсчетов; фазочастотный спектр заданной функции импульса с «колокольной» огибающей. Выходным параметром является выражение (2.1.3.1).

В основном *m* - файле *task.m*(Приложение Б Листинг 3) задаются основные параметры необходимые для реализации алгоритма фазочастотного прослеживания:

- начальное и конечное положения времени $T_m = 0.05$;
- шаг дискретизации $dT = 0.002$;
- временное положение сигнала Δt ;
- амплитуда $a_0 = 1$;
- коэффициент, определяющий затухание импульса $b = 60$;
- основная частота $f_0 = 60$;
- начальная фаза $f_i = 0$;
- граничные частоты $f_{left}=20, f_{right}=60$;
- оценка временного положения, равное количеству отсчетов τ ;
- математическое ожидание $m_x = 0$;
- среднеквадратичное отклонение $sigma = 1$.

Далее определяется вид входной функции, которая является импульсом с «колокольной» огибающей. Следующим шагом является получения амплитудного и фазочастотного спектров входного импульса по формулам (2.3.3) и (2.3.4). Для этого выполнены следующие действия:

- прямое преобразование Фурье от заданного импульса с помощью встроенной функцией *fft*;

- нахождения амплитудного спектра входной функции, для этого рассчитывается модуль от полученного преобразования;
- выделение реальной и мнимой части прямого преобразования Фурье от функции, заданного импульсом с «колокольной» огибающей;
- расчет при помощи встроенной функцией *atan2* фазочастотный спектр, как отношение мнимой части к реальной.

Затем производится суммирование входного импульса и шума, который представлен в виде аддитивных гауссовых помех. Следующим шагом является вызов функции *sum.m*, которая реализует выражение (2.1.3.1) с необходимыми входными параметрами. Далее визуализируем полученные результаты в виде графика выходной функции с добавлением шумовой составляющей и графика после реализации алгоритма фазочастотного прослеживания.

Таким образом, в результате проведенных исследований подготовлен к реализации в программной среде MATLAB алгоритм сжатия сложных сигналов на основе субьоптимальной обработки ФЧХ. Исследования разрешающей способности данного алгоритма будут проведены в 4 разделе настоящей работы.

3 Разработка алгоритма корректирующей деконволюции сейсмических записей

Для построения алгоритма деконволюции (обратная свертка) был выбран и реализован алгоритм корректирующей деконволюции Е.А. Козлова, Г.Н. Гогоневкова [44].

3.1 Метод корректирующей деконволюции

В ряду процедур цифровой обработки сейсмических данных одно из важнейших мест занимает деконволюция (обратная фильтрация), предназначенная для повышения разрешенности сейсмической записи. Она успешно применяется при обработке результатов морских и наземных сейсмических наблюдений. Однако нередко бывают случаи, когда применение деконволюции не приводит к заметному полезному эффекту, и даже наблюдается ухудшение волновой картины.

Из анализа проведенного выше (глава 1.3) следует, что если сейсмическая запись соответствует модели, которая выглядит следующим образом:

$$y(t) = x(t)u(t) + n(t) = x_u(t) + n(t), \quad (3.1.1)$$

где $x(t)$ – исходный сейсмический сигнал; $u(t)$ – импульсная сейсмограмма; $n(t)$ – случайные помехи.

Если известен комплексный спектр исходного сигнала $S(\omega)$ [или форма сигнала $s(t)$] и энергетический спектр помех $B(\omega)$ [или автокорреляционная функция помех $b_n(t)$], то искомый оператор обратного фильтра (его комплексный спектр $L(\omega)$) может быть найден по формуле [45].

$$L(\omega) = \frac{S^*(\omega)}{|S(\omega)|^2 + \frac{B_n(\omega)}{\sigma_u^2}}, \quad (3.1.2)$$

где $S^*(\omega)$ – комплексно-сопряженный спектр исходного сигнала; σ_u^2 – дисперсия импульсной сейсмограммы.

Этот оператор обеспечит оптимальное сжатие сигнала. Но функции $S(\omega)$ и $B_n(\omega)$, которые необходимо знать для каждого сейсмического канала, либо невозможно определить.

Поэтому на практике алгоритмы, построенные непосредственно по формуле (3.1.2), не используются. Применение находят субоптимальные процедуры, в которых неизвестные или трудно определяемые исходные данные заменяются некоторой приближенной обобщенной информацией, определяемой и задаваемой геофизиком часто на основе только визуального анализа обрабатываемых сейсмических материалов. Эта информация вводится в программу деконволюции в виде некоторых параметров, определяющих ход и соответственно результат обработки. От того, насколько точно выбранные параметры соответствуют характеристикам обрабатываемого волнового поля и отвечают геологической задаче, зависит эффективность деконволюции.

В связи с этим представляется целесообразным на реальном материале проанализировать роль и влияние задаваемых геофизиком параметров программы на результат обработки.

Этот анализ проведен применительно к самому распространенному алгоритму — корректирующей деконволюции, сочетающему идеальный обратный фильтр с полосовой фильтрацией и позволяющему наиболее просто учитывать априорную информацию о характеристиках волнового поля при выборе параметров программы. Важно отметить, что в других алгоритмах регулируемые параметры могут частично отличаться от параметров рассматриваемого алгоритма, тем не менее, выявленные закономерности косвенно помогут правильно ориентироваться при выборе параметров.

3.2 Разработка алгоритма корректирующей деконволюции для принятой модели сейсмического поля

Рассмотрим основные этапы алгоритма корректирующей деконволюции. Прежде чем описывать алгоритм корректирующей деконволюции, выделим основные допущения:

- импульсная сейсмограмма $u(t)$ представляет собой случайный некоррелированный процесс;
- исходный сейсмический сигнал $s(t)$ является минимально-фазовым и неизменным в пределах выбранного интервала трассы;
- известны границы области частот $f_1 < f < f_2$ в пределах, которых полезный сигнал сильнее помех;
- внутри области $f_2 - f_1$ помехи представлены белым шумом.

Эти допущения позволяют получать основной объем информации непосредственно из вычисления обратного оператора информации непосредственно из сейсмической трассы, дополняя ее только информацией в виде нескольких параметров. Параметры характеризуют граничные значения функций и некоторые константы. Те из параметров, которые не зависят или слабо зависят от характеристик волнового поля, фиксируют непосредственно в программе. Значения других параметров вводит геофизик при формировании машинного задания для выполнения операции обратной фильтрации. Далее приведем этапы реализации данного алгоритма на ЭВМ [44,45,46].

1. На первом этапе по участку сейсмической трассы $y(t) = 0, 1, \dots, I$ рассчитывается нормированная автокорреляционная функция:

$$\hat{R}_k = \frac{\sum_{i=m}^M y_i y_{i+k}}{\sqrt{\sum_{i=m}^M y_i^2}}, \quad (3.2.1)$$

где $k = 0, 1, \dots, K$;

$y(t)$ – сейсмическая модель волнового поля (3.1.1).

Параметрами на этом этапе являются значения m и M , определяющие начальное и конечное время интервала сейсмической трассы, по которому рассчитывается \hat{R}_k и число выборок $(K + 1) \hat{R}_k$, равное, как можно будет видеть ниже, длине обратного оператора.

2. Чтобы уменьшить погрешность при аппроксимации автокорреляционной функции исходного сигнала, необходимо умножить её на треугольную весовую функцию:

$$\varphi_k = 1 - \frac{k}{K}. \quad (3.2.2)$$

3. Решением матричного уравнения

$$\begin{pmatrix} R_0 & R_1 & \dots & R_k \\ R_1 & R_0 & \dots & R_{k-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_k & R_{k-1} & \dots & R_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_0 \\ l_1 \\ \dots \\ l_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3.2.3)$$

где

$$R_0 = R_0 \left(1 + \frac{b_0}{R_0} \right), \quad (3.2.4)$$

вычисляется обратный оператор $(l_0 \dots l_k)$, восстанавливающий весь спектр частот от нуля до частоты Найквиста $\frac{1}{2} \Delta t$ (Δt — интервал выборки).

Добавлением в главную диагональ матрицы параметра b_0 , численно равного энергии предполагаемого заданного белого шума, осуществляется регуляризация решения, включающие резкое усиление слабейших составляющих спектра сигнала.

4. Рассчитывается оператор полосового фильтра:

$$h_g = \frac{1}{\pi g \Delta t} \frac{\cos \xi g \Delta t}{1 - \frac{4}{\pi^2} \xi^2 g^2 \Delta t^2} (\sin(2\pi f_1 g \Delta t) - \sin(2\pi f_2 g \Delta t)), \quad (3.2.5)$$

$$g = -G, \dots, 0, \dots, G,$$

где в качестве параметров выступают значения коэффициента крутизны срезов фильтра ξ , граничные частоты фильтра f_1 и f_2 и длина оператора фильтра $2G - 1$.

5. Сверткой функций l_k и h_g определяется обратный оператор корректирующей деконволюции:

$$\hat{l}_k = \sum_{g=k-G}^{k+G} h_g l_{k-g}. \quad (3.2.6)$$

6. Сверткой \hat{l}_k с исходной трассой y_i вычисляется результат обратной фильтрации:

$$\bar{y}_i = \sum_{k=0}^K l_k y_{i-k}. \quad (3.2.7)$$

Таким образом, необходимо дополнительно задать восемь перечисленных параметров. Два из них ξ и $2G + 1$ в малой степени зависят от исходных данных и их можно зафиксировать в программе. Остальные непосредственно обусловлены характеристиками обрабатываемых данных и поставленной геологической задачей, поэтому они задаются геофизиком [45]. На рисунке 14 представлена структурная схема алгоритма корректирующей деконволюции.

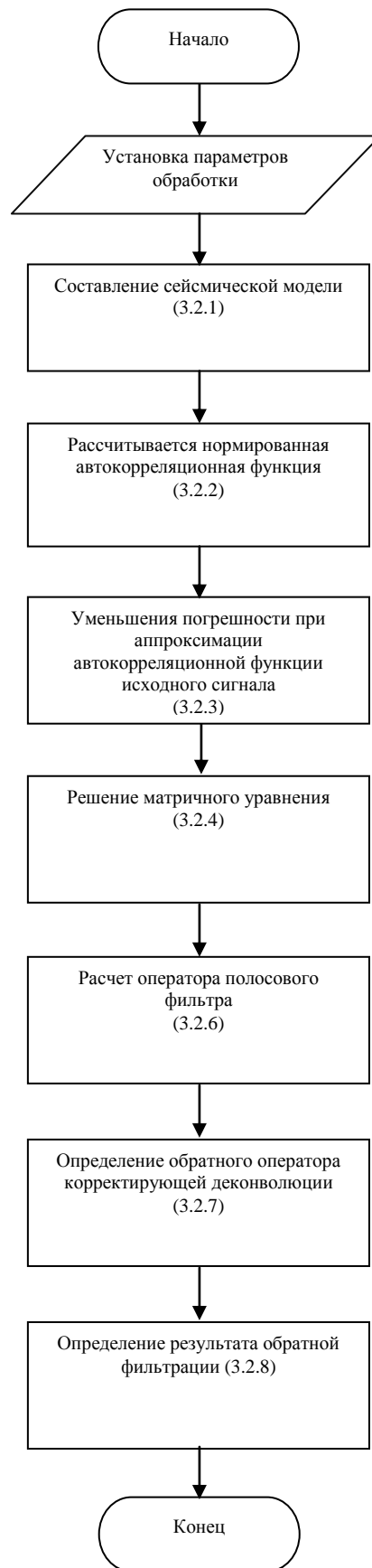


Рисунок 14 – Структурная схема алгоритма корректирующей деконволюции

3.3 Реализация алгоритма корректирующей деконволюции в математическом пакете MATLAB

С помощью математического пакета MATLAB написана программа, реализующая алгоритм корректирующей деконволюции. Преимущества данного пакета описаны в разделе 2.3.2.1.

Программа состоит из трех файлов-функций и основного m-файла. Листинги программы представлены в Приложении В.

В функции *Rk.m* (Приложение В Листинг 1) рассчитывается нормированная автокорреляционная функция по формуле (3.2.1). Входными параметрами данной функции являются: входная функция, представленная в виде импульса с «колокольной» огибающей с добавлением шумовой составляющей и без неё, длина заданного импульса, начальное и конечное время интервала сейсмической трассы. Выходным параметром является нормированная автокорреляционная функция.

В функции *phi.m* (Приложение В Листинг 2) рассчитывается треугольная весовая функция (3.2.2). Входными параметрами функции являются длина обратного оператора и число выборок. Выходным параметром является треугольная весовая функция.

В функции *Filter.m* (Приложение В Листинг 3) рассчитывается оператор полосового фильтра (3.2.5). Входными параметрами функции являются коэффициент крутизны, граничные частоты, длина оператора фильтра и шаг дискретизации. Выходным параметром является оператор полосового фильтра.

Для удобства описания основного m-файла *scr.m*, выделив основные этапы работы (Приложение В Листинг 4):

1. Определение входной функции, которая задается в виде импульса с «колокольной» огибающей (2.3.1.4). Для этого задаются начальное и конечное положения времени $T_m = 0.05$, шаг дискретизации $dT = 0.002$, временное положение сигнала Δt и параметры, необходимые для реализации входной

функции (амплитуда $a_0 = 1$, коэффициент, определяющий затухание импульса $b = 60$, основная частота $f_0 = 60$ и начальная фаза $f_i = 0$).

2. Получения амплитудного и фазочастотного спектров входного импульса по формулам (2.3.3) и (2.3.4). Для этого сначала задаются граничные частоты $f_{left} = 20$, $f_{right} = 60$ и шаг дискретизации по частоте dF . Затем находится прямое преобразование Фурье от заданного импульса с помощью встроенной функцией *fft*. Для нахождения амплитудного спектра входной функции рассчитывается модуль от полученного преобразования. Далее выделяется реальная и мнимая части прямого преобразования Фурье от функции, заданного импульсом с «колокольной» огибающей. Затем рассчитываем при помощи встроенной функцией *atan2* фазочастотный спектр, как отношение мнимой части к реальной.

3. Построение модели (2.3.1.2). К полученной входной функции прибавляем аддитивный нерегулярный шум, с числовыми характеристиками: математическим ожиданием ($m_x = 0$) и средним квадратичным отклонением ($sigma = 1$).

4. Выполнение процедуры уменьшения погрешности аппроксимации автокорреляционной функции исходного сигнала с добавлением шума. Необходимо сначала определить длину заданного импульса $K = 51$ (количество отсчетов), начальное и конечное время интервала сейсмической трассы $m = 1$, $M = 51$. Следующим шагом, вызываются функции *Rk.m* и *phi.m*, а затем в организованном цикле по k перемножаются, где k меняется по количеству отсчетов.

5. Вычисление обратного оператора, с помощью решения матричного уравнения (3.2.3). Для этого организуется два цикла i и j , которые меняются относительно строк и столбцов матрицы соответственно. Размер матрицы равен $[K - 1; K - 1]$.

6. Вызов функции *Filter.m*, для которой задается параметры крутизны $ksi = 3$ и длина оператора $G = 25$.

7. Определение обратного оператора корректирующей деконволюции по формуле (3.2.6). Суммирование реализуется с помощью двух циклов по k и g , где k меняется по количеству отсчетов, а g от $G - k$ до $G + k$.

