

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Государственный университет «Дубна»

*На правах рукописи*

**Колигаев Сергей Олегович**

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ  
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МОРСКИХ  
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ СТАЦИОНАРНЫХ  
ПРИЁМНЫХ И СИНТЕЗИРУЕМЫХ ИЗЛУЧАЮЩИХ АНТЕННЫХ  
РЕШЁТОК**

1.6.9 – Геофизика (технические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
**Кузнецов Олег Леонидович**

Дубна – 2023

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>Глава 1. Реализация методов пространственной фильтрации сейсмоакустических полей в морской геофизике</b> .....	19
<b>1.1 Фильтрующие свойства пространственно-развитой линейной антенной решетки</b> .....	19
<b>1.2 Фильтрующие свойства планарной антенной решетки</b> .....	23
<b>1.3 Ограничения на пространственное развитие антенны</b> .....	27
<b>1.4 Реализация направленного излучения и приема применительно к морской сейсморазведке</b> .....	30
<b>1.5 Моделирование сейсмолокатора бокового обзора на базе линейной донной приемной антенны и излучающей антенны с синтезированной апертурой</b> .....	33
<b>Выводы по Главе 1</b> .....	36
<b>Глава 2. Позиционирование приемно-излучающих систем</b> .....	38
<b>2.1 Методы позиционирования стационарной приемной системы</b> .....	43
<b>2.1.1 Оценка абсолютных координат</b> .....	43
<b>2.1.2 Оценка относительных координат</b> .....	44
<b>2.2 Методы решения систем уравнений</b> .....	49
<b>2.2.1 Метод Ньютона решения систем нелинейных уравнений</b> .....	49
<b>2.2.2 Метод наименьших квадратов решения систем линейных уравнений</b> .....	49
<b>2.2.3 Алгебраический метод решения систем линейных уравнений</b> .....	50
<b>2.3 Точностные характеристики позиционирования</b> .....	53
<b>2.4 Выбор модели среды распространения гидроакустических сигналов</b> .....	57
<b>2.5 Обоснование критерия выбора (задания) конфигурации реперных точек в системе позиционирования</b> .....	61
<b>2.6 Динамическое позиционирование излучателя</b> .....	66
<b>Выводы по Главе 2</b> .....	75
<b>Глава 3. Программный комплекс обработки сигналов</b> .....	77
<b>3.1 Возможные варианты получения входных данных</b> .....	78
<b>3.2 Предварительная обработка входных канальных данных</b> .....	79
<b>3.3 Совместная обработка данных</b> .....	81
<b>3.4 Отображение результатов обработки</b> .....	82
<b>Выводы по Главе 3</b> .....	85
<b>Глава 4. Экспериментальные исследования</b> .....	86
<b>4.1 Отработка технологии позиционирования приемной системы и согласованной со средой обработки информации</b> .....	86
<b>4.1.1 Позиционирование приемной системы</b> .....	86
<b>4.1.2 Согласование со средой при позиционировании приемной системы</b> .....	90
<b>4.1.3 Оценка дальности в дисперсионной среде</b> .....	99
<b>4.1.4 Согласованная со средой пространственная фильтрация сигналов поверхностных волн</b> .....	102
<b>4.1.5 Использование волноводной модели</b> .....	110
<b>4.1.6 Оценка параметров затухания</b> .....	114
<b>4.2 Экспериментальная отработка технологии позиционирование источника излучения</b> .....	117

<b>4.2.1. Позиционирование излучателя.....</b>	<b>117</b>
<b>4.2.2. Позиционирование источника поверхностных сейсмических волн .....</b>	<b>120</b>
<b>4.3. Экспериментальная отработка программного пакета ПОСиГС применительно к геофизическим методам поиска полезных ископаемых .....</b>	<b>128</b>
<b>4.3.1. Пассивная сейсмолокация (СЛОЭ).....</b>	<b>128</b>
<b>4.3.2. Активная сейсмолокация (СЛБО) .....</b>	<b>132</b>
<b>Выводы по Главе 4 .....</b>	<b>135</b>
<b>Заключение .....</b>	<b>137</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>141</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития мировой экономики характеризуется началом крупномасштабного освоения природных ресурсов Мирового океана. В России, в первую очередь, это относится к изысканиям и разработкам нефтегазовых месторождений на континентальном шельфе.

Основной объем предстоящих работ приходится на шельф арктических и дальневосточных морей. В ближайшей перспективе в качестве основных районов рассматривается шельф Охотского, Баренцева и Карского морей.

В процессе освоения морских месторождений углеводородов можно выделить несколько последовательных, а в ряде случаев параллельных во времени этапов, а именно:

- разведка и оконтуривание месторождения;
- инженерно-геологические исследования в предполагаемых районах разработки месторождения, местах бурения и обустройства скважин, включая места размещения подводных добычных комплексов, а также трассы прокладки магистральных трубопроводов;
- бурение скважин;
- эксплуатация скважин с контролем процесса газо- и нефтедобычи и оценкой уровня выработки месторождения.

Практически все эти этапы, за исключением этапа бурения скважин, реализуются сейсмическими методами с использованием буксируемых приемных сейсмоков и пневматических или электроискровых источников излучения, причем буксировка приемных и излучающих устройств осуществляется в приповерхностном слое [20, 41, 98].

Учитывая, тот факт, что существенная часть шельфовых месторождений углеводородов России находится в Арктической зоне, использование поверхностно буксируемых многоканальных пространственно-развитых геофизических средств носит исключительно сезонный и весьма затратный характер.

Одним из путей обеспечения круглогодичной возможности проведения геофизических исследований на шельфовом месторождении может являться использование подводной буксировки приемных и излучающих средств, но на данный момент времени этот вариант весьма дорогостоящий.

В последнее время даже вне зависимости от указанной выше проблемы освоения арктических шельфовых месторождений углеводородов предпринимаются попытки заглужения (приближения ко дну) приемных и излучающих систем в процессе проведения морских сейсмоакустических исследований.

Обоснование этого подхода активно ведется такими яркими представителями геофизической школы МГУ как Ю.П. Ампилов, М.Ю. Токарев, В.Г. Гайнанов и др., показывающими, что приближение ко дну моря излучающей и приемной систем может существенно повысить эффективность морских геофизических исследований [3,4].

Для обеспечения же максимальной эффективности ряда морских геофизических исследований (таких как планирование и контроль процессов бурения скважин, контроль выработки месторождения) сотрудниками кафедры общей и прикладной геофизики университета «Дубна» было предложено разместить, по крайней мере, приемную систему непосредственно на дно моря [62].

**Актуальность** диссертационной работы определяется необходимостью отработки технологии морских геофизических исследований с использованием именно стационарных пространственно-развитых донных приемных и мобильных заглуженных буксируемых излучающих средств.

### **Степень разработанности**

Целесообразность установки приемных систем непосредственно на дно с целью повышения эффективности геофизического исследования, отмечается в работах В.И. Богоявленского, Г.А. Максимова, А.В. Гладилина [13-16, 74].

Под руководством академика РАН Лобковского Л.И. разработана и внедрена на мелководном шельфовом месторождении Северного Каспия стационарная донная система непрерывного геодинамического мониторинга процесса нефтегазодобычи [69-72].

С установкой пространственно-развитых приемных систем на дно моря появляется возможность внедрения в морскую сейсморазведку ряда совершенно новых и перспективных технологий разведки полезных ископаемых. В первую очередь это относится к технологиям, использующим методы пространственной фильтрации как первичных, так и вторичных сейсмоакустических полей, научно-технические основы которых разработаны группой геофизиков во главе с О.Л. Кузнецовым [63-68, 89, 100, 101], в частности:

- метод сейсмической локации очагов эмиссии (СЛОЭ);
- метод сейсмической локации бокового обзора (СЛБО).

Отличительной особенностью технологии СЛБО является то, что для изучения геологической среды используют помимо зеркально отраженных волн, как в традиционной сейсморазведке, рассеянные волны.

Учитывая, что по сравнению с зеркально отраженными волнами рассеянные волны имеют амплитуду на 1-2 порядка меньше, для их выделения в общем сейсмическом волновом поле используют многоэлементные стационарные приемные и синтезируемые излучающие антенны с размерами апертур до 2 км и более, позволяющие реализовать накопление сигналов с кратностью до  $10^4$ .

Технология сейсмолокации очагов эмиссии позволяет производить разведку, доразведку, контроль процессов разработки, а также оценку степени выработки месторождения при использовании эффекта генерации углеводородной залежью колебаний в диапазоне низких звуковых частот [2,17,100].

Обнаружение и пространственная локализация выявленной микросейсмической активности, на которую, собственно, ориентирована

технология СЛОЭ, осуществляется аналогично СЛБО с использованием пространственно-развитых приемных антенных решеток, обеспечивающих возможность реализации многократного синфазного накопления и пространственной фильтрации сигналов.

Успех разработки месторождения зависит от эффективности процесса глубинного наклонно-направленного и горизонтального бурения. При горизонтальном и наклонно-направленном бурении контроль проходки осуществляют методами инклинометрии либо позиционирования координат забоя с использованием встраиваемого скважинного излучателя-приемника и наземной системы приемников-излучателей, ориентированных на излучение-прием специально сформированных сигналов. Однако реализация такого рода методов сопряжена с существенным усложнением процесса проходки скважины и необходимостью организации надежного канала связи в скважине.

Наличие шума бурового инструмента с ярко выраженными спектрально-энергетическими характеристиками позволяет организовать процесс непрерывного мониторинга местоположения забоя методами пассивной сейсмоакустики. В зависимости от режима работы бурового инструмента (ударный, вращательный, ударно-вращательный) и в зависимости от характера породы максимум спектральной плотности шумоизлучения будет находиться в частотном диапазоне от десятков до нескольких сотен Герц.

При размещении на морском дне низкочастотной сейсмоакустической пространственно-развитой приемной антенной решетки, появляется возможность оценки текущего положения забоя [73] в режиме пассивной локации.

Оценка уровня выработки месторождения, включая оценку текущего коэффициента нефтеотдачи и выявления незатронутых вытеснением целиков нефти, является весьма сложной задачей, но при наличии развернутой стационарной донной сейсмоакустической системы в районе разработки

месторождения появляется возможность периодического его 3D мониторинга, т.е. практической реализации 4D технологии.

Следует отметить, что локационные методы геофизических исследований (СЛБО и СЛОЭ) в полной мере соответствуют принципам, закладываемым в технологию «геосферной обсерватории», разрабатываемой академиком РАН А.Н. Дмитриевским и Н.А. Ереминым в институте проблем нефти и газа РАН [30].

Поскольку указанные технологии хорошо зарекомендовали себя в континентальной наземной геофизике, можно сделать вывод об актуальности проблемы реализации рассмотренных активных и пассивных методов локации неоднородностей и в морских условиях с использованием пространственной фильтрации сейсмоакустических полей фазируемыми антенными решетками.

Основной проблемой переноса этих технологий с континентальных условий на морские является проблема формирования желательной и оценки реальной конфигурации апертур излучения и приема в обеспечение эффективной пространственной обработки сигналов.

При проведении работ на суше эти задачи довольно просто решаются геодезическими методами, в том числе с использованием спутниковых систем позиционирования [80,81]. Перемещение же приемных и излучающих систем в водную толщу лишает этой возможности, что существенно затрудняет решение задач не только глубинной, но и поверхностной инженерной сейсморазведки [19]. Сложность задачи позиционирования, особенно приемных элементов пространственно-развитых антенных решеток таких масштабов, усугубляется тем обстоятельством, что решать ее необходимо в мелководных условиях шельфовой зоны, где в полной мере проявляются волноводный, дисперсионный характер распространения гидроакустических сигналов.

**Целью диссертационной работы является реализация в морских условиях геофизических методов, основанных на пространственной**

фильтрации сейсмоакустических полей с использованием фазируемых антенных решеток.

### **Основные задачи, решаемые в диссертационной работе**

1. Разработка основных элементов технологии морской сейсморазведки, основанной на пространственной фильтрации первичных и вторичных сейсмоакустических полей морскими геофизическими комплексами (сейсмолокаторами) на базе стационарных пространственно-развитых донных приемных сейсмоакустических антенн и излучающих антенн с синтезированной апертурой.

2. Разработка программного комплекса для обеспечения реализации в морских условиях современных технологий геофизических исследований, основанных на пространственной фильтрации сейсмоакустических полей морскими геофизическими комплексами на базе стационарных донных приемных и синтезируемых излучающих антенных решеток.

**Объектом исследования** в данной работе являются методы морской сейсморазведки, основанные на пространственной фильтрации первичных и вторичных сейсмоакустических полей.

**Предметом исследования** является технология морской сейсморазведки в мелководных условиях шельфовой зоны геофизическими комплексами (сейсмолокаторами) на базе стационарных пространственно-развитых донных приемных сейсмоакустических антенн и излучающих антенн с синтезированной апертурой.

### **Научная новизна работы**

В диссертационной работе:

1. Разработан способ совместного обнаружения и оценки координат (позиционирования) источника излучения, основанный на использовании параметров функции взаимной корреляции сигналов на элементах пространственно-распределенной приемной системы.

2. Обосновано использование меры обусловленности матрицы навигационных коэффициентов в качестве критерия оптимальности при

задании (выборе) конфигурации реперных точек в системах позиционирования дальномерным и разностно-дальномерным методами.

3. Показана необходимость и возможность учета передаточной характеристики акустического волновода как среды распространения сигналов при оценке координат приемных элементов приемной системы, установленной в мелководной шельфовой зоне.

4. Разработана технология оценки параметров передаточной характеристики волновода, как среды распространения поверхностных сейсмических сигналов и низкочастотных гидроакустических сигналов в мелком море, а также технология оценки параметров ее математической модели.

5. Показана реальная возможность и эффективность использования двуслойной модели Пекериса в обеспечение согласованной обработки низкочастотных гидроакустических сигналов, а также сигналов поверхностных сейсмических волн.

### **Защищаемые положения**

1. Технология позиционирования элементов стационарной донной пространственно-развитой приемной системы сейсмолокатора в диапазоне его рабочих частот, включающая оценку и использование передаточной характеристики среды распространения гидроакустического сигнала, без дополнительных средств обеспечивает необходимую точность позиционирования приемной апертуры для реализации методов активной и пассивной сейсмолокации.

2. Технология динамического позиционирование источника излучения в процессе синтезирования излучающей апертуры сейсмолокатора с использованием приемных элементов собственной стационарной донной пространственно-развитой приемной системы по критерию максимального уровня корреляции прямого гидроакустического зондирующего сигнала и минимального значения меры обусловленности навигационной матрицы обеспечивает требуемую точность позиционирования «элементов»

синтезируемой излучающей апертуры для реализации методов активной сейсмолокации.

3. Пакет программ обработки сейсмических и гидроакустических сигналов («ПОСиГС»), обеспечивает сквозную технологию морской сейморазведки, основанной на пространственной фильтрации первичных и вторичных сейсмоакустических полей морскими геофизическими комплексами на базе пространственно-развитых стационарных приемных и синтезируемых излучающих антенн.

### **Практическая ценность работы**

Результаты диссертационной работы позволяют:

- реализовать в морских условиях современные методы геофизических исследований, таких как СЛОЭ, СЛБО и др. на базе стационарных пространственно-развитых донных приемных антенных решеток и излучающих антенных решеток, синтезируемых буксируемым гидроакустическим излучателем, с использованием пакета программ обработки сигналов «ПОСиГС»;

- расширить функциональные возможности и повысить тактико-технические характеристики сейсмоакустических и гидроакустических систем наблюдения при использовании разработанного способа совместного обнаружения и позиционирования источника излучения, а также алгоритмов обработки информации, согласованных с передаточной характеристикой среды распространения, параметры модели которой определяются разработанными в диссертационной работе методами пространственно-частотно-временной фильтрации.

**Достоверность результатов работы** подтверждается тем, что:

1. Все алгоритмы пространственно-временной обработки информации, представленные в настоящей работе, апробировались методами математического моделирования, аппарат которого заложен в пакете программ «ПОСиГС». Результаты математического моделирования

полностью подтверждают работоспособность и правильность функционирования предложенных алгоритмов обработки информации.

2. Пакет программ «ПОСиГС» с реализованными в нем алгоритмами позиционирования неоднократно использовался для пространственной калибровки (оценки координат приемных элементов) выносных частей стационарного гидроакустического комплекса подводного наблюдения МГК-608М.

3. Способ обнаружения и определения координат источника сейсмоакустического сигнала отработан на макетном образце мобильной многоканальной системы сбора и передачи сейсмических сигналов, выносная часть которой устанавливалась в различных сезонных условиях в различных типах грунтов, с положительными результатами по обнаружению сигналов и локализации их источников.

4. Способ обнаружения и оценки координат источника излучения применительно к определению текущих координат излучателя в процессе синтезирования излучающей апертуры экспериментально отработан в натуральных условиях морского полигона.

5. Технология оценки параметров передаточной характеристики реального акустического волновода, как среды распространения гидроакустических сигналов, и технология оценки параметров ее математической модели отработана на большом объеме экспериментальных данных, полученных на обширной акватории Баренцева моря.

6. Алгоритмы пространственно-временной обработки, реализующие в пакете программ «ПОСиГС» современные геофизические методы, такие как сейсмолокация очагов эмиссии (СЛОЭ) и сейсмолокация бокового обзора (СЛБО), прошли апробацию и верификацию на разрабатываемых месторождениях в процессе обширных геофизических исследований, включая мониторинг гидроразрыва пласта (ГРП).

### **Методология и методы исследования**

В диссертационной работе использовались методы математического моделирования, натурального эксперимента и обработки данных геофизических исследований на реальных месторождениях.

Математическое моделирование, обработка данных экспериментальных и геофизических исследований выполнено в пакете программ «ПОСиГС».

**Личный вклад автора заключается в разработке методов и алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов, разработке программ обработки сейсмических и гидроакустических сигналов («ПОСиГС»), проведении математического моделирования, постановке и проведении натуральных экспериментальных исследований, обработке и интерпретации результатов.**

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на: Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», Казань, 2005г.; Межвузовской научно-практической конференции преподавателей, студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука – образование - отрасли народного хозяйства - профессия (потенциал Подмосковья), Дубна, 2005г.; Научно-практической конференции «Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения», Волгоград, 2005г.; Научно-практической конференции «Современные технологии создания средств наблюдения», Дубна, 2006г.; XIV научной конференции преподавателей, студентов, аспирантов и молодых специалистов Международного университета «Дубна», Дубна, 2007г.; Первой и второй Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана», Новосибирск, 2010г., 2012г.; Научно-практической

конференции «Сейсмические технологии-2016», Москва, 2016г.; Пятой международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: Maresedu-2016», Москва, 2016г.; Международной научно-технической конференции «Геофизическая разведка-2017», Дубна, 2017г.; Научно-практической конференции «Сейсмические технологии-2017», Москва, 2017г.; 36-ой Международной конференции по космическим лучам (ICRC2019), Мэдисон, Висконсин, США, 2019г.; Девятой международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: Maresedu-2020», Москва, 2020г.; XVII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований», (МСОИ-2021), Москва, 2021г. IX Международной научно-технической конференции «Освоение ресурсов нефти и газа Российского шельфа: Арктика и Дальний Восток (ОМНР-2023), 2023г.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 9 работ в рецензируемых журналах. Из них 5 публикаций представлены в научных журналах, включённых в международные базы цитирования Web of Science (WoS), Scopus, RSCI (РИНЦ), в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, а 4 статьи опубликованы в журналах рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ. Все основные результаты работы отражены в сборниках трудов указанных выше всероссийских и международных конференций.

На положения, выносимые на защиту, получено 3 патента на изобретение и 3 свидетельства о государственной регистрации программ.

В совместных публикациях использованы результаты математического моделирования, обработки результатов натуральных экспериментов и геофизических исследований на реальных месторождениях, выполненных автором лично.

## **Основное содержание работы**

В главе первой диссертационной работы рассмотрены некоторые вопросы исследования структуры геологической среды морского дна активно-пассивными методами на базе пространственной фильтрации сейсмоакустических сигналов.

Представлены результаты математического моделирования эффективности различных конфигураций приемных антенных решеток, как основных элементов пространственных фильтров. Показано, что наилучшими по параметру коэффициента концентрации являются апертуры в виде вложенных концентрических колец и спирали Архимеда. Однако с учетом того, что функционирование геофизического комплекса должно осуществляться в большинстве случаев в условиях шумящей морской буровой или добычной платформы, оптимальной конфигурацией апертуры стационарной приемной антенной решетки, минимизирующей влияние этих шумов при обеспечении высокой разрешающей способности, является конфигурация типа «Звезда». Данная конфигурация, что особенно важно в морских условиях, обеспечивает и высокую технологичность установки приемных антенн на дно.

Рассмотрены особенности реализации метода синтезирования излучающей апертуры в морских условиях и представлены результаты математического моделирования сейсмолокации бокового обзора с использованием линейной донной стационарной приемной антенны и излучающей антенны с синтезированной апертурой.

Показано, что основными проблемными вопросами, возникающими при реализации в морских условиях геофизических методов, основанных на пространственной фильтрации сейсмоакустических полей, являются вопросы пространственного позиционирования элементов приемной донной стационарной антенны и динамического позиционирования излучателя в процессе синтезирования апертуры излучающей антенны.

Вторая глава посвящена рассмотрению методов позиционирования приемной стационарной антенны и динамического позиционирования излучателя в процессе синтезирования излучающей апертуры.

Исследованы дальномерный и разностно-дальномерный методы позиционирования с длинной базой. Рассмотрены возможные математические методы решения задачи позиционирования в том числе: алгебраический метод, метод наименьших квадратов, метод Ньютона. Показано, что точность оценок координат существенно зависят от конфигурации реперных излучателей (приемников) в системе позиционирования приемных элементов стационарных приемных антенн и буксируемых излучателей соответственно. Показано, что для повышения точности позиционирования необходимо конфигурировать реперные точки таким образом, чтобы минимизировать число обусловленности матрицы навигационных коэффициентов.

Учитывая, что основные морские месторождения России находятся в мелководных районах шельфовой зоны, показана необходимость учета дисперсионного характера распространения сигналов в этих условиях.

В третьей главе представлено описание пакета программ обработки сейсмо- и гидроакустических сигналов «ПОСиГС», предназначенного для решения в морских условиях всего комплекса программно-алгоритмических задач, связанных с реализацией современных методов геофизических исследований, основанных на пространственной фильтрации первичных и вторичных сейсмоакустических полей.

Показано, что «ПОСиГС» обеспечивает возможность ввода, регистрации и обработки информации от многоканальных геофизических комплексов. В нем реализованы все основные функциональные процедуры, необходимые для решения морских геофизических задач, в частности:

- частотно-временной обработки многоканальной информации, включая спектральный и корреляционный анализ;

- оценки параметров передаточной характеристики дисперсионной среды распространения сейсмоакустических и гидроакустических сигналов, в том числе зоны малых скоростей и мелководной шельфовой зоны;

- оценки координат приемных элементов стационарных сейсмоакустических антенн на базе дальномерного и разностно-дальномерного методов позиционирования с использованием методов линейной и нелинейной алгебры;

- оценки текущих координат источника излучения (динамического позиционирования) с использованием собственной приемной системы и синтезирования излучающей апертуры;

- пространственной фильтрации сейсмоакустических полей на базе когерентной обработки сигналов пространственно-распределенной приемной системы, в том числе отраженных и рассеянных сигналов, возбуждаемых синтезированной излучающей апертурой.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных с использованием разработанного пакета программного обеспечения «ПОСиГС».

Представлены результаты позиционирования элементов протяженных стационарных приемных антенн и динамического позиционирования излучателя в обеспечение возможности синтезирования излучающей апертуры в морских условиях.

Показана реальная возможность повышения эффективности пространственной фильтрации гидроакустических и сейсмоакустических полей в дисперсионных средах. В частности, показано, что учет дисперсионной характеристики среды распространения сигналов приводит к расширению интервала пространственной корреляции сигнала, повышению точности оценок временных интервалов и соответственно точности позиционирования приемных элементов стационарной донной приемной системы. Расширение интервала пространственной корреляции сигнала

обеспечивает возможность существенного увеличения пространственных масштабов приемных и излучающих апертур, которые в свою очередь, определяют разрешающую способность пространственной фильтрации.

Тестирование разработанного программного обеспечения, реализующего современные методы пространственной фильтрации сейсмических полей, проведено непосредственно на классифицированных экспериментальных данных, полученных в процессе полевых работ по перфорации скважины в процессе подготовительных работ к гидроразрыву пласта и в процессе его мониторинга.

Представленные результаты применения разработанного программного обеспечения для обработки больших объемов сейсмической информации методами сейсмолокации очагов эмиссии и сейсмолокации бокового обзора показывают готовность разработанного пакета программ «ПОСиГС» к решению этих задач и в морских условиях с использованием донных стационарных приемных и синтезируемых излучающих антенных решеток.

### **Благодарности**

Автор приносит искреннюю благодарность научному руководителю д.т.н., профессору Олегу Леонидовичу Кузнецову, к.т.н., доценту Игорю Алексеевичу Чиркину, д.т.н., профессору Валерию Гарифьяновичу Гайнанову, сотрудникам кафедры общей и прикладной геофизики университета «Дубна».

С особой теплотой и благодарностью вспоминает ушедшего из жизни первого научного руководителя д.т.н., профессора Владислава Дмитриевича Неретина.

## **Глава 1. Реализация методов пространственной фильтрации сейсмоакустических полей в морской геофизике<sup>1</sup>**

В основу указанных выше современных методов геофизических исследований положена идея обеспечения одновременного обнаружения и локализации неоднородностей путем реализации методов пространственной фильтрации сейсмоакустических полей пространственно-развитыми антенными решетками. Рассмотрим основные фильтрующие свойства пространственно-развитой антенной решетки.

### **1.1 Фильтрующие свойства пространственно-развитой линейной антенной решетки**

Выбор линейной формы антенной решетки обусловлен тем, что именно линейные решетки имеют максимальное практическое применение в силу технологичности их использования и возможности формирования из них более сложных конфигураций.

Процедуры и результаты пространственной фильтрации сейсмо- и гидроакустических полей имеет некоторые отличия в зависимости от области обзора пространства, а именно ближней или дальней зоны относительно антенны, граница между которыми определяется соотношением размера антенны и длины волны рабочего сигнала [82 с. 83, 85 с. 6].

Рассмотрим прямолинейную эквидистантную антенную решетку длиной  $L$ , в которой приемные элементы установлены на одинаковом расстоянии друг от друга  $\Delta L \leq \lambda/2$ , и ее способность пространственной фильтрации в дальней зоне ( $R \gg L$ ), которая характеризуется аналитически определяемой диаграммой направленности.

---

<sup>1</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. Астахова Н.В, Добрянский В.М., Колигаев О.А., **Колигаев С.О.**, Крайнов А.Б, Лобов Р.В., Шикалов А.А. Способ морской сейморазведки. Патент №2502091. 2013.
2. **Колигаев С.О.**, Чиркин И.А., Ризанов Е.Г. Сейсмические антенны // Труды конференции «СЕЙСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ-2016», М. С. 49-52.

Для формирования диаграммы направленности антенны в направлении  $\theta_0$  необходимо просуммировать сигналы всех приемников антенны с компенсацией временных задержек (при формировании диаграммы направленности во временной области) или фазовых задержек (при формировании диаграммы направленности в частотной области) в предположении плоского фронта волны, т.е. расположении точек фокусировки в зоне Фраунгофера.

Рассмотрим формирование диаграммы направленности в частотной области, т.е. предполагаем, что сигнал каждого приемного элемента антенны подвергнут аналого-цифровому преобразованию, взяты синхронные выборки со всех приемных элементов, произведено дискретное преобразование Фурье и получены комплексные спектральные компоненты вида

$$S_i(t) = e^{j(\omega t - kr_i)} = e^{j(\omega t - kr_1)} e^{-j(k(i-1)\Delta L \sin\theta_0)} \quad (1.1)$$

где  $i=0, N-1$  – номер приемника в антенне;

$N$  – количество приемников в антенне;

$\omega$  – круговая частота;

$k$  – волновое число;

$r_i$  – расстояние от  $i$ -го приемника до точки фокусировки.

Пространственная фильтрация предполагает обеспечение возможности синфазного сложения сигналов, приходящих с заданного направления компенсации, т.е. предполагает компенсацию фазовых задержек в сигналах на апертуре антенны.

$$\begin{aligned} S(\theta) &= \sum_{i=0}^{N-1} S_i(t) e^{-jki\Delta L \sin\theta} = \sum_{i=0}^{N-1} e^{j(\omega t - kr_1)} e^{-jki\Delta L(\sin\theta - \sin\theta_0)} = \\ &= e^{j(\omega t - kr_1)} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} e^{-jki\Delta L(\sin\theta - \sin\theta_0)} \end{aligned} \quad (1.2)$$

Применяя формулу для суммы членов геометрической прогрессии получим выходной сигнал в виде

$$\begin{aligned}
S(\theta) &= e^{j(\omega t - kr_1)} \cdot \frac{e^{-jkN\Delta L(\sin\theta - \sin\theta_0)} - 1}{e^{-jk\Delta L(\sin\theta - \sin\theta_0)} - 1} = \\
&= e^{j(\omega t - kr_1)} \cdot \frac{e^{-jkN\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)}}{e^{-jk\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)}} \cdot \frac{e^{jkN\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)} - e^{-jkN\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)}}{e^{jk\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)} - e^{-jk\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)}} = \quad (1.3) \\
&= e^{j(\omega t - kr_1)} \cdot e^{-jk(N-1)\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)} \cdot \frac{\sin\left(kN\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right)}{\sin\left(k\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right)}.
\end{aligned}$$

Учитывая малость аргумента в синусе знаменателя значение синуса можно заменить на его аргумент, а далее умножив числитель и знаменатель на  $N$  получить

$$\begin{aligned}
S(\theta) &\sim N \cdot e^{j(\omega t - kr_1)} \cdot e^{-jk(N-1)\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)} \cdot \frac{\sin\left(kN\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right)}{kN\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)} \quad (1.4) \\
&= N \cdot e^{j(\omega t - kr_1)} \cdot e^{-jk(N-1)\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)} \cdot \text{sinc}\left(kN\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right)
\end{aligned}$$

При задании углу компенсации значения угла прихода волны  $\theta = \theta_0$  выходной сигнал пространственного фильтра будет превышать средний уровень сигнала на приемных элементах в  $N$  раз. Таким образом, коэффициент усиления сигнала линейной антенной может достигать величины  $N$ .

Форма диаграммы направленности линейной антенны определяется выражением

$$\begin{aligned}
R(\theta) &\sim \frac{1}{N} |S(\theta)| = \text{sinc}\left(kN\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right) = \\
&= \frac{\sin\left(kN\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right)}{kN\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)} = \frac{\sin\left(\frac{2\pi f}{c} N\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right)}{\frac{2\pi f}{c} N\frac{\Delta L}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)} \sim \quad (1.5) \\
&\sim \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} L(\sin\theta - \sin\theta_0)\right)}{\frac{\pi}{\lambda} L(\sin\theta - \sin\theta_0)}
\end{aligned}$$

Здесь  $\lambda$ -длина волны,  $L$ -длина антенны.