8. Получение результата обратной фильтрации (3.2.7). Для нахождения суммы создаются два цикла по i и k , где k меняется по количеству отсчетов, а i по длине интервала времени.

9. Визуализация всех результатов полученных на каждом этапе, для проведения подробного анализа.

4 Исследование надежности разработанных алгоритмов на модели сейсмических записей

Исследование разрешающей способности разработанных алгоритмов сжатия сигналов проводилось на построенной модели волнового сейсмического поля (см. раздел 2.3.1 настоящей работы) путем статистического моделирования на ЭВМ.

4.1 Оценка разрешающей способности алгоритма корректирующей деконволюции

На рисунке 15 представлена модель сейсмической записи, представляющая собой суперпозицию трех импульсов с колокольной огибающей в отсутствии нерегулярного шума.

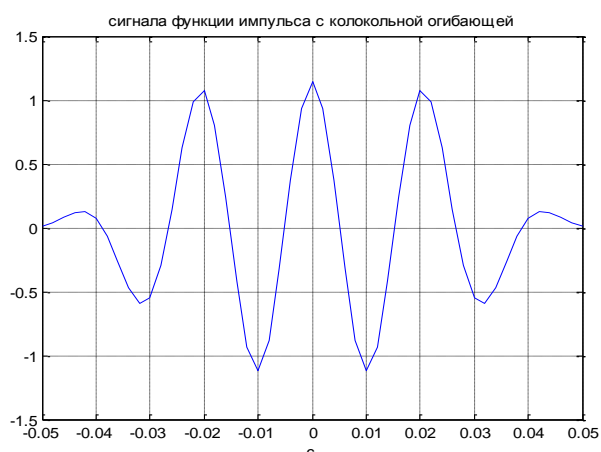


Рисунок 15 – Входная функция, заданная в виде суммы импульсов с «колокольной» огибающей в точках $[-0.02; 0; 0.02]$.

На рисунке 16 показан результат корректирующей деконволюции, выполненной в предположении, что входные сигналы являются минимально-фазовыми.

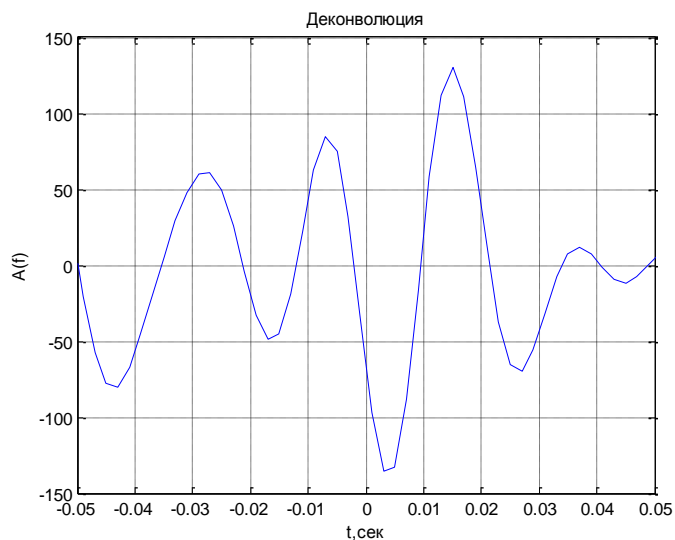


Рисунок 16 – Результат работы алгоритма корректирующей деконволюции на примере входной функции, заданного в виде суммы импульсов с «колокольной» огибающей в точках [- 0.02; 0; 0.02]

Из сопоставления рисунков видно, что сигналы действительно сжались, однако временное положение сигналов, приуроченное к их максимумам, не соответствует временному положению на исходной записи. Это связано с тем, что сделано неверное предположение о ФЧХ сигналов.

На рисунке 17 представлены те же три импульса, но при наличии аддитивного гауссова шума. Отношение сигнал/шум составляет 2.



Рисунок 17 – Входная функция, заданного в виде суммы импульсов с «колокольной» огибающей в точках [- 0.02; 0; 0.02] и с добавлением гауссовского шума.

На рисунке 18 показан результат деконволюции зашумленной последовательности трех импульсов. Из рисунка видно, что алгоритм корректирующей деконволюции не только сжал сигналы, но и достаточно хорошо отфильтровал помеху. Однако временное положение сигналов опять определено с погрешностью.

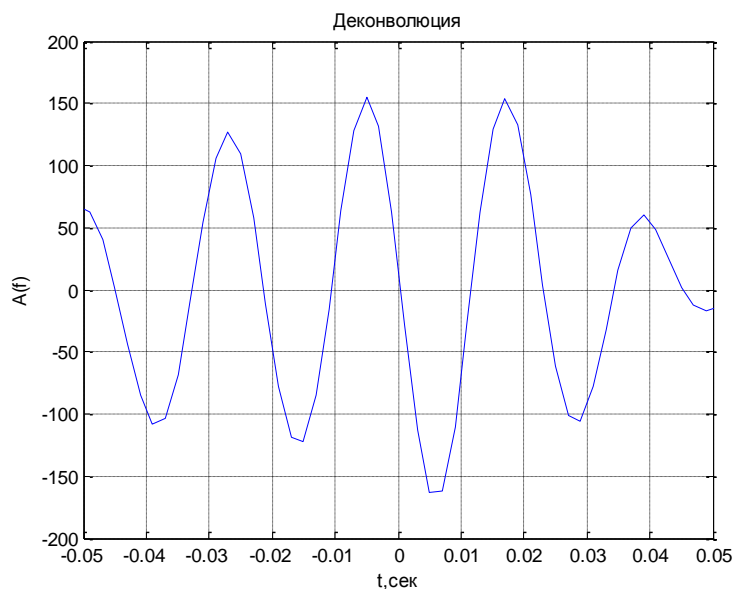


Рисунок 18 – Результат работы алгоритма корректирующей деконволюции на примере входной функции, заданного в виде суммы импульсов с «колокольной» огибающей в точках $[-0.02; 0; 0.02]$ и добавлением гауссовского шума.

Таким образом, алгоритм корректирующей деконволюции позволяет решать поставленную задачу, однако для получения надежных оценок временного положения сигналов необходимо точно задавать значения ФЧХ, что при реализации уже существующей структуре алгоритма крайне затруднительно.

4.2 Оценка разрешающей способности фазочастотных алгоритмов

Исследование разрешающей способности алгоритмов ФЧП на построенной модели (см. раздел 2.3.1) проводилось следующим образом. Выбирались параметры прослеживания, при которых разрешение являлось наилучшим. Далее непосредственно осуществлялось фазочастотное

прослеживание (ФЧП), по результатам которого формировалась функция правдоподобия. Подобные процедуры повторялись для различных интервалов между импульсами. Значения интервалов формировались исходя из реальных соотношений при исследовании тонкослоистых сред. Так при моделировании задавались интервалы от 30 до 10 мс. При этом ширина окна анализа варьировалась от 60 до 14 мкс. Для качественной иллюстрации достигнутого разрешения на рисунке 15 показана интерференционная картина (рисунк 21) и функция правдоподобия (рисунк 22, 23) при сдвиге между импульсами 10 мс (5 отсчетов) и длительностях окна анализа соответственно 60мс (31 отсчет) и 22 мс (11 отсчетов).

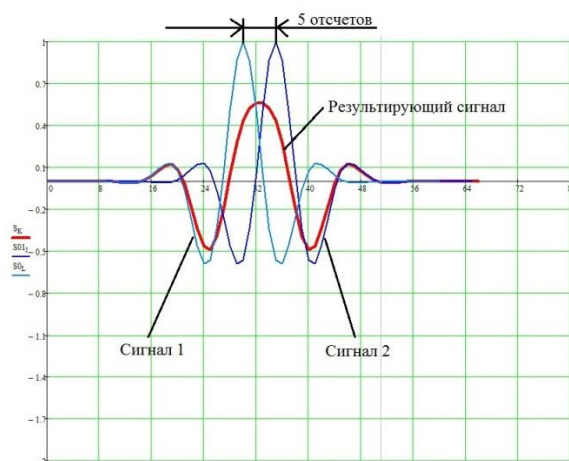


Рисунок 21 – Интерференционная картина двух импульсов, демонстрирующая работу алгоритма ФЧП



Рисунок 22 – График функции правдоподобия при сдвиге между импульсами 10 мс



Рисунок 23 – График функции правдоподобия при сдвиге между импульсами 60 мс

Из анализа приведенных рисунков видно, что при уменьшении окна анализа, разрешение записи на формируемой функции правдоподобия возрастает (наличие дополнительных экстремумов). При этом удается выделить не только глобальные, но и локальные экстремумы, которые не видны на исходных записях. Для количественной оценки разрешающей способности алгоритмов ФЧП на рисунке 24 показана модель волнового поля и функции прослеживания для методов ФЧП с равновесной (рисунк 25) и неравновесной обработкой (рисунк 26) для сейсмической трассы, которая определяет предельное разрешение сигналов.

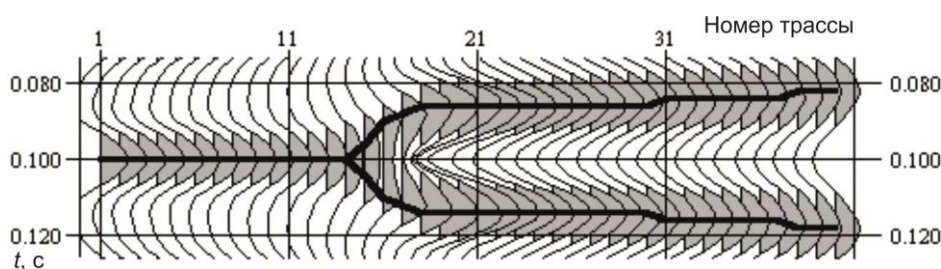


Рисунок 24 – Модель волнового поля

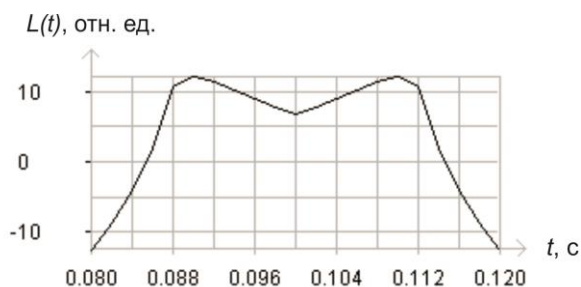


Рисунок 25 – Функция прослеживания для алгоритма ФЧП с равновесной обработкой (разрешение 16 мс).

Длительность окна прослеживания $T = 40$ мс; полоса частот $\Omega = 20 \div 60$ Гц.

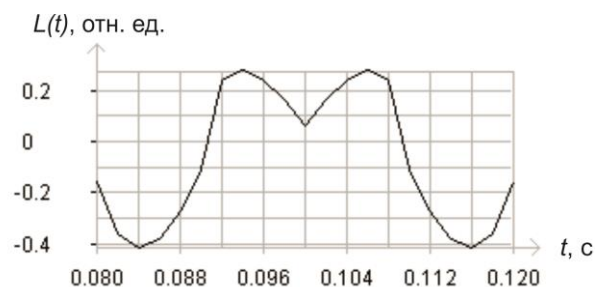


Рисунок 26 – Функция прослеживания для алгоритма ФЧП с неравновесной обработкой (разрешение 11 мс).

Длительность окна прослеживания $T = 40$ мс; полоса частот $\Omega = 20 \div 60$ Гц.

Приведенный пример показывает высокую разрешающую способность фазочастотных алгоритмов. Это позволяет говорить о возможности определения временного местоположения отражающих границ при фазочастотном прослеживании с высокой точностью. Еще более убедительные

количественные результаты исследования разрешающей способности алгоритма фазочастотного прослеживания с неравновесной обработкой при различной длительности окна прослеживания T приведены на рисунке 27.

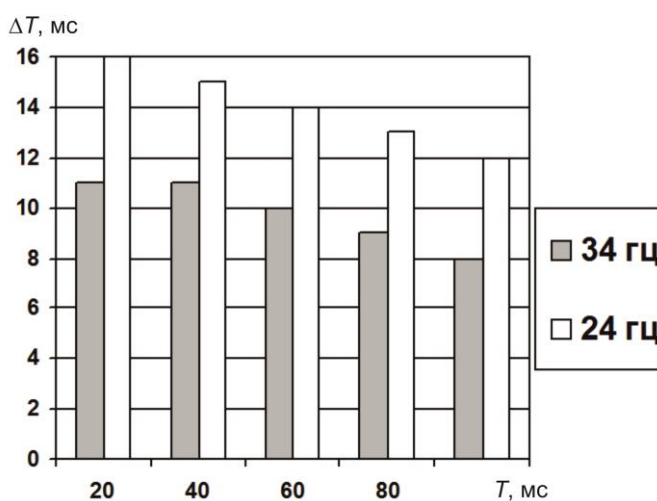


Рисунок 27– Разрешающая способность (в мс) алгоритма с неравновесной обработкой для сигналов с частотой 24 и 34 Гц.

Из анализа диаграммы следует, что методы фазочастотного прослеживания сигналов с неравновесной обработкой позволяют разрешать сигналы, сдвинутые друг относительно друга, не более чем на треть видимого периода.

4.3. Сопоставление рассмотренных алгоритмов

Представленные в разделах 4.1 и 4.2 настоящей работы результаты исследования алгоритмов сжатия показали, что предлагаемый подход на основе оптимальной и субоптимальной обработки ФЧХ может увеличить точность восстановления отражающих сейсмических границ по сравнению с алгоритмами деконволюции в зонах интенсивной интерференции волн. Высокая разрешающая способность фазочастотных алгоритмов объясняется как самой структурой алгоритмов (возможностью перестраиваемого набора весовых функций, так и привлечением дополнительной априорной информации, извлекаемой из ФЧХ регистрируемых волн

5 Примеры реализации фазочастотных алгоритмов на реальных данных

Для иллюстрации разрешающей способности методов фазочастотного прослеживания на рисунках 28 и 29 приведены фрагменты разреза (Крапивинское месторождение) после стандартной обработки (рисунок 28) и фазочастотного прослеживания (рисунок 29).