Ширина диаграммы направленности зависит от угла компенсации  $\theta_0$ , но разрешающую способность линейной антенны принято определять по ширине диаграммы направленности при нулевом угле компенсации, т.е. при  $\theta_0 = 0$ .

$$R(\theta) \sim \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} L \cdot \sin\theta\right)}{\frac{\pi}{\lambda} L \cdot \sin\theta} \quad (1.6)$$

Принятые упрощения позволяют описать диаграмму направленности линейной антенны выражением для широко применяемого кардинального синуса  $\text{sinc}(X) = \frac{\sin(X)}{X}$ , значения которого табулированы.

Полученное выражение позволяет оценивать потенциальные возможности антенной решетки.

В соответствии с формой кардинального синуса уровня  $\text{sinc}(x)=0.7$  он достигает при значении аргумента  $x=1.4$ , т.е.

$$\frac{\pi}{\lambda} L \cdot \sin\theta = 1.4, \text{ откуда } \sin\theta = \frac{1.4}{\frac{\pi}{\lambda} L}.$$

Для  $\frac{L}{\lambda} \gg 1$  значение правой части мало и тогда можно считать  $\theta \sim \sin\theta \sim \frac{1.4}{\frac{\pi}{\lambda} L}$  или переводя в градусы  $\theta \sim \frac{1.4}{\frac{\pi}{\lambda} L} \cdot \frac{180}{\pi} \sim \frac{25^\circ}{\frac{L}{\lambda}}$ .

Полный раскрыв диаграммы направленности линейной антенны по уровню 0.7 составляет  $2\theta \sim \frac{50^\circ}{\frac{L}{\lambda}}$ .

Представленные результаты процедуры пространственной фильтрации соответствуют области дальнего поля антенны, где элемент пространственного разрешения антенны существенно вытянут в радиальном относительно антенны направлении. По мере приближения к антенне радиальные размеры элемента пространственного разрешения уменьшаются и в ближней зоне появляется возможность сканирования области обзораемого пространства не только по углу, но и по дальности, а в более общем случае, по всем трем пространственным координатам X,Y,Z . В этом случае область обзораемого пространства представляется совокупностью

сопрягаемых или пересекающихся элементов пространственного разрешения. Центры элементов пространственного разрешения (ЭПР) используются в качестве точек фокусировки антенны, относительно которых рассчитываются временные или фазовые (в зависимости от способа формирования отклика – во временной или спектральной области существования сигнала) задержки для каждого приемного элемента антенны. Этим собственно и отличаются процедуры диаграммообразования и фокусировки. Впрочем, процедурно (алгоритмически) они могут быть выполнены единообразно, т.е. диаграммообразование может быть реализовано как фокусировка на центры элементов пространственного разрешения, равномерно размещенных на окружности (для двумерного пространства) или сферы (для трехмерного пространства) существенно большего по сравнению с длиной апертуры антенны радиуса.

## **1.2 Фильтрующие свойства планарной антенной решетки**

Разрешающая способность антенны, как в дальней, так и в ближней зоне на частоте  $f$  определяется соотношением  $L_0/\lambda$  проекции  $L_\theta$  ее геометрического размера  $L$  на направление компенсации  $\theta_0$  к длине волны  $\lambda$ . В частности, линейная антенна обладает самым узким лепестком диаграммы направленности в направлении перпендикулярном к апертуре и самым широким в направлении вдоль апертуры.

Для повышения эффективности и увеличения разрешающей способности планарной приемной антенны при пространственной фильтрации необходимо максимизировать ее линейные размеры (в каком-то одном или во всех направлениях, в зависимости от назначения).

При этом возникает определенная проблема выбора оптимальной конфигурации апертуры антенны, обеспечивающей максимальную разрешающую способность во всей заданной области пространства при заданном ограниченном количестве приемных элементов.

Проанализировать фильтрующие свойства приемных апертур можно путем математического моделирования.

Определим область обзора в виде площадки размером 4000x4000 метров в горизонтальном сечении нижнего полупространства на глубине 3000м и дискретность обзора в виде элемента 25x25м.

Модель среды – горизонтально слоистая представлена на Рис. 1.1

H Num	Depth[m]	V[m/c]	H[m]
1	-10	375	10
2	-25	700	15
3	-60	1765	35
4	-300	2150	240
5	-375	2720	75
6	-595	4350	220
7	-800	5000	205
8	-1450	5560	650
9	-1938	4770	488
10	-2530	5600	592
11	-4000	5800	1470

Количество слоев: 11

Рис. 1.1 Скоростной разрез

Рассмотрим некоторые виды конфигурации приемных систем и оценим их эффективность с точки зрения разрешающей способности, моделируя отклик антенны с планарной апертурой соответствующей конфигурации.

Положим следующие общие для всех антенных апертур параметры:

- геометрический центр приемной апертуры находится центре системы координат с координатами (0,0,0);

- количество приемников каждой апертуре – 120шт.;

- расстояние между приемниками в апертуре – 50м.;

- точка излучения с координатами (1000;-1000;-3000).

На Рис.1.2. представлены сечения диаграмм направленности антенн различной конфигурации, вид которых изображен в левых верхних углах, а также плотности распределения уровней ДН в заданной области обзора в диапазоне частот 30-70 Гц.

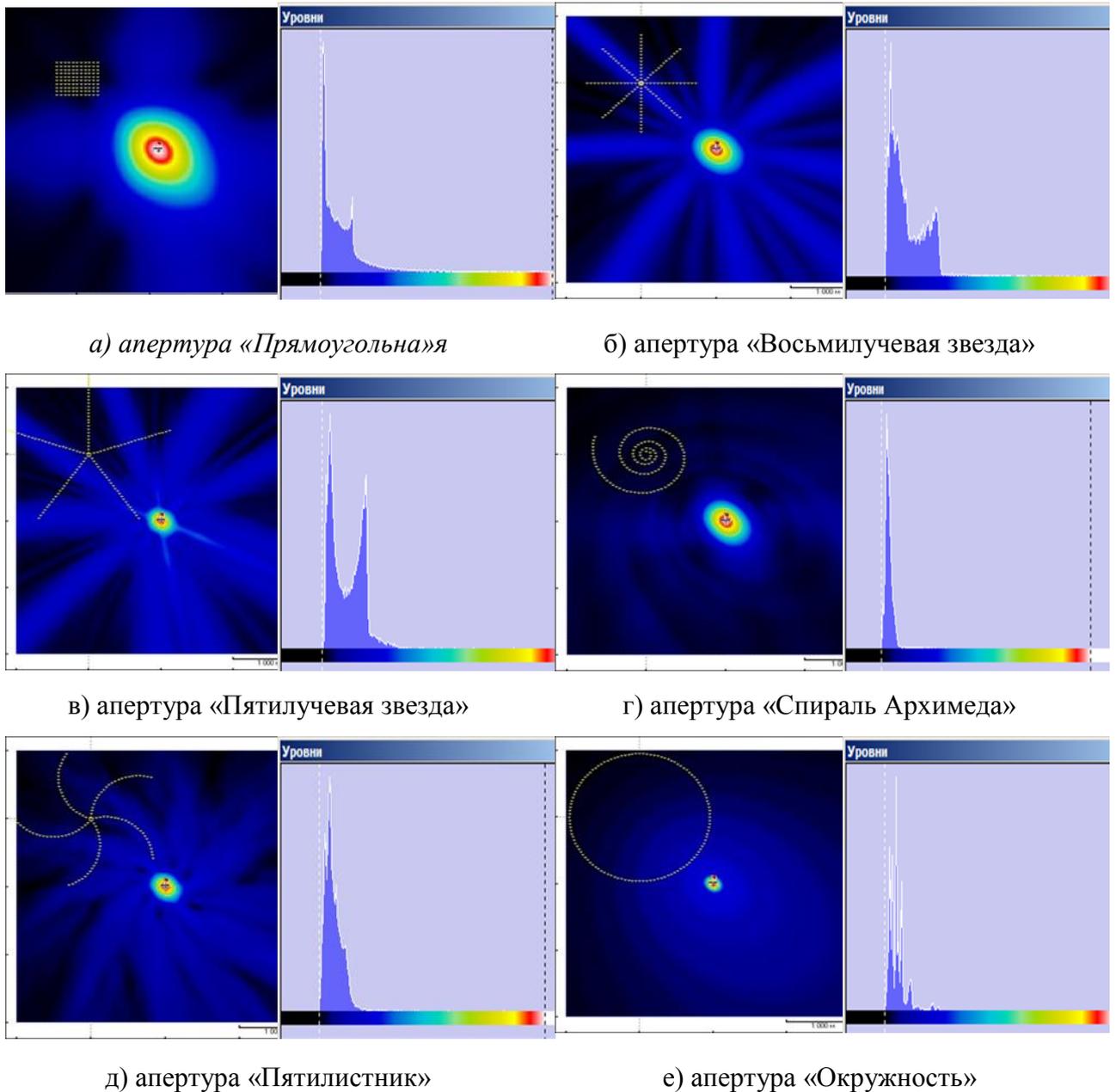


Рис.1.2. Сечения диаграмм направленности планарных антенн

При заданном количестве каналов и межэлементном расстоянии максимальным коэффициентом концентрации из рассмотренных конфигураций приемных апертур обладает спираль Архимеда, максимальной же разрешающей способностью - окружность.

Этот факт вполне объясним тем обстоятельством, что при заданном количестве приемных элементов в антенне и межэлементном расстоянии окружность обеспечивает максимальный пространственный разнос приемных элементов, т.е. максимальное значение размера любого сечения в плоскости апертуры, поэтому именно окружность обеспечивает

максимальную разрешающую способность. Для увеличения же коэффициента концентрации достаточно частично заполнить внутреннюю часть окружности, создав ее, например, виде нескольких concentric окружностей. На Рис. 1.3. представлено соответствующее сечение диаграммы направленности и плотность распределения.

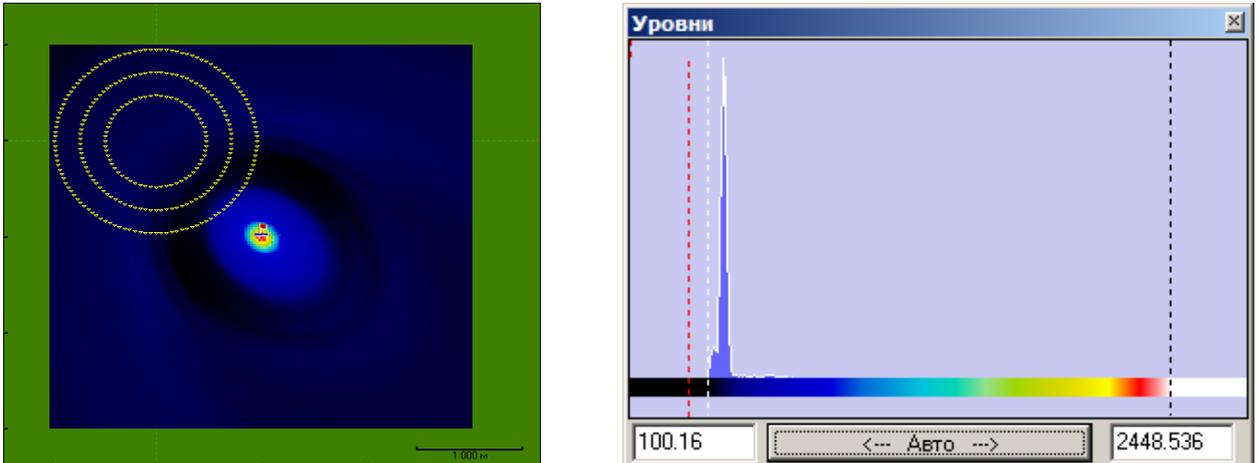


Рис. 1.3. Сечение диаграммы направленности concentric антенны.

Коэффициент концентрации антенны повысился в 2.5 раза.

В условиях суши создание любой конфигурации приемной выносной части не представляет особых сложностей. В морских же условиях формирование определенной конфигурации антенне, укладываемой даже с использованием специализированного судна-кабелеукладчика, обладающего повышенной маневренностью, является весьма сложной и зачастую практически невыполнимой задачей.

С точки зрения обеспечения максимальной разрешающей способности конфигурация в виде concentric окружностей является наиболее приемлемой, в том числе для системы пассивного наблюдения применительно к реализации задач сейсмолокации очагов эмиссии и контроля бурения скважин. Однако учитывая технологические аспекты постановки антенн в море, в процессе практической реализации апертуры в виде вложенных колец реальная апертура будет приближаться к

Архимедовой спирали, направленные свойства которых наиболее близки друг другу.

Учитывая тот факт, что при обустройстве приемной выносной части для сейсмоакустического мониторинга в районе геологоразведочной буровой или добычной платформы, являющейся основным шумящим объектом, в обеспечение максимального уровня отношения сигнал/шум оптимальной конфигурацией приемной выносной части следует считать конфигурацию типа «Звезда» (рис. 1.2.в). За счет расположения шумящего объекта вдоль приемной части данная конфигурация автоматически обеспечивает возможность максимально эффективного шумоподавления, например, с использованием FK-фильтрации. Но основным ее достоинством является то, что она наиболее проста с точки зрения технологии постановки выносных частей.

### 1.3. Ограничения на пространственное развитие антенны

Основное предназначение антенной решетки состоит, в первую очередь, в повышении отношения сигнал/шум на выходе устройства обработки информации, способствующего возможности выделения слабого сигнала на фоне шумов.

Определим потенциальные возможности пространственно-развитой антенны по повышению отношения сигнал/шум за счет пространственно-временного накопления.

Рассмотрим в качестве примера линейную гидроакустическую антенну.

Повышение отношения сигнал/шум на выходе антенны по сравнению с отношением сигнал/шум на выходе одиночного приемника, входящего в ее состав определяется уровнем корреляции полезного сигнала и шума на приемных элементах антенны [91 с. 53]

$$KУ = 10lg \frac{(S/N)^2}{(S/n)^2} = 10lg \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m (\rho_s)_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m (\rho_n)_{ij}} \quad (1.7)$$

где  $m$  - количество приемных элементов в антенне;

$(\rho_s)_{ij}$  - коэффициент корреляции сигнала на  $i$ -том и  $j$ -том приемных элементах;

$(\rho_n)_{ij}$  - коэффициент корреляции шума на  $i$ -том и  $j$ -том приемных элементах.

В общем случае повышение отношения сигнал/шум на выходе комплекса пространственно-временной обработки сигналов определяется повышением отношения сигнал/шум отдельно трактами временной и пространственной обработки

$$(S/n)_T = \frac{T}{\tau_{0ш}} \cdot (S/n)_{вх} \quad (1.8)$$

$$(S/N)_L = \frac{L}{l_{0ш}} \cdot (S/n)_T \quad (1.9)$$

где  $(S/n)_{вх}$  – отношение сигнал/шум на входе приемного элемента антенны;

$(S/n)_T$  – отношение сигнал/шум на выходе тракта временной обработки приемного канала антенны;

$(S/N)_L$  – отношение сигнал/шум на выходе тракта пространственной обработки антенны;

$T$  - интервал временного накопления сигнала на каждом приемном элементе;

$\tau_{0ш}$  - интервал временной корреляции шума;

$L$  - длина апертуры приемной антенны;

$l_{0ш}$  - интервал пространственной корреляции шума.

Интервал корреляции определяется следующим выражением

$$\tau_0 = \frac{1}{B(0)} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau) d\tau \quad (1.10)$$

где  $B(\tau)$  - корреляционная функция (сигнала или шума).

Временной интервал накопления  $T$  и пространственный интервал накопления  $L$  (линейный размер апертуры приемной антенны) не должны

превышать интервалы временной и пространственной корреляции сигнала соответственно, т.е.  $T \leq \tau_{0c}$  и  $L \leq l_{0c}$ .

Интервалы корреляции сигналов на приемных элементах антенны определяются как интервалом корреляции сигнала собственно источника излучения, так и интервалом корреляции передаточной характеристики среды распространения. В большинстве случаев временной интервал накопления сигнала определяется исключительно корреляционными свойствами источника излучения (в том числе, с учетом его возможного пространственного перемещения), в то время как интервал пространственного накопления (длина антенны) определяется в основном пространственной изменчивостью передаточной характеристики среды распространения.

В качестве иллюстрации на Рис.1.4 и Рис.1.5. представлены пространственные корреляционные функции гидроакустического сигнала от взрывного источника звука и окружающего шума, полученные с использованием протяженной горизонтальной донной антенны километровой длины.

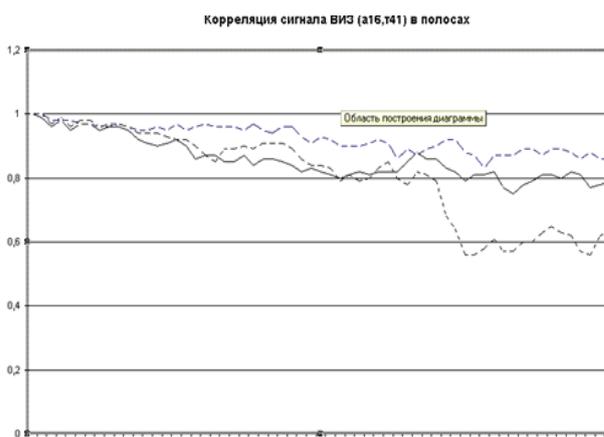


Рис.1.4 Пространственные корреляционные функции сигнала

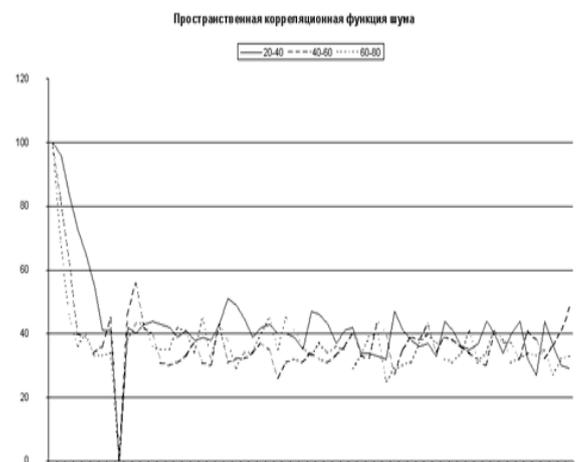


Рис.1.5 Пространственные корреляционные функции шума

Корреляционные функции оценены в различных полосах частот, причем во всем интересующем диапазоне на крайних элементах антенны

коэффициент корреляции превышает уровень 0.7-0.8, что обеспечивает возможность когерентного накопления. Интервалы же корреляции шума, как видно из рис.1.5 составляют не более половины длины волны.

#### **1.4. Реализация направленного излучения и приема применительно к морской сейсморазведке**

СЛБО относится к методам активной локации, что означает работу приемной пространственно-развитой антенны по вторичному, т.е. переизлученному неоднородностью полю. Облучение пространства может производиться, как направленно, так и ненаправленно. Прием же однозначно осуществляется направленной, т.е. фазируемой антенной. Направленное облучение подразумевает наличие пространственно-развитой стационарной излучающей антенны, состоящей из определенного количества парциальных излучателей, возбуждение которых осуществляется сигналами с соответствующими временными или фазовыми задержками, в зависимости от того в какой временной или частотной области осуществляется управление направленным излучением. Хотя это и трудно, но принципиально возможно. В частности, для увеличения амплитуды излучаемого импульса и подавления пульсаций широко используется объединение пневматических излучателей и синхронизация их излучения [28]. Если удастся синхронизовать излучение ряда пневмоисточников, то не составляет труда обеспечить введение наперед заданных задержек для формирования соответствующих диаграмм направленности излучения. Однако, учитывая необходимость обеспечения соответствующих фильтрующих свойств приемно-излучающей системы, размеры излучающей апертуры должны соответствовать размерам приемной апертуры, а это сотни и даже тысячи метров при наличии десятков и даже сотен излучающих устройств в апертуре. Реализация такой фазируемой излучающей апертуры, хотя технически и возможна, но экономически нецелесообразна.

Одной из реальных альтернатив использования многомерных пространственно-развитых антенных решеток применительно к задаче пространственной фильтрации является применение метода синтезирования апертуры [40].

В этом случае пространственно-развитая многоэлементная приемная антенная антенна, в которой сигнал с приемных элементов снимается одновременно и обрабатывается синхронно, заменяется на один, перемещаемый в пространстве приемный элемент, который последовательно занимает положение каждого приемного элемента гипотетической антенной решетки. И только после того, как приемный элемент зафиксирует сигнал в каждой точке приема в пространстве апертуры гипотетической антенны, осуществляется совместная обработка сигналов.

Несмотря на все сложности, связанные с обеспечением системы единого времени и позиционирования приемника в процессе перемещения в пространстве, данный подход в ряде случаев оказывается экономически более целесообразным. Однако есть одно существенное условие, ограничивающее возможности применения метода синтезирования приемной апертуры применительно к сейсмолокации первичного поля, а именно интервал синтезирования апертуры не должен превышать интервал корреляции регистрируемого сигнала. Данное ограничение практически сводит на нет возможности применения метода синтезирования апертуры в задачах пассивной сейсморазведки.

Однако для целей реализации активного метода сейсмолокации бокового обзора задача синтезирования апертуры вполне решаема.

Известно [82 стр. 109-111], что при использовании в пространственно-развитой антенне направленных приемников (излучателей), результирующая диаграмма направленности определяется как произведение диаграммы направленности приемника (излучателя) и диаграммы направленности собственно апертуры антенны. Аналогично диаграмма направленности активного средства, использующего приемную и излучающую антенны,

определяется как произведение диаграмм направленности приемной и излучающей антенн. Создание в морских условиях направленного сейсмоакустического излучателя с параметрами направленности соответствующими параметрам направленности приемных антенн представляет собой практически невыполнимую задачу, поэтому единственным решением представляется синтезировать излучающую апертуру с использованием ненаправленного либо слабонаправленного излучателя.

Технология наблюдения СЛБО заключается в последовательном излучении сейсмических волн в каждой точке излучения синтезируемой излучающей апертуры, в приеме и регистрации вторичного сейсмического волнового поля (возникающего в геосреде) во всех точках приема приемной апертуры. Сейсмические наблюдения завершаются после излучения в последней точке излучения и регистрации сейсмограммы от этого излучения в каждой точке приема. В результате наблюдения получают  $N$  сейсмограмм с  $M$ -канальностью, где  $N$  и  $M$  - количество точек излучения и приема соответственно.

В процессе обработки полученных сейсмограмм реализуется фокусирующий обзор геосреды (нижнего полупространства). Физический смысл фокусирующего обзора заключается в следующем. Вначале формируется общая падающая волна от всех излучателей (со всех точек излучения). Фокусировка осуществляется в центры элементов пространственного разрешения, на которые разбита сканируемая область обзора, в результате чего данная точка становится точечным источником вторичной сейсмической волны, которая распространяется вверх до каждой точки приема (приемного элемента) апертуры приемной антенны, сфокусированной в эту же точку обзора. Фокусирование осуществляется путем введения временных задержек в принятые сигналы каждым приемным элементом, которые рассчитаны по годографам падающей и восходящей волн от точечного излучения на поверхности и глубине соответственно.

Реализуя подобную процедуру для каждой точки обзора (в соответствии с количеством элементов пространственного разрешения) в заданном объеме исследования, осуществляется фокусирующий обзор геосреды.

Накопленная амплитуда сигналов в каждой точке соответствует амплитуде отраженной волны зеркального или рассеянного классов. Таким образом, фокусирующий сканирующий обзор СЛБО позволяет, во-первых, выделять зеркально отраженные и рассеянные волны в общем регистрируемом сейсмическом волновом поле и, во-вторых, позиционировать их в исследуемом объеме геосреды. При этом зеркально отраженные волны можно использовать для оценки слоистого строения среды, а рассеянные волны для оценки распределения открытой трещиноватости в ней. Для получения зеркально отраженных волн используется нормальный обзор локатора, который реализуется в схеме наблюдения и процедурах обработки по технологии МОГТ-3Д, а для изучения трещиноватости по рассеянным волнам используется боковой обзор, который реализуется в технологии СЛБО.

### **1.5. Моделирование сейсмолокатора бокового обзора на базе линейной донной приемной антенны и излучающей антенны с синтезированной апертурой**

Общие параметры, использованные для моделирования.

Количество каналов в линейной протяженной приемной антенне – 120шт.

Расстояние между приемниками – 20м.

Центр апертуры находится в центре системы координат (0;0;0) (Рис. 1.6).

Расстояние между точками в синтезированной апертуре излучения – 200м.

Количество точек излучения – 225шт.

Центр аномалии в точке с координатами (1000; 0;-2000).

Область обзора – плоскость на глубине 2000м, размером 4000х4000 метров.

Шаг обзора – 25x25м.

Глубина установки приемной апертуры – 195м.

Глубина точек излучения – 5м.

Модель среды – горизонтально слоистая (Рис.1.7).

Скоростная модель:

Вода – глубина 200м.  $C = 1500$  м\с.

Слой грунта толщиной 300м.  $C = 3000$  м\с.

Нижнее полупространство.  $C = 5000$  м\с.

Зондирующий сигнал – импульс Берлаге [60] длительностью 100мс с полосой от 10 до 90 Гц (Рис.1.8).

Траектория распространения зондирующего сигнала от текущей точки излучения (в процессе синтезирования излучающей апертуры) до аномалии и траектория распространения рассеянного сигнала от аномалии до одной из точек приема представлены на Рис. 1.9.

На Рис.1.10-1.12 представлены временные реализации прямого сигнала из одной точки возбуждения на приемных элементах антенны, прямого и отраженного от неоднородности сигналов и прямого, отраженного и шумового сигналов соответственно.

На рис. 1.13-1.16 представлены вертикальные и горизонтальные разрезы пространственных откликов сейсмолокатора бокового обзора, которые отчетливо показывают существенное повышение степени и точности локализации неоднородности при использовании синтезированной излучающей апертуры.

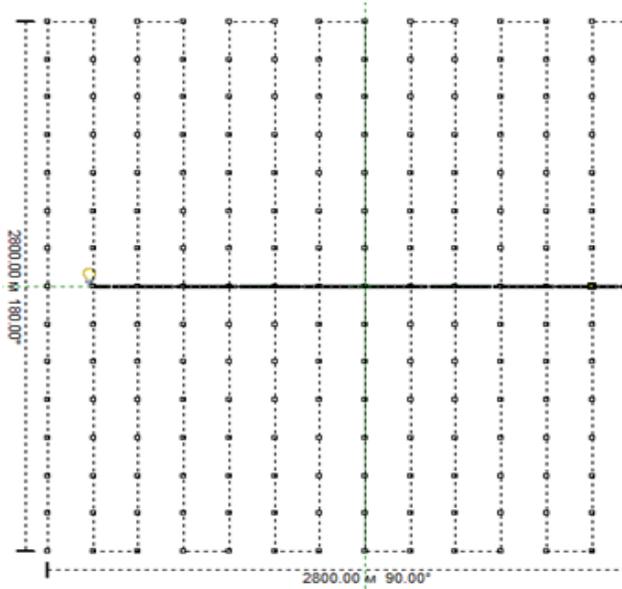


Рис. 1.6.

Апертуры излучения и приема.

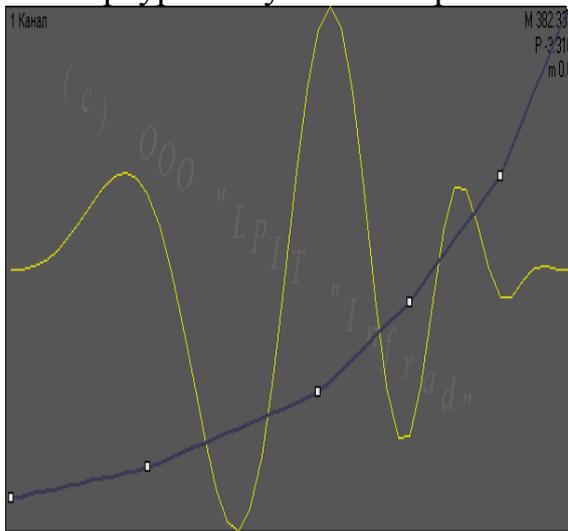


Рис. 1.8.

Форма зондирующего сигнала

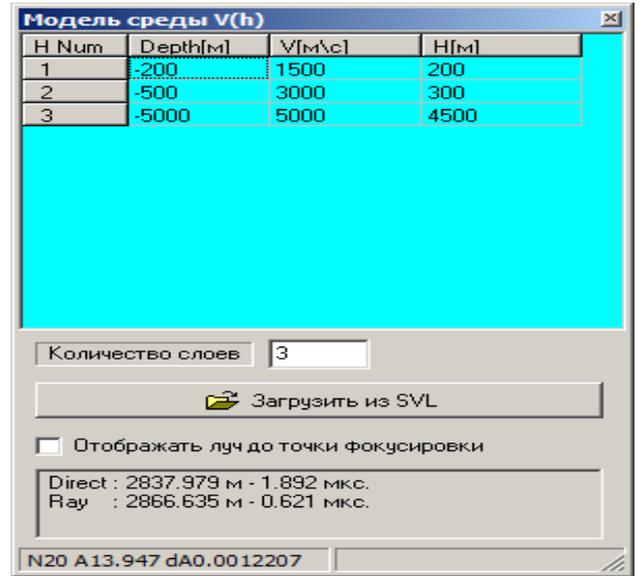


Рис. 1.7.

Параметры среды.

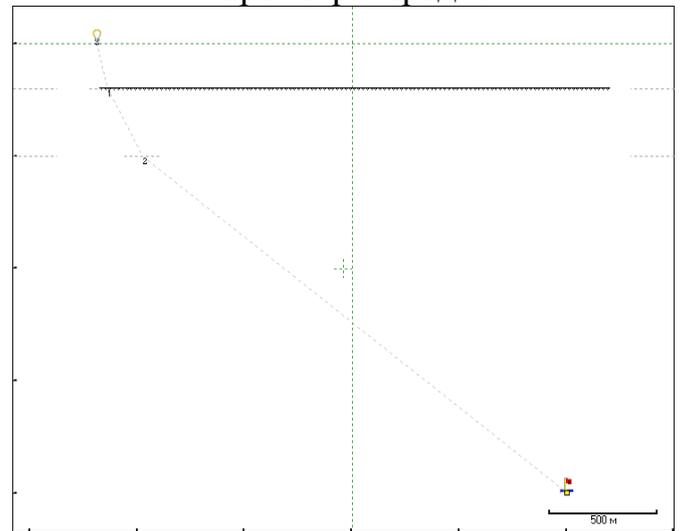


Рис. 1.9.

Траектория распространения сигнала

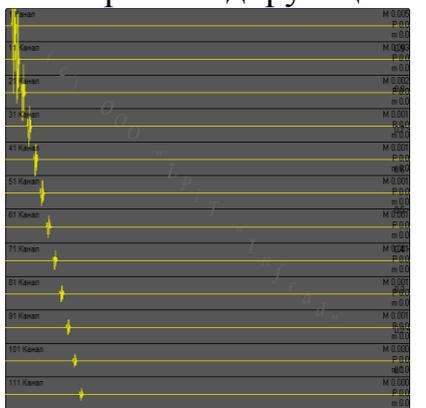


Рис. 1.10  
Прямой сигнал.

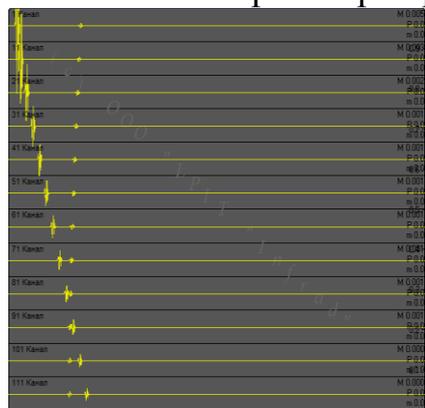


Рис. 1.11.  
Прямой и отраженный  
сигнал.

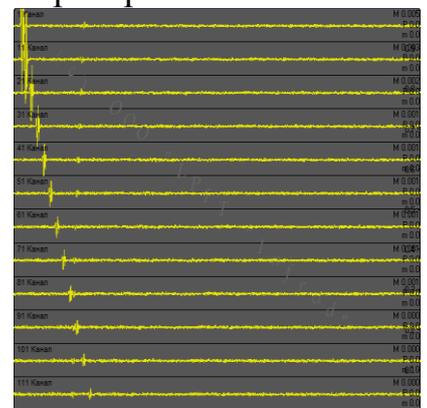


Рис. 1.12.  
Прямой, отраженный и  
шумовой сигнал.

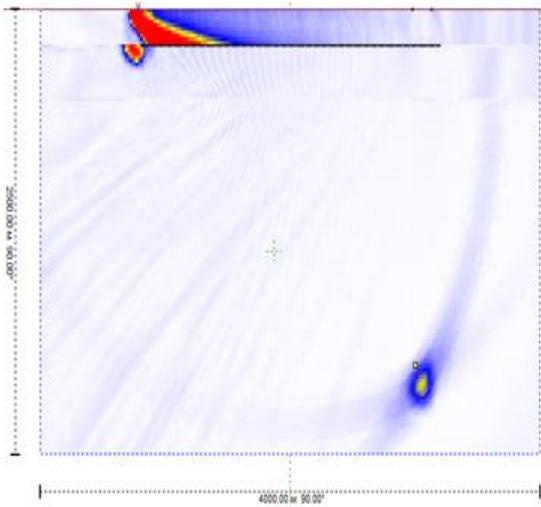


Рис. 1.13.  
Вертикальный разрез при  
использовании одной точки излучения

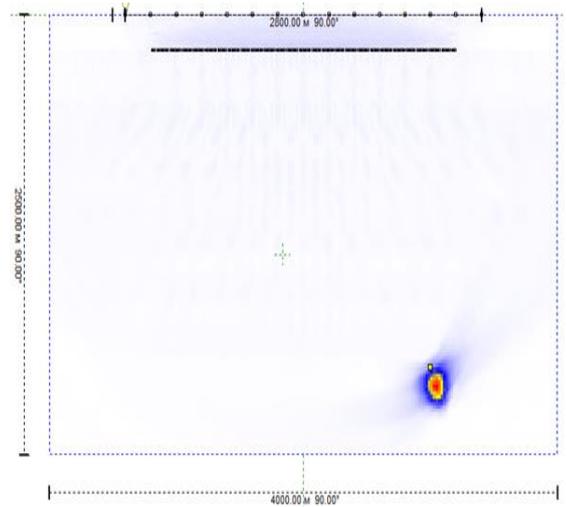


Рис. 1.14  
Вертикальный разрез при  
использовании синтезированной  
апертуры излучения.

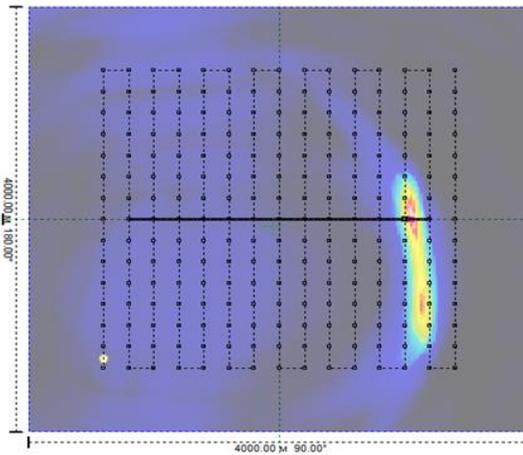


Рис. 1.15.  
Горизонтальный разрез при  
использовании одной точки  
излучения.

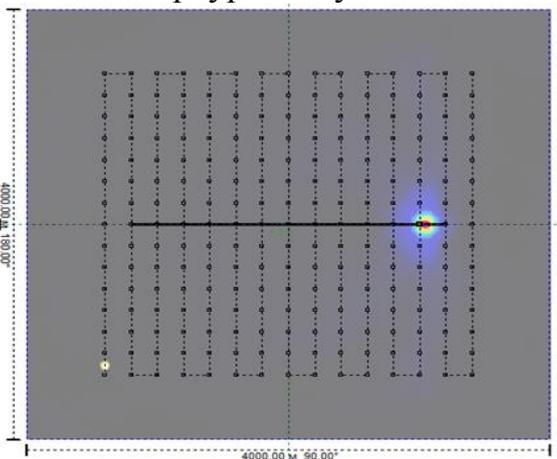


Рис. 1.16.  
Горизонтальный разрез при  
использовании синтезированной  
апертуры излучения.

### Выводы по Главе 1

1. Результатами математического моделирования показана реализуемость и эффективность защищаемого способа морской сейсморазведки, основанного на пространственной фильтрации первичных и вторичных сейсмоакустических полей с использованием стационарных пространственно-развитых донных приемных сейсмоакустических антенн и излучающих гидроакустических антенн с синтезируемой апертурой.

2. Разрешающая способность пространственно-развитой апертуры определяется ее пространственным масштабом, однако, размеры апертуры не должны выходить за границы интервалов пространственной корреляции анализируемых информационных сигналов.

3. По совокупности таких характеристик как коэффициент концентрации, помехоустойчивость и удобство установки наиболее предпочтительной формой апертуры приемной антенны является конфигурация типа «Звезда».

4. Применительно к реализации методов сейсмолокации в морских условиях необходима разработка эффективной технологии оценки координат приемных элементов стационарной донной приемной антенны и координат излучателя в процессе синтезирования апертуры.

5. Программный комплекс должен обеспечивать возможность приема и регистрации многоканальной информации, а так же её обработки во временной, спектральной и пространственной области.

## Глава 2. Позиционирование приемно-излучающих систем<sup>2</sup>

Возможность осуществления пространственной фильтрации сейсмоакустических сигналов стационарной пространственно-развитой донной приемной системой при реализации, как пассивных (СЛОЭ), так и активных (СЛБО) методов сейсмолокации, может быть обеспечена при условии предварительной оценки ее конфигурации.

Определение конфигурации антенной решетки сводится к оценке координат ее приемных элементов или их позиционированию в пространстве.

Для оценки местоположения гидроакустического приемника (излучателя) в некоторой системе координат существует несколько гидроакустических методов позиционирования, а именно: с длинной, короткой и ультракороткой базой [75].

Учитывая особенности рассматриваемой задачи, не имеет смысла останавливаться на исследовании возможностей применения методов с короткой и ультракороткой базой, поэтому все дальнейшие исследования касаются применения только методов позиционирования с длинной базой.

Принципиально позиционирование, т.е. оценка координат, приемника и излучателя ничем не отличается. Единственное отличие состоит в использовании соответствующих технических средств. При позиционировании стационарных приемников или излучателей в качестве вспомогательных средств могут использоваться излучатель или

<sup>2</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Колигаев С.О.**, Колигаев О.А. Некоторые особенности позиционирования объектов в гидроакустических и сейсмоакустических информационных системах. // Геоинформатика. - 2010. - №4. – С. 23-27
2. **Колигаев С.О.**, «Способ обнаружения и определения текущего местоположения нарушителя охраняемой зоны». Патент РФ № 2311686. 2007.
3. Колигаев О.А., **Колигаев С.О.** О расстановке датчиков в системе позиционирования. Статья депонирована ФГУП ВИМИ – Федерального информационно-аналитического центра оборонной промышленности. Сборник рефератов НИОКР. №1. Серия ИМ. 2007.
4. **Колигаев С.О.** О применении принципов позиционирования объектов в сейсмоакустических информационных системах охранной сигнализации. Сборник трудов кафедры общей и прикладной геофизики Международного университета «Дубна». М. РАЕН. 2007. С.85-91.

соответственно приемник, перемещаемый в пространстве, либо пространственно-развитая система стационарных излучателей или соответственно приемников с известными координатами.

Указанная очевидная «симметрия» задачи позиционирования излучателя (приемника) обеспечивает возможность рассмотреть возможные методы решения этой задачи применительно, например, к оценке конфигурации приемной системы, предполагая, что для оценки положения излучателя могут быть использованы те же методы.

При позиционировании же излучателя (приемника), находящегося в движении, в качестве вспомогательных средств может использоваться только пространственно-развитая система стационарных приемников (излучателей) с известными координатами (если не рассматривать использование инерциальной системы позиционирования).

Применительно к поставленной общей задаче обеспечения позиционирования приемных элементов стационарной донной сейсмоакустической антенны и позиционирования источника излучения в процессе синтезирования апертуры возникает необходимость рассматривать три частных задачи:

1. оценки координат одного из приемных элементов стационарной донной антенны, выбираемого в качестве опорного, в общей (глобальной) системе координат;
2. оценки координат остальных приемных элементов стационарной донной антенны в частной (локальной) системе координат привязанной к опорному приемному элементу;
3. оценки координат источника излучения в процессе синтезирования апертуры в этой же системе координат.

Задачу 1 можно определить как задачу абсолютного позиционирования приемника, т.е. оценки абсолютных координат одного приемника для привязки новой системы координат (абсолютное позиционирование стационарных приемных антенн).

Задачу 2 можно определить как задачу относительного позиционирования приемников, т.е. оценки координат остальных приемников относительно опорного в новой системе координат (относительное позиционирование элементов стационарных приемных антенн).

Задачу 3 можно определить как задачу позиционирования излучателя, т.е. оценки текущих координат излучателя в новой системе координат в процессе синтезирования излучающей апертуры (динамическое позиционирование излучателя).

Хотя географические координаты хорошо подходят для определения абсолютного местоположения объектов, они не годятся для определения относительного их расположения, а также для определения вторичных пространственных характеристик, таких как длина, площадь и т.д., так как географические широта и долгота не являются однозначными единицами измерения. Градус широты равен градусу долготы в метрическом измерении только на экваторе. Для преодоления этих трудностей, данные глобальных спутниковых навигационных систем типа GPS или Глонас, либо радионавигационных систем типа «Марс», переводят из сферических географических координат в прямоугольные спроецированные координаты с использованием преобразования поверхности эллипсоида (эллипсоида Красовского [76 с.8]), описывающего форму Земли в целом, в плоскую прямоугольную проекцию (Гаусса-Крюгера) [76 с. 213-283].

Таким образом, основная задача абсолютного позиционирования привязать координату любого приемника стационарной донной системы к координатам источников излучения, спроецированным из поверхности эллипсоида Красовского, в плоскую прямоугольную проекцию Гаусса-Крюгера.

Применение этой проекции даёт возможность практически без существенных искажений изобразить довольно значительные участки земной (водной) поверхности и, что особенно важно, построить на этой поверхности

систему плоских прямоугольных координат. Эта система преобразования координат является наиболее простой и удобной при проведении инженерных и топографо-геодезических работ [24, 29, 83].

Таким образом, в качестве системы координат при позиционировании целесообразно использовать прямоугольную систему координат, привязанную к любой точке пространства, настолько близкую к району работ, чтобы не было необходимости в дальнейших расчетах дополнительно учитывать кривизну поверхности земли. В качестве центра координат лучше выбрать центральный приемный элемент антенны, устремив Y-координатную ось в направлении на Север, а X-координатную ось на восток.

Тогда все дальнейшие координатные расчеты могут быть привязаны к этой обычной и удобной прямоугольной системе координат.

Как первая, так и вторая задача, а именно, оценка относительных координат приемных элементов пространственно-развитой донной приемной системы (оценка конфигурации приемной системы) решаются методами позиционирования с длинной базой с той лишь особенностью, что используется только один источник излучения, который последовательно перемещается в наперед заданные реперные точки.

Решение третьей задачи формально можно было бы переложить на радионавигационные системы наземного базирования («Чайка», «Марс-75», «Loran-C») или спутниковые радионавигационные системы типа (GPS, Глонасс), которые могут использоваться для оценки координат излучателя при решении первой и второй задач, а именно при определении абсолютных и относительных координат элементов стационарной приемной системы.

Однако использование радионавигационных систем в задаче динамического позиционирования излучателя в процессе синтезирования апертуры весьма ограничено.

Во-первых, радионавигационные системы наземного базирования являются региональными системами и могут вообще отсутствовать в районе

проведения работ, а во-вторых, они обладают очень низкими для этой задачи точностными характеристиками (десятки и даже сотни метров).

Спутниковые же радионавигационные системы обладают высокими точностными характеристиками только в дифференциальном режиме работы и для динамического позиционирования источника излучения с целью создания синтезированной апертуры совершенно непригодны в силу периодически возникающей ситуацией отсутствия в поле зрения необходимого количества спутников, хотя и называются глобальными. Особенно это свойственно районам дальнего Севера, наиболее перспективным с точки зрения наличия углеводородного сырья (в частности, району Штокмановского газоконденсатного месторождения).

Другим существенным недостатком использования радионавигационных систем, в том числе спутниковых, для позиционирования излучателя непосредственно в процессе сейсмолокации является необходимость его перемещения вблизи поверхности моря, что исключает принципиальную возможность приближения ко дну моря для повышения эффективности использования возбуждаемых сейсмических волн.

Совершенно очевидным путем решения проблемы оценки текущих координат излучателя как подводного объекта является опять же использование гидроакустической системы позиционирования и сам собой напрашивается выход в виде решения обратной по отношению к позиционированию приемной выносной части задачи. Поскольку излучатель в процессе синтезирования апертуры для СЛБО постоянно находится в непосредственном акустическом контакте с приемной выносной частью, появляется возможность использования для задачи динамического позиционирования излучателя его собственных гидроакустических сигналов, которые являются помехой для сейсмолокатора, и этой же приемной выносной части.

## 2.1. Методы позиционирования стационарной приемной системы

### 2.1.1. Оценка абсолютных координат

В качестве метода решения задачи позиционирования одного приемника (и даже всех приемников) стационарной выносной приемной части используется дальномерный метод [75], суть которого заключается в оценке расстояний до приемного элемента от нескольких реперных точек, куда помещается источник излучения судном-носителем, и решению системы уравнений вида

$$(x-x_m)^2+(y-y_m)^2+(z-z_m)^2=R_m^2=(c \cdot t_m)^2, \quad (2.1)$$

где

$x_m, y_m, z_m$  - координаты излучателя в  $m$ -той реперной точке в декартовой системе координат, привязанной к району функционирования антенны (географические координаты переведены в прямоугольные);

$x, y, z$  - координаты приемного элемента в той же системе координат;

$c$  - скорость распространения гидроакустического сигнала;

$t_m$  - время распространения сигнала от  $m$ -той реперной точки до приемного элемента.

Преобразуем уравнение (2.1) к виду

$$x^2 - 2xx_m + y^2 - 2yy_m + z^2 - 2zz_m = b_m, \quad (2.2)$$

где

$$b_m = R_m^2 - x_m^2 - y_m^2 - z_m^2 \quad (2.3)$$

Выражения 2.1 и 2.2 описывают уравнения сфер с центрами в местах расположения реперных точек и определяют суть дальномерного метода позиционирования. Область пересечения, по крайней мере, трех сфер определяет местоположение искомой точки расположения приемного элемента, найденная геометрически либо путем решения системы этих уравнений, количество которых определяется количеством реперных точек и должно быть не менее трех.

Уравнения (2.2) принципиально являются нелинейными, поэтому для решения система таких уравнений могут использовать только итерационные методы, в частности, метод Ньютона [95]. В качестве первого приближения для решения системы могут быть заложены географические координаты судна постановщика на момент укладки антенны на дно, предварительно переведенные в указанную выше прямоугольную систему координат, в которой будут определены и координаты реперных точек.

### **2.1.2. Оценка относительных координат**

Принципиально задачу оценки конфигурации донных антенн или оценки относительных координат приемных элементов можно решать путем оценки абсолютных координат каждого приемного элемента с использованием дальномерного метода позиционирования, изложенного выше.

Однако в дальномерном методе в качестве измеряемых величин (помимо значений координат источников излучения) используются времена распространения акустического сигнала от каждого источника излучения до каждого приемного элемента антенны. Эта процедура подразумевает наличие четкой синхронизации работы системы излучения и приема [21,86], например обеспечение возможности передачи по радиоканалу синхросигнала разрешения излучения либо обеспечение функционирования приемной и излучающей частей в системе единого времени.

Использование синхронизации работы приемной и излучающей подсистем, удобна из-за отсутствия необходимости оценки времени начала излучения, но требует наличия устойчиво работающего радиоканала, что не всегда обеспечивается условиями распространения радиосигнала, особенно в северных широтах.

Поэтому, используется система единого времени с оценкой момента излучения непосредственно на судне носителе излучателя.

Момент излучения сигнала ввиду большой его энергетики и малой длительности может быть оценен с относительно высокой точностью, а вот

время регистрации сигнала на приемном элементе определяется с существенной погрешностью. Причем эта погрешность практически не зависит от используемого способа оценки момента прихода сигнала, например, по переднему фронту, центру масс и др. [25-27]. Вызвано это значительно меньшей энергетикой сигнала за счет потерь при распространении и, что самое важное, значительным расширением сигнала по временной оси за счет дисперсии в процессе распространения. Погрешность оценок расстояний источник-приемник увеличиваются с увеличением расстояния от антенны до реперной точки излучения, что приводит соответственно к повышению погрешности оценок и относительных координат приемных элементов в антенне.

Поэтому, для повышения точности оценки относительных координат приемных элементов (определения конфигурации антенны) целесообразно уйти от пороговых процедур оценок абсолютных времен распространения акустических сигналов и перейти к экстремальным процедурам оценок относительных времен распространения акустических сигналов, получаемых с использованием потенциально более точных корреляционных методов.

Достичь этого возможно при измерении вместо расстояний излучатель-приемник разностей расстояний между излучателем и парой приемников или (при больших дальностях) проекций межэлементных расстояний на направление на источник излучения, что является собственно сутью разностно-дальномерного метода позиционирования. Действительно, задача оценки относительных координат приемных элементов может решаться с использованием разностно-дальномерного метода. При этом, опорным приемным элементом, относительно которого будут определяться координаты остальных приемных элементов, может быть выбран средний элемент антенны, для которого было произведено абсолютное пространственное позиционирование.

В отличие от дальномерного метода позиционирования при реализации разностно-дальномерного метода появляется возможность линеаризации

системы уравнений и дальнейшего применения алгебраических методов решения систем линейных уравнений [94 с. 43-74, 18 с.53-69].

При этом, как было сказано ранее, необходимо найти такой способ формирования системы уравнений, который минимизирует влияние на результат погрешности измеряемых параметров (в том числе и навигационных).

Пусть координаты  $n$ -той точки возбуждения (источника сигнала)  $(x_n, y_n, z_n)$ , а координаты приемников  $(x_i, y_i, z_i)$ , тогда расстояние от  $n$ -го источника до  $i$ -го приемника ( $i=1, I$  и  $n=1, N$ )

$$R_{in} = C_o \tau_{in} = \sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2 + (z_i - z_n)^2} \quad (2.4)$$

Выберем в качестве опорного элемента один из приемников с координатами  $(x_o, y_o, z_o)$ .

$$R_{on}^2 = (C_o \tau_{on})^2 = x_o^2 - 2x_o x_n + x_n^2 + y_o^2 - 2y_o y_n + y_n^2 + z_o^2 - 2z_o z_n + z_n^2 \quad (2.5)$$

$$R_{in}^2 = (C_o \tau_{in})^2 = x_i^2 - 2x_i x_n + x_n^2 + y_i^2 - 2y_i y_n + y_n^2 + z_i^2 - 2z_i z_n + z_n^2 \quad (2.6)$$

Разность квадратов расстояний от источника до опорного и  $i$ -го приемников

$$\begin{aligned} \Delta R_{ion}^2 &= R_{in}^2 - R_{on}^2 = C^2(\tau_{in}^2 - \tau_{on}^2) = x_i^2 - x_o^2 - 2(x_i - x_o)x_n + y_i^2 - y_o^2 - 2(y_i - y_o)y_n + z_i^2 - z_o^2 - \\ &- 2(z_i - z_o)z_n = C_o^2(\tau_{in} - \tau_{on})(\tau_{in} + \tau_{on}) = C_o^2 \Delta \tau_{ion} (\tau_{on} + \Delta \tau_{ion} + \tau_{on}) = \\ &= C_o^2 \Delta \tau_{ion} (2\tau_{on} + \Delta \tau_{ion}) = C_o^2 (2\tau_{on} \Delta \tau_{ion} + \Delta \tau_{ion}^2) \end{aligned} \quad (2.7)$$

где  $\Delta \tau_{ion}$  – измеряемая величина разностей времен прихода сигнала из  $n$ -той точки излучения на  $i$ -тый и опорный (0-ой) каналы;

$\tau_{on}$  – измеренное при оценке абсолютных координат время распространения сигнала из  $n$ -той точки излучения до опорного приемника.

Представим систему уравнений в виде

$$\begin{aligned} &2(x_i - x_o)x_n + 2(y_i - y_o)y_n + 2(z_i - z_o)z_n = \\ &= x_i^2 - x_o^2 + y_i^2 - y_o^2 + z_i^2 - z_o^2 - C_o^2 \Delta \tau_{ion} (2\tau_{on} + \Delta \tau_{ion}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Учитывая, что координаты приемных элементов ищутся в относительной системе координат (относительно опорного приемного элемента, для которого определена абсолютная координата), то и привязать всю систему необходимо к опорному элементу, обнулив его координаты в новой системе координат.

Тогда при  $(x,y,z)=(0,0,0)$  система из  $N$  линейных уравнений для оценки координат приемных элементов в стационарной антенне принимает вид

$$2x_i x_n + 2y_i y_n + 2z_i z_n = x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 - C_o^2 \Delta \tau_{ion} (2\tau_{on} + \Delta \tau_{ion}) \quad (2.9)$$

где определяются координаты  $(x_i, y_i, z_i)$  приемных элементов по известным координатам  $N$  точек излучения  $(x_n, y_n, z_n)$ ,  $n=1, N$ .

Отличительной особенностью данной системы является то, что она является системой линейных уравнений, имеющей однозначное решение.

При этом при ее формировании отсутствует необходимость оценки времени распространения сигнала от источника излучения до каждого приемника антенны.

Теперь рассмотрим решение обратной задачи, а именно, по известным координатам приемников пространственно-распределенной приемной части оценить местоположение источника излучения (в этой же относительной системе координат).

Пусть координата источника  $(x_u, y_u, z_u)$ , а координаты приемников  $(x_i, y_i, z_i)$ , тогда расстояние от источника до  $i$ -го приемника

$$R_i = C_o \tau_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} \quad (2.10)$$

Опять выберем в качестве опорного один из приемников с координатами  $(x_o, y_o, z_o)$

$$R_o^2 = (C_o \tau_o)^2 = x_o^2 - 2x_o x_u + x_u^2 + y_o^2 - 2y_o y_u + y_u^2 + z_o^2 - 2z_o z_u + z_u^2 \quad (2.11)$$

$$R_i^2 = (C_o \tau_i)^2 = x_i^2 - 2x_i x_u + x_u^2 + y_i^2 - 2y_i y_u + y_u^2 + z_i^2 - 2z_i z_u + z_u^2$$

Разность квадратов расстояний от источника до опорного и  $i$ -го приемников:

$$\begin{aligned}
R_i^2 - R_o^2 &= C^2(\tau_i^2 - \tau_o^2) = x_i^2 - x_o^2 - 2(x_i - x_o)x_u + y_i^2 - y_o^2 - 2(y_i - y_o)y_u + z_i^2 - z_o^2 - \\
&- 2(z_i - z_o)z_u = C_o^2(\tau_i - \tau_o)(\tau_i + \tau_o) = C_o^2\Delta\tau_{io}(\tau_o + \Delta\tau_{io} + \tau_o) = \\
&= C_o^2\Delta\tau_{io}(2\tau_o + \Delta\tau_{io}) = C_o^2(2\tau_o\Delta\tau_{io} + \Delta\tau_{io}^2)
\end{aligned} \tag{2.12}$$

где  $c_0$  – скорость распространения гидроакустического сигнала;

$\Delta\tau_{io}$  – измеряемая величина разностей времен прихода сигнала;

$\tau_o$  – время распространения сигнала до опорного приемника (дополнительная неизвестная).

Представим систему уравнений в нормальном виде для искомым неизвестных  $x_u, y_u, z_u, \tau_o$

$$\begin{aligned}
2(x_i - x_o)x_u + 2(y_i - y_o)y_u + 2(z_i - z_o)z_u + 2C_o^2\Delta\tau_{io}\tau_o &= \\
= x_i^2 - x_o^2 + y_i^2 - y_o^2 + z_i^2 - z_o^2 - C_o^2\Delta\tau_{io}^2
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Т.о. система уравнений представляется в виде:

$$AX = F \tag{2.14}$$

или

$$a_i x + b_i y + c_i z + d_i \tau_o = f; \tag{2.15}$$

где

$$\begin{aligned}
a_i &= 2(x_i - x_o); \\
b_i &= 2(y_i - y_o); \\
c_i &= 2(z_i - z_o); \\
d_i &= 2c_o^2\Delta\tau_{io} \\
f_i &= x_i^2 - x_o^2 + y_i^2 - y_o^2 + z_i^2 - z_o^2 - c_o^2\Delta\tau_{io}^2
\end{aligned} \tag{2.16}$$

В данном случае рассмотрен общий случай применения разностно-дальномерного метода. В конкретном же частном случае применения этого метода для оценки текущего местоположения излучателя в процессе его буксировки при синтезировании излучающей апертуры время распространения от излучателя до опорного приемника может быть измерено, как было сказано выше, путем организации синхронизации излучения-приема или организации работы средств излучения и приема в системе единого времени. Тогда  $\tau_o$  уходит из состава неизвестных и система упрощается.

## 2.2. Методы решения систем уравнений

### 2.2.1. Метод Ньютона решения систем нелинейных уравнений

Для решения систем нелинейных уравнений используются итерационные методы, в частности, метод Ньютона [95].

Рассмотрим систему нелинейных уравнений (2.2) в векторной форме

$$F(x) = 0, \quad (2.17)$$

для решения которой используем метод последовательных приближений

$$f(x^{(k)}) + D x^{(k)} = 0. \quad (2.18)$$

Предполагая, что функция  $f(x)$  непрерывно дифференцируема в некоторой выпуклой области, содержащей  $x$  и  $x^{(k)}$ , разложим левую часть уравнения (2.18) по степеням малого вектора  $D x^{(k)}$ , ограничиваясь линейными членами,

$$f(x^{(k)}) + D x^{(k)} = f(x^{(k)}) + f'(x^{(k)}) D x^{(k)} = 0. \quad (2.19)$$

Под производной  $f'(x)$  понимается матрица Якоби системы функций  $f_1, f_2, \dots, f_n$  относительно переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , т. е.  $f'(x) = W(x)$ .

Поэтому формула (2.19) может быть записана в следующем виде:

$$f(x^{(k)}) + W(x^{(k)}) D x^{(k)} = 0, \quad (2.20)$$

с вектором поправок, определяемым следующим образом

$$D x^{(k)} = -W^{-1}(x^{(k)}) f(x^{(k)}). \quad (2.21)$$

Решение системы нелинейных уравнений (2.17) состоит в построении итерационной последовательности:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - W^{-1}(x^{(k)}) f(x^{(k)}) \quad (2.22)$$

( $k = 0, 1, 2, \dots$ ),

а процесс расчета новых значений  $x_i$  повторяется до тех пор, пока поправки не становятся пренебрежимо малыми.

### 2.2.2. Метод наименьших квадратов решения систем линейных уравнений

Применяя метод наименьших квадратов [94 с. 210-233] к системе

уравнений (2.9)

$$\begin{aligned}
 V &= \sum_i (f_i - a_i x - b_i y - c_i z - d_i \tau_o)^2 = \\
 &= \sum (f_i^2 + a_i^2 x^2 + b_i^2 y^2 + c_i^2 z^2 + d_i^2 \tau_o^2 - 2f_i a_i x - 2f_i b_i y - 2f_i c_i z - 2f_i d_i \tau_o + \\
 &+ 2a_i b_i xy + 2a_i c_i xz + 2a_i d_i x \tau_o + 2b_i c_i yz + 2b_i d_i y \tau_o + 2c_i d_i z \tau_o);
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

$$\frac{\partial V}{\partial X} = (\sum 2a_i^2)x - \sum 2f_i a_i + (\sum 2a_i b_i)y + (\sum 2a_i c_i)z + (\sum 2a_i d_i)\tau_o \tag{2.27}$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = (\sum 2b_i^2)y - \sum 2b_i f_i + (\sum 2a_i b_i)x + (\sum 2b_i c_i)z + (\sum 2b_i d_i)\tau_o$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} = (\sum 2c_i^2)z - \sum 2c_i f_i + (\sum 2a_i c_i)x + (\sum 2b_i c_i)y + (\sum 2c_i d_i)\tau_o \tag{2.28}$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau_o} = (\sum 2d_i^2)\tau_o - \sum 2d_i f_i + (\sum 2a_i d_i)x + (\sum 2b_i d_i)y + (\sum 2c_i d_i)z$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = 0; \frac{\partial V}{\partial y} = 0; \frac{\partial V}{\partial z} = 0; \frac{\partial V}{\partial \tau} = 0,$$

получаем окончательно систему линейных уравнений

$$\begin{aligned}
 (\sum a_i^2)x + (\sum a_i b_i)y + (\sum a_i c_i)z + (\sum a_i d_i)\tau_o &= \sum a_i f_i \\
 (\sum a_i b_i)x + (\sum b_i^2)y + (\sum b_i c_i)z + (\sum b_i d_i)\tau_o &= \sum b_i f_i \\
 (\sum a_i c_i)x + (\sum b_i c_i)y + (\sum c_i^2)z + (\sum d_i c_i)\tau_o &= \sum c_i f_i \\
 (\sum a_i d_i)x + (\sum b_i d_i)y + (\sum c_i d_i)z + (\sum d_i^2)\tau_o &= \sum d_i f_i
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Число уравнений соответствует количеству неизвестных, а количество реперных точек должно превышать количество неизвестных.