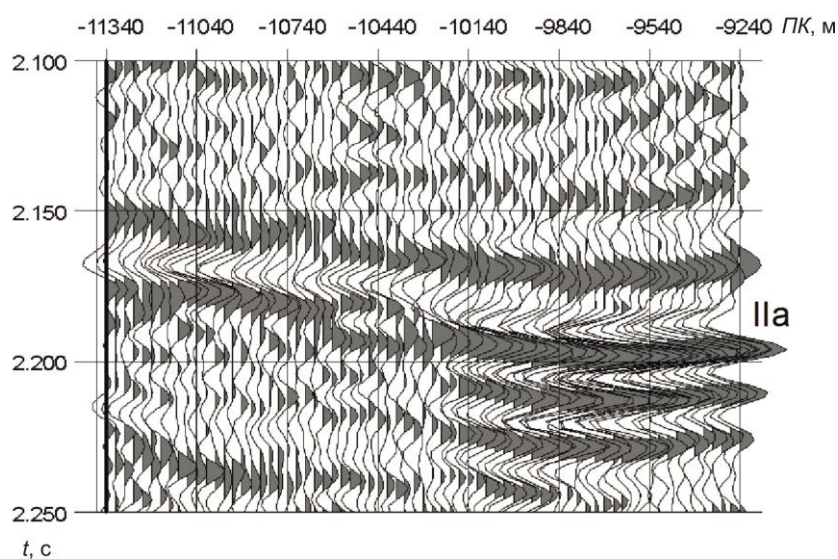


Рисунок 28 – Фрагменты разреза (Крапивинское месторождение) после стандартной обработки

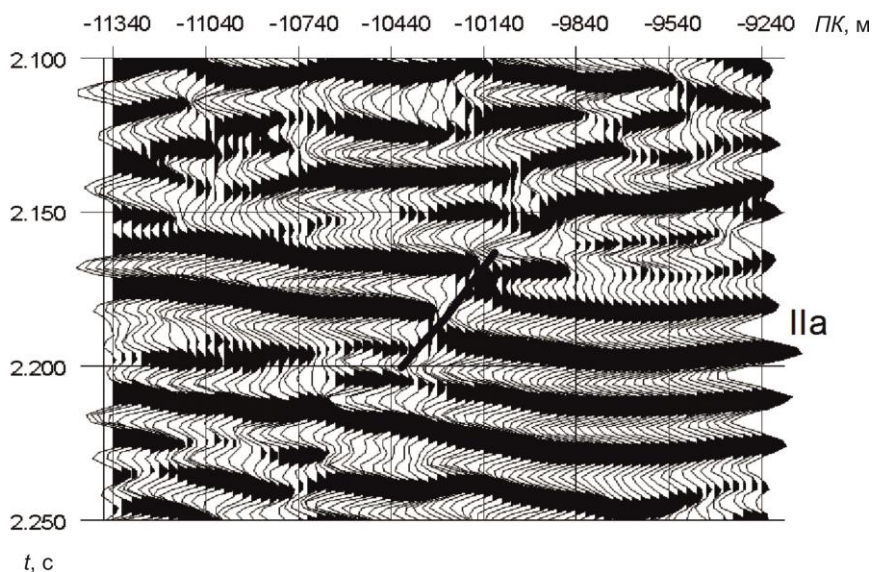


Рисунок 29 – Фрагменты разреза разреза (Крапивинское месторождение) после фазочастотного прослеживания

Из рисунка видно, что в результате проведения фазочастотного прослеживания удалось выделить дополнительные отражающие границы, что в свою очередь дало возможность увидеть амплитудно-выраженный сброс, которого на фрагменте разреза после стандартной обработки нет.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8БМ41	Злобиной Елене Вячеславовне

Институт	ИК	Кафедра	ПМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Прикладная математика и информатика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	+
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Ставка социального налога и НДС</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	+
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	+
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
<i>Календарный график выполнения ВКР</i>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. Менеджмента	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8БМ41	Злобина Елена Вячеславовна		

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность ресурсосбережение

Одной из важнейших задач при анализе сейсмических волновых полей является построение математических моделей сейсмических сигналов, адекватно описывающих реальные сейсмоимпульсы, на основе которых будет строиться эксперимент по изучению данных импульсов.

Данная разработка предназначена для обработки, анализа данных о сейсмических сигналах и результатах исследований над данными сигналами.

Разработанные в рамках магистерской диссертации методы и алгоритмы будут использованы для проведения обработки реальных сейсмических данных в программно-алгоритмическом комплексе «Геосейф», созданным сотрудниками кафедры прикладной математики.

6.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации проекта необходимо рационально запланировать занятость каждого из его участников (научный руководитель и исполнитель) и сроки проведения отдельных работ. В таблице 1 представлен перечень работ и продолжительность их выполнения во время выполнения диссертации «Разработка и исследование методов сжатия сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик»

Таблица 1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Формирование и составление требований к проекту	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике, анализ предметной области	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100%

		И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 20% И – 100%
Разработка на основе разработанных ранее методов новые методы и алгоритмы	НР, И	НР – 100% И – 80%
Реализация полученных алгоритмов в математическом пакете Matlab	И	И – 100%
Анализ полученных результатов	НР, И	НР – 80% И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

6.1.1 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ при выполнении магистерской диссертации является важным этапом, так как мы можем определить трудоемкость проводимых работ, а трудовые затраты составляют основную часть стоимости научно-исследовательской работы (НИР).

Под трудоемкостью работ понимают максимально допустимые затраты труда в человеко-днях на выполнение НИР с учетом организационно технических мероприятий, обеспечивающих наиболее рациональное использование выделенных ресурсов.

Существуют разные методы расчета продолжительности этапов работы, в рамках данной НИР используется экспертный способ. Он предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию.

Для определения вероятных (ожидаемых) значений продолжительности работ $t_{ож}$ применяется следующая формула.

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (6.1.1)$$

где t_{min} – минимальная продолжительность работы, дн.;

t_{max} – максимальная продолжительность работы, дн.

Для выполнения перечисленных в таблице 2 работ требуются специалисты:

- математик-программист – в его роли действует исполнитель НИР;
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ($T_{РД}$) ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}, \quad (6.1.2)$$

где $t_{ож}$ – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей;

$K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ.

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{КАЛ}, \quad (6.1.3)$$

где $T_{КД}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{К}$ – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле:

$$T_{КАЛ} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (6.1.4)$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни ($T_{КАЛ} = 365$);

$T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 52$);

$T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 10$).

По формуле (6.1.4) рассчитаем:

$$T_{КАЛ} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,2.$$

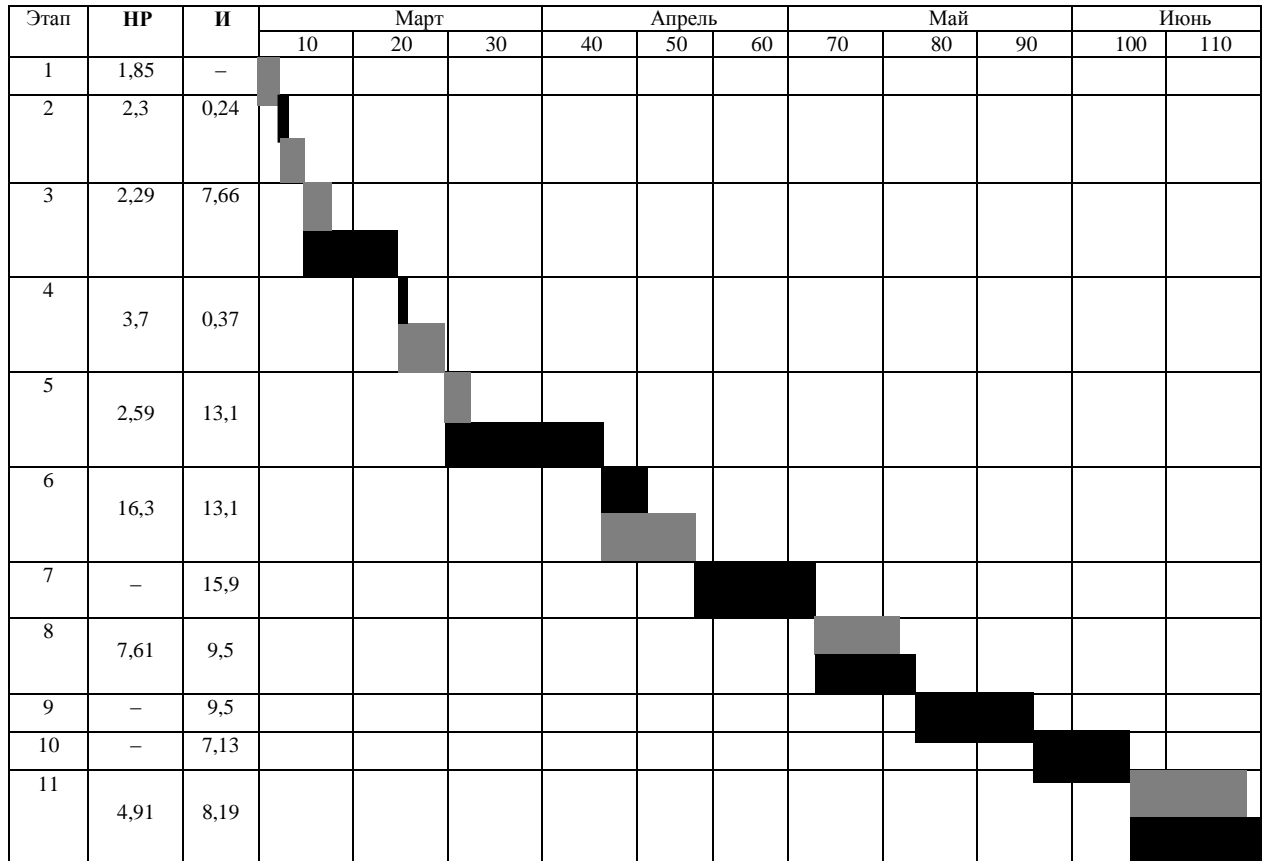
В таблице 2 приведен расчет определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. По показанию полученных величины трудоемкости этапов по исполнителям $T_{КД}$ построен линейный график осуществления проекта (таблица. 5.3).

Таблица 2 – Расчет трудозатрат на выполнения проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	1	2	1,4	1,54	–	1,85	–
Формирование и составление требований к проекту	НР, И	1	3	1,8	1,98	0,2	2,3	0,24
Подбор и изучение материалов по тематике, анализ предметной области	НР, И	5	7	5,8	1,91	6,38	2,29	7,66
Разработка календарного плана	НР, И	2	4	2,8	3,08	0,31	3,7	0,37
Изучение и обсуждение литературы	НР, И	7	14	9,8	2,16	10,9	2,59	13,1
Разработка на основе разработанных ранее методов новые методы и алгоритмы	НР, И	10	16	12,4	13,6	10,9	16,3	13,1
Реализация полученных алгоритмов в математическом пакете Matlab	И	8	14	10,4	–	11,4	–	15,9
Анализ полученных результатов	НР, И	6	9	7,2	6,34	7,92	7,61	9,5
Оформление расчетно-пояснительной	И	6	9	7,2	–	7,92	–	9,5

записки								
Оформление графического материала	И	5	6	5,4	–	5,94	–	7,13
Подведение итогов	НР, И	5	8	6,2	4,09	6,82	4,91	8,19
Итого:				70,4	34,7	68,7	41,6	105,1

Таблица 3 – Линейный график работ



НР – ■ ; И – ■

6.1.2 Расчет накопления готовности проекта

Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов по окончании текущего (i -го) этапа выполнен общий объем работ по проекту в целом. Степень готовности определяется по формуле:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}}, \quad (6.1.2.1)$$

где $TP_{общ.}$ – общая трудоемкость проекта;

TP_i (TP_k) – трудоемкость i -го (k -го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$;

TP_i^H – накопленная трудоемкость i -го этапа проекта по его завершении;

TP_{ij} (TP_{kj}) – трудоемкость работ, выполняемых j -м участником на i -м этапе, здесь $j = \overline{1, m}$ – индекс исполнителя, в нашем примере $m = 2$.

В таблице 4 – представлены расчеты нарастания технической готовности работы и удельного веса каждого этапа

Этап	TP_i , %	CT_i , %
Постановка задачи	2,99	2.99
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	2,82	5.81
Подбор и изучение материалов по тематике	18,32	24.13
Разработка календарного плана	3,28	27.41
Обсуждение литературы	5,83	33.24
Выбор структурной схемы устройства	17,78	51.02
Выбор принципиальной схемы устройства	13,83	64.86
Расчет принципиальной схемы устройства	11,10	75.96
Оформление расчетно-пояснительной записки	7,69	83.65
Оформление графического материала	5,77	89.41
Подведение итогов	10,59	100.00

6.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;

- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- оплата услуг связи;
- прочие (накладные расходы) расходы.

6.2.1 Расчет затрат на материалы

Величина материальных затрат определяется исходя из стоимости всех материалов, используемых при выполнении магистерской диссертации, в том числе расходы на их приобретение. В таблице 5 представлен расчет затрат на используемые материалы.

Таблица 5 – Расчет затрат на используемые материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	190	1 уп.	150
Картридж для принтера	1550	1 шт.	1550
Итого:			1700

Транспортно-заготовительные расходы (ТЗР) составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны:

$$C_{mat} = 1700 \cdot 1,05 = 1785 \text{ руб.}$$

6.2.2 Расчет заработной платы

Смета затрат на оплату труда в большинстве случаев составляет наибольшую часть себестоимости ВКР. Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-м}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-м}} = \frac{МО}{21,83}, \quad (6.2.2.1)$$

учитывающей, что в году 298 рабочих дней и, следовательно, в месяце в среднем 21,83 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 6. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{ПР} = 1,1$; $K_{доп.ЗП} = 1,113$; $K_p = 1,3$.

Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_u = 1,1 \cdot 1,113 \cdot 1,3 = 1,62$.

Таблица 6 – Расчет затрат на полную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	23 264,86	936,97	35	1,62	53 126,2
И	20 000	805,48	69	1,62	90 036,6
Итого:					143162,75

6.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, то есть:

$$C_{соц.} = C_{зн} \cdot 0,3.$$

Итак, в нашем случае:

$$C_{соц.} = 143162,75 \cdot 0,3 = 42948,8 \text{ руб.}$$

6.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot Ц_{э}, \quad (6.2.4.1)$$

где $P_{об}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{э}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{об}$ – время работы оборудования, час.

В Томском политехническом университете $Ц_{э} = 5,257$ руб./кВт·часс учетом налога на добавленную стоимость.

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 2 для инженера ($T_{РД}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{об} = T_{РД} \cdot K_t, \quad (6.2.4.2)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{РД}$, определяется исполнителем самостоятельно.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном.} \cdot K_C, \quad (6.2.4.3)$$

где $P_{ном.}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_C \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $K_C = 1$.

Расчет затраты на электроэнергию для технологических целей представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования t_{OB} , час	Потребляемая мощность P_{OB} , кВт	Затраты \mathcal{E}_{OB} , руб.
Персональный компьютер	5040,6	0,3	476,92
Струйный принтер	30	0,1	15,77
Итого:			492,69

6.2.5 Расчет амортизационных расходов

В данном разделе рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта по формуле:

$$C_{AM} = \frac{H_A \cdot C_{об} \cdot t_{рф} \cdot n}{F_D}, \quad (6.2.5.1)$$

где H_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

C_{OB} – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;

F_D – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку C_{AM} ;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Рассчитаем амортизацию используемого компьютера по формуле (6.2.5.1):

$$C_{AM} = \frac{0,4 \cdot 40000 \cdot 532 \cdot 1}{2384} = 3570,47 \text{ руб.}$$

Рассчитаем амортизацию используемого принтера по формуле (6.2.5.1):

$$C_{AM} = \frac{0,5 \cdot 10000 \cdot 8 \cdot 1}{500} = 80 \text{ руб.}$$

6.2.6 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, к ним относятся содержание оргтехники, услуги связи, представительные расходы и другие. Их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{проч.} = (C_{mat} + C_{зн} + C_{соц} + C_{эл.об.} + C_{ам}) \cdot 0,1. \quad (6.2.6.1)$$

Найдем прочие расходы по формуле (5.11) учитывая данные полученные выше:

$$C_{проч.} = (1785 + 143162,75 + 42948,8 + 492,69 + 3650,47) \cdot 0,1 = 19204.$$

6.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Разработка и исследование методов сжатия сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик». Смета затрат на разработку представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	C_{mat}	1785
Основная заработная плата	$C_{зн}$	143162,75
Отчисления в социальные фонды	$C_{соц}$	42948,8
Расходы на электроэнергию	$C_{эл.}$	492,69
Амортизационные отчисления	$C_{ам}$	3650,47
Прочие расходы	$C_{проч}$	19204
Итого:		211 243,71

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 211\,243,71$ руб.

6.2.8 Расчет прибыли

Прибыль от реализации проекта в зависимости от конкретной ситуации (масштаб и характер получаемого результата, степень его определенности и

коммерциализации, специфика целевого сегмента рынка и т.д.) может определяться различными способами. В данной работе исполнитель не располагает данными для применения «сложных» методов, отсюда следует прибыль принять в размере 5 ÷ 20 % от полной себестоимости проекта. Таким образом, она составляет 42248.74 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

6.2.9 Расчет НДС

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это $(211\,243,71 + 42\,248,74) \cdot 0,18 = 45\,628,64$ руб.

6.2.10 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае

$$C_{НИР(КР)} = 211\,243,71 + 42\,248,74 + 45\,628,64 = 340\,992,81 \text{ руб.}$$

6.3 Оценка экономической эффективности проекта

Актуальным аспектом качества выполненного проекта является экономическая эффективность его реализации, то есть соотношение обусловленного ей экономического результата (эффекта) и затрат на разработку проекта.

Выполнение научно-исследовательских работ оценивается уровнями достижения, научного и научно-технического эффектов.

Научный эффект характеризует получение новых научных знаний, опытных данных и отображает прирост полезной информации, предназначенной как для внутри научного потребления, так и для внешних потребителей. Научно-технический эффект характеризует возможность использования результатов в других проектах и обеспечивает получение

информации, необходимой для разработки более совершенных и быстродействующих алгоритмов обработки сейсмических сигналов.

6.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР

Научно-технический уровень характеризует влияние проекта на уровень и динамику обеспечения научно-технического прогресса в области обработки сейсмических сигналов. Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых научно-исследовательскую работу, используется метод балльных оценок. Балльная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям. На ее основе делается вывод о целесообразности работы.

Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется интегральный показатель (индекс) ее научно-технического уровня по формуле:

$$K_{НТУ} = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i, \quad (6.3.1.1)$$

где $K_{НТУ}$ – интегральный индекс научно-технического уровня;

R_i – весовой коэффициент i -го признака научно-технического эффекта;

n_i – количественная оценка i -го признака научно-технического эффекта, в баллах.

Таблица 9 – Весовые коэффициенты признаков НТУ

Признаки научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИР	R_i
Уровень новизны	Математический аппарат не является принципиально новым, но содержит ряд модернизированных функций и методов.	0,3

Теоретический уровень	Разработан собственный алгоритм обработки и реализация продукта в математическом пакете Matlab.	0,4
Возможность реализации	Продукт позволит упростить и увеличить точность обработки и анализа данных, за счет использования неклассических алгоритмов.	0,3

Так как все частные признаки научно-технического уровня оцениваются по 10-балльной шкале, а сумма весов R_i равна единице, то величина интегрального показателя также принадлежит интервалу $[0, 10]$.

В таблице 10 представлены частные оценки уровня n_i и их краткое обоснование.

Таблица 10 – Оценки научно-технического уровня научно-исследовательской работы

Значимость	Фактор НТУ	Уровень фактора	Выбранный балл	Обоснование выбранного балла
0,3	Уровень новизны	Относительно новая	7	Созданный математический алгоритм обработки сейсмических сигналов содержит в себе ранее разработанные методы, но в такой интерпретации является новым
0,4	Теоретический уровень	Разработка способа и алгоритма	7	Разработан и реализован алгоритм обработки сейсмических сигналов
0,3	Возможность реализации	В течение первых лет	10	Точность и быстродействия алгоритма может быть улучшена в течение первых лет

Отсюда интегральный показатель научно-технического уровня для данного проекта составляет рассчитанный по формуле (6.3.1.1):

$$I_{\text{НТУ}} = 0,3 \cdot 7 + 0,4 \cdot 7 + 0,3 \cdot 10 = 7,9.$$

Таким образом, данная разработка достаточно эффективна, в первую очередь из-за высокой научной значимости и актуальности.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 8БМ41	ФИО Злобиной Елене Вячеславовне
-----------------	------------------------------------

Институт	ИК	Кафедра	ПМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Прикладная математика и информатика

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Работа связана с разработкой, моделированием процессов, анализом массивов информации, проектированием и с реализацией разработанных алгоритмов в математическом пакете Matlab для исследования методов сжатия сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик.</i>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:	К опасным факторам относятся: <ul style="list-style-type: none"> • электрический ток; К вредным факторам относятся: <ul style="list-style-type: none"> • повышенный уровень шума; • несоответствующий микроклимат: пониженная или повышенная температура и влажность воздуха; • повышенный уровень электромагнитных излучений от монитора и компьютера; • недостаточная освещенность.
2. Экологическая безопасность:	<ul style="list-style-type: none"> • Действие на литосферу.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	К наиболее вероятным ЧС относятся пожар.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<ul style="list-style-type: none"> • Требования эргономики. • Режим работы.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Анищенко Юлия Владимировна	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8БМ41	Злобина Елена Вячеславовна		

7 Социальная ответственность

В данной ВКР объектом исследования являются разработанные на ЭВМ алгоритмы, которые применяются математиком-программистом для исследование методов сжатия сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазо-частотных характеристик.

7.1 Производственная безопасность

Перечень вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в ходе разработки алгоритма по ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы» [47], представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Опасные и вредные факторы при разработке алгоритмов на ЭВМ

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74[47])		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1. Анализ и разработка математической модели. 2. Описание алгоритмов исследования. 3. Выбор необходимого оборудования для реализации алгоритма. 4. Реализация алгоритма.	1. Повышенный уровень шума; 2. Несоответствующий микроклимат рабочего помещения; 3. Повышенный уровень электромагнитных излучений; 4. Недостаточная освещенность рабочего помещения;	1. Электрический ток.	1. Параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.4-548-96. 3. Параметры излучений дисплеев и шума устанавливаются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. 4. Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78 и СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. 5. Освещение устанавливается СП 52.13330.211 и СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

Рассмотрим эти факторы более подробно.

Производственный шум. Шум – это совокупность звуков, неблагоприятно воздействующих на организм человека и мешающих его работе и отдыху. Основным источником шума при работе с вычислительными машинами является системный блок. В современном мире настоящей проблемой системных блоков стала шумность систем вентиляции. Это происходит за счет того, что современные процессоры стали более мощные. Естественно, что чем выше частота процессора, тем выше будет его энергопотребление. Таким образом, возникает нужда в более мощном охлаждении. И соответственно растет уровень шума, создаваемый системой вентиляции. Также источником шума является охлаждающий блок питания, процессор, графические платы и жесткие диски.

Шум оказывает отрицательное влияние, как на качество работы человека, так и на его здоровье. Постоянное воздействие сильного шума может не только отрицательно повлиять на слух, но и вызвать другие вредные последствия – звон в ушах, головокружение, головную боль, повышение усталости. Человек, постоянно подвергающийся воздействию шума, быстро переутомляется, отличается повышенной раздражительностью, становится забывчивым, чаще страдает от слабости и головокружения. Уровень шума на рабочих местах, связанных с работой на ПЭВМ, не должен превышать 50 дБА[48].

Требования к параметрам шума устанавливаются СанПин 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» [48].

Меры, которые необходимо принять, для того чтобы помещение было менее зашумленным, это в первую очередь, обеспечение нормальной вентиляции системного блока. Для охлаждения необходимо обеспечить со стороны вентиляционных отверстий хотя бы 20-30 см свободного пространства. Не загромождать оборудование посторонними предметами, которые снижают теплоотдачу, прочищать вентиляционные отверстия от пыли пылесосом.

Несоответствующий микроклимат рабочего помещения. Требования к параметрам микроклимата и воздушной среды определяются согласно СанПиН 2.2.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [48].

Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения (значительные или незначительные тепловыделения). Допустимые параметры микроклимата для категории работ, к которой относится работа математика программиста, приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Допустимые и оптимальные значения параметров микроклимата

Время года	Зона	Температура воздуха, С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный период	Оптимальная	18 – 21	60 – 40	< 0.2
Теплый период года ($t > 10^{\circ}\text{C}$)	Оптимальная	20 – 25	60 – 40	< 0.3
	Допустимая	< 28 в 13 часов самого жаркого месяца	< 75	< 0.5

В настоящее время для обеспечения комфортных условий для работы программиста математика, рекомендуется использовать технические средства, которые включают вентиляцию, кондиционирование воздуха, отопительную систему.

Повышенный уровень электромагнитных излучений. Когда все устройства персонального компьютера включены, в районе рабочего места, формируется сложное по структуре электромагнитное поле. Реальную угрозу для пользователя компьютера представляют электромагнитные поля, которые создаются за счет работы монитора и системного блока компьютера.

Влияние их на организм человека не обходится без последствий. Исследования показали, что в организме человека под влиянием электромагнитного излучения монитора происходят значительные изменения гормонального состояния, специфические изменения биотоков головного

мозга, изменение обмена веществ. Пыль, притягиваемая электростатическим полем монитора, иногда становится причиной дерматитов лица, обострения астматических симптомов, раздражения слизистых оболочек.

Требования и нормы на параметры излучений дисплеев включены в СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 [49].

Для снижения воздействия электромагнитного излучения следует применять мониторы с пониженным уровнем излучения, придерживаться регламентированного режима труда и отдыха, а также проводить регулярную гигиеническую уборку помещения.

Несоответствующая освещенность рабочего помещения. В лабораториях, оснащенных ЭВМ должно быть естественное и искусственное освещение, то есть совмещенное. Естественное освещение обеспечивается через оконные проемы с коэффициентом естественного освещения (КЕО) не ниже 1,2% в зонах с устойчивым снежным покровом и не ниже 1,5% на остальной территории. Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева. Искусственное освещение в помещениях с компьютерами должно осуществляться системой общего равномерного освещения. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения документа должна быть 300-500 лк. Допускается установка светильников местного освещения для подсветки документов. Местное освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана и увеличивать освещенность экрана более 300 лк[50].

Более того, основным гигиеническим требованием является достаточно равномерная освещенность всего поля зрения. То есть уровень освещенности помещения, и яркость экрана монитора должны быть соотносимы: яркий свет в районе периферийного зрения повышает напряженность глаз и приводит к утомляемости.

Электрический ток. Во время использования средства вычислительной техники или другими периферийными устройствами работник должен

осторожно обращаться с электропроводкой и компьютером, а также должен всегда помнить, что, если не придерживаться правил безопасности, то это может угрожать его здоровью.

Чтобы избежать поражения электрическим током, необходимо выполнять следующие правила:

1. Необходимо постоянно следить на своем рабочем месте за исправным состоянием электропроводки, выключателей, штепсельных розеток, при помощи которых оборудование включается в сеть, и заземления. При обнаружении неисправности немедленно обесточить электрооборудование. Продолжение работы возможно только после устранения неисправности.

2. Для исключения поражения электрическим током запрещается:

- а) часто включать и выключать компьютер без необходимости;
- б) прикасаться к экрану и к тыльной стороне блоков компьютера;
- в) работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании мокрыми руками;
- г) работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании, имеющих нарушения целостности корпуса, нарушения изоляции проводов, неисправную индикацию включения питания, с признаками электрического напряжения на корпусе
- д) класть на средства вычислительной техники и периферийном оборудовании посторонние предметы.

3. Запрещается под напряжением очищать от пыли и загрязнения электрооборудование.

4. Ремонт электроаппаратуры производится только специалистами-техниками с соблюдением необходимых технических требований [51].

Во всех случаях поражения человека электрическим током немедленно вызывают врача. До прибытия врача нужно, не теряя времени, приступить к оказанию первой помощи пострадавшему.

7.2 Экологическая безопасность

Одной из основных проблем в современном мире является загрязнение литосферы. В первую очередь она загрязняется твердыми отходами, которые накапливаются на свалках, в отвалах и являются опасными источниками загрязнения земной поверхности. Бытовой мусор состоит из бумаги, металла, древесины, стекла, полимеров и др. Основными инструментами при работе над разработкой новых методов и алгоритмов являются компьютерная техника, бумага, люминесцентные лампы и т.д. По истечению срока службы они становятся бытовым мусором. Рассмотрим загрязнения литосферы бытовым мусором, на примере люминесцентных ламп. Их эксплуатация требует осторожности и четкого выполнения инструкции по обращению с данным отходом (код отхода 35330100 13 01 1, класс опасности – 1[52]). В данной лампе содержится опасное вещество ртуть в газообразном состоянии. При не правильной утилизации, лампа может разбиться и пары ртути могут попасть в окружающую среду. Вдыхание паров ртути может привести к тяжелому повреждению здоровья.

При перегорании ртутьсодержащей лампы (выходе из строя) её замену осуществляет лицо, ответственное за сбор и хранение ламп (обученное по электробезопасности и правилам обращения с отходом). Отработанные люминесцентные лампы сдаются только на полигон токсичных отходов для захоронения. Запрещается сваливать отработанные люминесцентные лампы с бытовым мусором [53].

Бытовой мусор помещений организаций несортированный, образованный в результате деятельности работников предприятия (код отхода 91200400 01 00 4). Агрегатное состояние отхода твердое; основные компоненты: бумага и древесина, металлы, пластмассы и др[52]. Для сбора мусора рабочее место оснащается урной. При заполнении урны, мусор выносится в контейнер бытовых отходов. Предприятие заключает договор с

коммунальным хозяйством по вывозу и размещению мусора на организованных свалках.

7.3 Защита в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайной ситуацией (ЧС) называют сложившуюся ситуацию на определенной территории, которая произошла вследствие стихийного бедствия или аварии, которые могут привести к ущербу здоровья людей или окружающей среды, а также к большим материальным потерям.

Наиболее вероятной ЧС в рамках выполнения ВКР является пожар [54].

К мерам по предупреждению данного вида ЧС отнесем следующие пожарно-профилактические мероприятия - соблюдение эксплуатационных норм оборудования, обучение персонала правилам техники безопасности; издание противопожарных инструкций, планов эвакуации.

Профилактические методы борьбы с пожарами в помещении предусматривают:

- организационные методы: надлежащее содержание помещений, инструктаж персонала;
- технические методы: соблюдение противопожарных правил;
- эксплуатационные методы: своевременная профилактика, ремонт оборудования [55].

Основными мерами по повышению устойчивости помещения к данной ЧС являются в первую очередь исключение образования благоприятной для пожара среды (контроль воздухообмена, вентиляция), а также использование трудно сгораемых материалов при отделке рабочего помещения.

Необходимыми действиями в результате возникшей ЧС и мерами по ликвидации её последствий являются:

1. Передать сигнал «Тревога» голосом, задействовать систему оповещения людей о пожаре.

2. Сообщить по телефону 01, с сотового 010 адрес объекта, место возникновения пожара, свою фамилию. Сообщить по телефону 03, с сотового 030 адрес объекта, что случилось, информацию о пострадавших, свою фамилию, оказать помощь пострадавшим.

3. Направить людей к эвакуационным выходам согласно знакам направления движения.

4. Отключить от электропитания оборудование, обесточить помещение.

5. По возможности принять меры, по тушению пожара используя средства противопожарной защиты (углекислый огнетушитель).

6. По возможности предотвратить развитие аварии, обозначить место аварии [55].