Данный подход к решению задачи позиционирования методом наименьших квадратов оптимален с точки зрения минимизации вычислительных затрат и требований к вычислительным средствам.

### 2.2.3. Алгебраический метод решения систем линейных уравнений

В матричном виде постановка задачи оценки относительных координат для линеаризованной системы уравнений (2.9) представляется следующим образом:

$$\mathbf{Ax}=\mathbf{b} \tag{2.30}$$

Для того чтобы это уравнение решать классическими методами линейной алгебры [18 с. 53-69], обычно стремятся к тому, чтобы матрица  $\mathbf{A}$  была квадратной. Если определитель матрицы  $\det \mathbf{A}$  не равен нулю (т.е. матрица невырожденная), то уравнение (2. 30) имеет единственное решение

$$\mathbf{x}=\mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}, \quad (2.31)$$

где  $\mathbf{A}^{-1}$  - обратная матрица, такая, что  $\mathbf{A}^{-1}\mathbf{A}=\mathbf{I}$  ( $\mathbf{I}$ -единичная матрица).

Таким образом, для решения системы линейных уравнений при  $N=I$  достаточно найти обратную матрицу системы.

Хотя для вычисления обратной матрицы и для непосредственного решения системы уравнений используются одни и те же вычислительные схемы, в конкретных задачах можно получить определенные преимущества в необходимом объёме памяти и скорости счета при правильном выборе способа решения.

Алгебраические методы можно разделить на прямые и итерационные. Важнейшим из прямых методов решения системы линейных алгебраических уравнений является метод исключения Гаусса.

В обычном способе решения системы линейных уравнений  $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$  осуществляется вычисление обратной матрицы  $\mathbf{A}^{-1}$  и умножение  $\mathbf{A}^{-1}$  на  $\mathbf{b}$ .

Этот способ оказывается особенно выгодным, если задано несколько правых частей  $\mathbf{b}$ , так как обратную матрицу необходимо вычислять только один раз.

Одной из основных проблем, возникающих в процессе решения задач, связанных с решением систем линейных уравнений, является проблема устойчивости решения, которая выражается в исключительно сильной зависимости решения от вариаций  $\mathbf{b}$ , а также от ошибок задания коэффициентов системы и ошибок вычислений.

Неустойчивость решения связано с плохой обусловленностью системы: малые изменения входных данных могут вызвать как угодно большие (по норме) изменения решения [92].

Связь между относительными ошибками в решении и в  $\mathbf{b}$  определяется величиной  $\|\mathbf{A}\| \cdot \|\mathbf{A}^{-1}\|$ , которая называется числом обусловленности и обозначается  $\text{cond}\mathbf{A}$ .

$$\text{cond}\mathbf{A} = \|\mathbf{A}\| \cdot \|\mathbf{A}^{-1}\| = m_1/m_N \quad (2.32)$$

Сингулярными числами  $m_i$  ( $i=1, N$ ) называются неотрицательные корни квадратные из собственных значений симметричной матрицы  $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$ . Для невырожденных матриц  $\mathbf{A}$  порядка  $N$  справедливо неравенство  $m_1 > m_2 > m_N > 0$ . Здесь учитывается прямая связь между нормами матриц  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{A}^{-1}$  и экстремальными значениями сингулярных чисел:

$$\|\mathbf{A}\| = m_1; \quad \|\mathbf{A}^{-1}\| = m_N^{-1}. \quad (2.33)$$

Таким образом, число обусловленности ограничивает сверху отношение относительной ошибки в  $\mathbf{x}$  к относительной ошибке в  $\mathbf{b}$  и это отношение не может быть меньше 1.

В целом число обусловленности  $\text{cond}\mathbf{A}$  является эффективной мерой того, насколько матрица  $\mathbf{A}$  хороша по отношению к вычислениям, осуществляемым в процессе решения уравнения. Даже если вектор  $\mathbf{b}$  известен точно, но коэффициенты  $a_{mn}$  матрицы  $\mathbf{A}$  заданы с ошибкой, то и в этом случае величина  $\text{cond}\mathbf{A}$  позволяет получить оценку сверху в неопределенности решения согласно следующему выражению

$$\|\Delta\mathbf{x}\|/\|\mathbf{x}+\Delta\mathbf{x}\| > \text{cond}\mathbf{A} \|\Delta\mathbf{A}\|/\|\mathbf{A}\|. \quad (2.34)$$

Величина  $\text{cond}\mathbf{A}$  и, следовательно, степень неустойчивости решения зависит от отношения наибольшего и наименьшего сингулярных чисел  $m_1/m_N$  или, аналогично, от отношения наибольшего и наименьшего собственных значений  $\lambda_{\max}/\lambda_{\min}$  матрицы  $\mathbf{A}$ .

Следует отметить, что свойства матрицы  $\mathbf{A}$  определяются конфигурацией собственно системы позиционирования, т.е. геометрией размещения приемных элементов (приемно-излучателей) на обслуживаемой системой позиционирования территории или акватории. В связи с этим

весьма важным является вопрос выбора этой конфигурации применительно к любому из приложений задачи позиционирования.

### 2.3. Точностные характеристики позиционирования

Погрешность оценки абсолютных и относительных координат приемных элементов в антенне определяется конфигурацией реперных точек, точностью измерения координат реперных точек, точностью измерения временных задержек и скорости распространения гидроакустического сигнала.

Если излучатель опускается с судна-носителя в заданной реперной точке или даже буксируется у поверхности моря буем, находящемся на поверхности и оснащенным приемником GPS, то позиционирование судна или буя и соответственно излучателя может осуществляться с использованием дифференциальной системы позиционирования (если она функционирует в районе работ). Дифференциальная система позиционирования обеспечивает возможность оценки местоположения приемника GPS с дециметровой и даже сантиметровой точностью по всем координатам [29, 83].

Например, дифференциальная система SkyFix XP или OmniSTAR обеспечивает дециметровую точность определения координат  $\sigma_0$  порядка 10 см в плане и 15 см по высоте.

При использовании дальномерного метода точность оценки расстояния излучатель-приемник имеет вид:

$$\sigma^2 R = C_0^2 \cdot \sigma^2 \tau + \left(\frac{R_0}{C_0}\right)^2 \cdot \sigma^2 C + \sigma_0^2, \quad (2.35)$$

где  $C_0$  и  $R_0$  – истинные значения скорости распространения и расстояния;

$\delta^2 \tau = 1/(q^2 \cdot P_{эф}^2)$  – дисперсия оценки временной задержки;

$q$  – отношение сигнал/шум;

$P_{эф}$  – эффективная полоса частот рабочего сигнала.

Для оценки точности измерений воспользуемся характеристиками импульсного излучателя пневматического типа "Пульс-2" [28]. Данный источник обеспечивает излучение импульсного сигнала в полосе 25-50 Гц с амплитудой волны давления на расстоянии 1м  $P_a=300$  кПа.

Амплитуда прямого сигнала в точке приема

$$P_c = \frac{P_a}{R} \cdot 10^{-0.05 \cdot \beta \cdot R} \quad (2.36)$$

Амплитуда шумового сигнала в точке приема

$$P = N_0 \cdot \sqrt{\Delta f} \quad (2.37)$$

$N_0$ - спектральная плотность шума.

Определим отношение сигнал/шум в точке приема

$$q = \frac{P_c}{P_w} = \frac{P_a}{N_0 \cdot R \cdot \sqrt{\Delta f}} \cdot 10^{-0.05 \cdot \beta \cdot R} \quad (2.38)$$

Спектральная плотность шума в мелком море [89] в нижнем звуковом частотном диапазоне находится в пределах (0.003-0.006) Па/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , а коэффициент километрического затухания  $\beta=(0.02-0.03)$ дБ/км.

Определим отношение сигнал/шум на приемном элементе антенны, находящемся на расстоянии  $R=10$ км от источника излучения, в эффективной полосе сигнала  $\Delta f=25$ Гц при спектральной плотности шумов  $N_0 = 0.006$  Па/ $\sqrt{\text{Гц}}$  и коэффициенте километрического затухания  $\beta=0.03$ дБ/км.

$$q = \frac{3 \cdot 10^5}{(10^4 \cdot 0.006 \cdot 5)} \cdot 10^{-0.05 \cdot 0.03 \cdot 10} = 10^3 \quad (2.39)$$

Тогда потенциальная точность оценки времени запаздывания составит

$$\delta\tau = \frac{1}{(q \cdot \Pi)} = \frac{1}{(10^3 \cdot 25)} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ (с)}. \quad (2.40)$$

Учитывая полученное значение потенциальной точности оценки времени распространения сигнала пневмоисточника, можно с уверенностью ориентироваться на реальную погрешность оценки временных интервалов в диапазоне величин  $10^{-3} - 10^{-4}$  с.

Погрешность оценки скорости распространения звука современными измерительными средствами составляет величину сотых долей процента.

Например измеритель профиля скорости звука в воде Valeport MiniSVP обеспечивает диапазон измерений скорости звука: 1375 — 1900 м/с с дискретностью измерений 0,001 м/с при точности измерений: +/- 0,02 м/с.

Однако эти потенциальные точности соответствуют оценкам локальной скорости звука на высокой (единицы МГц) частоте и в безграничном пространстве.

Для низкочастотного же диапазона и мелководных условий с волноводным, дисперсионным характером распространения гидроакустических сигналов оценка скорости их распространения представляет собой отдельную довольно сложную задачу.

Поэтому, определим погрешность оценки расстояний от точки излучения до приемных элементов при использовании реалистичных значений погрешности оценки скорости звука  $\sigma_c=0.5$  м/с и оценки времен распространения  $\sigma_\tau=10^{-3}$  с.

Дисперсия оценки этих расстояний составит величину

$$\delta^2 \Delta l = C_0^2 \cdot \delta^2 \tau + \left( \frac{R}{C_0} \right)^2 \cdot \delta^2 C = 1500^2 \cdot (10^{-3})^2 + \left( \frac{10000}{1500} \right)^2 \cdot 0.5^2 \approx 13 \text{ (м}^2\text{)}. \quad (2.41)$$

Такая точность более чем достаточна для оценки абсолютных координат антенны в пространстве. Однако для оценки конфигурации антенны или относительных координат приемных элементов в антенне для обеспечения возможности синфазной обработки сигналов в процессе пространственной фильтрации такой точности явно недостаточно. В этом случае требуется на порядок более высокая точность.

Анализ выражения (2.35) показывает, что основной вклад в дисперсию оценки вносит расстояние излучатель-приемник, на котором, собственно измеряется задержка сигнала.

Именно поэтому для оценки относительных координат приемных элементов в антенне необходимо применять разностно-дальномерный метод

позиционирования, использующий при своей реализации не оценки времен распространения гидроакустических сигналов от точки излучения до каждого приемного элемента антенны, а оценки относительных задержек этого сигнала на соответствующих приемных элементах, точность измерения которых существенно выше.

Поэтому предполагая использование корреляционного метода оценки временных интервалов можно уверенно ориентироваться на точность измерения относительных задержек  $\sigma_\tau = 10^{-4}$  с. При этом дисперсия оценки проекции межэлементного расстояния на направление на источник излучения, даже при их километровом разнесении, составит величину

$$\delta^2 \Delta l = C_0^2 \cdot \delta^2 \tau + \left( \frac{\Delta R}{C_0} \right)^2 \cdot \delta^2 C = 1500^2 \cdot (10^{-4})^2 + \left( \frac{1000}{1500} \right)^2 \cdot 0.5^2 \approx 0.1 \text{ (м}^2\text{)} \quad (2.42)$$

Таким образом, в процессе пространственного позиционирования приемной антенны можно обеспечить точность оценок относительных координат приемников в антенне в пределах долей метра.

Полученная точность оценки пространственного положения приемников в антенне обеспечивает возможность синфазной пространственной обработки сигналов вплоть до длин волн менее  $\lambda = 5$  м.

Анализ выражения (2.42) показывает, что основной вклад в дисперсию оценки проекции межэлементного расстояния вносит погрешность оценки скорости распространения гидроакустического сигнала.

Одним из возможных выходов из этого положения является включение скорости распространения в состав неизвестных при формировании соответствующей системы уравнений [50].

Однако данный прием возможен при наличии однородных условий распространения гидроакустических сигналов в условиях глубокой воды при отсутствии частотной зависимости скорости звука.

В условиях же волноводного распространения, а именно эти условия характерны мелководной шельфовой зоне Российской Федерации, где сосредоточены основные запасы и месторождения углеводородного сырья,

следует уже учитывать и возможное существенное влияние волноводного дисперсионного характера распространения гидроакустического сигнала.

Использование собственной низкочастотной излучающей системы для пространственной калибровки приемной системы в условиях мелководья, тем более требует учитывать существенную дисперсию скорости звука, присущую именно низкочастотному диапазону.

Учитывая то обстоятельство, что пространственные масштабы приемной части сейсмолокационного комплекса могут достигать единиц километров, то с учетом желательности нахождения реперных точек излучения в ее дальней акустической зоне, удаление излучателя от элементов приемной выносной части может составлять от единиц до десятков километров. При таком разнесении точек излучения будет наблюдаться существенное затягивание импульсного сигнала вплоть до разделения отдельных мод, что может существенно увеличить погрешность, как оценок скорости распространения, так и оценок временных задержек. Выходом из этого положения может быть подбор адекватной модели среды распространения гидроакустических сигналов, определение ее параметров и дальнейшее её использование в процедурах согласованной со средой обработки информации.

#### **2.4. Выбор модели среды распространения гидроакустических сигналов**

В низком диапазоне частот мелкое море представляет собой акустический волновод с модовым характером распространения сигналов, обуславливающим наличие дисперсии фазовой и групповой скорости.

Данное обстоятельство, с одной стороны, существенно осложняет работу гидроакустических средств [48], а с другой стороны, позволяет улучшить характеристики [7, 10] и открывает дополнительные функциональные локационные возможности [11-12, 61] для гидроакустических средств, адаптируемых к условиям применения. Более того появляется возможность использования волноводных дисперсионных

условий распространения для формирования сигналов с наперед заданными пространственно-временными свойствами [38, 39].

Однако, для реального использования этих особенностей распространения гидроакустических сигналов необходимо знание адекватной модели среды [1,8-9,78,79], обеспечивающей возможность прогнозирования пространственно-временных параметров сигналов.

Удобной, с точки зрения описания особенностей волноводного распространения сигналов, является модель идеального волновода с абсолютно жесткими или абсолютно мягкими границами [46 с.310-317, 84 с.463-472, 90 с.109-116].

В идеальном морском волноводе глубиной  $H$  акустическое поле точечного гармонического источника частоты  $\omega$  описывается выражением

$$S(\omega, r, t) = \sum_{m=1}^{M(\omega)} A_m \cdot e^{j \cdot (\omega t - \alpha_m r)}, \quad (2.43)$$

параметры распространения волн в котором определяются уравнением

$$\gamma_m \cdot H = (m - \frac{1}{2}) \cdot \pi, \quad (2.44)$$

где  $M(\omega) \leq (\frac{2H}{\lambda} + \frac{1}{2})$  - количество возбуждаемых нормальных волн;

$A_m = \sin(\gamma_m \cdot z_n) \cdot \sin(\gamma_m \cdot z_n)$  - амплитуда  $m$ -той нормальной волны;

$\gamma_m = \frac{(m - \frac{1}{2}) \cdot \pi}{H}$  - вертикальное волновое число;

$\alpha_m = \sqrt{(\frac{\omega}{c})^2 - \gamma_m^2}$  - горизонтальное волновое число;

$c$  – скорость звука в водном слое.

Данная модель, весьма эффективна при решении принципиальных вопросов построения гидроакустических средств, предназначенных для работы в условиях волноводного распространения и формирования модельных задач в процессе отработки программно-алгоритмических решений. Однако она редко когда может быть использована для практического применения в реальных условиях.

Несколько более сложной, но и более адекватной моделью для описания волноводного распространения гидроакустических сигналов в

реальных морских условиях является модель Пекериса [46 с.317-340, 77, 90 с.117-123], представляющая собой однородный плоскопараллельный слой жидкости, лежащий на жидком однородном полупространстве, а основные параметры нормальных волн определяются характеристическим уравнением

$$\alpha_m \cdot H \cdot \left( \frac{v_m^2}{c_1^2} - 1 \right)^{1/2} = m \cdot \pi - \operatorname{arctg} \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \left[ \frac{\frac{v_m^2}{c_1^2} - 1}{1 - \frac{v_m^2}{c_2^2}} \right]^{1/2}, \quad (2.45)$$

где  $\rho_1, c_1$  и  $\rho_2, c_2$  – плотность и скорость распространения волны в жидком слое и подложке;

$v_m$  – фазовая скорость  $m$ -той нормальной волны.

Для демонстрации существенности отличий акустических характеристик модели жидкого слоя, лежащего на жидком полупространстве (модели Пекериса) от модели идеального волновода, на рис.2.1. представлены соответствующие дисперсионные характеристики нормальных волн для водного слоя глубиной  $H=100\text{м}$ .

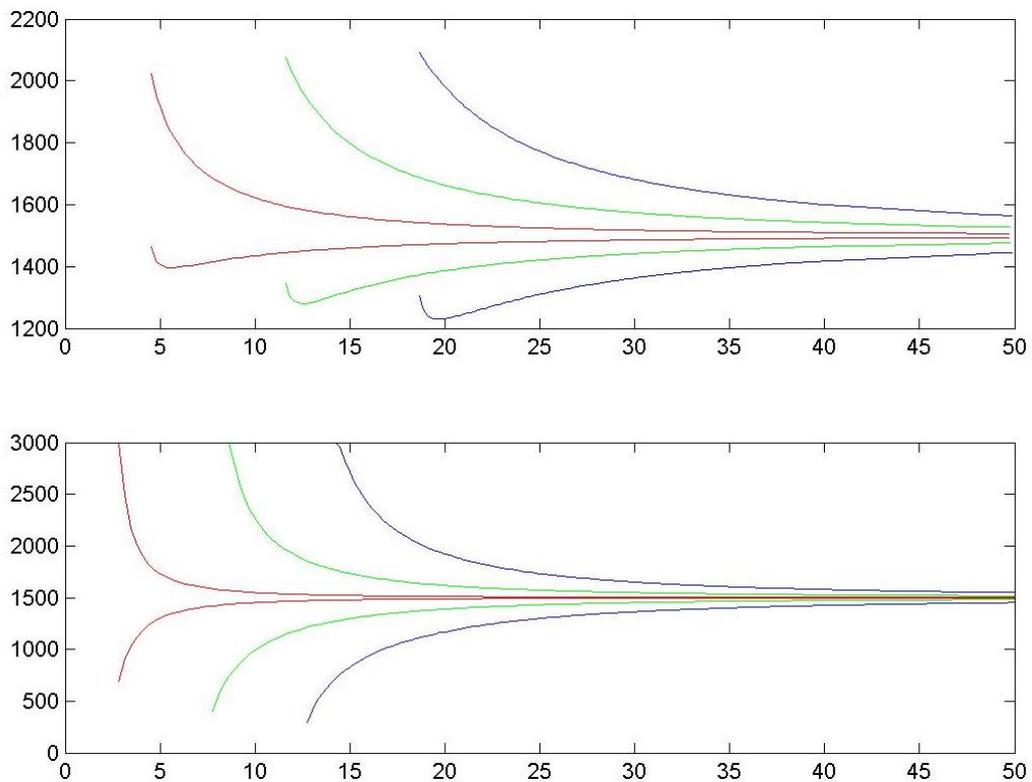


Рис. 2.1 Фазовые и групповые скорости нормальных волн

Верхний рисунок - модель Пекериса  $c_b = 1500\text{м/с}$ ,  $\rho_g = 2\text{ г/см}^3$ ,  $c_t = 1800\text{м/с}$ ;

Нижний рисунок - модель идеального волновода  $c_b = 1500\text{м/с}$ ,  $\rho_g c_t = \infty$ .

Где  $c_v$  - скорость звука в водном слое,  
 $\rho_r$  - плотность грунта,  
 $c_r$  - скорость звука в грунте.

Именно модель Пекериса выбрана для описания и прогнозирования пространственно-временной структуры гидроакустических сигналов низкого частотного диапазона в мелком море (в том числе в шельфовой зоне Баренцева моря).

Подбор параметров математической модели может быть осуществлен по результатам оценок именно дисперсионных характеристик фазовых и групповых скоростей нормальных волн.

Дисперсионные характеристики групповых скоростей относительно легко могут быть получены в результате частотной фильтрации импульсного сигнала принятого от источника излучения, находящегося на расстоянии достаточном для разделения распространяющихся нормальных волн.

Для оценки же дисперсионных характеристик фазовых скоростей желательно наличие широкополосного высокостабильного низкочастотного излучателя для обеспечения возможности разделения нормальных волн в пространстве доплеровских частот (или горизонтальных волновых чисел) путем доплеровской фильтрации (или апертурного синтеза) [6] либо в пространстве угловых координат при наличии достаточно протяженной приемной антенны [22,23,31-37].

Реализация первого варианта, несмотря на кажущуюся простоту, проблематична в связи с необходимостью разработки, изготовления и дальнейшего использования в буксируемом варианте весьма габаритного и сложного низкочастотного излучателя.

А второй вариант, допускающий использование импульсного (в том числе, пневматического) источника, вполне реализуем, учитывая, что в составе сейсмолокатора присутствует именно низкочастотная пространственно-развитая приемная часть, а излучателем может служить простая пневмопушка, как источник низкочастотного импульсного сигнала.

На выходе процедуры диаграммообразования пространственно-развитой гидроакустической антенны, принимающей сигнал низкочастотного излучателя в мелком море, наблюдаются  $M$  максимумов, соответствующих  $M$  нормальным волнам. Уровни максимумов соответствуют коэффициентам возбуждения нормальных волн в месте расположения источника излучения, их угловое положение зависит от используемого в передаточной функции среды  $N$  волнового числа  $k$ . Причем, ни одно из направлений  $\theta = \theta_m$  этих максимумов может не совпадать с направлением на источник излучения.

Учитывая, что направление  $\theta_0$  на источник излучения известно, легко определяются продольные волновые числа выделенных нормальных волн

$$\alpha_m = \frac{\sin \theta_m}{\sin \theta_0} \cdot k.$$

Однако для получения конфигурации самой приемной части необходима информация о скорости распространения гидроакустических сигналов (фазовой или групповой в зависимости от способа оценки межэлементных расстояний).

Это означает, что процесс позиционирования приемной выносной части должен быть итерационным.

## **2.5. Обоснование критерия выбора (задания) конфигурации реперных точек в системе позиционирования**

Максимально упростим решаемую задачу плоским случаем, то есть необходимостью оценки только  $(x, y)$  координат, применительно к позиционированию гидроакустического излучателя, работающего у дна, в донной системе реперных приемников (с известными, ранее определенными координатами) [47].

Используя разностно-дальномерный метод, выберем один из реперных приёмников в качестве опорного и оценим разность квадратов расстояний от излучателя до опорного приемника и  $i$ -го приёмника:

$$R_i^2 - R_0^2 = C_0^2 (\tau_i^2 - \tau_0^2) \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned}
R_i^2 - R_0^2 &= (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 - (x_0 - x)^2 - (y_0 - y)^2 = \\
&= x_i^2 - 2xx_i + x^2 + y_i^2 - 2yy_i + y^2 - x_0^2 + 2xx_0 - x^2 - y_0^2 + 2yy_0 - y^2 = \\
&= x_i^2 - x_0^2 + y_i^2 - y_0^2 + 2xx_0 - 2xx_i + 2yy_0 - 2yy_i = \\
&= 2(x_0 - x_i)x + 2(y_0 - y_i)y + x_i^2 - x_0^2 + y_i^2 - y_0^2
\end{aligned} \tag{2.47}$$

С другой стороны, имея в виду, что  $\tau_i = \tau_0 + \Delta\tau_i$ , преобразуем

$$\tau_i^2 - \tau_0^2 = (\tau_0 + \Delta\tau_i)^2 - \tau_0^2 = \tau_0^2 + 2\Delta\tau_i\tau_0 + \Delta\tau_i^2 - \tau_0^2 = 2\Delta\tau_i\tau_0 + \Delta\tau_i^2$$

и получаем навигационное уравнение

$$2(x_0 - x_i)x + 2(y_0 - y_i)y + x_i^2 - x_0^2 + y_i^2 - y_0^2 = C_0^2(2\Delta\tau_i\tau_0 + \Delta\tau_i^2). \tag{2.48}$$

При этом система навигационных уравнений  $Ax = b$  представляется в нормальном виде

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 = b_i, \tag{2.49}$$

где  $(x, y)$  - элементы множества векторов  $x$ ,

$$\begin{aligned}
a_{i1} &= 2(x_0 - x_i) \\
a_{i2} &= 2(y_0 - y_i) \\
b_i &= C_0^2(2\Delta\tau_i\tau_0 + \Delta\tau_i^2) - x_i^2 + x_0^2 - y_i^2 + y_0^2
\end{aligned} \tag{2.50}$$

Определим точностные характеристики решения матричного уравнения  $Ax = b$ , которое записываем в виде  $x = A^{-1}b$ . Нашей задачей является обеспечение минимизации ошибки в оценке искомого вектора  $x$  при наличии ошибок в оценках всех компонент вектора  $b$ .

Поскольку связь между относительными ошибками в решении и в  $b$  определяется мерой обусловленности матрицы  $A$ ,

$$\text{cond}A = \|A\| \cdot \|A^{-1}\| = \frac{|\lambda_{\max}|}{|\lambda_{\min}|} \tag{2.51}$$

где  $\lambda_{\max}, \lambda_{\min}$  - максимальное и минимальное собственное значение матрицы  $A$ , найдём спектр собственных значений матрицы  $A$  из условия вырожденности матрицы  $A - \lambda I$  и собственно из условия  $\det|A - \lambda I| = 0$ .

В рассматриваемом случае матрица коэффициентов имеет вид:

$$|A| = \begin{vmatrix} 2(x_0 - x_1) & 2(y_0 - y_1) \\ 2(x_0 - x_2) & 2(y_0 - y_2) \end{vmatrix} \tag{2.52}$$

Обозначим

$$\begin{aligned} 2(x_0 - x_1) &= \Delta x_1 \\ 2(x_0 - x_2) &= \Delta x_2 \end{aligned} \quad (2.53)$$

$$\det|A - \lambda \delta_{ik}| = \begin{vmatrix} \Delta x_1 - \lambda & \Delta y_1 \\ \Delta x_2 & \Delta y_2 - \lambda \end{vmatrix} = (\Delta x_1 - \lambda)(\Delta y_2 - \lambda) - \Delta x_2 \Delta y_1 = 0 \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} (\Delta x_1 - \lambda)(\Delta y_2 - \lambda) - \Delta x_2 \Delta y_1 &= 0, \\ \Delta x_1 \Delta y_1 - \lambda \Delta x_1 - \lambda \Delta y_2 + \lambda^2 - \Delta x_2 \Delta y_1 &= 0, \\ \lambda^2 - \lambda(\Delta x_1 + \Delta y_2) + \Delta x_1 \Delta y_2 - \Delta x_2 \Delta y_1 &= 0. \end{aligned} \quad (2.55)$$

Для оценки собственных значений матрицы  $A$  необходимо решить квадратное уравнение

$$\lambda^2 - b\lambda + c = 0, \quad (2.56)$$

корни которого

$$\lambda_{12} = -\frac{1}{2}(b \pm \sqrt{b^2 - 4c}) = -\frac{1}{2}(b \pm \sqrt{d}), \quad (2.57)$$

где

$$\begin{aligned} b &= \Delta x_1 + \Delta y_2, \\ c &= \Delta x_1 \Delta y_2 - \Delta x_2 \Delta y_1, \\ d &= (\Delta x_1 + \Delta y_2)^2 - 4(\Delta x_1 \Delta y_2 - \Delta x_2 \Delta y_1). \end{aligned} \quad (2.58)$$

Таким образом, учитывая, что обусловленность матрицы  $A$  коэффициентов навигационного уравнения определяется отношением максимального и минимального собственных чисел необходимо максимизировать  $|b|$  и минимизировать  $|d|$ , тогда отношение корней минимально.

Рассмотрим два крайних варианта расстановки реперных приемников (рис.2.2).

Реперные приемники в варианте 1 расположены в углах квадрата, а в варианте 2 по одной стороне квадрата внутри которого находится район функционирования. Расстояние между соседними приемниками  $r$ .

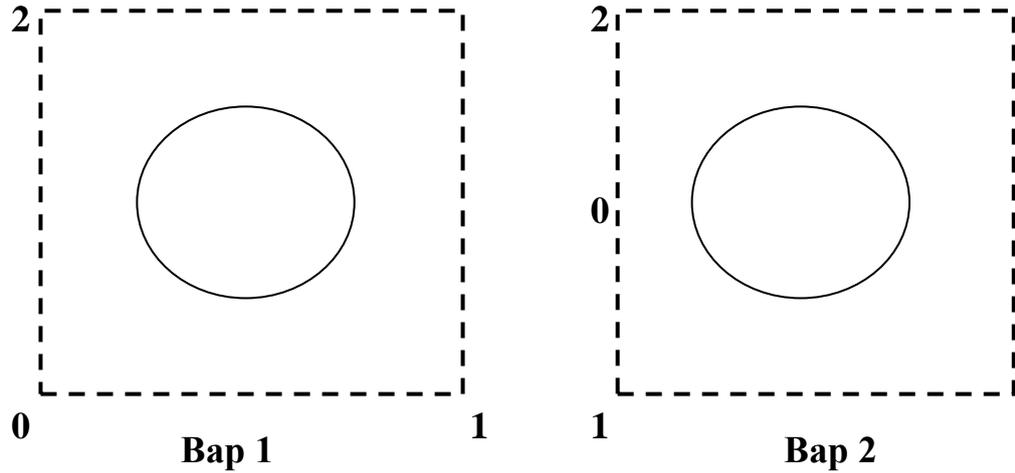


Рис. 2.2 Варианты расстановки реперных приемников

Координаты приемников в данных вариантах расстановки:

вариант 1	вариант 2
$(x_0^I, y_0^I) = (0, 0)$	$(x_0^{II}, y_0^{II}) = (0, 0)$
$(x_1^I, y_1^I) = (r, 0)$	$(x_1^{II}, y_1^{II}) = (0, -r)$
$(x_2^I, y_2^I) = (0, r)$	$(x_2^{II}, y_2^{II}) = (0, r)$

Оценим обусловленность матрицы коэффициентов  $A$  двух вариантов расстановки приемников (опорный приёмник обозначен нулевым индексом).

Учитывая, что в рассматриваемом случае

$$\begin{aligned} |\lambda_{\max}| &= \frac{1}{2}(|b| + \sqrt{d}) \\ |\lambda_{\min}| &= \frac{1}{2}(|b| - \sqrt{d}) \end{aligned} \quad (2.59)$$

оцениваем число обусловленности матрицы коэффициентов

$$\text{cond} = \frac{|\lambda_{\max}|}{|\lambda_{\min}|} = \frac{|b| + \sqrt{d}}{|b| - \sqrt{d}}. \quad (2.60)$$

Отсюда понятно, что условием минимизации числа обусловленности является максимизация  $|b|$  и минимизация  $d$ .