7.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Рабочая зона представляет собой все места, где работник должен находиться или временно пребывать в процессе трудовой деятельности. Если рабочее место неправильно организовано, то это может привести к получению производственной травмы, а также к неэффективности рабочего процесса. При организации рабочего места необходимо выполнять определенные требования эргономики [56]. К ним относятся:

- выбор положения работающего;
- пространственная компоновка рабочего места;
- размерные характеристики рабочего места;
- взаимное расположение рабочих мест;
- размещение технологической и организационной оснастки;

Также важен режим работы. При эффективном труде, необходимо выполнять следующие пункты:

- возможность перемены типов нагрузок и задач;

- наличие перерывов в работе: 5 минут через 1 час работы на дисплее. Во время перерыва следует производить физические упражнения с растяжением мышц спины и рук;
- возможность отдыха для глаз (гимнастика для глаз) [57].

Заключение

В ходе выполнения магистерской диссертации был разработан программно-алгоритмический комплекс для сжатия сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки их фазочастотных характеристик. Разработанный комплекс ориентирован на обработку сейсмической информации, где сложные сигналы нашли широкое применение. Использование алгоритмов сжатия в задачах обработки и интерпретации сейсмических данных объясняется необходимостью увеличения разрешения на записи при исследовании тонкослоистых сред, где существующие методы деконволюции не всегда обеспечивают требуемую точность восстановления отражающих границ.

Особое внимание при выполнении работы уделялось вопросам построения математической модели сейсмической записи в области интерференции волн, разработки алгоритмов сжатия и проведения вычислительного эксперимента, а также программной реализации алгоритмов корректирующей деконволюции и фазочастотного прослеживания в математическом пакете Matlab. Структура программ состоит из файлов-функций и основного m-файла. С целью удобства пользователя и оптимизации вычислительных затрат было предложено использовать файловые потоки для хранения промежуточных данных и конечных результатов. Интерфейс программы прост и логичен, это позволяет использовать данный программный продукт заранее неподготовленным пользователям. Кроме выполнения основных этапов моделирования, программа оснащена возможностью строить графики по данным, полученным как из актуальных экспериментов, так и архивных данных. По построенным графикам можно делать качественные выводы об эффективности разработанных алгоритмов при различных временных сдвигах между сигналами.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. существующие методы деконволюции в ряде практически важных случаев не позволяют обеспечить требуемую точность структурных построений

сейсмического волнового поля, что объясняется в первую очередь неоднозначными предположениями о виде фазочастотных характеристик сейсмических сигналов;

2. наряду с методами деконволюции для сжатия сложных сигналов целесообразно использовать методы фазочастотного прослеживания, основанные на оптимальной и субоптимальной обработке ФЧХ. Это связано, прежде всего, с тем, что в фазу сигнала заложена основная информация о временном положении сигнала и, следовательно, оптимальная обработка ФЧХ реализует получение оптимальных оценок временного положения;

3. проведенные исследования разработанных фазочастотных алгоритмов на моделях волновых полей показали, что применение данных методов оказывается весьма эффективным при исследовании тонкослоистых сред, так как сама структура методов позволяет путем изменения длительности окна анализа и выбора весовых функций существенно увеличивать разрешающую способность.

4. результаты сравнения фазочастотных алгоритмов с алгоритмом корректирующей деконволюции, говорят о перспективности развития данного подхода;

5. программная реализация фазочастотных алгоритмов содержит удобный интерфейс и модульную структуру, что позволяет достаточно просто увеличивать функциональность разработанного комплекса;

6. примеры опробования разработанного программно-алгоритмического комплекса на реальных данных подтвердили модельные эксперименты и показали перспективность использования методов фазочастотного прослеживания для сжатия сейсмических сигналов.

Список публикаций студента

1. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Нгуен С.Х., Злобина Е.В., Лаевский В.Е. Определение временного сдвига между сейсмическими трассами на основе анализа их фазочастотных характеристик. Известия томского политехнического университета инжиниринг георесурсов. Том 327, № 5, 2016 г.

2. Злобина Е.В., Ильясова И.Э. Разработка и исследование методов сжатия сложных сигналов на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик. III Международной научной конференции «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине». В печати.

Список использованных источников

1. Гольдин С.В. Линейные преобразования сейсмических сигналов. – М.: Недра, 1974. – 352 с.
2. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсморазведка. Учебник для вузов. – Тверь: Изд-во АИС, 2006. – 744 с.
3. Зенов А.А. Вычисление оптимального временного сдвига между сейсмическими трассами. – Разведочная геофизика, 1977, вып. 76, с.18
4. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Определение временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик. Геология и геофизика, 1988, № 9, стр.77-83.
5. Кочегуров А. И. Алгоритмическое и программное обеспечение систем обработки сейсмической информации на основе методов фазочастотного прослеживания. – Дисс. канд. Техн. Наук. – Томск, 1986.- 186с.
6. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы. – М.: Сов. Радио, 1968-468 с.
7. Варакин Л.Е. Теория систем сигналов. – М.: Сов. Радио, 1978.-304 с.
8. Пестряков В.Б. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. – М.: Сов. Радио, 1973.-424 с.
9. Гурвич И.И., Номоконов В.П., Сейсморазведка. Справочник геофизика.- М.: Недра, 1981.-464 с.
10. Карпенко И.В., Тяпкин Ю.К. Способ повышения разрешенности сейсмической записи при линейной зависимости фазового спектра элементарного сигнала от частоты. – Докл. АН УССР, 1981, № 6, с. 20-23.
11. Гринь Н.Е. Исследования структуры и свойств среды по динамике сейсмических волн. – Киев: Наукова думка, 1979.-216 с.
12. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка. Учебник для вузов. М.: Недра, 1980, 551с.

13. Данквардт Э., Патцер У. Проблемы использования фазовых спектров сейсмических данных. – В кн.: Труды 30 Международного географического симпозиума. Стендовые доклады. – М., 1985, ч. 2, с. 132-142.
14. Канасевич Э.Р. Анализ временных последовательностей в геофизике. - М.: Недра, 1985.- 300 с.
15. Stephen M. Seismic data processing. – Society of Exploration Geophysicists, 1998. – P.178.
20. Сейсмическая деконволюция как способ повышения разрешающей способности [Электронный ресурс] / European Association of Geoscientists & Engineers, курс лекций; ред. Денисов М.С. – Электрон. дан. –EAGE, 2016. URL: <http://eage.ru/ru/courses/detail.php?id=148>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. Дата обращения: 04.10.2015 г.
21. Давыдов А.В. Цифровая обработка сигналов. Тема 13. Деконволюция цифровых сигналов. [Электронный ресурс]. URL: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKewjzn7zc5bPLAhUkDJoKHU7PC5UQFggiMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.geoin.org%2Fdsp%2Fdoc%2Fdsp13.doc&usq=AFQjCNGijyG4MНWHzaaTHzSvp8nCVKrcWA&sig2=tAnfVX6CL7LgXKma_fbjfw, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. Дата обращения: 20.12.2015 г.
22. Сильвия М.Т., Робинсон, Э.А., Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ, пер. с англ. М., Недра, 1983, –382 с.
23. Cambois G., Stoffa P.L., Surface-consistent deconvolution in log/Fourier domain, Geophysics, vol. 57. №. 6, 1992; P. 823-840
24. Yilmaz O. Seismic data processing, SEG, 1986,– P.187.
25. Cary P.W., Lorentz G.A., Four-component surface-consistent deconvolution, Geophysics, vol. 58. №. 5, 1993; P. 515-531
26. Levin S.A., Surface-consistent deconvolution, Geophysics, vol. 54. №. 9, 1989; P. 1123-1133

27. Morley L., Claerbout J., “ Predictive deconvolution in shot-receiver space”, *Geophysics*, vol. 48. №. 5, 1983; P. 515-531

28. Худяков Г.И. О потенциальной точности определения временного положения флюктуирующих сигналов.- *Вопросы радиоэлектроники. Общие вопросы радиоэлектроники*, 1984, вып.8, с. 55-60.

29. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах/ Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Сов. Радио, 1975.-296 с.

30. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. Радио, 1974. – кн.1. – 552с.

31. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения.- М.: Мир, 1971.- вып.1.-316 с.

32. Кочегуров А.И. Исследование функции правдоподобия, формируемой при реализации методов фазочастотного прослеживания сейсмических волн. Труды Международной научной конференции «Наука и образование – ведущий фактор стратегии Казахстан-2030» , (Сагиновские чтения №2), часть 3, стр.364-365, Караганда, 2010.

33. Сиберт У. М.. Цепи, сигналы, системы. В 2-х частях. Ч.2: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988.-360с.

34. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Фазочастотные алгоритмы оценки местоположения пространственно-временных сигналов по оценкам фазочастотных характеристик. *Известия высших учебных заведений. Физика*, 1995, № 9, стр.100-104

35. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Phase-frequency algorithms for estimating the position of space-time signals conditions of a priori indeterminacy. *RUSSIAN PHYSICS JOURNAL* ,Volume 38, Number 9, 1995, p. 957-961.

36. Кочегуров А.И. О потенциальной точности определения временного положения сложных сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик. *Автоматизация, математические методы и управление народным хозяйством. Сборник статей*, Томск, 1990, с.278-282.

37. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. О точности определения временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Известия Томского политехнического университета. Известия Томского политехнического университета, 2009 - т. 315, - № 5. - с. 49-53.
38. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Исследование разрешающей способности методов фазочастотного прослеживания сейсмических сигналов // Известия Томского политехнического университета. - 2012 - Т. 320 - №. 5 - С. 80-84.
39. Тяпкин Ю.К. Оптимальная линейно-фазовая полосовая фильтрация сейсмических записей // Геология и геофизика. – 1984. – № 3. – С. 99–105.
40. Яппарова Е. А. Спектральные методы разделения волн на основе цифровой веерной фильтрации: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Томский политехнический университет, 2006.
41. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике: справочник геофизика / под ред. В.И. Дмитриева. - 2-е изд., перераб. и доп. -М.: Недра, 1990. - 448 с.
42. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: Недра, 1986. – 342 с.
43. Кулханек О. Введение в цифровые фильтры в геофизике. -Л.: Недра, 1981. –198 с.
44. Гурвич И.И., Номоконов М. Сейсморазведка. Справочник геофизика. – М.: Недра, 1981.-464с.
45. Яновский А.К. Использование функций взаимной корреляции сейсмических трасс для увязки сейсмических наблюдений. Дискретная корреляция сейсмических волн. Новосибирск: Наука, 1971,с.50-72.
46. Харкевич А.А. Спектры и анализ.- М.:ГТТИ,1957.-236с.

47. Материалы по продуктам MATLAB&Toolboxes [Электронный ресурс]. URL: <http://matlab.exponenta.ru/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. Датаобращения: 04.03.2016 г.
48. Козлов Е.А., Гогоненков Г.Н., Лернер Б.Л. и др. Цифровая обработка сейсмических данных. – М.: Недра, 1973. – 312 с.
49. Гогоненков Г. Н., Кравцов Б. Я.. Выбор регулируемых параметров при корректирующей деконволюции. URL: <http://deg.gubkin.ru/artdb/081/pp033-045.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. Дата обращения: 03.02.2016 г.
50. Wang R.I. The determination of optimum gate lengths for time-varying Wiener filtering. — «Geophysics», 1969, No. 5, P. 683
51. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1974.
52. СНиП 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1996.
53. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 2003.
54. СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
55. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.
56. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

57. Федеральный классификационный каталог отходов [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://www.ecoguild.ru/faq/fedwastecatalog.htm>, свободный. – Загл. с экрана.

58. Об утверждении правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде: Постановление Правительства Российской Федерации от 3 сентября 2010 года № 681.

59. ГОСТ Р 22.0.01-94. Безопасность в ЧС. Основные положения.

60. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".

61. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – 1978

62. Эргономика рабочего места программиста. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://artelvyv.narod.ru/ergonom.htm>.

**Приложение А
(обязательное)**

Раздел 2.3

**Разработка алгоритма фазочастотного прослеживания сейсмических волн
(The development of the algorithm phase-frequency tracking of seismic waves)**

Раздел 3

**Разработка алгоритма корректирующей деконволюции сейсмических записей
(Development of the algorithm of the correcting deconvolution in the seismic records)**

АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8БМ41	Злобина Елена Вячеславовна		

Консультант кафедры ПМ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Кочегуров А.И.	к.т.н		

Консультант – лингвист кафедры Английского языка (ИЯИК):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
зав. каф. иностранных языков	Сидоренко Т.В.	к.п.н		

2.3 The development of the algorithm phase-frequency tracking of seismic waves

To construct the algorithm signal compression based on the optimal and suboptimal treatment of PFC. First, consider the formation of a mathematical model of the seismic record.

2.3.1 Construction of mathematical model of the seismic wave field

Seismic wave field – this is the response of the medium to the excitation source, which can be represented as a set of elastic vibrations arising in the environment and describe the function of the time. Seismic wave field model are generally in the form of an additive model [36, 37, 38]. This model is the result of field measurement $Y(t)$, which is the amount of useful component $S(t)$ and complicating its interference $L(t)$:

$$Y(t) = S(t) + L(t), \quad (2.3.1.1)$$

where t – time coordinate.

Signal is a form of manifestation field in which useful information is concentrated, the interference is different perturbations field, preventing release signal [14]. Suppose that at a certain range of records observed seismic signals recorded on the background of irregular interference. Analysis window moves seismic trace, which carves a fixed time each recording site. A mathematical model of the area may be represented as [38]:

$$x(t) = S_1(t - \tau) + S_2(t - \tau) + N(t), \quad (2.3.1.2)$$

where $S_1(t - \tau)$ – useful seismic signals;

$S_2(t - \tau)$ – regular wave-interference;

$N(t)$ – additive random noise, with numerical characteristics: expected value (m_x) and standard deviation (σ_x^2);

τ – time position of the seismic signal.

In its turn useful seismic signals are the superposition of the once reflected waves and then the expression (2.3.1.2) to seismograms can be written as:

$$x(t, l) = \sum_i a_i \cdot f(t - \tau_i - \Delta t_i(l)) + N(t, l), \quad (2.3.1.3)$$

where $f(t)$ – form of the individual wave;

a_i – amplitude of i waves;

τ – time of arrival i waves in the point $l = 0$;

$\Delta t_i = l / v_i$ – time increment from the trace to the trace;

v_i – apparent velocity i waves.

Thus, any seismic traces can be viewed as the sum of two independent processes: the signal which is a superposition of a large number of waves of the same shape, and noise.

The predetermined seismic signal can be described by a function with the bell-shaped pulse:

$$S(t - \tau) = a_0 e^{-\beta^2(t-\tau)^2} \cos(\omega_0(t - \tau) + \varphi), \quad (2.3.1.4)$$

where a_0 – amplitude;

β – coefficient that determines the pulse attenuation;

ω_0 – base frequency;

φ – initial phase.

On the image 5 is a graph of the function given in the form of pulses the sum to bell-shaped pulse in points $[-0.02; 0; 0.02]$, the amplitude $a_0 = 1$, the coefficient damping $\beta = 60$, the initial phase equal 0.