Тогда для варианта 1 расстановки приемников:

$$\begin{aligned} |b^I| &= 2r \\ d &= 0 \end{aligned} \quad \lambda_1 = \lambda_2 = \frac{|b^I|}{|b^I|} = 1 \quad (2.61)$$

и соответственно  $\text{cond}^I = 1$ , что говорит о хорошей обусловленности матрицы.

Для варианта 2 расстановки:

$$\begin{aligned}
 |b''| &= r \\
 d'' &= r^2 \\
 \sqrt{d} &= r \\
 |\lambda_{1,2}''| &= \frac{1}{2}(r \pm r) \\
 |\lambda_1''| &= r, |\lambda_2''| = 0 \\
 \text{cond}'' &= \frac{|\lambda_1|}{|\lambda_2|} = \infty
 \end{aligned} \tag{2.62}$$

Это говорит о вырожденности матрицы. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для минимизации погрешности позиционирования требуется максимальное разнесение реперных точек по всем координатам.

На рисунке 2.3 представлены результаты моделирования задачи нахождения оптимального расположения реперных точек, при котором число обусловленности матрицы  $A$  будет минимально, и соответственно минимальна погрешность оценки положения позиционируемого объекта.

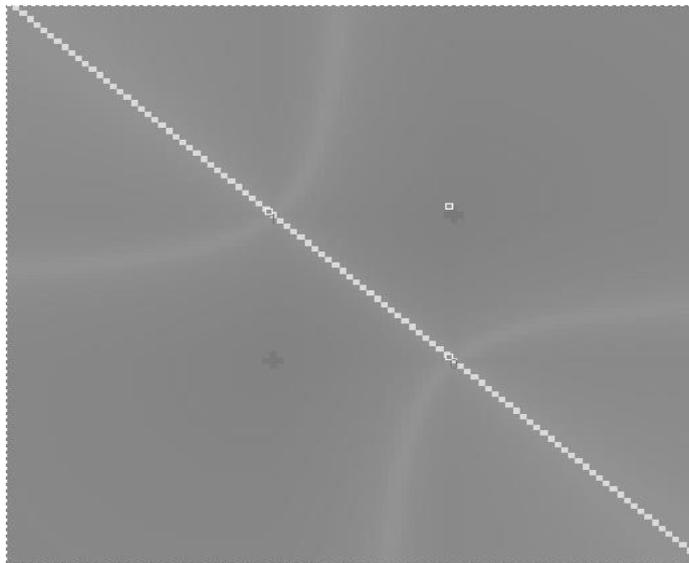


Рис. 2.3. Степень вырожденности матрицы коэффициентов в зависимости от взаимного расположения реперных точек.

Задача моделирования заключалась в следующем – по заданному положению двух реперных точек, необходимо найти такое положение (или область) третьей – для опорного приемника, при котором  $\text{cond}A$  минимально.

Яркость каждой точки на рисунке характеризует степень вырожденности матрицы при постановке опорного приемника в данную точку. Чем ярче точка, тем больше число обусловленности матрицы  $A$ .

Затем находится точка, где значение  $condA$  минимально (место, где следует расположить опорный приемник) и выделяются области, где значения  $condA$  не превышает минимальное на 10%.

Следует еще раз отметить, что постановка двумерной задачи позиционирования сделана исключительно с целью упрощения и наглядности, а все выводы относительно расположения реперных точек в полной мере относятся и задаче оценки координаты  $Z$  излучателя (или приемника).

## 2.6. Динамическое позиционирование излучателя

Принципиально для позиционирования излучателя можно использовать те же методы, которые используются для позиционирования приемников. Если требуется определить местоположение источника излучения в пространстве, то достаточно заменить используемую при позиционировании приемников пространственно-развитую систему реперных излучателей на пространственно-развитую систему реперных приемников [50].

Классическая система с длинной базой для динамического позиционирования подводного объекта предполагает установку на нем приемо-передатчика и оборудование района проведения работ пространственно-развитой системой маяков ответчиков, местоположение которых заранее определено. Рабочая частота системы позиционирования обычно составляет десятки килогерц и существенно отличается от рабочего частотного диапазона сейсмоакустической системы. Поэтому для использования приемной выносной части для целей позиционирования излучателя часть приемных элементов должна быть сделана с расширенным частотным диапазоном. Этот вариант технической реализации системы

позиционирования существенно повышает стоимость приемной выносной части за счет усложнения приемных трактов и системы передачи информации в целом.

Поскольку приемная выносная часть геофизической системы охватывает полностью район исследований, то входящие в нее приемные элементы могут использоваться в качестве элементов системы позиционирования излучателя.

Гидроакустические сигналы источника излучения, распространяющиеся в толще воды, приходят на приемные элементы в качестве помехи сейсмоакустическим сигналам. Однако именно они несут информацию о местоположении источника излучения и могут быть использованы в системе позиционирования.

Рассмотрим гидроакустическую систему позиционирования источника излучения, в предположении обеспечения возможности синхронизации работы излучающей и приемной подсистем.

Для решения задачи оценки текущего местоположения излучателя воспользуемся дальномерным методом

$$(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2=R_i^2=(c \cdot t_i)^2, \quad (2.63)$$

где

$x_i, y_i, z_i$  - координаты  $i$ -той реперной точки приема системы позиционирования в принятой прямоугольной системе координат;

$x, y, z$  - координаты излучателя (позиционируемого объекта) в той же системе координат;

$R_i=c \cdot t_i$  - расстояние между  $i$ -той реперной точкой приема и позиционируемым объектом;

$c$  - скорость распространения гидроакустического сигнала;

$t_i$  - время распространения сигнала от излучателя до  $i$ -той реперной точки.

Преобразуем уравнение (2.60) к виду

$$x^2 - 2x_i x + y^2 - 2y \cdot y_i + z^2 - 2z \cdot z_i - b_i = 0, \quad (2.64)$$

где  $b_i = R_i^2 - x_i^2 - y_i^2 - z_i^2$ .

Для решения систем нелинейных уравнений используем метод Ньютона [95].

Матрица Якоби для общего случая 4-х неизвестных (x,y,z,c) применительно к дальномерному (сферическому) методу позиционирования, подразумевающему использование в качестве навигационного параметра времени распространения акустического сигнала от источника излучения до каждой реперной точки, имеет вид:

$$\begin{aligned} (x) W_{i1}^{(k)} &= 2x^{(k)} - 2x_i \\ (y) W_{i2}^{(k)} &= 2y^{(k)} - 2y_i \\ (z) W_{i3}^{(k)} &= 2z^{(k)} - 2z_i \\ (c) W_{i4}^{(k)} &= -2c^{(k)} \cdot (t_i)^2 \end{aligned} \quad (2.65)$$

Пусть требуется с высокой степенью точности определять местоположение излучателя, находящегося на высоте  $z=50\text{м}$  от дна, а приемная часть системы позиционирования состоит из пяти приемников, равномерно расположенных по окружности радиуса  $r_0$  (100м, 200м, 300м) относительно проекции объекта на дно моря, обеспечивая хорошую обусловленность матрицы  $W$ . Координаты  $z$  приемников системы позиционирования должны также отличаться друг от друга, для того чтобы матрица  $W$  не превратилась в вырожденную. Предполагаем, что это различие возникает из-за естественной неровности дна моря, и вносим соответствующие отличия в  $z$  координатах приемников на уровне  $\Delta H=10\text{см}$ .

На рис.2.4-2.9 представлены результаты статистического моделирования по оценке точностных характеристик позиционирования объекта, а именно среднеквадратических отклонений горизонтальных ( $dx_y$ ) и вертикальной ( $dz$ ) координат при расположении реперных точек на разном расстоянии от позиционируемого объекта и при условии оценок времен распространения с погрешностью  $dt=0.01\text{мс}$ .

На рис.2.4 представлены оценки координат (красные точки) объекта при его местоположении на высоте  $h=50\text{м}$  в центре объема (зеленый кружок), ограниченного в плане окружностью расположения приемников (красные кружки) системы позиционирования радиусом  $r_0=100, 200$  и  $300\text{м}$ . При расположении приемников на дне на окружности (по периметру района) число обусловленности матрицы Якоби составляет величину порядка  $\text{cond}\sim 10^6$ , что говорит о возможности получения значительных ошибок в оценках координат из-за естественных ошибок в оценках времен распространения гидроакустических сигналов.

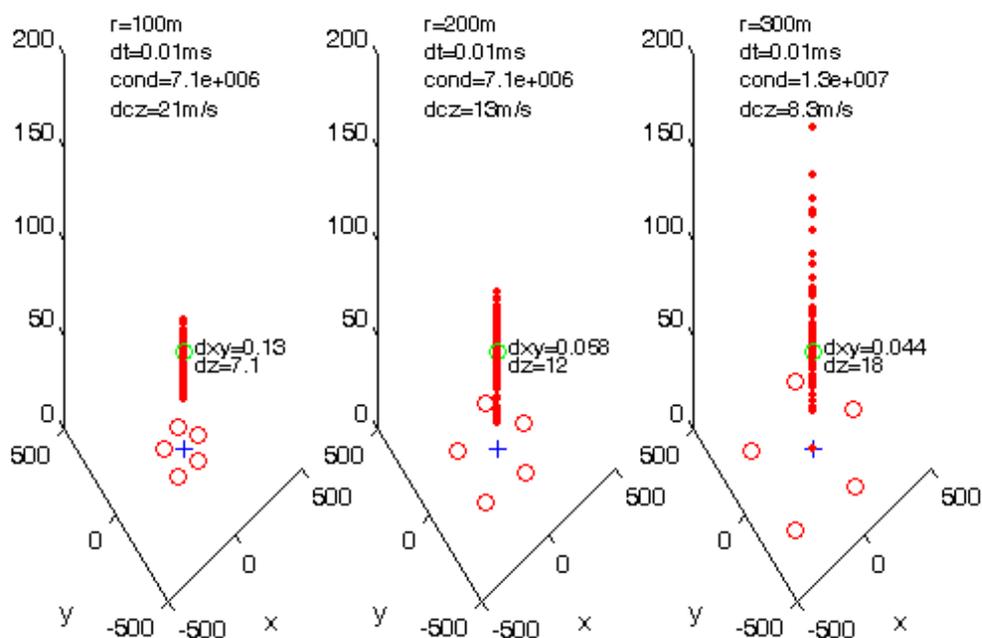


Рис 2.4 Дальномерная система по периметру района на дне

Возможным вариантом повышения точности оценки вертикальной координаты в рамках реализации дальномерного метода является обеспечение значительного развития приемной части по глубине, желательно перекрывающего весь объем возможного местонахождения объекта. В частности, изменение глубины одной из реперных точек на 10 метров приводит к снижению числа обусловленности матрицы Якоби на порядок (рис.2.5).

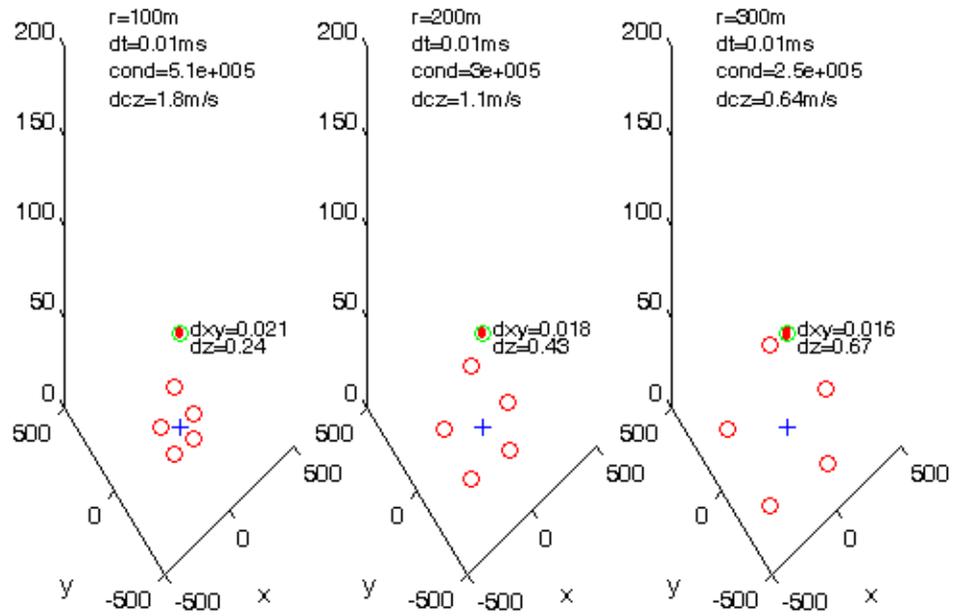


Рис. 2.5 Дальномерная система внутри района, развитая по глубине

Однако развитие приемной системы по глубине сопряжено со значительными техническими трудностями и, в первую очередь, с необходимостью обеспечения стационарности установки оторванных от дна приемников либо обеспечения их динамического позиционирования.

Однако, понижение числа обусловленности навигационной матрицы может быть достигнуто более простым способом, а именно размещением приемной части внутри района позиционирования (Рис. 2.6).

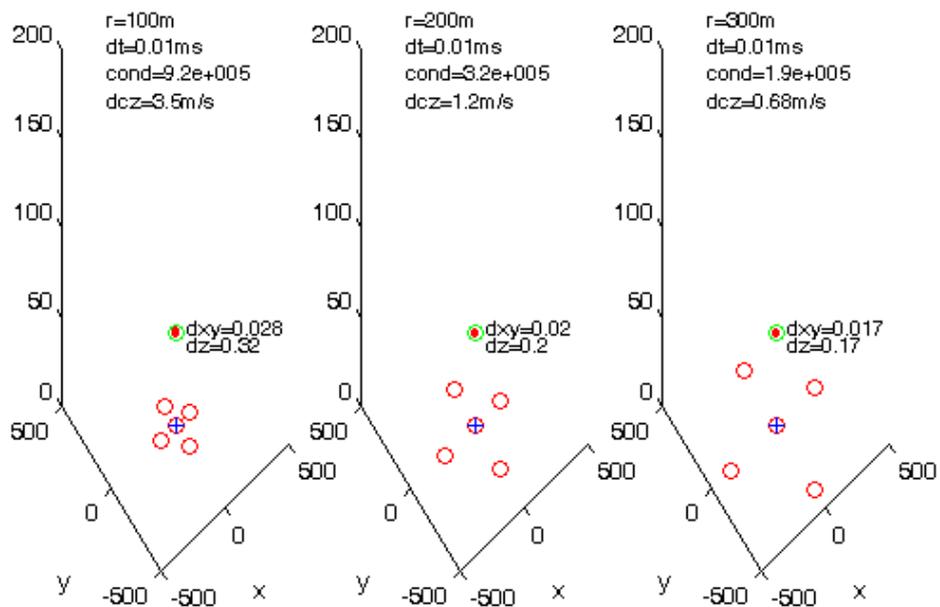


Рис. 2.6 Дальномерная система внутри района на дне

Изменение конфигурации приемной части дальномерной системы позиционирования, а именно распределение ее по площади внутри района местонахождения объекта, дает такой же эффект как и развитие распределенной по периметру системы по глубине.

Одним из возможных путей получения более устойчивых оценок координат при решении задачи позиционирования источника излучения является использование разностно-дальномерного метода.

Отличительной особенностью разностно-дальномерного (гиперболического) метода является то, что навигационным параметром является не время распространения сигнала от излучателя до реперной точки (в данном случае до приемника системы позиционирования), а разность времен распространения сигналов до реперных приемников.

Измеряем разность времен распространения сигнала  $\Delta t_{i0}$  от излучателя с искомыми координатами  $(x \ y \ z)$  до  $i$ -го и опорного приемников с координатами  $(x_i \ y_i \ z_i)$  и  $(x_0 \ y_0 \ z_0)$  соответственно.

Решаем систему уравнений вида

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} = C\Delta t_{i0}, \quad (2.66)$$

в котором навигационным параметром является относительная задержка

$$\Delta t_{i0} = \frac{R_i - R_0}{c} = \frac{\Delta R_{i0}}{c}. \quad (2.67)$$

Перепишем уравнение (2.66) в виде

$$\begin{aligned} & \left( x^2 - 2xx_i + x_i^2 + y^2 - 2yy_i + y_i^2 + z^2 - 2zz_i + z_i^2 \right)^{1/2} - \\ & - \left( x^2 - 2xx_0 + x_0^2 + y^2 - 2yy_0 + y_0^2 + z^2 - 2zz_0 + z_0^2 \right)^{1/2} - C\Delta t_{i0} = 0 \end{aligned} \quad (2.68)$$

Находим матрицу Якоби для решения системы методом Ньютона

$$(x) W_{il}^{(k)} = \frac{2x^{(k)} - 2x_i}{D_i^{(k)}} - \frac{2x^{(k)} - 2x_0}{D_0^{(k)}} \quad (2.69)$$

$$(y) W_{i2}^{(k)} = \frac{2y^{(k)} - 2y_i}{D_i^{(k)}} - \frac{2y^{(k)} - 2y_0}{D_0^{(k)}} \quad (2.70)$$

$$(z) W_{i3}^{(k)} = \frac{2z^{(k)} - 2z_i}{D_i^{(k)}} - \frac{2z^{(k)} - 2z_0}{D_0^{(k)}} \quad (2.71)$$

$$(c) W_{i4}^{(k)} = -\Delta t_{i0} \quad (2.69)$$

где

$$D_i^{(k)} = \sqrt{(x^{(k)} - x_i)^2 + (y^{(k)} - y_i)^2 + (z^{(k)} - z_i)^2} \quad (2.70)$$

$$D_0^{(k)} = \sqrt{(x^{(k)} - x_0)^2 + (y^{(k)} - y_0)^2 + (z^{(k)} - z_0)^2} \quad (2.71)$$

На рис. 2.7 представлены результаты позиционирования объекта при тех же условиях, что и на рис. 2.4, но полученные при реализации разностно-дальномерного метода. Следует отметить, что, несмотря на то, что число обусловленности матрицы  $W$  уменьшилось на три порядка ( $\text{cond} \sim 10^3$ ) в «периметровом» варианте размещения приемной части возникают аналогичные ситуации появления больших ошибок в оценке координаты  $z$ .

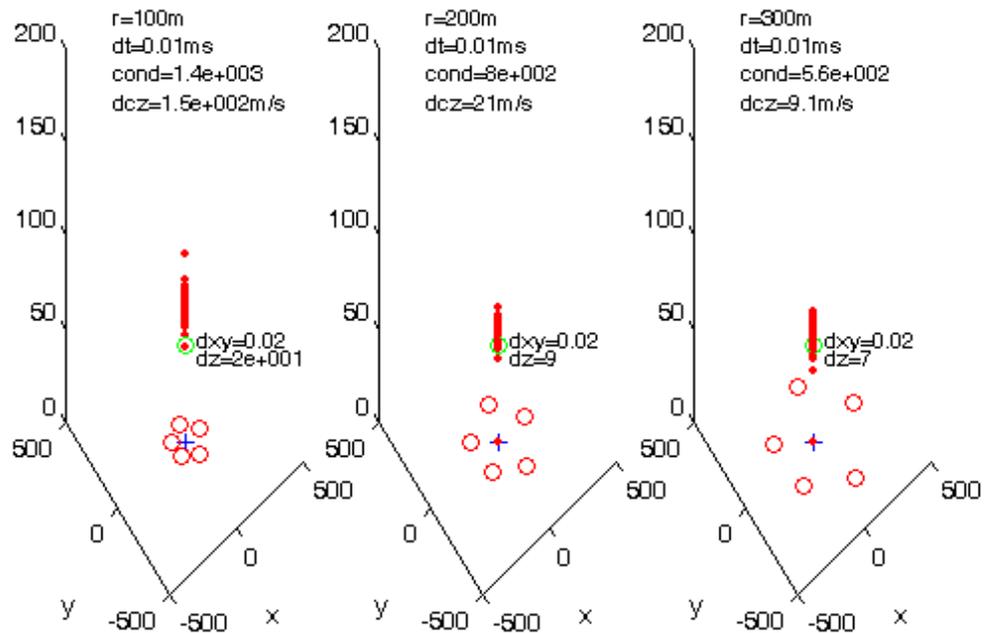


Рис. 2.7 Разностно-дальномерная система по периметру района на дне

Результаты оценок координат значительно улучшаются при разнесении точек приема по вертикальной координате (рис. 2.8). Однако, как

уже отмечалось, развитие приемной системы по вертикали сопряжено с определенными трудностями и не всегда возможно.

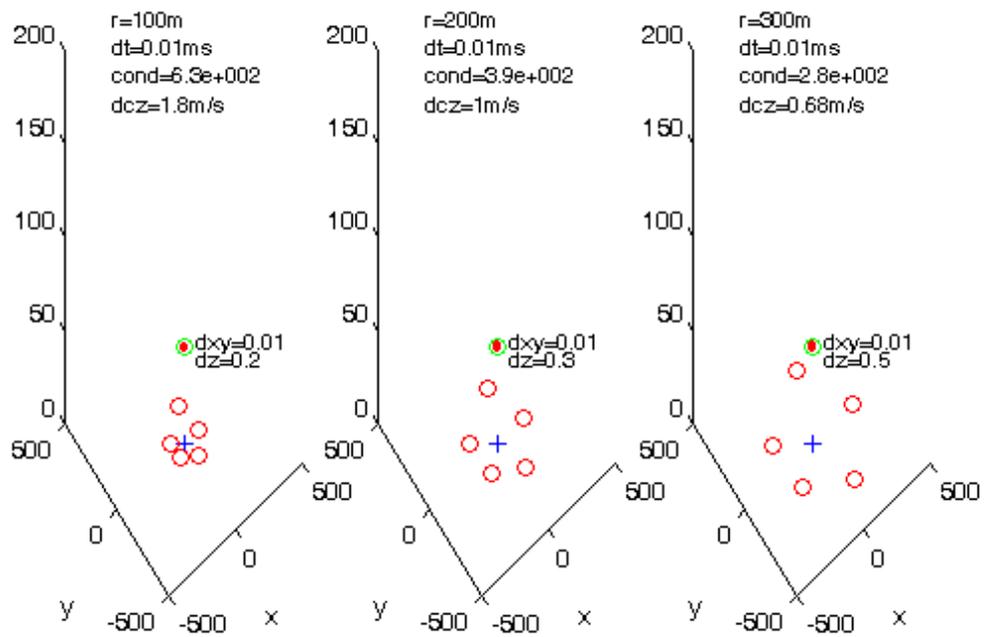


Рис. 2.8 Разностно-дальномерная система внутри района развитая по глубине

На рис. 2.9 представлены результаты моделирования разностно-дальномерного метода измерений в донном «плоском» варианте конфигурации приемной части с одной центральной реперной точкой.

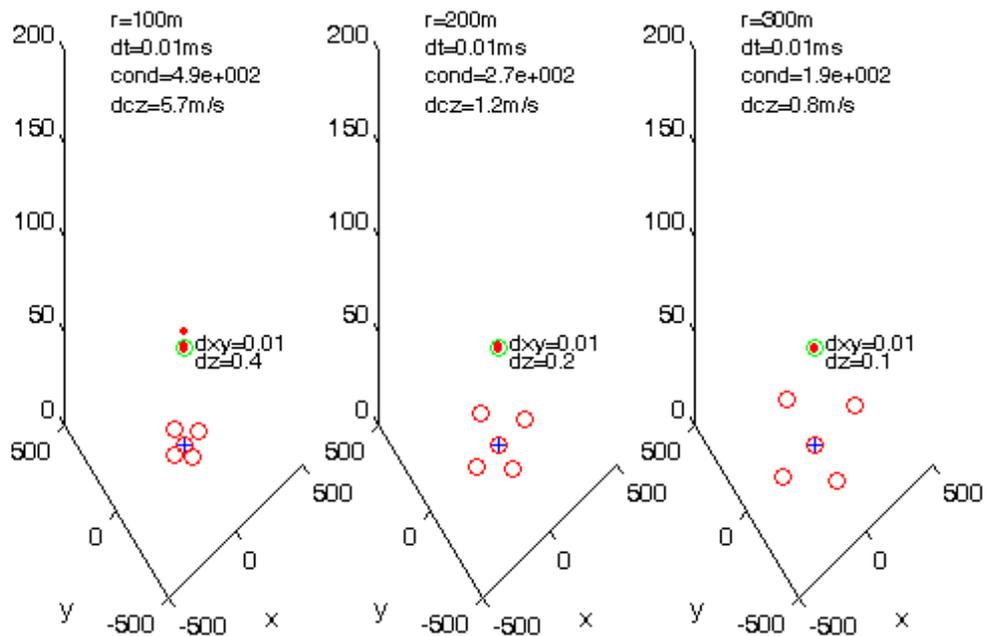


Рис. 2.9 Разностно-дальномерная система внутри района донная

При этом число обусловленности матрицы Якоби составляет величину того же порядка, что и при вертикальном развитии приемной системы ( $\text{cond} \sim 10^2$ ).

Данная конфигурация размещения приемной части даже без вертикального ее развития не уступает по уровню минимизации ошибок оценки, как горизонтальных координат, так и вертикальной координаты позиционируемого объекта.

Наличие возможности обеспечения требуемых точностных характеристик объемного позиционирования при использовании практически только плоского размещения приемной системы в данной задаче сейсмоакустической разведки имеет принципиальное значение, поэтому целесообразно вообще исключить оценку вертикальной координаты из числа неизвестных. В морских условиях эта задача решается путем установки на излучатель либо датчика давления, либо эхолота. Эхолот даёт возможность непосредственного измерения текущего расстояния между излучателем и дном, которое необходимо учитывать при расчете компенсирующей задержки при фокусировке. В этом случае показания эхолота используем в качестве оценки глубины места излучателя и систему уравнений решаем только относительно горизонтальных координат  $X$  и  $Y$ .

Современные малогабаритные эхолоты, обеспечивают возможность измерения глубины места с точностью до одного и менее процента, т.е. могут составлять единицы сантиметров, что более чем достаточно.

Единственным фактором, который необходимо учесть при оценке глубины, это профиль скорости звука между горизонтом излучения и дном, но учитывая, что излучатель желательно перемещать как можно ближе ко дну, где наблюдаются минимальные температурные изменения, то измеритель скорости звука можно также установить непосредственно на устройстве буксировки излучателя.

Причем, в этом случае точность оценки координат источника излучения в горизонтальной плоскости слабо зависит от радиуса размещения реперных точек приема относительно позиционируемого излучателя, поэтому можно использовать практически любые приемные элементы системы, формирующие оптимальную конфигурацию.

При решении задачи позиционирования буксируемого источника излучения с использованием пространственно-развитой стационарной донной приемной системы появляется возможность применения любого из рассмотренных методов позиционирования. Но наиболее точные оценки местоположения излучателя в процессе синтезирования излучающей апертуры в реальных условиях применения должен продемонстрировать разностно-дальномерный корреляционный метод позиционирования. Наличие большого числа возможных вариантов выбора реперных элементов из стационарной приемной системы, позволяет выбрать именно те элементы, на которых наблюдается максимум взаимной корреляции сигналов и координаты которых минимизируют число обусловленности навигационной матрицы.

Оптимальность конфигурации реперных точек и метода позиционирования рассматривается при этом с точки зрения именно минимизации ошибок позиционирования излучателя.

## **Выводы по Главе 2**

1. Для решения задачи оценки местоположения приемных элементов пространственно-развитых донных стационарных сейсмоакустических антенн целесообразно сочетание сферического и гиперболического методов позиционирования с длинной базой.

2. Для мелководных условий процедуру позиционирования низкочастотной приемной выносной части необходимо проводить с учетом

дисперсионных свойств волноводного характера распространения гидроакустических сигналов.

3. Результатами математического моделирования показана эффективность защищаемого разностно-дальномерного способа обнаружения и определения текущего местоположения источника сейсмоакустического излучения, основанного на оценке параметров функции взаимной корреляции сигналов на приемных элементах пространственно-развитой приемной системы и основанной на нем технологии динамического позиционирования излучателя в процессе синтезирования излучающей апертуры.

4. Результатами математического моделирования показана справедливость защищаемого положения о целесообразности оптимизации конфигурации реперных точек по критерию меры обусловленности матрицы навигационных коэффициентов при реализации технологии позиционирования элементов пространственно-развитой приемной системы и динамического позиционирования излучателя в процессе синтезирования апертуры дальномерным и разностно-дальномерным методами.

### Глава 3. Программный комплекс обработки сигналов<sup>3</sup>

Программный комплекс «Пакет обработки сейсмо- и гидроакустических сигналов - «ПОСиГС» предназначен, в первую очередь, для синфазной обработки многоканальной сейсмоакустической и гидроакустической информации. Область применения: сейсморазведка и гидролокация активными и пассивными методами с использованием фазируемых и синтезируемых антенных решеток.

В пакете программ «ПОСиГС» реализованы основные функциональные процедуры, необходимые для решения морских геофизических задач, в частности:

- частотно-временной обработки канальной информации, включая спектральный и корреляционный анализ;
- оценки параметров передаточной характеристики дисперсионной среды распространения сейсмоакустических сигналов, в том числе зоны малых скоростей и мелководной шельфовой зоны;
- оценки координат приемных элементов стационарных сейсмоакустических антенн на базе дальномерного и разностно-дальномерного методов позиционирования, с использованием методов линейной и нелинейной алгебры;
- формирования синтезированной излучающей апертуры с использованием непосредственно той же сейсмолокационной пространственно-развитой приемной системы для оценок текущих координат источника излучения (динамического позиционирования);

<sup>3</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Колигаев С.О.** Пакет обработки сейсмо- и гидроакустических сигналов - «ПОСиГС». Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ. № 2015662772. 2015.
2. **Колигаев С.О.,** Колигаев О.А., Колтин Г.П., «Регистрация, обработка и анализ экспериментальной информации», Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ, № 2015617212 от 03.07.2015.
3. **Колигаев С.О.,** Колтин Г.П. Синхронизация работы с береговым комплексом калибруемой системы. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2015617220. 2015.
4. **Колигаев С.О.** и др. Программный комплекс станции контроля шумности морских нефтегазовых комплексов. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ №2012616017. 2012.

- пространственной фильтрации сейсмоакустических полей на базе когерентной обработки сигналов пространственно-распределенной системы приемных датчиков и синтезированной излучающей апертуры, обеспечивающей реализацию в морских условиях таких геофизических методов как СЛБО и СЛОЭ.

### **3.1. Возможные варианты получения входных данных**

#### 3.1.1. Загрузка из файлов различных форматов:

- бинарные файлы с заголовком;
- файлы форматов IDH, TIM, SSM;
- потоковые сейсмические данные в формате SEED;
- сейсмические данные в формате SEG-Y и SEG-D;
- звуковые файлы в формате WAV.