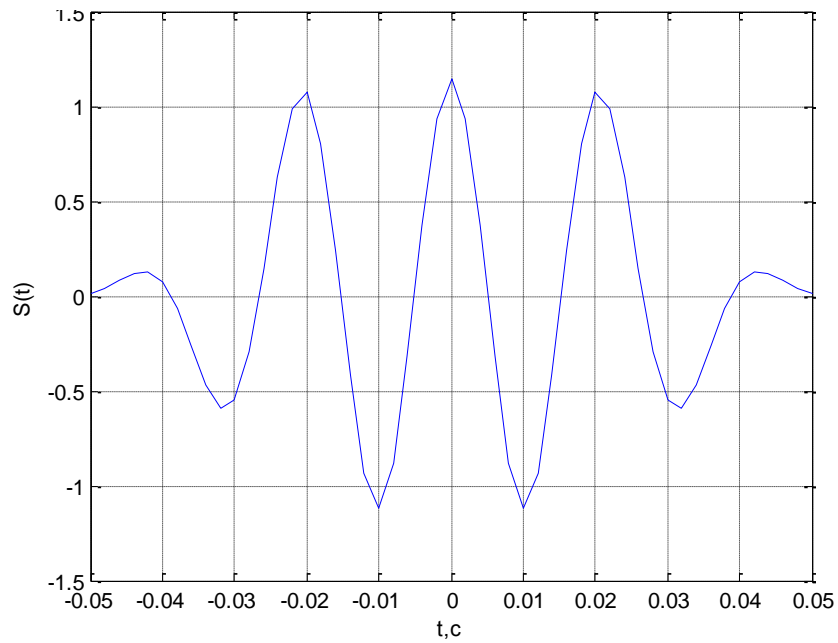


Figure 5 – Graph of the function given in the form of pulses the sum to bell-shaped pulse at the points [- 0.02; 0, 0.02]

The ratio between the amplitude of the signal and the standard deviation of the noise determines ratio between signals to noises:

$$\gamma = \frac{a_0^2}{\sigma_x^2}. \quad (2.3.1.5)$$

The noise process $L(t)$ is complex and is defined by the action of a large number of independent causes. So we can assume that is subject $L(t)$ to normal distribution law.

On the figure 6 is a graph function of a mathematical model of seismic trace (2.3.1.2) in the form of an additive mixture of a sequence of pulses the bell-shaped pulse and normal noise. As an example of the implementation of the generated normal noise with expected value 0 and variance 1.

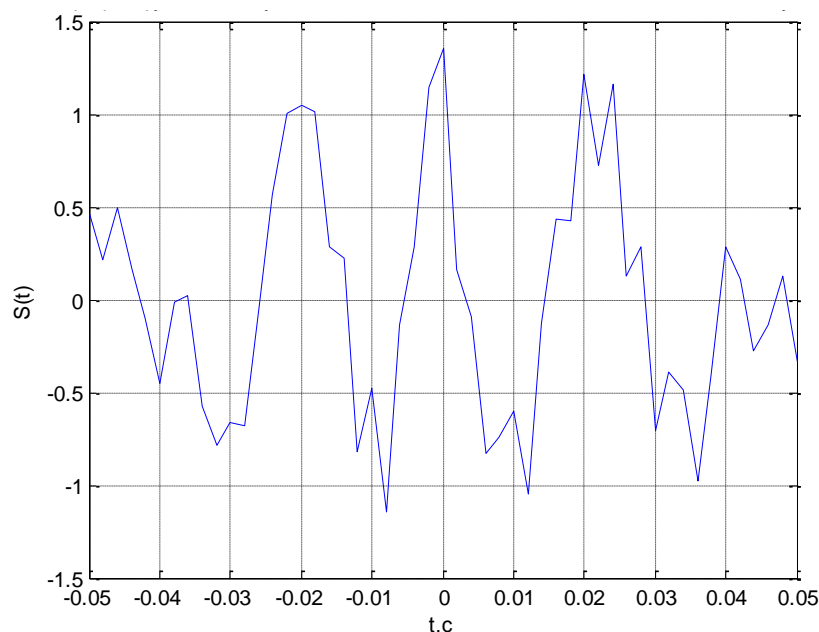


Figure 6 - Graph of the original signal with added noise function

Any process can be fully described in the time domain as a function of time $x(t)$ and the frequency of the complex spectrum $X(f)$. Both of these forms of representation processes equal and interconnected pair of Fourier transforms [39]:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j2\pi\omega t} d\omega, \quad (2.3.1.6)$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi\omega t} dt,$$

where $X(\omega)$ – complex function of the $x(t)$.

Complex function can be represented as:

$$X(\omega_k) = A(\omega_k) - jB(\omega_k) = A(\omega_k) e^{j\varphi(\omega_k)} \quad (2.3.1.7)$$

for all $k = \overline{1, m}$,

where m – number of analyzed frequency components;

$A(\omega_k)$ – amplitude spectrum (2.3.3);

$\varphi(\omega_k)$ – phase spectrum (2.3.4).

On the figure 7, 8 is a graph of the amplitude and phase-frequency spectra of the bell-shaped pulse of the range of 20 - 60 Hz.

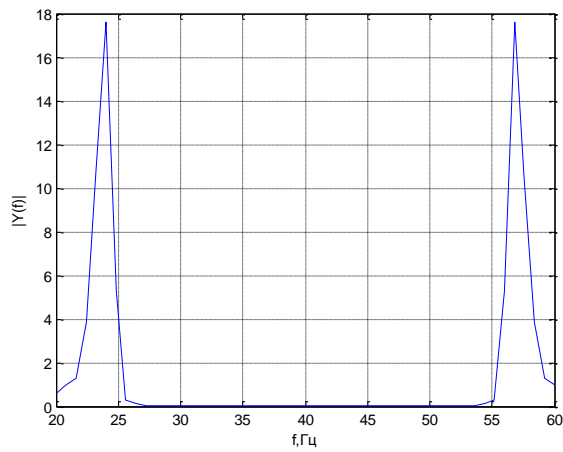


Рисунок 7 – The amplitude spectrum of the function bell-shaped pulse

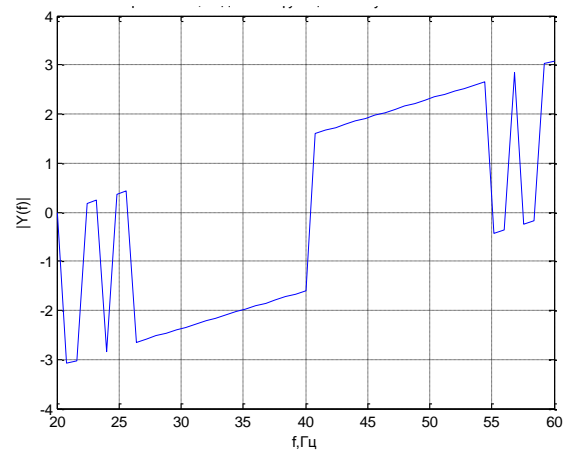


Рисунок 8 – Phase-frequency spectrum of the function bell-shaped pulse

On the figure 9, 10 is a graph of the amplitude and phase-frequency spectra of the bell-shaped pulse with the addition of noise generated by the normal with $m_x = 0$ and the $D_x = 1$ at the range of 20 - 60 Hz.

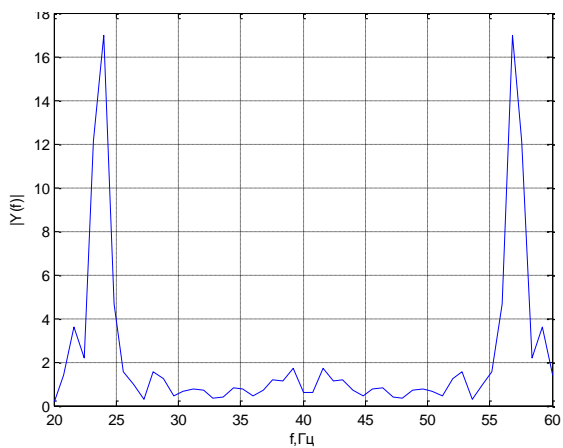


Figure 9 – The amplitude spectrum of the function bell-shaped pulse with noise

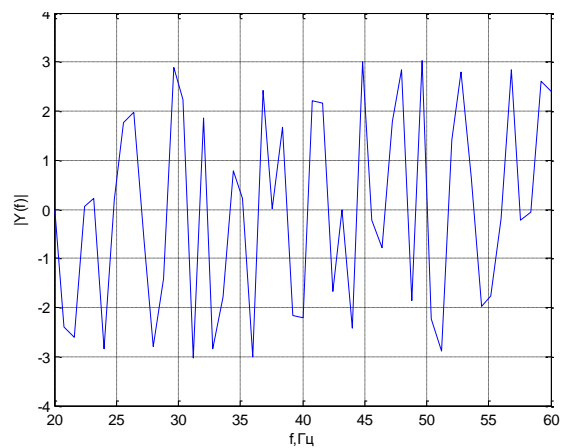


Figure 10– Phase-frequency spectrum of the function bell-shaped pulse with noise

Graphs necessary to analyze the effectiveness of compression designed algorithms complex of the signals based on optimal and processing suboptimal of phase-frequency characteristics, as well as for existing algorithms deconvolution

2.3.2 Develop and implement a phase-frequency tracking algorithm in mathematical package of MATLAB

To build the tracking algorithm we assume that signal is found and located at area of the seismic track with a length T_h ; waveform is unknown, and its phase-frequency characteristic (PFC) in a frequency band from 20 to 60 is known. Described in section 2.2.2 research show that usually time of reflection is known with precision equal to signal length (60 – 90 ms) [40], and phase spectrum of the seismic signals have a characteristic appearance (stationary area in frequency band, where main energy of the signal is focused). Therefore these assumptions are often used in processing of seismic records.

Expression (2.1.3.1) is used to build the algorithm of seismic waves tracking. This expression describes the credibility function to define temporal location of signals based on PFC with nonequilibrium processing. As shown in section 2.1.3, maximum of the credibility function depends temporal location of signals on a track. Also, generalized analysis of quality function that quality function, built whilst phase-frequency tracking, represents seismic record with higher resolution of signals and higher signal-noise ratio a relatively to basic seismic track. Quality function saves all the information about petrophysical characteristic of the layered strata, kinematical parameters of a spreading environment. Additional possibility of wave tracking process control by creation weight functions with given parameters arise.

Therefore, algorithm of the phase-frequency tracking of wave should contain sequence of actions which build quality functions (2.1.3.1) for different points of observation on profile. In this case, the position of the maxima quality function will determine the time position of signals, which will be traced reflectors on time sections. Now let us turn again to the expression (2.1.3.1), from which it follows that you must to build algorithm of the tracking phase-frequency:

1. to select the duration of the analysis window and the frequency range in which the main energy of the signal is concentrated it;
2. to set the analysis window to its original position on the seismic trace;

3. to select the type of a weighting function and calculate its value at a given frequency range;
4. to calculate the deviation PFC of the phase response section seismic trace at a given analysis window of PFC of the signal for the selected frequency range;
5. revealed deviations subjected the trigonometric transform (take the cosine of the angle);
6. to produce weighing of transformed deviations;
7. to perform a sum of the weighted transformed deviation over a range of frequencies, thereby forming the value of the likelihood function (2.1.3.1) for a specific time t ;
8. to move analysis window of the seismic track and repeat the steps described in paragraphs 4 – 7 as long as not all the analyzed section is traced.

To build a block diagram of the algorithm will consider in more detail each step of the algorithm. It is clear that to obtain reliable estimates of PFC of seismic signals, it is necessary that the length of the analysis window is equal to the duration of the signal. In its turn, the length of the chip, the analysis showed 2-3 is visible the period oscillation. Therefore, to estimate the duration of the window analysis is necessary to determine the visible oscillation period. There are number methods of measuring the visible period of seismic signals. We choose one of them [41], the most used until now in practice, namely the determination of the visible periods of the autocorrelation function (ACF) of the track. Now, knowing the visible period, it is easy to set the duration of the analysis window, as well as to determine the fundamental frequency oscillation:

$$f_0 = \frac{1}{T_{\text{вид}}}.$$

Then the frequency range in which the main energy of the signal is concentrated can be defined as:

$$(0,5-1,5)f_0.$$

Tracing interval determined by the length of the signal in the area of reflections, so the initial position of the analysis window is not difficult to install. However, at the same time, to ensure high accuracy of position estimation of a time signal, displaced a step of the analysis window along the trace, must be equal to step seismic trace sample.

In section 2.1.3 of this paper discussed the choice of weighting functions for the phase-frequency tracking waves. Research has shown [34] that the results of which will be shown below, the weighting function of the form (2.1.3.4) have all the necessary properties to increase the resolution of signals, so these features were used in the developed algorithms. The values of the weighting functions are calculated before the start of tracking in the entire frequency range.

Considering that the analysis window moves over seismic trace in steps equal to step sampling trace. Instant PFC [42] is "sliding" by integrating, thus, the integration interval has a constant duration of T , an equal duration of the signal. Thus calculated PFC will use the discrete Fourier transform (DFT) [33], according to which the process of calculating the AFC and PFC is as follows:

$$\text{Re}(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot \cos((T_0 + \Delta t \cdot n)(\omega_H + k \cdot \Delta \omega)), \quad (2.3.1)$$

$$\text{Im}(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot \sin((T_0 + \Delta t \cdot n)(\omega_H + k \cdot \Delta \omega)), \quad (2.3.2)$$

$$A(\omega_k) = \sqrt{\text{Re}^2(\omega_k) + \text{Im}^2(\omega_k)}, \quad (2.3.3)$$

$$\varphi(\omega_k) = -\text{arctg} \frac{\text{Im}(\omega_k)}{\text{Re}(\omega_k)}, \quad (2.3.4)$$

for all $k = \overline{1, m}$,

where m – the number of analyzed frequency components;

N – the number of discrete points in the analysis window;

$T_0 = -T/2$ – time sample rate;

ω_k – the initial angular frequency;

$\Delta \omega$ – sampling frequency step.

As seen from expressions (2.3.1) and (2.3.2), a discrete Fourier transform (DFT) is performed in the interval from $-T / 2$ to $T / 2$, which allows the stationary phase response of seismic signals. It should be noted that the basic function is always calculated in the interval from $-T / 2$ to $T / 2$, regardless of the position of the analysis window. PFC is calculated in the principal values in the range of $-\pi$ up to π , which leads to the appearance of jumps in the phase spectrum. On one hand, to build algorithms tracking, because in the future by the phase is taken the cosine, to assess the dispersion and absorption properties of geological environments for PFC reflected waves (Section 2.3 of this paper), the jumps have to be removed. Therefore, the algorithm tracking removing in the PFC jumps, a procedure completions phase spectrum. Thus procedure for determining the PFC is selected on the basis of the analysis carried out in [33], and has the form:

$$\phi_{ucm}(\omega_k) = \phi_{ucm}(\omega_{k-1}) + [\phi_p(\omega_k) - \phi_p(\omega_{k-1})] + A, \quad (2.3.5)$$

where

$$A = \begin{cases} 0, & |\phi_p(\omega_k) - \phi_p(\omega_{k-1})| < \pi \\ 2\pi, & (\phi_p(\omega_k) - \phi_p(\omega_{k-1})) \leq -\pi, \\ -2\pi, & (\phi_p(\omega_k) - \phi_p(\omega_{k-1})) \geq \pi \end{cases}$$

for all $k = \overline{1, m}$,

where m –number of samples;

ϕ_{ucm} – true PFC;

ϕ_p – PFC design.