#### 3.1.2. Ввод в реальном времени с многоканальных устройств ввода-вывода:

- платы L-Card;
- плата DAQ2208;
- плата PCI24DSI32;
- плата DACn10PCI;
- звуковые аудиоустройства;
- интерфейсы связи с гидроакустическими устройствами;
- сетевая трансляция сейсмической информации.

#### 3.1.3. Моделирование входных данных:

- моделирование излучаемых сигналов различных видов модуляции;
- моделирование передаточных характеристик среды распространения сигналов;
- моделирование сигналов многоканальных пространственно- развитых приемных систем.

В частности, на рис.3.1 представлено окно ввода данных из SEG – файлов. В левой части окна представлена область выбора рабочей директории и

файлов, а в правой область задания параметров записей в файле, параметров системы координат.

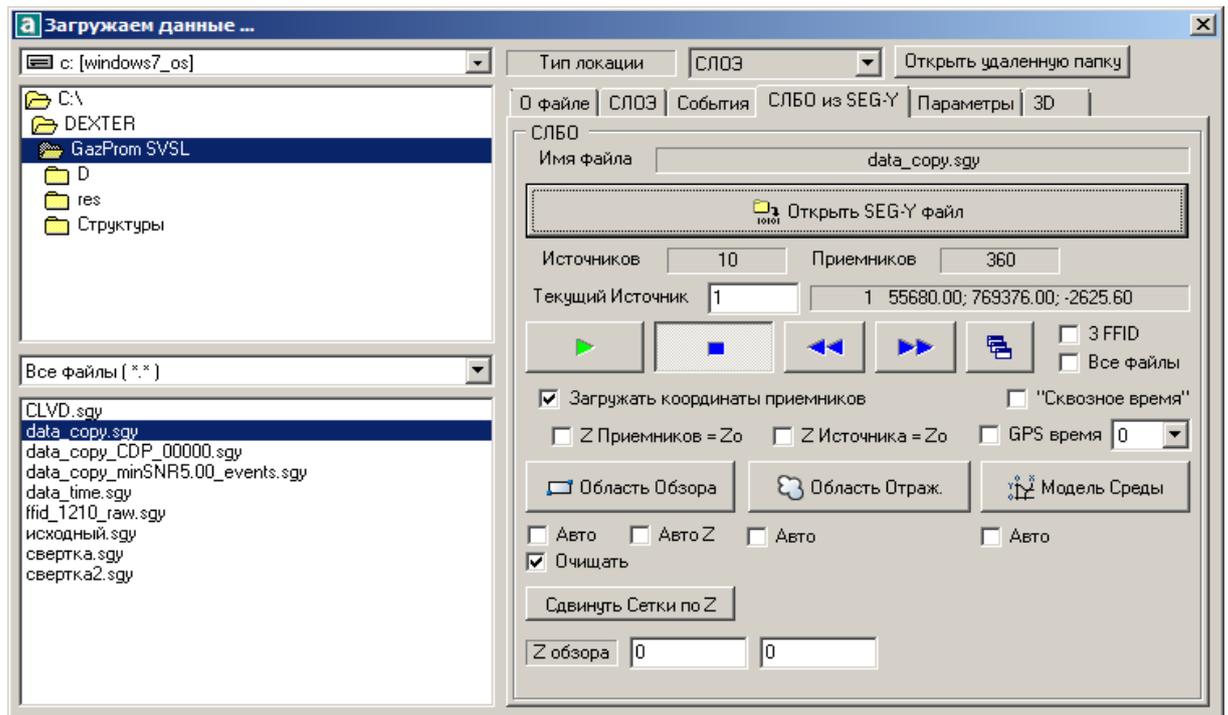


Рис. 3.1 Окно ввода данных из SEG – файлов

## 3.2 Предварительная обработка входных канальных данных

### 3.2.1. Корректировка временного диапазона:

- с учетом кинематических поправок;
- с учетом статических поправок.

### 3.2.2 Поканальная обработка во временной области:

- комплексное гетеродинирование;
- фазовые повороты комплексного сигнала;
- SSB демодуляция из комплексного сигнала;
- свертка комплексного сигнала;
- обработка модуля 3х компонентного сигнала;
- выделение Р и S волн из 3х компонентного сигнала;
- удаление постоянной составляющей;
- интерполяция;
- умножение на оконную функцию;
- умножение на функцию ВАРУ;

- MUTE временных интервалов;
- нормировка на максимум;
- нормировка скользящим окном;
- КИХ фильтр;
- квадратурный КИХ фильтр;
- SSB модуляция.

### 3.2.3. Поканальная обработка в спектральной области:

- умножение на частотно-амплитудную характеристику;
- нормировка на максимум;
- частотное «выбеливание»;
- компенсация задержек аналого-цифрового преобразования (АЦП) ;
- расчет энергетики в диапазоне.
- расчет фазы в диапазоне;
- поворот фазы;
- внесение фазовых задержек;
- оценка частотно зависимой групповой и фазовой скорости;
- компенсация частотно зависимой скорости;

На рис.3.2. представлено одно из окон задания параметров предварительной обработки канальных данных, в котором, в частности, осуществляется выбор вида обработки сигналов, границ частотного диапазона и параметров преобразований Фурье.

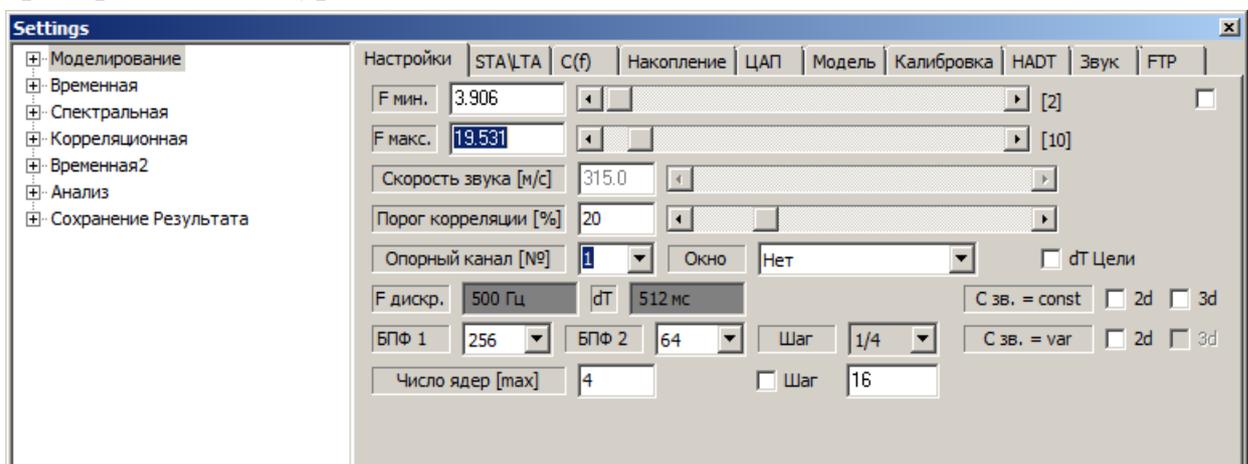


Рис. 3.2 Окно задания параметров обработки канальных данных

### 3.3. Совместная обработка данных

#### 3.3.1 Оценка корреляционной матрицы.

#### 3.3.2. Расчеты по корреляционной матрице:

- вычисление координат источника сигнала;
- расчет статических поправок пунктов приема;
- расчет амплитудных коэффициентов каналов;
- пространственная калибровка антенны (геометрия антенн).

#### 3.3.3. Совместная обработка в спектральной области:

- расчет частотно зависимой фазовой скорости звука;
- расчет частотно зависимых коэффициентов затухания;
- расчет реализаций в точке фокусировки.

#### 3.3.4. Сеточные вычисления:

- пространственная фильтрация и фокусировка;
- оценка коэффициента усиления антенны;
- оценка дальности в дисперсионной среде;
- позиционирование приемных элементов стационарной антенны;
- динамическое позиционирование излучателя и синтезирование апертуры;
- пространственно-временная обработка СЛОЭ;
- пространственно-временная обработка СЛБО;
- пространственно-временная обработка ОГТ;
- оценка вырожденности матрицы при решении систем уравнений;
- оценка аппаратной функции;
- моделирование диаграммы направленности;
- интерполяция карты глубин.

На рис. 3.3. представлено окно задания параметров пространственной обработки сигналов применительно к задачам сейсмолокации очагов эмиссии и сейсмолокации бокового обзора, включая задание границ пространственной области обработки и параметров ее разбиения на сеточные элементы.

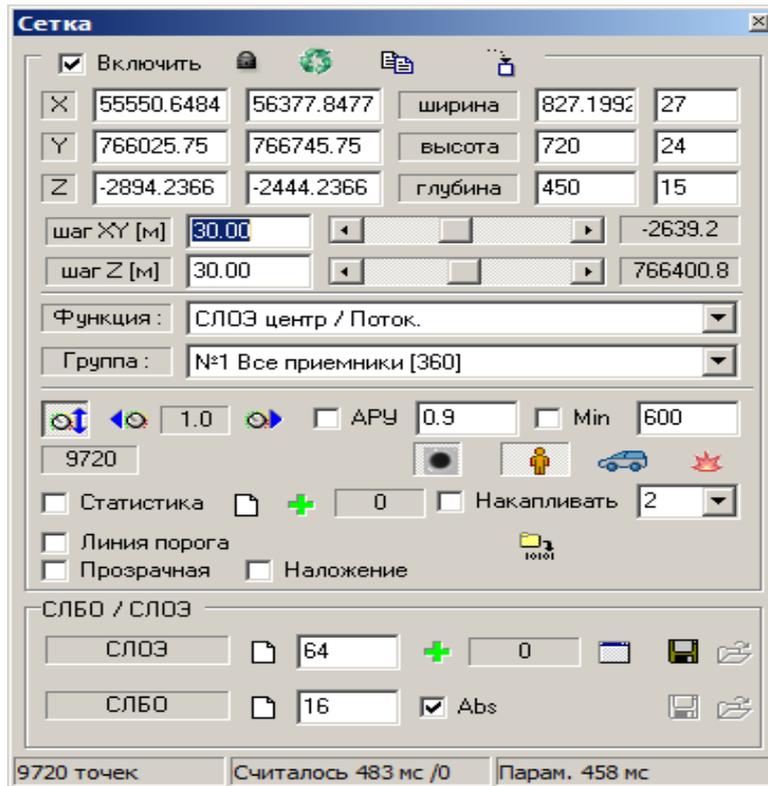


Рис. 3.3. Окно задания параметров пространственной обработки

### 3.4. Отображение результатов обработки

#### 3.4.1. Отображение реализаций и функций:

- временные реализации;
- спектры;
- корреляционные функции;
- корреляционные матрицы;
- сонограммы.

#### 3.4.2. Отображение основы карты:

- растровые карты;
- растровый фоновый рисунок;
- векторные карты;

#### 3.4.3 Отображение визуальных компонентов:

- отдельные точечные объекты;
- антенные решетки;
- аппаратные функции и диаграммы направленности;
- навигационные треки;

- сеточные объекты;
- виртуальные камеры.

На рис. 3.4. и 3.5. представлены варианты отображения входных реализаций.

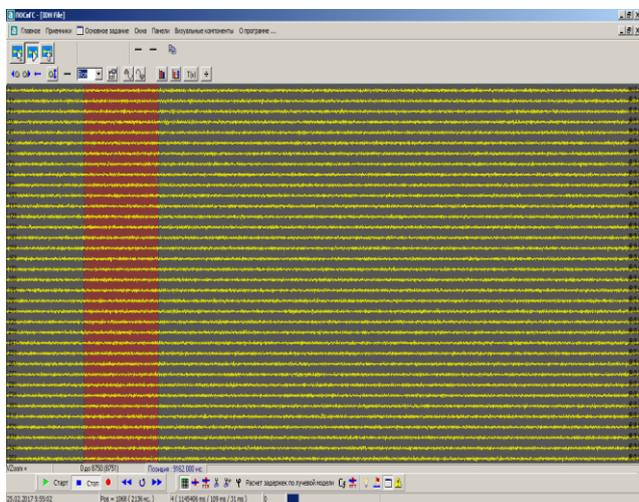


Рис. 3.4. Вариант 1 отображения входных реализаций.

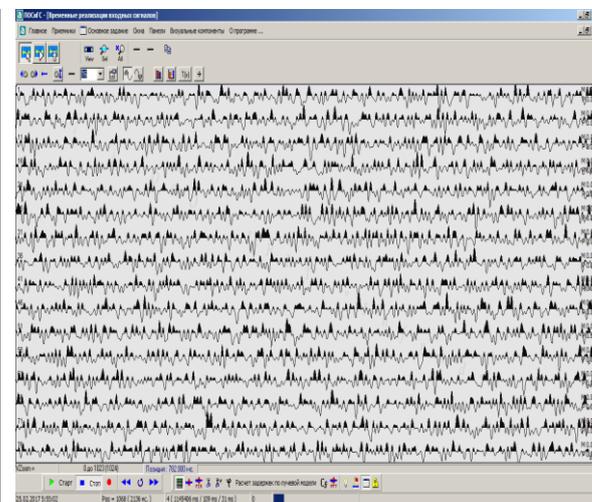


Рис. 3.5. Вариант 2 отображения входных реализаций.

На рис.3.6. и 3.7. представлены форматы отображения корреляционных функций и корреляционной матрицы.

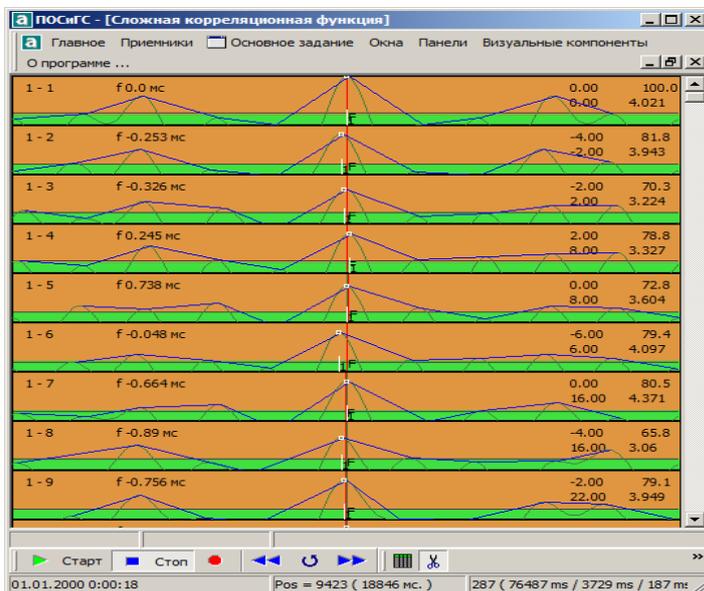


Рис. 3.6. Корреляционные функции

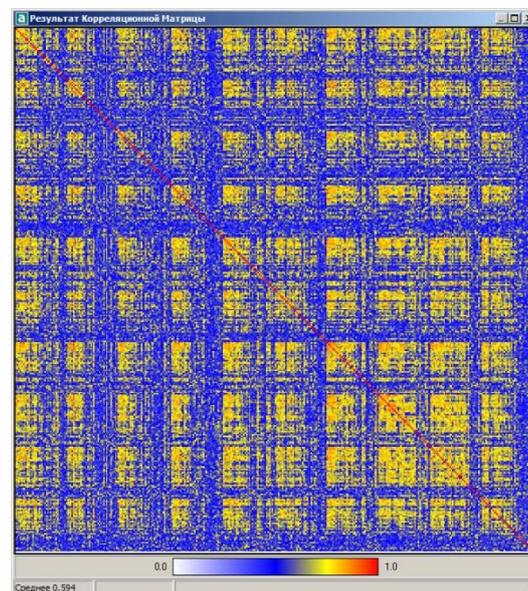
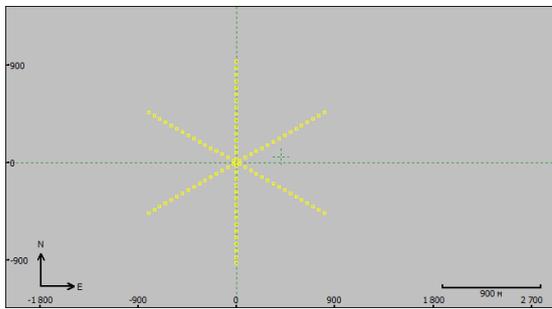
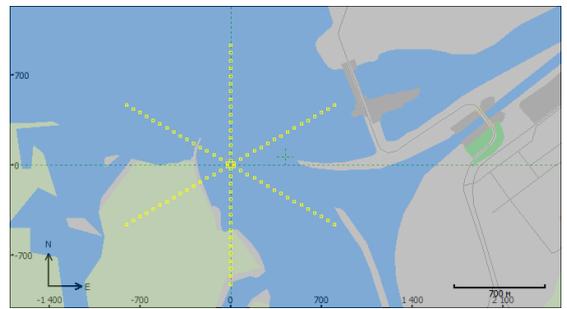


Рис. 3.7. Корреляционная матрица

На рис.3.8. представлены варианты отображения приемной апертуры на различных картах-основах, а на рис. 3.9 представлено окно сеточных вычислений.



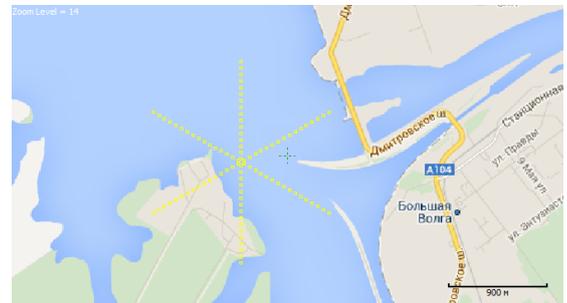
а) Без слоев карт



б) Векторная карта



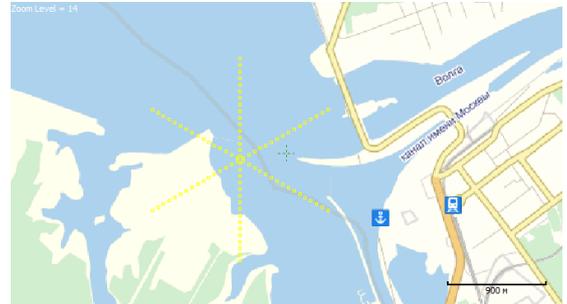
г) Google спутник



д) Google схема



е) Yandex спутник



ж) Yandex народная

Рис. 3.8. Варианты карт-основ

Скриншот интерфейса ПОСИГС. В центре экрана находится панель «Сетка» с параметрами: X: 55540.7266, Y: 766080.375, Z: -2894.2366, шаг XY: 30.00 м, шаг Z: 30.00 м. В правой части экрана отображены тепловые карты с результатами расчетов по сетке. В нижней части экрана виден график средних и максимальных значений МСЗ.

Окно задания параметров «Сетки»

Текущие результаты расчета по «сетке»

№	Амп.	Тип	Аз.	СШ
1	0.5	Сдвиг	39	0
2	0.7	Сдвиг	42	0
3	0.6	Сдвиг	42	0
4	2.3	Взрыв	0	0
5	0.5	Сдвиг	40	0
6	2.2	Взрыв	0	0
7	2.1	Взрыв	0	0
8	1.3	Взрыв	0	0

Рис. 3.9. Окно сеточных вычислений

### Выводы по Главе 3

1. «Пакет обработки сейсмо- и гидроакустических сигналов - «ПОСиГС» обеспечивает возможность ввода, регистрации и обработки информации от многоканальных сейсмоакустических комплексов и реализует основные функциональные процедуры, необходимые для решения морских геофизических задач, в том числе:

- частотно-временной обработки многоканальной информации, включая спектральный и корреляционный анализ;
- оценки параметров передаточной характеристики дисперсионной среды распространения сейсмоакустических и гидроакустических сигналов, в том числе зоны малых скоростей и мелководной шельфовой зоны;
- оценки координат приемных элементов стационарных сейсмоакустических антенн на базе дальномерного и разностно-дальномерного методов позиционирования, с использованием методов линейной и нелинейной алгебры;
- оценки текущих координат источника излучения (динамического позиционирования) с использованием собственной приемной системы и реализации функции формирования синтезированной излучающей апертуры;
- пространственной фильтрации сейсмоакустических полей на базе когерентной обработки сигналов пространственно-распределенной системы приемных датчиков и синтезированной излучающей апертуры, обеспечивающей реализацию в морских условиях таких геофизических методов как СЛБО и СЛОЭ.

2. Защищаемый пакет программ обработки сейсмических и гидроакустических сигналов («ПОСиГС») обладает всем необходимым набором процедур сбора, регистрации и обработки информации во временной, частотной и пространственной области и обеспечивает реализацию защищаемого способа морской сейсморазведки.

## Глава 4. Экспериментальные исследования

### 4.1. Отработка технологии позиционирования приемной системы и согласованной со средой обработки информации

#### 4.1.1. Позиционирование приемной системы<sup>4</sup>

Рассмотренные в главе 2 методы позиционирования апробированы в процессе пространственной калибровки выносных частей стационарного гидроакустического комплекса освещения подводной обстановки.

Основу подводной части комплекса составляли протяженные донные гидроакустические многоэлементные антенные решетки, соединенные с береговым постом цифровой кабельной линией связи.

В качестве источника излучения для оценки пространственного положения приемных элементов этих донных гидроакустических антенных решеток использовался пневматический излучатель.

Излучение калибровочных сигналов осуществлялось из определенных, наперед заданных, точек пространства с фиксацией их координат, включая географические координаты судна и заглубление источника в момент излучения.

Задание координат точек излучения осуществлялось таким образом, чтобы обеспечить оптимальное их расположение с точки зрения минимизации погрешности при решении навигационной задачи для всех калибруемых антенн, т.е. обеспечения для всех них максимальной меры обусловленности систем навигационных уравнений.

<sup>4</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Колигаев С.О.**, Колигаев О.А. Некоторые особенности позиционирования объектов в гидроакустических и сейсмоакустических информационных системах. Геоинформатика. - 2010.- №4. С. 23-27.
2. Колигаев О.А., **Колигаев С.О.** О расстановке датчиков в системе позиционирования // Депонировано ФГУП ВИМИ – Федерального информационно-аналитического центра оборонной промышленности. Сборник рефератов НИОКР №1. Серия ИМ. - 2007г.
3. **Колигаев С.О.**, Колигаев О.А. О позиционировании пространственно-развитых приемных выносных частей и излучателя в процессе синтезирования излучающей апертуры в морских системах сейсмолокации // Тезисы докладов IX Международной научно-технической конференции «Освоение ресурсов нефти и газа Российского шельфа: Арктика и Дальний Восток (ОМНР-2023)». М. Газпром ВНИИГАЗ. 2023. С.74.
4. Avrorin A.D., Avrorin A.V., Belolapnikov I.A., Kebkal K.G., Kebkal O.G., **Koligaev S.O.** Baikal-GVD collaboration, A positioning system for Baikal-GVD, 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019), 2019, Madison, WI, U.S.A.

На рис. 4.1 представлено расположение реперных точек излучения, используемых для пространственной калибровки антенны предположительно находящейся в месте, обозначенном крестиком.

Для «абсолютной калибровки» антенн или привязки антенны к общей системе координат осуществлялась оценка координат одного из приемных элементов антенны в этой системе координат с использованием дальномерного метода позиционирования. Для оценки собственно конфигурации антенны оценивались относительные координаты приемников с использованием разностно-дальномерного метода позиционирования.

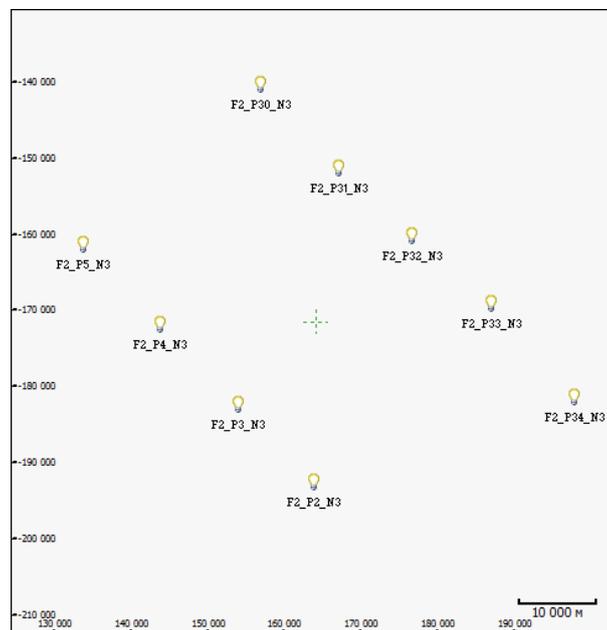
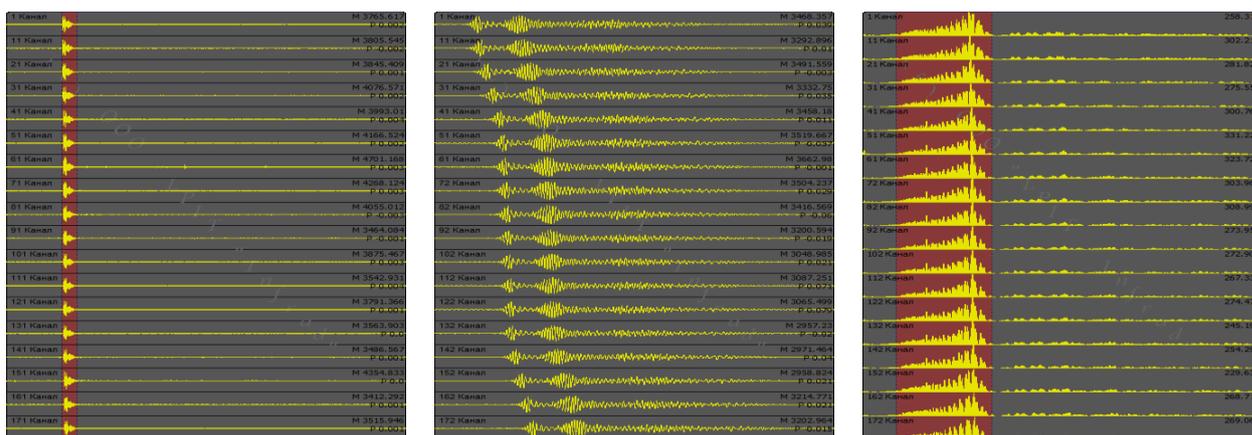


Рис. 4.1. Конфигурация реперных точек излучения.

На рисунке 4.2а представлены временные реализации сигнала импульсного источника излучения на элементах антенны, где красным цветом выделена область, используемая для обработки. На Рис.4.2 б представлены указанные выборки сигналов, спектры которых представлены на рис. 4.2 в.

На рис. 4.2в красным цветом выделена рабочая полоса 10-40Гц максимального уровня излучения пневмопушки, используемая для расчета корреляционных функций и оценки временных задержек сигналов. Взаимные корреляционные функции и корреляционная матрица сигналов представлены на рис. 4.3.



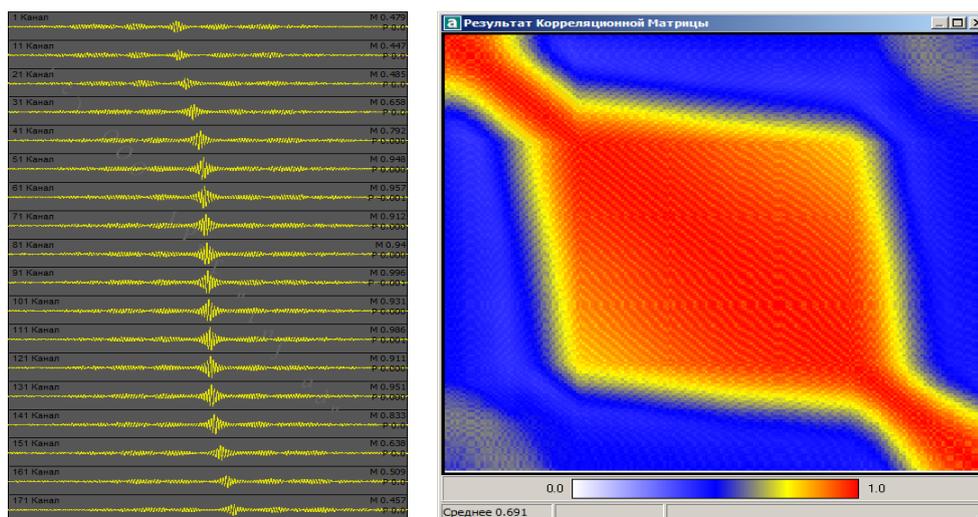
а)

б)

в)

Рис. 4.2. Временные реализации (а), синхронные выборки (б) и спектры сигналов (в)

Ромбовидность корреляционной матрицы обусловлена тем, что в центре антенны приемники расположены на более близком расстоянии друг от друга.

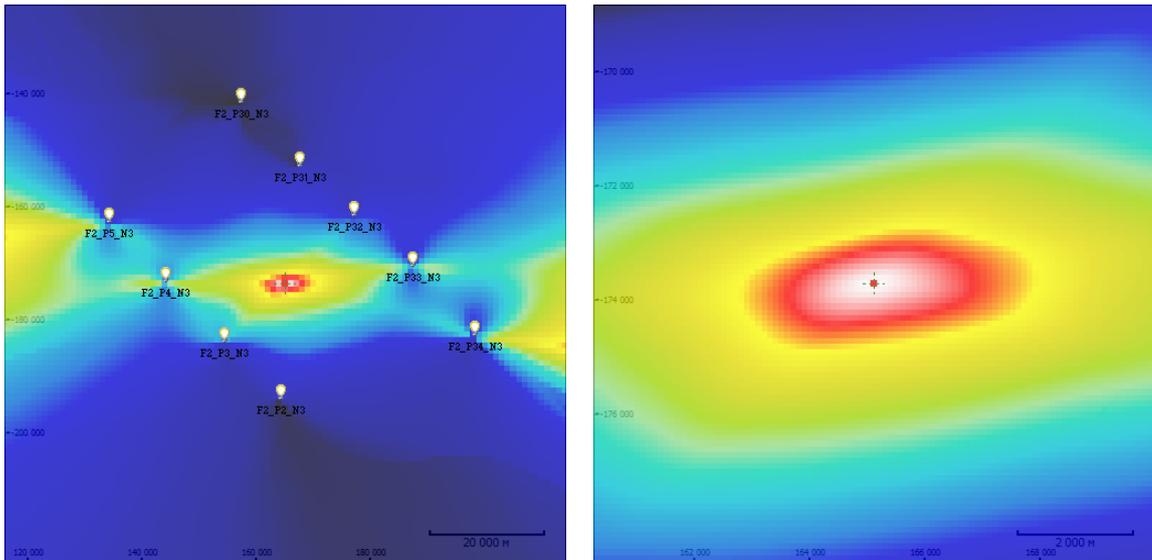


а)

б)

Рис. 4.3. Корреляционные функции (а) и корреляционная матрица (б).

В качестве опорного используется средний приемник антенны, координаты которого и определяются в процессе «абсолютной калибровки» антенны. На рис. 4.4 представлены фрагменты итерационной процедуры определения абсолютных координат опорного приемника.



а)

б)

Область 100x100 км с шагом 1 км. Область 10x10 км с шагом 100м  
Рис. 4.4 Результаты расчета абсолютных координат опорного канала.

На рис. 4.5 представлена предварительная конфигурация антенной решетки, полученная с использованием временных задержек, полученных в указанном диапазоне частот.

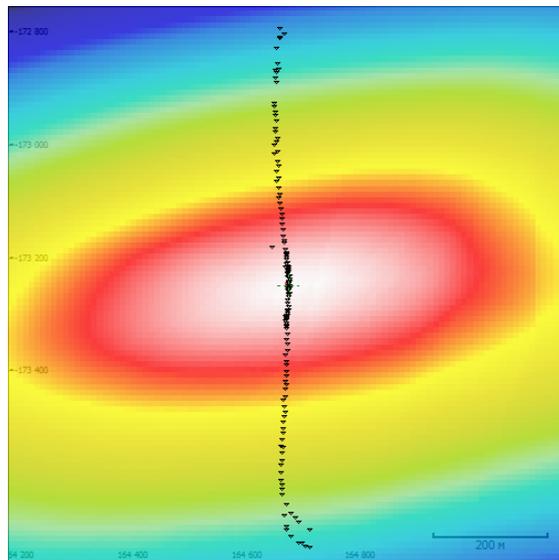


Рис. 4.5 Результат расчета относительных координат.

Теперь по полученным результатам предварительного позиционирования приемных элементов антенны можно произвести оценку параметров передаточной характеристики среды распространения, используя которую повторить процедуру позиционирования.

#### 4.1.2. Согласование со средой при позиционировании приемной системы<sup>5</sup>

Разделение нормальных волн за счет различия их групповых скоростей осуществляется во временной области путем фиксации времен прихода отдельных нормальных волн на приемный элемент по временной развертке частотного спектра сигнала импульсного источника (сонограмме). При этом, для разделения нормальных волн и получения дисперсионных характеристик их групповых скоростей достаточно наличия одного импульсного излучателя и одного приемника.

Представим акустическое поле каждой спектральной составляющей импульсного источника сигнала в виде суммы нормальных волн:

$$P(r,t) = \sum_m A_m \cdot \exp\{j(\omega t - \alpha_m r)\} \cdot S(t - r/v_m) \cdot \exp\{-\delta_m r\}. \quad (4.1)$$

Огибающая сигнала  $S(t)$  распространяется с групповой скоростью  $v_m$  нормальных волн. Отличие в групповых скоростях  $v_m$  нормальных волн приводит к тому, что огибающая импульсного сигнала, распространяющаяся по различным модам доходит до точки приема в различные моменты времени и при условии малости длительности простого излучаемого импульса или достаточной его сложности, возникают условия разделения нормальных волн по временам их прихода на приемный элемент. Разделение нормальных волн за счет различия их фазовых скоростей может быть осуществлено в пространственной области с использованием пространственно-развитой антенной решетки с естественной или

<sup>5</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. Астахова Н.В., Добрянский В.М., Колигаев О.А., **Колигаев С.О.**, Крайнов А.Б., Лобов Р.В., Шикалов А.А. «Способ оценки геологической структуры верхних слоев дна», патент №2503037, 27.12.2013г.
2. **Колигаев С.О.**, Колигаев О.А., «Практическое применение волновода Пекериса в качестве геофизической модели Баренцева моря», Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование «Maresedu-2020», Москва, 2020г.
3. **Колигаев С.О.**, Колигаев О.А., «Некоторые практические результаты использования волновода Пекериса при исследовании низкочастотных гидроакустических полей в Баренцевом море», Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2021), Москва, 2021г.

искусственной (синтезированной) апертурой, отклик которой на импульсный (или тональный) сигнал при использовании одномодового вектора компенсации будет содержать многомодовый пространственный спектр, содержащий  $M$  максимумов, соответствующих  $M$  нормальным волнам. Уровни максимумов соответствуют коэффициентам возбуждения нормальных волн в месте расположения источника излучения, их направления  $\theta_m$  зависят от используемого в передаточной функции среды  $H$  волнового числа  $k$ . Причем, направление ни одного из этих максимумов может не совпадать с направлением на источник излучения. Однако точное знание координат точки излучения и знание в первом приближении координат антенны и ее конфигурации (по результатам предварительной калибровки, описанным выше) дает оценку первого приближения азимутального направления  $\theta_0$  на источник излучения, по угловому рассогласованию с которым производится оценка волновых чисел

$$\alpha_m = k \cdot \frac{\sin \theta_m}{\sin \theta_0} \quad (4.2)$$

В результате итерационной процедуры, добиваясь соответствия оценок волновых чисел нормальных волн их истинным значениям, диаграмма направленности согласованной со средой антенной решетки становится состоящей из основного лепестка максимальной амплитуды и ряда дополнительных лепестков малой амплитуды, количество которых определяется числом сочетаний из  $M$  по два.

Основной лепесток диаграммы направленности ориентируется на источник сигнала, а уровень его определяется суммарной амплитудой используемых нормальных волн.

Нормальные волны в классическом спектре хорошо разделяются при условии  $L(\theta) > (5 \div 6) 2\pi / \Delta\alpha_{\min}$ , где  $L(\theta)$  – проекция антенны на точку излучения. Спектр нормальных волн определяется глубиной волновода, глубиной установки излучателя и приемников, частотой излучения. Таким образом, в результате спектрального анализа (дискретного преобразования

Фурье) пространственной реализации, состоящей из спектральных компонент временных реализаций приемных элементов антенны на частоте сигнала излучения, формируется спектр горизонтальных волновых чисел, который далее переводится в частотно-зависимую фазовую скорость

$$C_m(f) = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\alpha_m(f)}. \quad (4.3)$$

В качестве приемной антенны используем антенну, процедура пространственной калибровки которой описана выше. Глубина моря в месте установки антенны 125 м. На рис. 4.6 представлена итоговая (по результатам итерационной процедуры) конфигурация антенны и направление на точку расположения пневматического источника излучения, находящегося на расстоянии 21165 м (по навигационным данным) от антенны. Положение данной точки излучения наилучшим образом соответствует направлению бегущей волны, обеспечивающему наилучшие условия разделения нормальных волн в пространстве горизонтальных волновых чисел, проявляющемуся в процессе пространственной фильтрации сигналов с использованием антенной решетки.

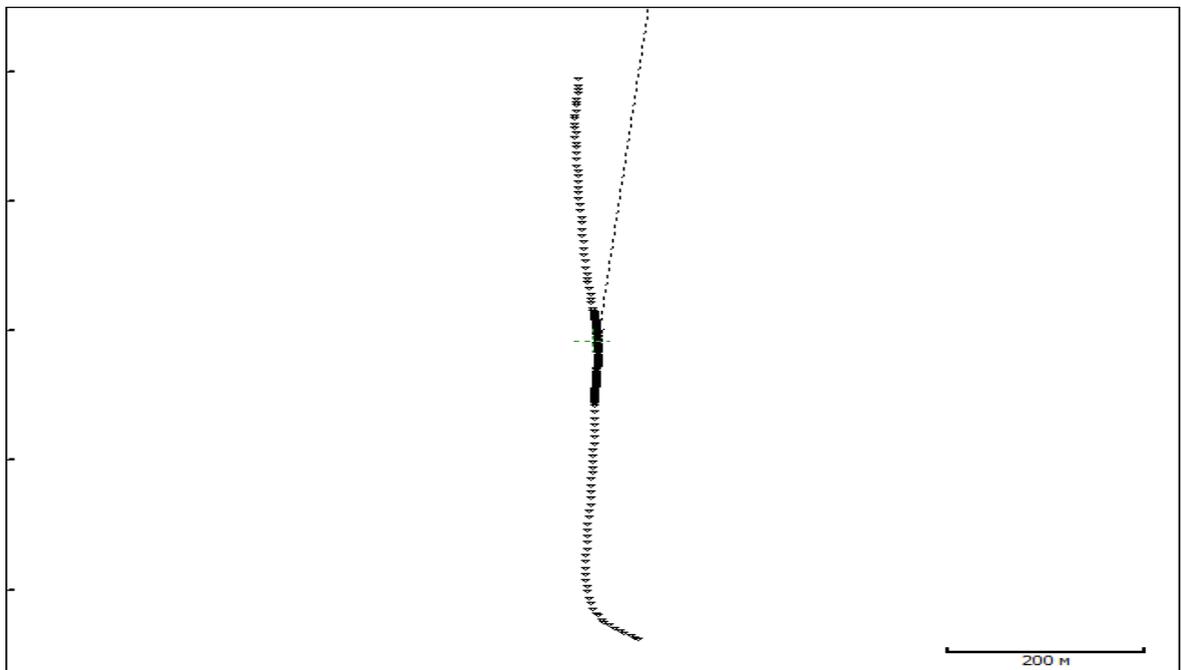


Рис. 4.6 Геометрия антенной решетки.

На рис.4.7 и 4.8 представлены дисперсионные характеристики групповой и фазовой скорости, полученные в результате анализа структуры сигнала

импульсного источника на глубине  $Z_{и}=30\text{м}$  на сонограмме отдельного приемного элемента антенны и его пространственной фильтрации на всей апертуре антенны.

Белые точки на рис. 4.7 соответствуют дисперсионным характеристикам групповых скоростей трех нормальных волн, рассчитанным по модели Пекериса.

Белыми точками на рис. 4.8 отмечены экспериментальные оценки фазовых скоростей (соответствующих максимальным значениям диаграмм направленности), а непрерывными линиями, вдоль которых они располагаются, отмечены частотные зависимости фазовых скоростей трех нормальных волн, рассчитанные по модели Пекериса.

Оценки параметров модели при этом составили значения:

- глубина моря  $H=125\text{м}$ ;
- скорость в грунте  $C_2=1860\text{ м/с}$ ;
- плотность грунта  $\rho_2=2.1$ .

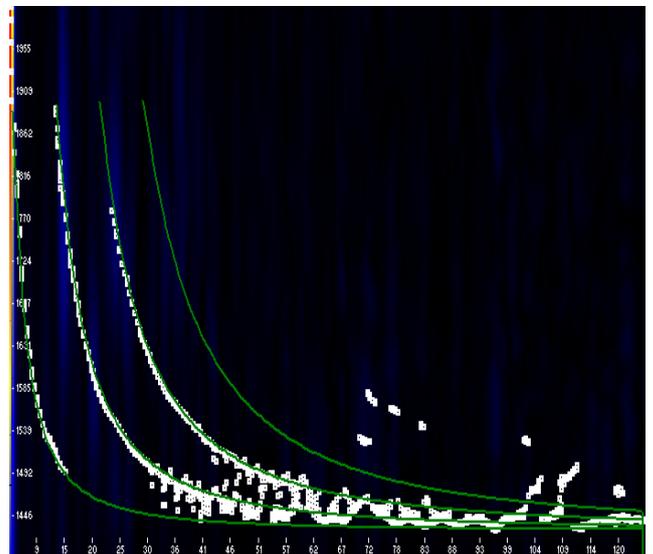
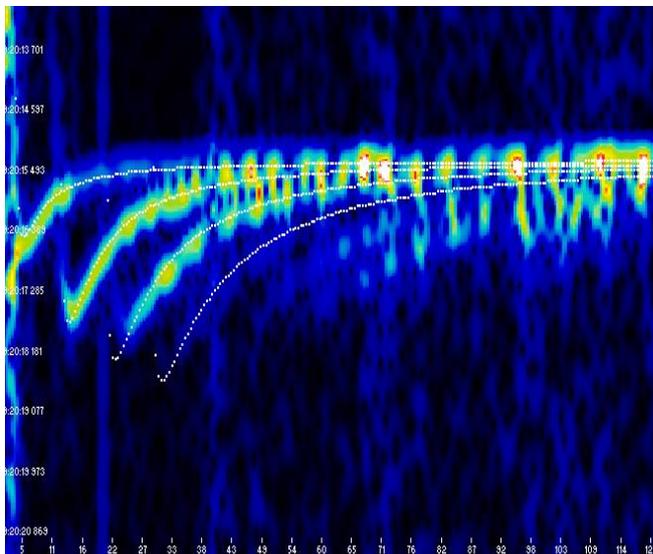


Рис.4.7 Дисперсионная характеристика групповой скорости

Рис.4.8 Дисперсионная характеристика фазовой скорости

Анализ дисперсионных кривых (Рис.4.7 и Рис.4.8) показывает наличие трехмодового распространения в волноводе с критическими частотами примерно,  $f_{2кр}=(12-13)\text{ Гц}$  и  $f_{3кр}=(22-23)\text{ Гц}$ .

На рис.4.9 представлены дисперсионные характеристики групповой

и фазовой скорости, полученные в результате анализа структуры сигнала импульсного источника на глубине  $Z_{и}=50\text{м}$ .

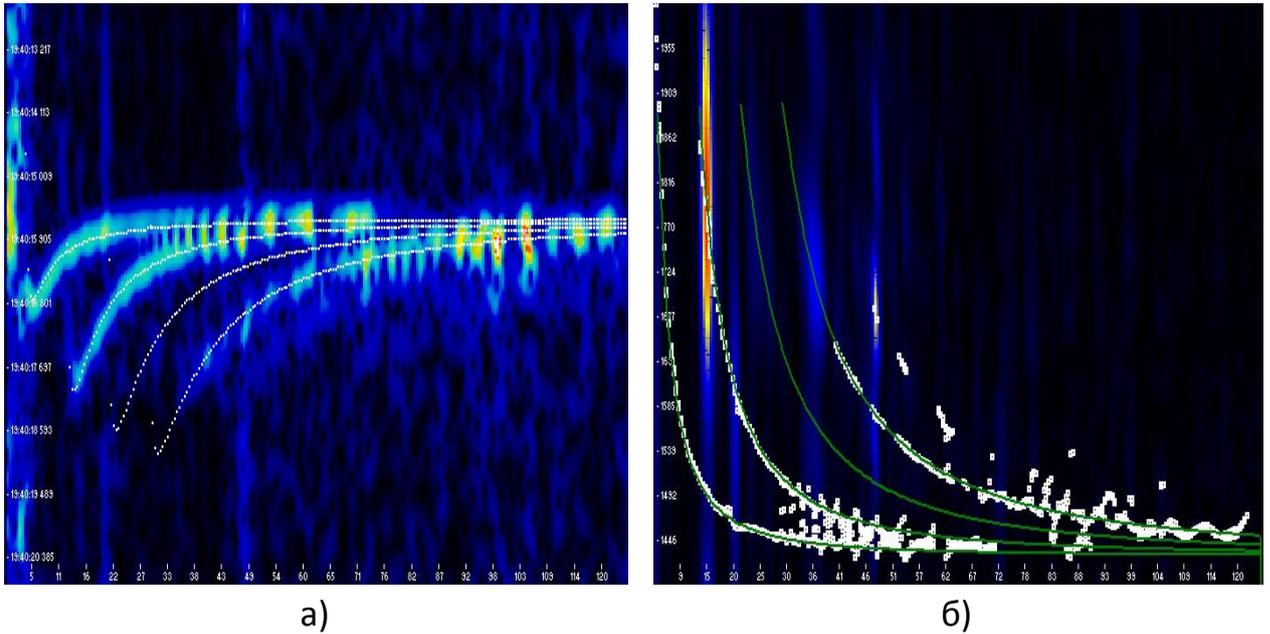


Рис.4.9 Дисперсионные характеристики групповой (а) и фазовой (б) скорости

На дисперсионных характеристиках отчетливо видно отсутствие третьей моды при явном присутствии четвертой и даже пятой моды. Отсутствие третьей моды в сигнале, источник излучения которого помещен на глубину 50м, объясняется тем обстоятельством, что именно на этой глубине собственная функция третьей моды переходит через ноль (рис. 4.10).

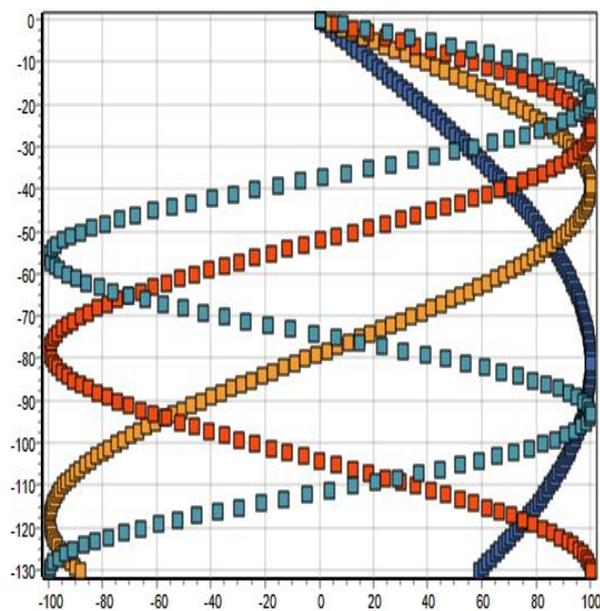


Рис.4.10 Собственные функции модели волновода.

Одновременно следует отметить возникновение четвертой моды, отсутствующей по той же причине при излучении сигнала с глубины 30м.

На Рис. 4.11 представлен частотно-скоростной разрез, полученный в результате пространственной фильтрации уже непрерывного сигнала, а именно, собственных шумов судна-носителя излучателя. Явно выделяемый сигнал дискретной составляющей ( $f_d=15-20\text{Гц}$ ) собственных шумов однозначно ложится на ранее полученную (оцененную экспериментально и рассчитанную по модели) дисперсионную кривую второй моды с фазовой скоростью  $C_\phi=1620\text{м/с}$ .

На частоте данной дискретной составляющей существует только две моды (критическая частота третьей моды несколько выше), причем, учитывая, что источник шумоизлучения находится в данном случае на глубине порядка (5-6) м, то превалирование второй моды вполне объяснимо.

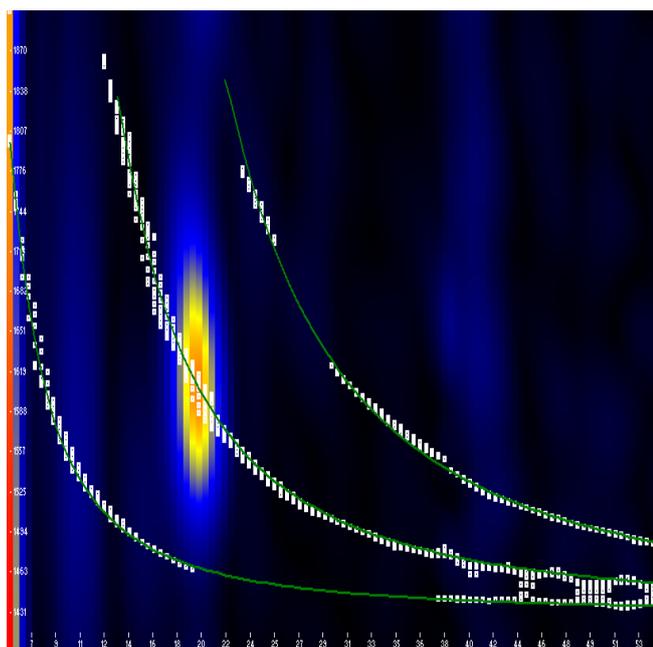
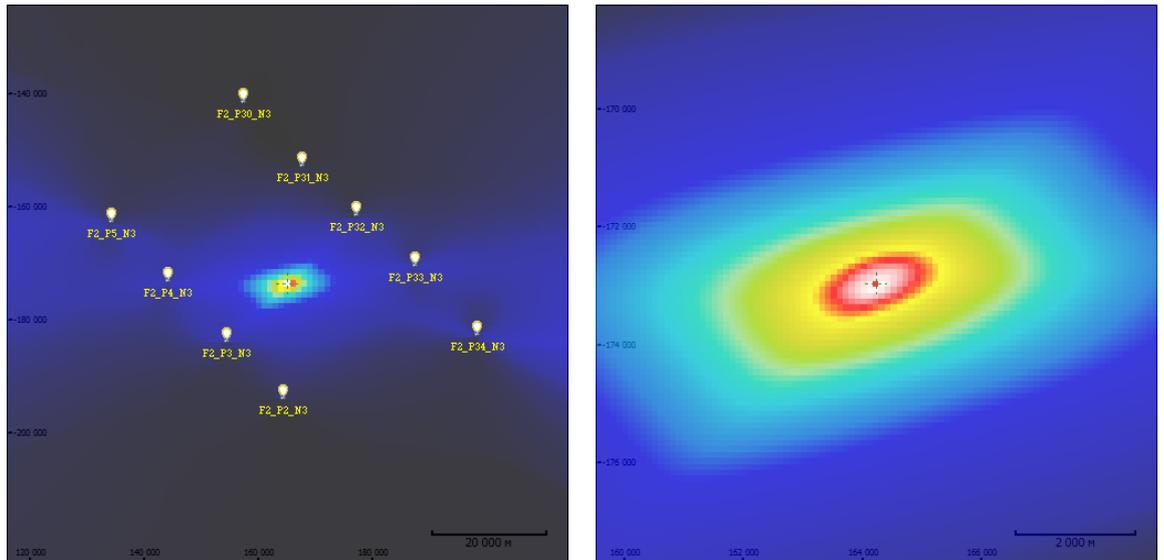


Рис.4.11 Дисперсионный анализ непрерывного сигнала.

Наличие частотной зависимости скорости распространения приводит к существенному затягиванию во времени сигналов на приемных элементах антенны (рис. 4.12а и 4.12в). Однако введение в спектральные составляющие сигналов на приемных элементах компенсации скорости распространения с последующим переходом во временную область приводит к существенному сжатию сигналов, что хорошо видно на рис. 4.12б и 4.12г.





Область 100x100 км с шагом 1 км. Область 10x10 км с шагом 100м

Рис. 4.14. Результат итоговой итерации (согласованная обработка)

Компенсация дисперсии скорости распространения приводит к повышению среднего уровня корреляции сигналов на приемных элементах антенны. в диапазоне частот (5-12) Гц с 0.91 до 0.97 и с 0.8 до 0.88 в диапазоне частот (13-30) Гц, что продемонстрировано на рис. 4.15.

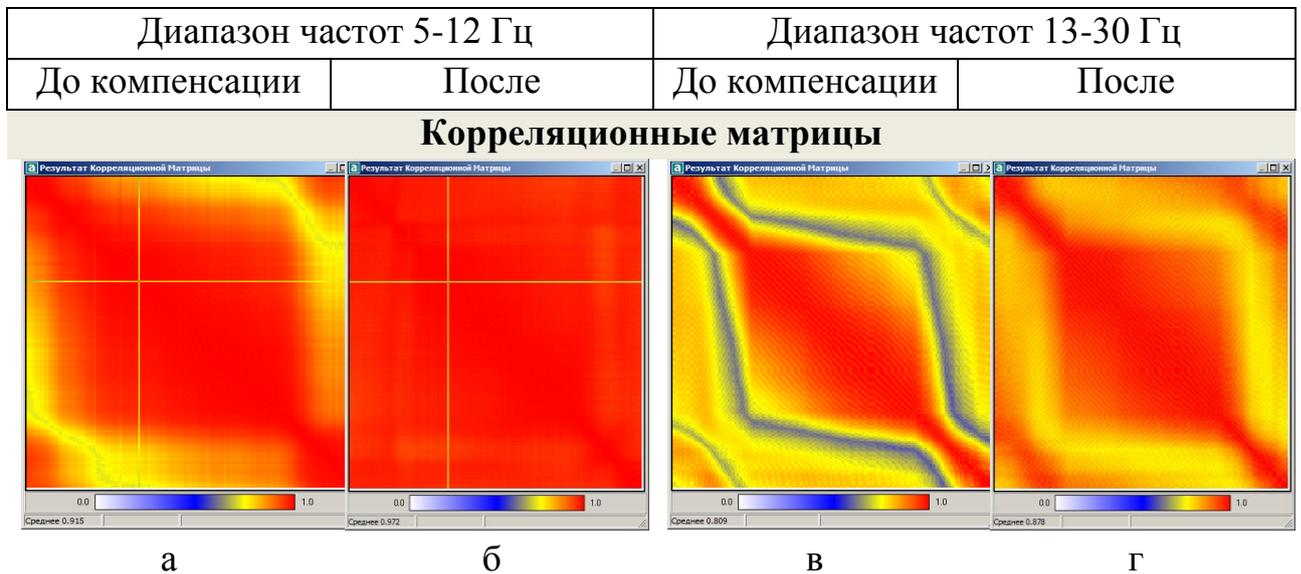


Рис.4.15 Повышение уровня пространственной корреляции

Повышение уровня корреляции сигналов обеспечивает повышение точности оценок относительных временных задержек сигнала между каналами. Это, в свою очередь, приводит к повышению точности оценки и относительных координат приемных элементов (рис. 4.16.).

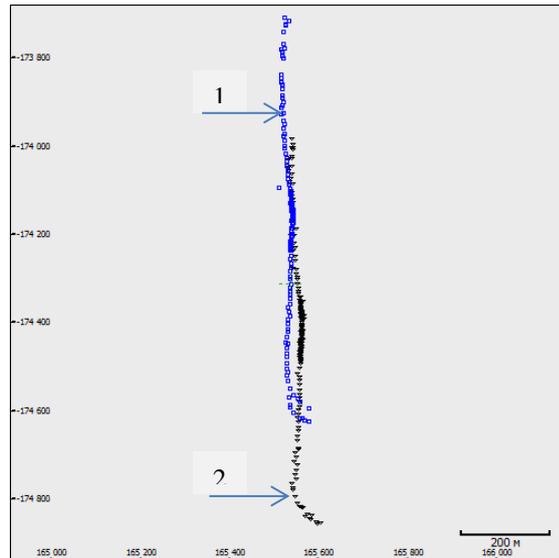


Рис. 4.16. Исходная (1) и итоговая (2) конфигурации антенны

На рис. 4.16. синим цветом представлена конфигурация антенны, полученная по результатам первой итерации расчета относительных координат приемных элементов без учета модели среды распространения (до ее получения), черным цветом – итоговая конфигурация антенны с использованием полученной модели среды распространения.

Критерием качества пространственной калибровки приемной антенны может являться коэффициент усиления антенны, достигаемый в процессе формирования диаграммы направленности, а так же точность оценки направления на источник излучения.

На рис. 4.17 представлены пространственные отклики антенны на сигналы двух источников излучения, находящихся в продольном и поперечном (траверсном) относительно антенны направлениях соответственно, характеризующие качество оценки абсолютных и относительных координат приемных элементов.

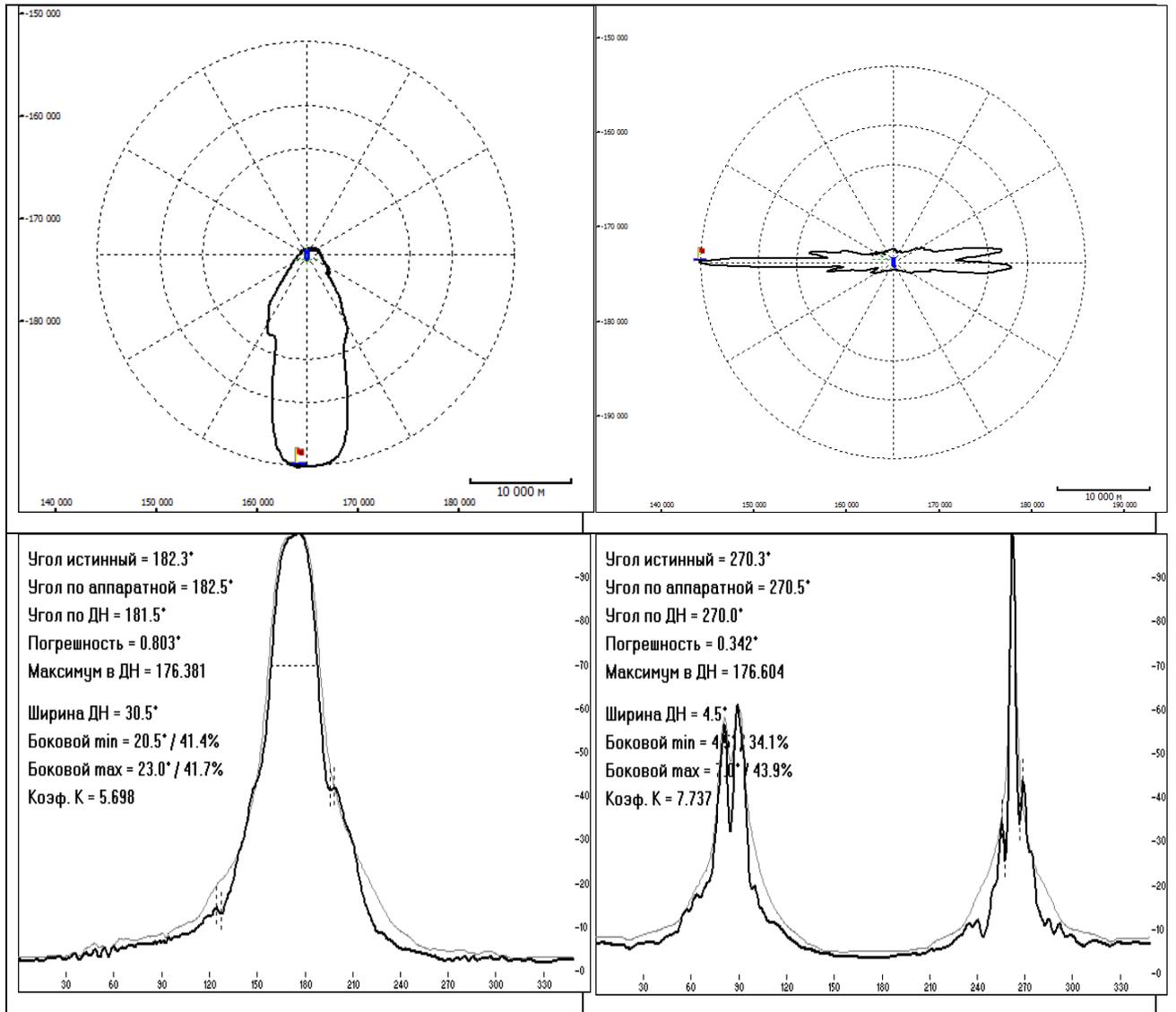


Рис. 4.17. Пространственные отклики антенны.

Погрешность оценки углового направления составила  $0.8^{\circ}$  и  $0.34^{\circ}$ , а коэффициент усиления антенны составил более 176 в обоих направлениях, что при наличии 180 приемников в антенне практически соответствует максимально достижимому значению.

#### 4.1.3. Оценка дальности в дисперсионной среде

Одним из существенно-полезных применений многомодового характера распространения сигнала является принципиальная возможность оценки расстояния до источника излучения исключительно по результатам анализа частотно-временных параметров принятого сигнала.

При достаточных уровнях сигнала, в частности, обеспечиваемых пневматическим источником излучения, дисперсионный анализ групповой

скорости не требует необходимости использования пространственного накопления (антенной решетки) и вполне может быть осуществлен с использованием одиночного приемного элемента.