This procedure is a continuous extension legitimate PFC, since PFC is a multi-valued function with period 2π . On the figure 11 is an illustration of removing PFC jumps in accordance with (2.3.5).

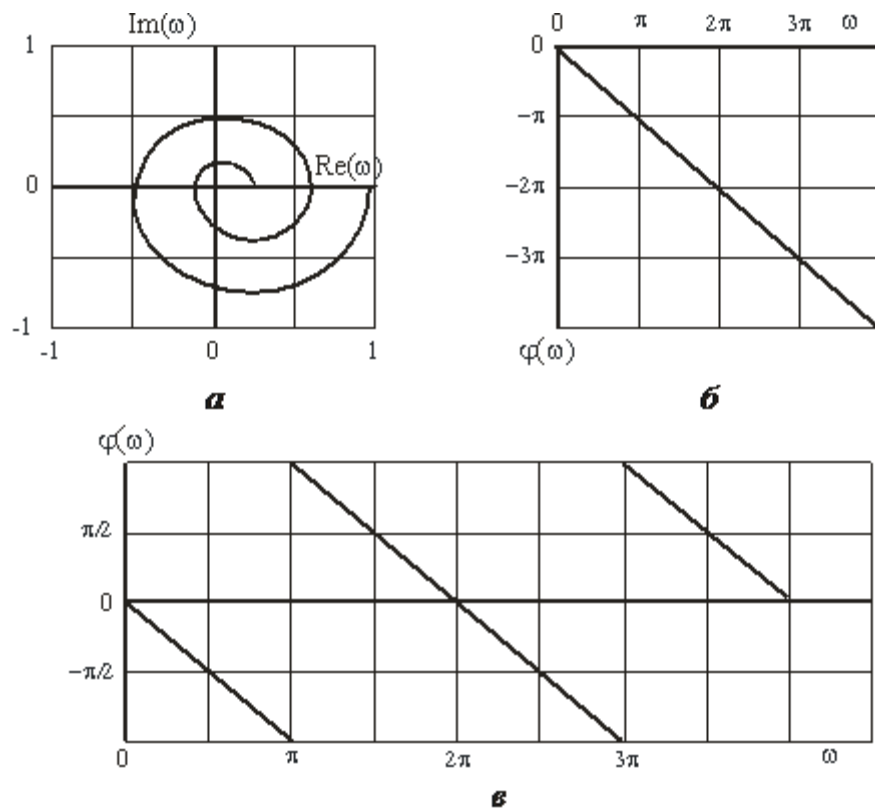


Figure 11 - Deployment phase-frequency characteristics of the method of Schafer: a) amplitude and phase response (APFC); b) Open PFC (true); c) the estimated FRF

Now considering the above, the algorithm tracking has the structure the form shown in the figure 12

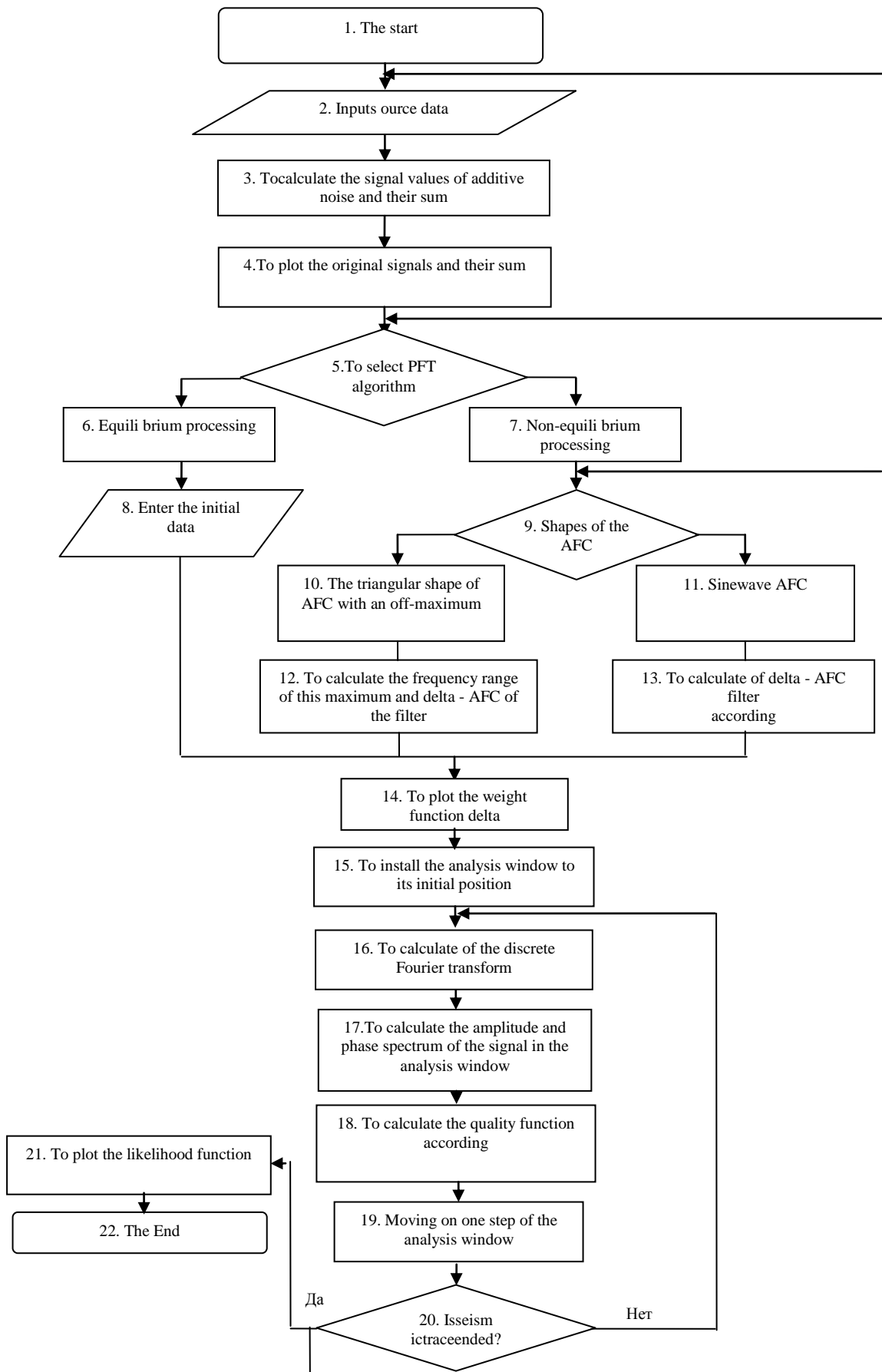


Figure 12 – Structural diagram

As an example to illustrate the sequence of operations in the algorithm tracking, Figure 13 shows a diagram for the model seismo-impulsa [5]. The diagram shows that the passage of the analysis window through the pulse (Figure 13 b), changing the slope of the phase spectrum on the contrary (figure 13 c). Thus, at the moment when the center of the analysis window coincide with the maximum pulse, the phase spectrum becomes stationary, and the likelihood function attains its maximum (Figure 13 e).

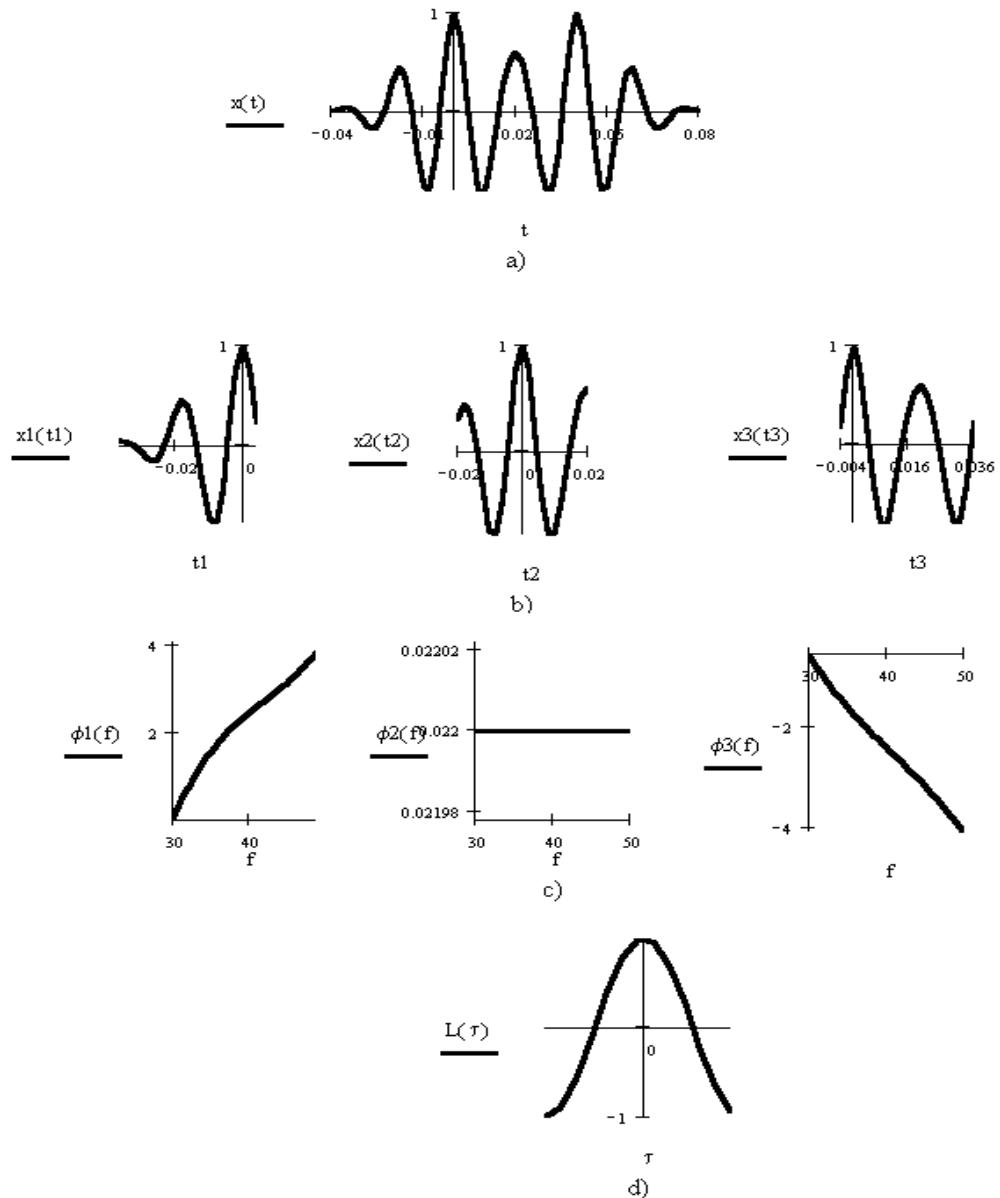


Figure 13 - Diagram illustrating the algorithm phase-frequency of the tracking waves

3 Development of the algorithm of the correcting deconvolution in the seismic records

In this study was reviewed and implemented corrective the deconvolution algorithm of E.A., Kozlov, G.N. Gogonevkova [44].

3.1. The method of correction deconvolution

Deconvolution (inverse filtering) is one of the most important places in the process of digital processing of seismic data, which is designed to increase the resolution of seismic record. It is successfully used in the processing of the results of marine and land seismic observations. However, often there are cases where the applicable deconvolution algorithms not lead to a significant beneficial effect, and even observed the deterioration of the wave picture. From the analysis (Chapter 1.3) carried out above, it follows that if the seismic record corresponds to the model, which is written as follows:

$$y(t) = x(t)u(t) + n(t) = x_u(t) + n(t), \quad (3.1.1)$$

where $x(t)$ – source seismic signal; $u(t)$ – impulse seismogram; $n(t)$ – random noise.

If known a complex spectrum of the original signal $S(\omega)$ [or form signal $s(t)$] and the energy spectrum of the noise $B(\omega)$ [or the autocorrelation function interference $b_n(t)$], the original operator of the inverse filter (complex spectrum $L(\omega)$) can be found by the formula [45]:

$$L(\omega) = \frac{S^*(\omega)}{|S(\omega)|^2 + \frac{B_n(\omega)}{\sigma_u^2}}, \quad (3.1.2)$$

where $S^*(\omega)$ – complex conjugate spectrum of the output signal; σ_u^2 – variance of the impulse seismogram. This operator will ensure optimal compression of the signal. But the function $S(\omega)$ and $B_n(\omega)$, this must be known for each seismic channel, or cannot be determined.

Thus, in practice, algorithms are constructed directly by the formula (3.1.2) are not used. Suboptimal procedures are used in this problem, in which the unknown or difficult to determine the original data replaced by some approximate generalized information determined and defined by the geophysicist is often based only on visual analysis of the processed seismic data. This information is input into a deconvolution program some parameters. If the parameters are accurately selected, that corresponds to the characteristics of the processed wave field and meets the geological problems the effectiveness of the deconvolution depends.

Therefore it seems appropriate to the real material to analyze the role and impact of the program parameters set by geophysicist on the processing result.

This analysis is carried out to the most popular algorithm - correction deconvolution, which combines a perfect inverse filter with band pass filtering and allows the most simple to take into account a priori information about the characteristics of the wave field when selecting of program options.

It should be noted that other algorithms adjustable parameters can partly differ from the parameters of the algorithm, however indirectly, revealed patterns will help to orient when selecting of parameters.

3.2. Development of algorithm correcting deconvolution for the accepted model of the seismic field

Consider the basic steps of the algorithm correction deconvolution. Before correction deconvolution of algorithm to describe the need to highlight the the basic assumptions:

- the impulse seismogram $u(t)$ is a stochastic correlated process;
- the original seismic signal $s(t)$ is the minimum-phase and constant within the selected track interval;
- the certain limits the frequency $f_1 < f < f_2$ in range which the useful signal is stronger interference;
- inside the field of $f_2 - f_1$ interference presented white noise.

These exceptions allow receiving the bulk of the necessary for the calculation of the inverse operator information directly from the seismic trace, complementing the information only in the form of several parameters.

The parameters represent the boundary values of functions and some constants. Parameters that are independent or weakly dependent on the characteristics of the wave field, is fixed directly in the program. Values of other parameters introduce a geophysicist with the forming machine tasks to perform inverse filtering operation. The following are the steps of implementation of the algorithm on a computer [44, 45, 46].

1. In the first step, the section of seismic trace $y(t) = 0, 1, \dots, I$ is calculated the normalized autocorrelation function:

$$\hat{R}_k = \frac{\sum_{i=m}^M y_i y_{i+k}}{\sqrt{\sum_{i=m}^M y_i^2}}, \quad (3.2.1)$$

where $k = 0, 1, \dots, K$; $y(t)$ – seismic model of the wave field(3.1.1). The parameters in this phase are the values of m and M that define the start and end time interval of the seismic trace, which is calculated on the \hat{R}_k and the number of samples $(K + 1) \hat{R}_k$, equal as you can see below, the length of the inverse operator.

2. To reduce the error in the approximation of the original signal autocorrelation function, multiply it on the triangular weighting function $\phi_k = 1 - k/K$:

$$R_k = \hat{R}_k \phi_k. \quad (3.2.2)$$

3. By the decision matrix equation

$$\begin{vmatrix} R_0 & R_1 & \dots & R_k \\ R_1 & R_0 & \dots & R_{k-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_k & R_{k-1} & \dots & R_0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} l_0 \\ l_1 \\ \dots \\ l_k \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (3.2.3)$$

where

$$R_0^* = R_0 \left(1 + \frac{b_0}{R_0} \right), \quad (3.2.4)$$

calculated the inverse operator ($l_0 \dots l_k$), which restores the entire frequency spectrum from zero to the Nyquist frequency $\frac{1}{2\Delta t}$ (Δt – sample interval). The addition in the main diagonal of the matrix parameter b_0 , is numerically equal to the energy given the intended white noise, carried out a regularization solutions, including a sharp increase in the weakest components of the signal spectrum.

4. To calculated operator of the band pass filter.

$$h_g = \frac{1}{\pi g \Delta t} \frac{\cos \xi g \Delta t}{1 - \frac{4}{\pi^2} \xi^2 g^2 \Delta t^2} (\sin(2\pi f_1 g \Delta t) - \sin(2\pi f_2 g \Delta t)), \quad (3.2.5)$$

$$g = -G, \dots, 0, \dots, G,$$

where as the parameters are the values of the coefficient of the slope sections of the filter, frequency limits of the f_1 and f_2 and the length of the operator is equal to $2G - 1$.

5. Convolution of functions l_k and h_g is determined by the inverse operator correction deconvolution:

$$\hat{l}_k = \sum_{g=k-G}^{k+G} h_g l_{k-g}. \quad (3.2.6)$$

The convolution \hat{l}_k with the original route is calculated the result of inverse filtering:

$$\bar{y}_i = \sum_{k=0}^K l_k y_{i-k}. \quad (3.2.7)$$

Therefore, is necessary to additionally specify the eight listed parameters. Two of them ξ and $2G + 1$ in a small degree dependent on the input data and can be fixed in the program. The remaining parameters are defined the characteristics of data to be processed and delivered to the geological task, so they are given by geophysicist [45]. Figure 13 is a block diagram of the algorithm.

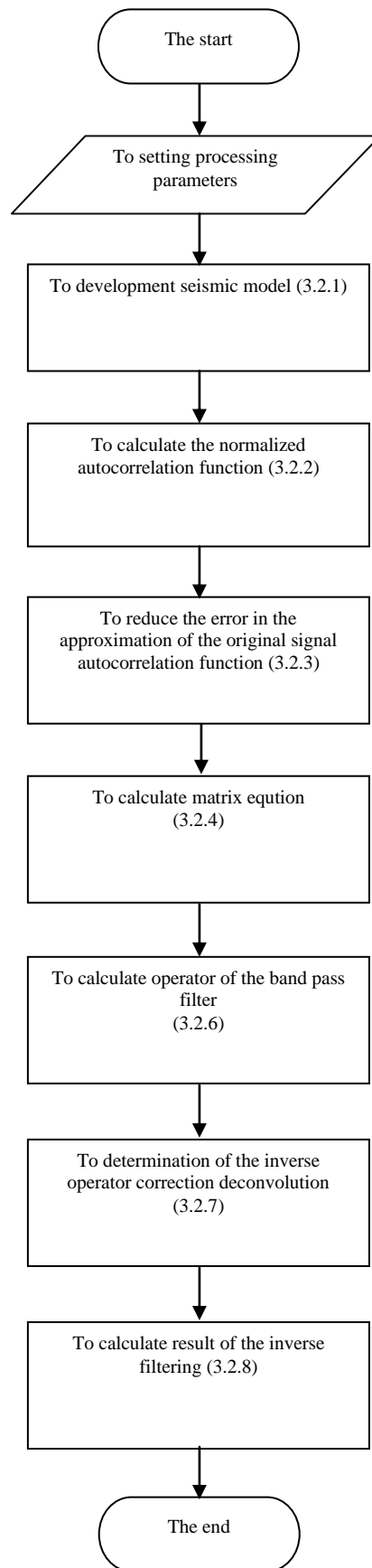


Figure 13 – Block diagram of the algorithm correction deconvolution

3.3 Implementation of the corrective deconvolution algorithm in the mathematical package MATLAB

The program is written in the mathematical package Matlab that implements the algorithm of correction deconvolution. Advantages of Matlab described in the section 2.3.2.1. The program consists of three files-functions and of the main m-file. Listing of program listings are presented in Annex B.

In *Rk.m* function (Annex B Listing 1) is calculated normalized autocorrelation function of the formula (3.2.1). Input parameters of this function are: the input function is the bell-shaped pulse with the addition of the noise component and without it, the length of the initial pulse, the start and end time interval of the seismic trace. The output parameter is the normalized autocorrelation function.

In *phi.m* function (Annex B Listing 2) is calculated the triangular weighting function (3.2.2). Input parameters of the function are: the length of the inverse operator and number of samples. The output parameter is the triangular weighting function.

In the function *Filter.m* (Annex B of Listing 3) is calculated the bandpass filter operator (3.2.5). Input parameters of the function are the slope coefficient, the boundary frequency, the filter operator length and sample rate. The output parameter is a bandpass filter operator.

Steps work of the main m-file *scr.m* (Annex B Listing 4):

1. Definition of the input function, which is in the form of bell-shaped pulse (2.3.1.4). To do this, set the start and end position of the time $T_m = 0.05$, the sampling step $dT = 0.002$, time position signal Δt and parameters necessary for the implementation of the input function (amplitude $a_0 = 1$, the coefficient that determines the pulse attenuation $b = 60$, the base frequency $f_0 = 60$ and the initial phase of $f_i = 0$).

2. The next step is the calculation of the amplitude spectrum and phase spectrum of the input pulse. It's are calculated according to formulas (2.3.3) and (2.3.4). First set boundary frequencies $f_{left} = 20$, $f_{right} = 60$, and the sampling step of

frequency dF . Then calculated the direct Fourier transform of the set of the input pulse by using the built-in function *fft*. To calculate the amplitude spectrum of the input function module is calculated from the resulting conversion. Next the real and imaginary parts of the forward Fourier transform of a function are isolated, which is the bell-shaped pulse. And then calculated phase-frequency spectrum using the built-in function *atan2*, as the ratio of the imaginary part to the real.

3. Construction of the model. To the obtained input function added additive random noise, with numerical characteristics: the expected value ($m_x = 0$) and the standard deviation ($\sigma = 1$).

4. Performing procedures reduce the error of approximation autocorrelation function of the original signal with the addition of noise. At first, determine the length of a given pulse $K = 51$ (number of samples), start and end time of the interval seismic trace $m = 1, M = 51$. At second, called function *Rk.m* and *phi.m*, and then in a loop by using index k multiplied variables, where k varies in the number of samples.

5. To calculate the inverse operator, by solving the matrix equation (3.2.3). For this, it organized two loops i and j , which vary with respect to the rows and columns of the matrix, respectively. The matrix size is $[K - 1; K - 1]$.

6. Call function of *Filter.m* for which the parameter of the steepness $k_{si} = 3$ and the length of the operator $G = 25$ are defined.

7. Determination inverse operator of correction deconvolution using the formula (3.2.6). The summation is realized with two loops of k and g , where k varies according to the number of samples, and g from $G - k$ to $G + k$.

8. Getting feedback filter result (3.2.7). To calculate the sum creates two loops for i and k , where k varies in the number of samples and i for time interval length.

9. Visualization of all the results obtained at each step, to conduct a detailed analysis.

Приложение Б

Программная реализация алгоритма фазочастотного прослеживания сейсмических волн в математическом пакете MATLAB

Листинг 1. Листинг файла-функции *triangular.m*. Рассчитывается весовой функции в виде треугольника со смещенным максимумом

```
function Pr = triangular(wk,wc,wn,wv)
for i=1:length(wk)
if (wn<wk(i)) && (wk(i) <= wc)
Pr(i)=(2).*(wk(i) - wn);
elseif (wc<wk(i)) && (wk(i) <= wv)
Pr(i)=(-1).*(wk(i) - wv);
else (wk(i) <wn)
Pr(i)=0;
end;
end;
```

Листинг 2. Листинг 2 файл-функции *sum.m*. Построения оптимального фазочастотного алгоритма прослеживания волн

```
function [ res ] = sum_L(wk,wc,wn,wv,phi,N)
res = 0;
for i = 1:N
res = res + (125/2*wc^2)*triangular(wk(i), wc, wn, wv) * cos(phi(i)-
wk(i).*tau);
end
end
```

Листинг 3. Листинг m-файл *task.m*. Основной файл-сценарий

```
close all;
clc;
clear all;
Tm = 0.05;
dT = 0.002;
fleft = 20;
fright = 60;
t=-Tm:dT:Tm;
a0 = 1; b = 60; f0 = 40; fi = 0;
tau = 0:1:length(t);
%-----
ISignal = zeros(1, length(t));
% % функция с колокольной огибающей со сдвигом
d = [-0.02,0,0.02];
sz = length(d);
for i = 1:sz
ISignal = ISignal + a0* exp(-b^2*(t-d(i)).^2).*cos(2*pi*f0*(t-d(i))+fi);
end
figure(1);
plot(t,ISignal);
title('сигнала функции импульса колокольной огибающей');
xlabel('c');
grid on;
%-----
dF = (fright-fleft)*dT/(max(t)-min(t));
F=fleft:dF:fright;
```

```

fmid = (fleft+fright)./2;
%преобразование
S=fft(ISignal);
S_Re=real(S);S_Im=imag(S);
S1=abs(S);
an = atan2(S_Im, S_Re);
%-----импульс с «колокольной» огибающей с добавлением шумом-----
mu = 0;
A0=max(S1);
sigma = A0/100;
Noise = normrnd(mu,sigma,1,length(ISignal));
figure(2);
plot(t,SigWithNoise);
title('Графикфункцииимпульсас "колокольной" огибающей с
добавлениемшума');
ylabel('S(t)');
xlabel('t,c');
gridon;
%-----реализация алгоритма фазочастотного прослеживания-----
L1 = sum_L(F, fmid, fleft, fright,an,m)
figure;
plot(t,L1)
xlabel('c');
gridon;

```

Приложение В
Программная реализация алгоритма
корректирующей деконволюции в математическом пакете MATLAB

Листинг 1. Листинг файла-функции *Rk.m*. Расчет нормированной автокорреляционной функции по формуле (3.2.1)

```
function res = Rk( a, k, m, M )
% расчет нормированной автокорреляционной функции
num = 0;
den = 0;
len = length(a);
for i = m : M
if (i + k < 1)
continue
end
if (i + k > len)
break;
end
num = num + a(i) * a(i + k);
den = den + a(i) ^ 2;
end;
res = num / sqrt(den);
end
```

Листинг 2. Листинг файла-функции *phi.m*. Вычисление треугольной весовой функции (3.2.2)

```
function res = phi( k, K )
% функция для уменьшения погрешности решения ( аппроксимация
% автокорреляционной функции исходного сигнала)
res = 1 - k / K;
end
```

Листинг 3. Листинг файла-функции *Filter.m*. Задание оператора полосового фильтра (3.2.5)

```
function [ res ] = FILTER( g, dt, ksi, f1, f2 )
% оператор полосового фильтра
% если деления на ноль какое при этом будет условие?
if (g == 0)
res = -10;
else
res = 1 / pi / g / dt * cos(ksi * g * dt) / (1 - (2 * ksi * g *
dt / pi) ^ 2 ) * (sin(2 * pi * f1 * g * dt) - sin(2 * pi * f2 * g * dt));
end
end
```

Листинг 4. Листинг m - файл *scr.m*. Основной файл-сценарий

```

closeall;
clc;
clearall;
Tm = 0.05;
dT = 0.002;
fleft = 20;
fright = 60;
t=-Tm:dT:Tm;
a0 = 1; b = 60; f0 = 40; fi = 0;
b0 = 1; % параметр энергии белого шума
K = 51;
m = 1;
%-----
ISignal = zeros(1, length(t));
% % функция с колокольной огибающей со сдвигом
d = [-0.02,0,0.02];
sz = length(d);
fori = 1:sz
ISignal = ISignal + a0* exp(-b^2*(t-d(i)).^2).*cos(2*pi*f0*(t-d(i))+fi);
end
figure(1);
plot(t, ISignal);
title('сигналафункцииимпульсасколокольнойогибающей');
xlabel('c');
gridon;
%-----
dF = (fright-fleft)*dT/(max(t)-min(t));
F=fleft:dF:fright;
%преобразование
S=fft(ISignal);
S_Re=real(S);S_Im=imag(S);
S1=abs(S);
an = atan2(S_Im, S_Re);
%-----импульс с «колокольной» огибающей с добавлением шумом-----
mu = 0;
A0=max(S1);
sigma = A0/100;
Noise = normrnd(mu,sigma,1,length(ISignal));
figure(2);
plot(t, SigWithNoise);
title('Графикфункцииимпульсас "колокольной" огибающейсдобавлениемшума');
ylabel('S(t)');
xlabel('t,c');
gridon;
%-----автокорреляционнаяфункция-----
M = length(SigWithNoise);
R = zeros(K, 1);
for k = 1 : K
R(k) = Rk(SigWithNoise(1, :), k - ceil(K / 2) - 1, m, M) * phi(k, K);
%R(k) = Rk(ISignal(1, :), k - ceil(K / 2) - 1, m, M);
end;
figure(3);
plot(t,R');
title('Автокорреляционнаяфункцияимпульсас «колокольной»огибающей')
xlabel('t,сек');ylabel('R(f)')
gridon;
%-----решение матричного уравнения -----
matrixR = zeros(K - 1, K - 1);
Rs0 = R(1) * (1 + b0 / R(1));
fori = 1 : K - 1
for j = i : K - 1

```

```

if (i == j)
matrixR(i, j) = Rs0;
else
matrixR(i, j) = R(j - i + 1);
matrixR(j, i) = R(j - i + 1);
end
end
end
vector_right = zeros(K-1, 1);
vector_right(1) = 1;
% вычисление обратного оператора L, восстанавливающего весь спектр частот
от
% нуля до частоты Найквиста
L = matrixR ^ (-1) * vector_right
%-----оператор полосового фильтра -----
G = floor(K/2);
ksi = 3;
f1 = 20;
f2 = 60;
h = zeros(G * 2, 1);
for g = -G : G
h(g + G + 1) = FILTER( g, dT, ksi, fleft, fright);
end
figure(4);
h = h';
plot(t, h);
title('Оператор полосового фильтра')
xlabel('t, сек'); ylabel('h(f)')
grid on;
%-----свертка функций lk и hg. Определение обратного оператора -----
ls = zeros(K, 1); % L^
for k = 1 : K
ls(k) = 0;
for g = k - G : k + G
if (k - g > 0 && g > 0)
ls(k) = ls(k) + h(g) * L(k - g);
end
end
end
figure(5);
plot(t, ls);
title('Определение обратного оператора')
xlabel('t, сек'); ylabel('ls(f)')
grid on;
%----- Обратная фильтрация -----
as = zeros(K * 2, 1); % a^
len = length(t) * 2;
for i = 1 : len
as(i) = 0;
for k = 1 : K
if (i - k > 0 && i - k <= length(ISignal))
as(i) = as(i) + ls(k) * ISignal(1, i - k);
end
end
end;
figure(6);
t = [t t];
t(K + 1:end) = t(K + 1:end) + t(K) + dT - t(1);
plot(t, as);
title('Деконволюция')
xlabel('t, сек'); ylabel('A(f)');
grid on;

```