На рис.4.18-4.20 слева представлены сонограммы сигнала пневматического источника, находящегося на разных расстояниях от приемника. Белыми пунктирными линиями показаны дисперсионные кривые групповой скорости первых трех мод, соответствующие расстоянию до точек излучения, рассчитанных в соответствии с математической моделью, параметры которой получены в результате пространственной фильтрации мод.

Анализ данных рисунков показывает весьма хорошее соответствие математической модели реальным данным в достаточно широких пространственных масштабах от 15 до 45 км.

На этих же рисунках справа представлены результаты локализации сигнала по расчетной модельной передаточной характеристике. Во всех случаях сигнал локализуется именно на той дальности, на которой был установлен источник излучения. Более того, использование тех же параметров модели с использованием только иной реальной глубины установки другой аналогичной антенны, установленной на глубине 160м в 50-ти км, также дали хорошее соответствие реальным данным рис 4.21.

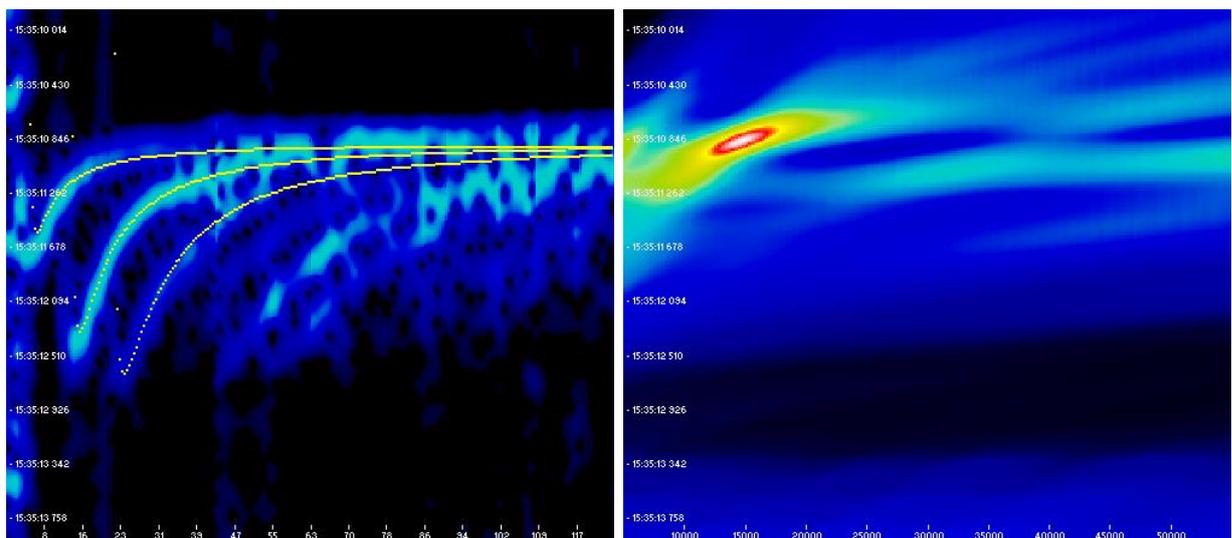
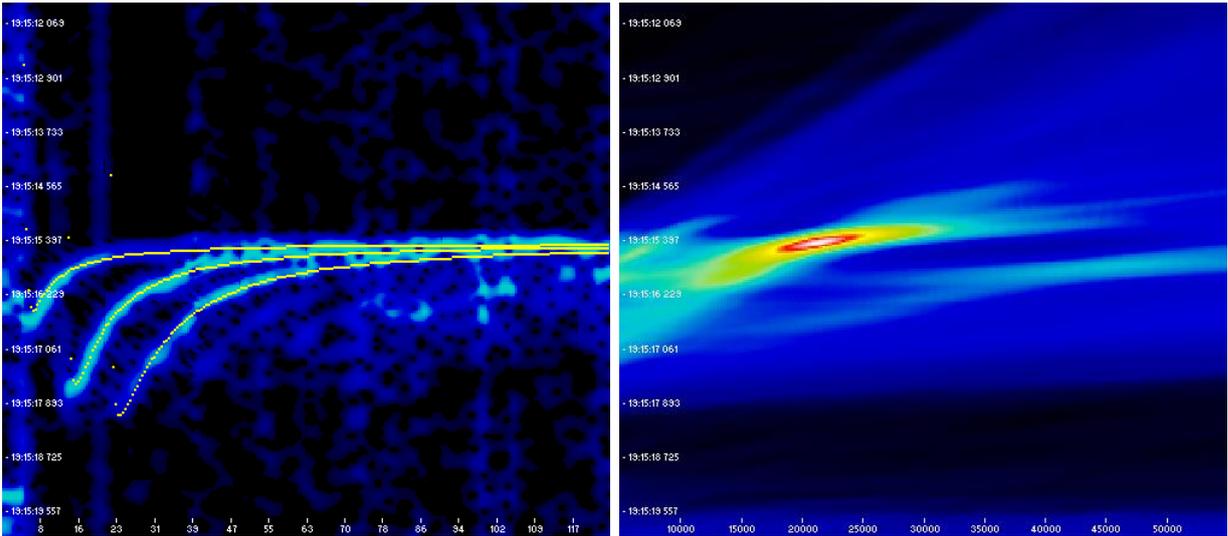
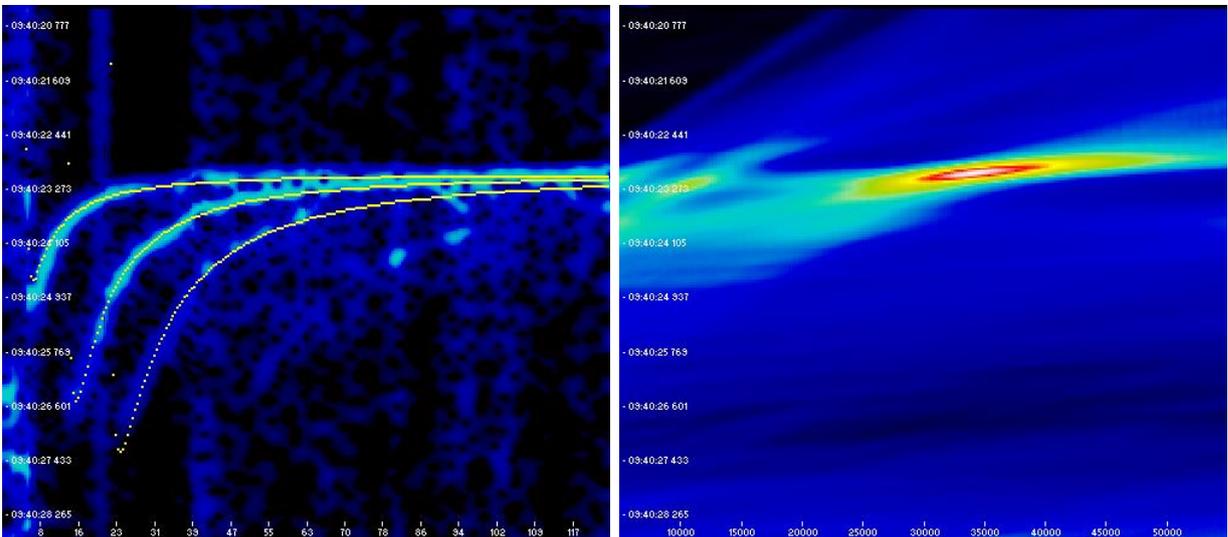
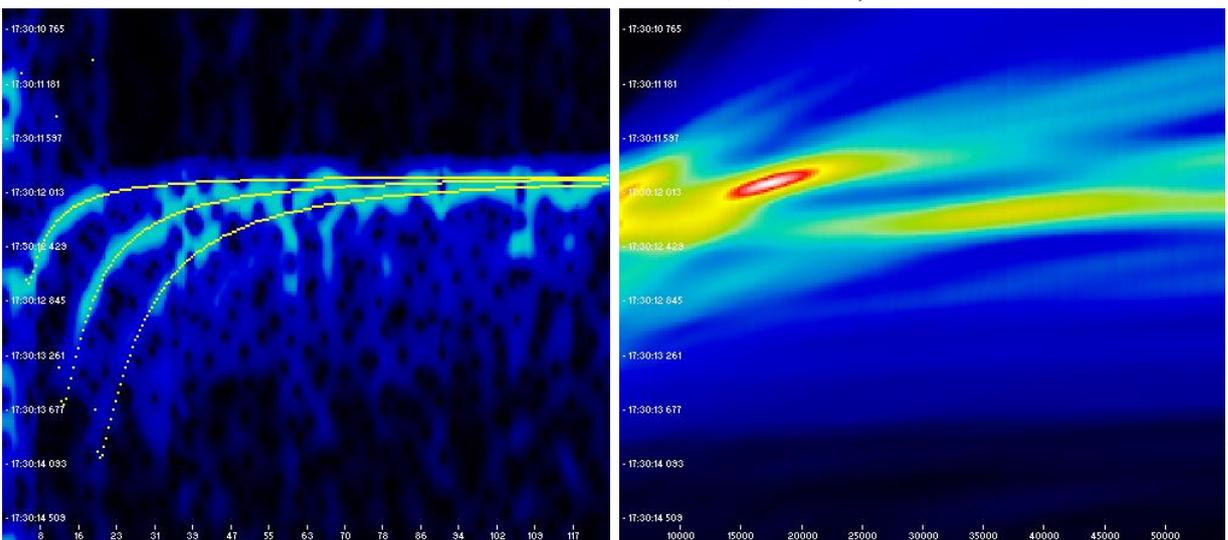


Рис.4.18 Дисперсия групповой скорости и оценка дальности  
 $L=14661\text{m}$  ( $H=125\text{m}$ )

Рис.4.19  $L=21165\text{m}$  ( $H=125\text{m}$ )Рис.4.20  $L=32720\text{m}$  ( $H=125\text{m}$ )Рис. 4.21 Дисперсия групповой скорости и оценка дальности  
 $L=17200\text{m}$  ( $H=160\text{m}$ )

Полученные результаты показывают реальную возможность построения математической геоакустической модели Баренцева моря, наиболее важного в стратегическом плане, как с точки зрения промышленного освоения запасов углеводородного сырья, так и с точки зрения, обеспечения боевой эффективности систем освещения и мониторинга подводной обстановки в интересах Военно-Морского Флота России.

#### **4.1.4. Согласованная со средой пространственная фильтрация сигналов поверхностных волн**

Поверхностные волны в большинстве приложений прикладной геофизики являются помехой и борьба с ними ведется на уровне, как конструктивных решений выносных частей, так программно-алгоритмических решений информационно-вычислительных комплексов соответственно [87].

Однако существует ряд практических приложений, в которых поверхностные волны являются носителями информации и используются как полезные в сейсмологии [93], в том числе в Международной системе мониторинга Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний [42-45].

Одним из таких приложений являются сейсмоакустические системы охранной сигнализации [88].

Вероятностные характеристики обнаружения сигнала, дальность и точность оценки координат источника его возбуждения, являющиеся основными тактико-техническими характеристиками такого рода систем, определяются свойствами полезного сигнала и способностью совокупности средств сбора и обработки информации эти свойства использовать. Одним из основных свойств полезного сигнала, от которых зависят данные характеристики, являются уровень и интервал пространственной корреляции, определяющий размеры апертуры, которую можно использовать для синфазной обработки.

При этом, желательно использовать наиболее мощную и распространяющуюся с минимальными потерями часть спектра возбуждения волн, лежащую в нижнем частотном диапазоне.

Однако, именно в этой части спектра характерна максимальная дисперсия скорости распространения поверхностных волн, искажающая вид сигнала в процессе распространения и, соответственно, уменьшающая интервал их пространственной корреляции.

Восстановление формы сигнала возможно при наличии дисперсионной (частотно-зависимой) характеристики фазовой скорости его распространения.

Для оценки частотной зависимости фазовой скорости использовались 24-х канальные сейсмограммы, полученные с помощью малоглубинной инженерной сейсмостанции SGD-SEL при линейной расстановке сейсмодатчиков с интервалом 2.5 метра. Расстояние от крайнего датчика до пункта возбуждения составляло 60м. Схема расстановки и расположение пункта возбуждения изображена на Рис.4.22.

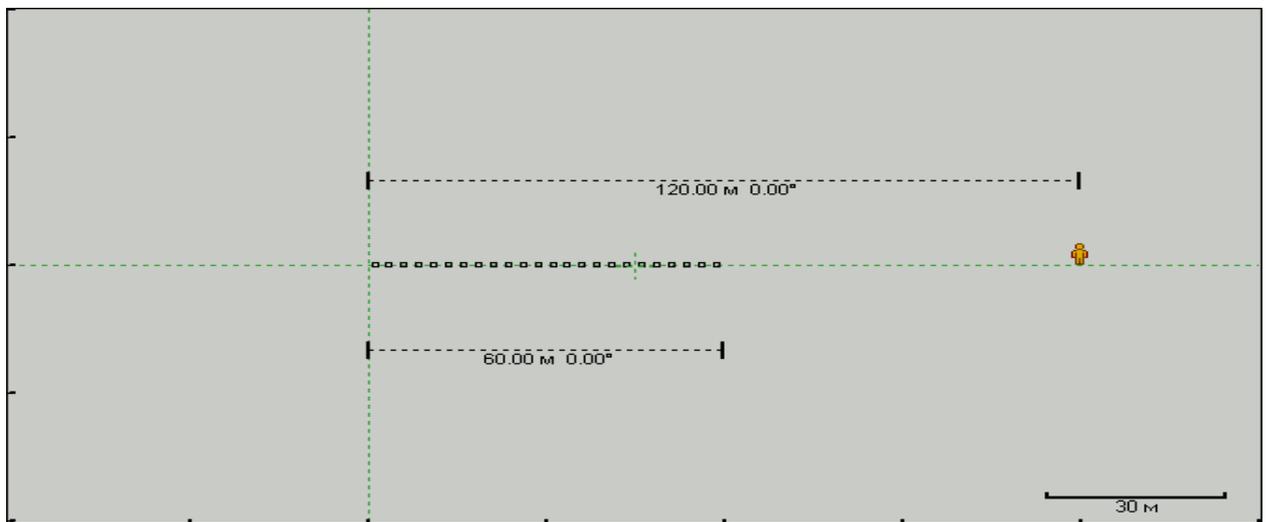


Рис. 4.22. Схема расстановки датчиков и расположение пункта возбуждения.

Временные реализации сигналов на приемных элементах и их спектры представлены на Рис.4.23. и Рис.4.24. соответственно.

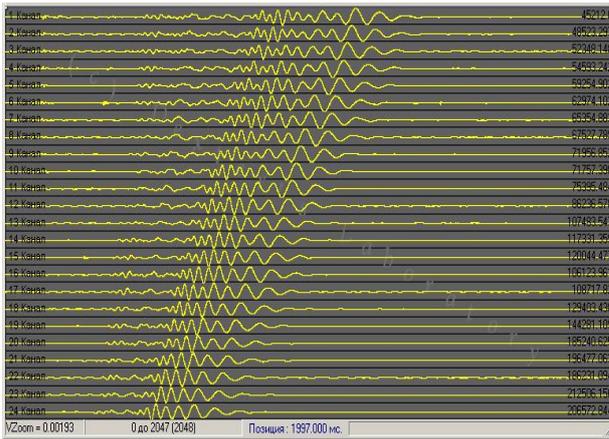


Рис. 4.23. Временные реализации.

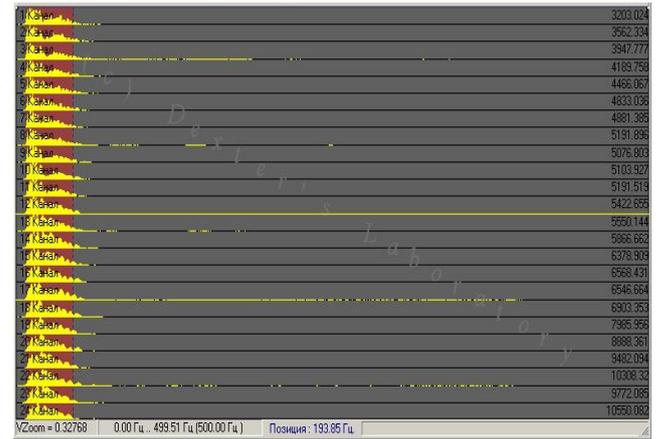


Рис.4.24. Спектры.

На рис.4.23. шкала времени (по горизонтали) от 0 до 2 сек, а шкала амплитуд (по вертикали) нормирована на максимум каждого канала. На рис.4.24. шкала частот (по горизонтали) от 0 до 500 Гц, шкала амплитуд (по вертикали) нормирована на максимум каждого канала, а красным выделен рабочий диапазон частот от 6 до 45 Гц.

Датчики сейсмостанции представляются как элементы фазируемой антенной решетки, а оценка фазовой скорости осуществляется для каждой спектральной компоненты в диапазоне частот спектра сигнала путем максимизации результирующего отклика антенны сфокусированной на точку его возбуждения.

Для каждой спектральной компоненты рассчитывается коэффициент усиления антенны, сфокусированной в точку излучения, и максимум которого ищется путем вариации скорости распространения сигнала:

$$КУ(c_\omega) = \text{Max} \left\{ \frac{\sum_n |S_n(\omega) \times H^*(\omega, \vec{r}_n, c)|}{\frac{1}{N} \sum_n |S_n(\omega)|} \right\}, \quad (4.4)$$

где  $S_n(\omega)$  - комплексная спектральная компонента сигнала n-го приемного элемента в апертуре на частоте  $\omega$ ,

$N$  – количество приемников в антенне ( $n=1, N$ );

$\vec{r}_n$  - радиус-вектор от точки фокусировки до n-го приемника,

$H(\omega, r_n, c)$  - передаточная функция среды распространения сигнала от точки возбуждения до n-го приемника.

Полоса частот выбирается настолько узкой, чтобы в пределах неё можно было использовать предположение о постоянстве скорости распространения. В данном случае использовалась полоса в 1 Гц.

Передаточная функция в этом случае имеет вид (в пренебрежении затуханием)

$$H(\omega, \vec{r}_n, c_\omega) = \exp[-j\chi r] = \exp\left[-j\omega \frac{r}{c_\omega}\right] \quad (4.5)$$

В результате находится такая скорость  $c_\omega$ , при которой коэффициент усиления на данной частоте  $\omega$  будет максимальным. При этом в случае дисперсионной среды на каждой частоте эти скорости разные и при использовании одного значения скорости применительно ко всему диапазону частот приводит к снижению коэффициента усиления, т.е. к неполному использованию потенциала антенны.

На рис. 4.25 и 4.26 представлены зависимости коэффициента усиления антенны от скорости в полосе частот 16-17 Герц и 6-45 Герц соответственно.

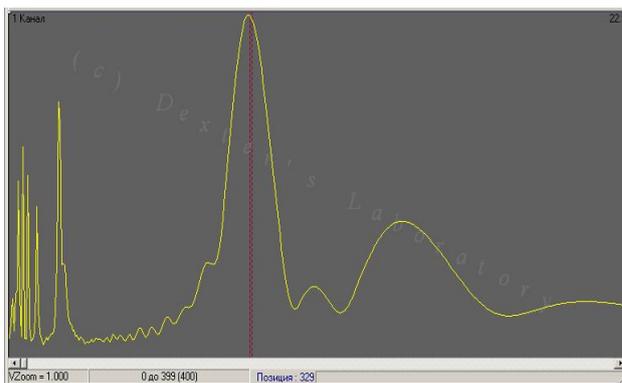


Рис. 4.25. КУ( $c_\omega$ ) (16-17 Герц).

Рис. 4.26. КУ( $c_\omega$ ) (6-45 Гц.).

Шкала скорости (по горизонтали) от 0 до 400 м\с.

Максимальный коэффициент усиления для узкой полосы частот  $KU_{\max} = 22.9$  соответствует скорости  $C = 156$  м\с. Максимальный же коэффициент усиления, при использовании передаточной функции с

постоянной скоростью распространения в широком диапазоне частот, составил  $KU_{\max} = 16.1$  при  $C = 141$  м/с.

На Рис.4.27 представлены результаты расчетов коэффициента усиления антенны, наглядно демонстрирующие частотную зависимость фазовой скорости. Шкала частот (по горизонтали) от 6 до 60 Гц, шкала скоростей (по вертикали) от 100 до 400 м/с. Аналитическая кривая  $C(f)$  дисперсионной зависимости фазовой скорости представлена белым цветом.

В качестве аналитического выражения зависимости скорости от частоты выбран степенной закон:

$$C(f) = A \cdot (f - f_0)^{-k} + C_0 \quad (4.6)$$

Результаты подбора коэффициентов  $A$ ,  $f_0$ ,  $k$  и  $C_0$  приведены на Рис. 4.27 в виде белой линии.

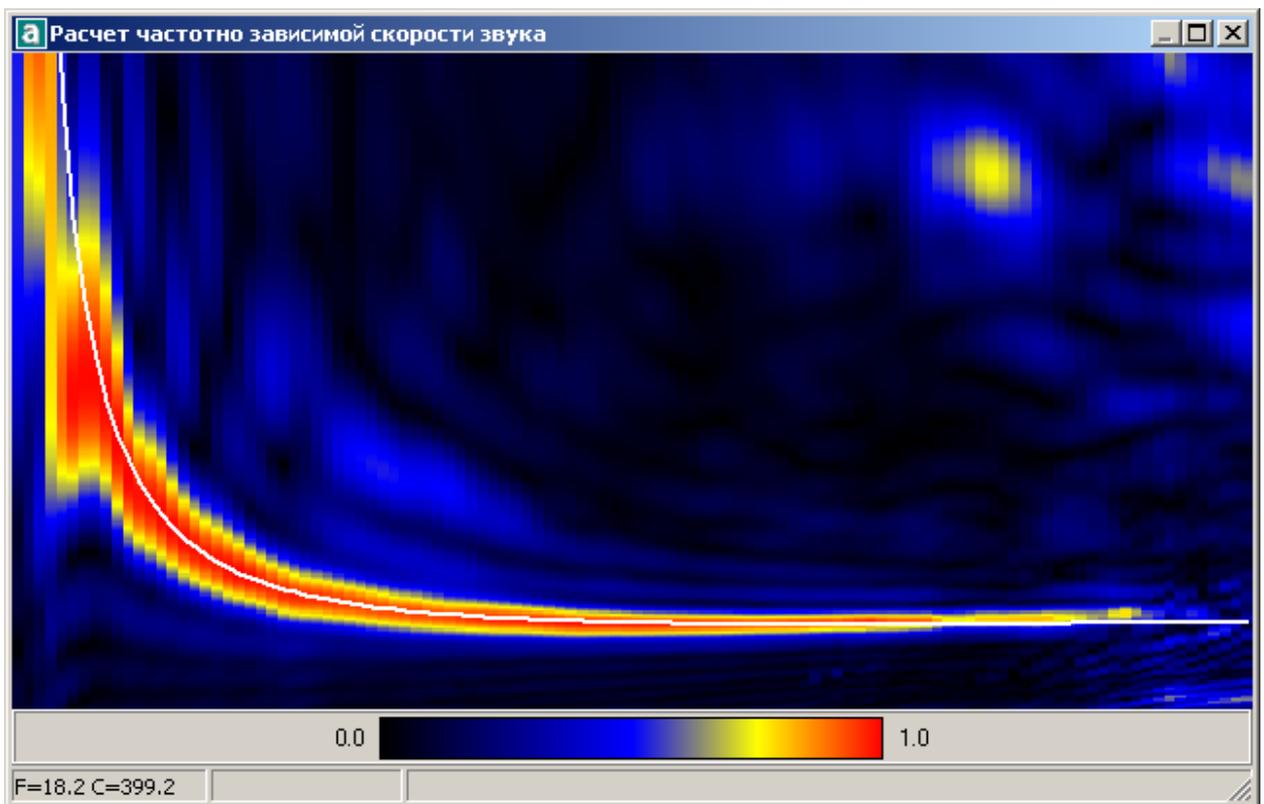


Рис.4.27. Зависимость фазовой скорости от частоты  $C(f)$ .

Полученные методом наименьших квадратов значения коэффициентов аналитического выражения  $A = 1200$ ,  $f_0 = 5$ ,  $k = -1.5$ ,  $C_0 = 125$  использовались в дальнейшем при расчете передаточной функции среды

распространения для пространственной фильтрации и при корректировке спектров сигналов на приемных элементах антенны.

Для оценки эффективности использования частотно зависимой скорости будем сравнивать 2 параметра. Это коэффициент усиления сигнала при фокусировке в точку излучения и среднее значение корреляционной матрицы, рассчитанной по всем приемным элементам. Все расчеты производятся в диапазоне частот 6-45 Гц.

На Рис. 4.28 и Рис. 4.29 представлены результаты пространственного сканирования методом фокусировки с использованием передаточной функции среды с постоянной и частотно-зависимой скоростью распространения, из которых следует, что введение частотно зависимой скорости приводит к существенному улучшению пространственного разрешения и повышению коэффициента усиления антенны с КУ=16.1 при использовании  $C(f)=cte=141\text{ м/с}$  до КУ=22.4 при использовании  $C(f)=var$ .

Улучшение пространственной избирательности антенны и повышение коэффициента усиления достигается за счет улучшения корреляционных свойств сигналов на приемных элементах при использовании частотно-зависимой передаточной функции канала распространения сигнала.

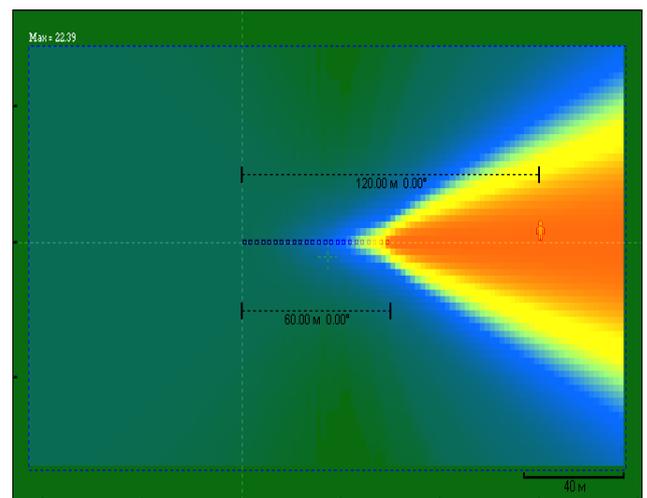
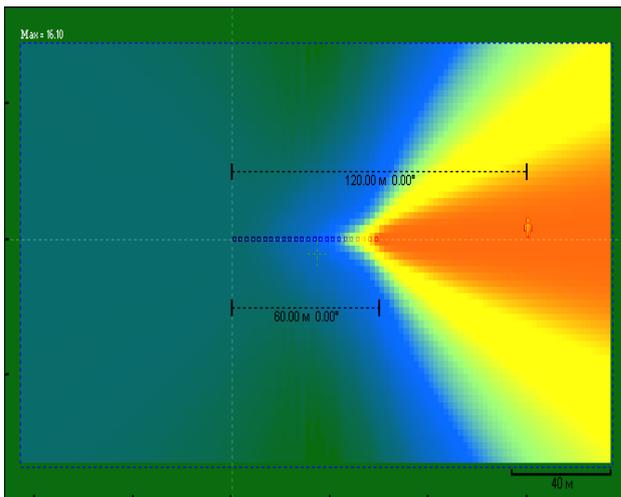


Рис.4.28 Пространственный отклик антенны при  $c_\omega = cte = 141 \text{ м/с}$ .

Рис. 4.29 Пространственный отклик антенны при  $c_\omega = var = C(f)$ .

На рис.4.30 и рис.4.31 представлены корреляционные функции и корреляционные матрицы исходных сигналов приемных элементов антенны

и сигналов с компенсированной (4.4) дисперсионной характеристикой канала распространения в диапазоне частот от 6 до 45 Гц.

$$\hat{S}_n(\omega) = S_n(\omega) \times \hat{H}(\omega, \vec{r}_n, c_\omega) = S_n(\omega) \times \exp\left(-j\omega \frac{r}{c_\omega}\right) \exp\left(j\omega \frac{r}{c_0}\right). \quad (4.7)$$

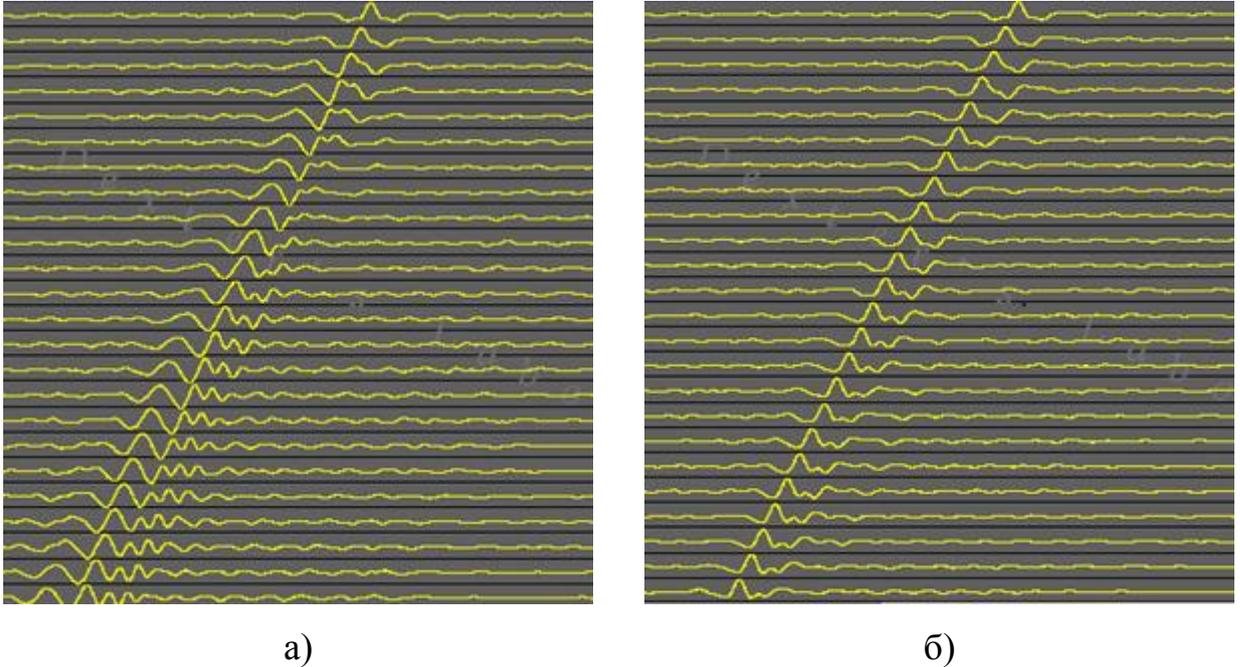


Рис. 4.30 Корреляционные функции сигналов: а-исходного, б- с коррективкой  $C(f)$

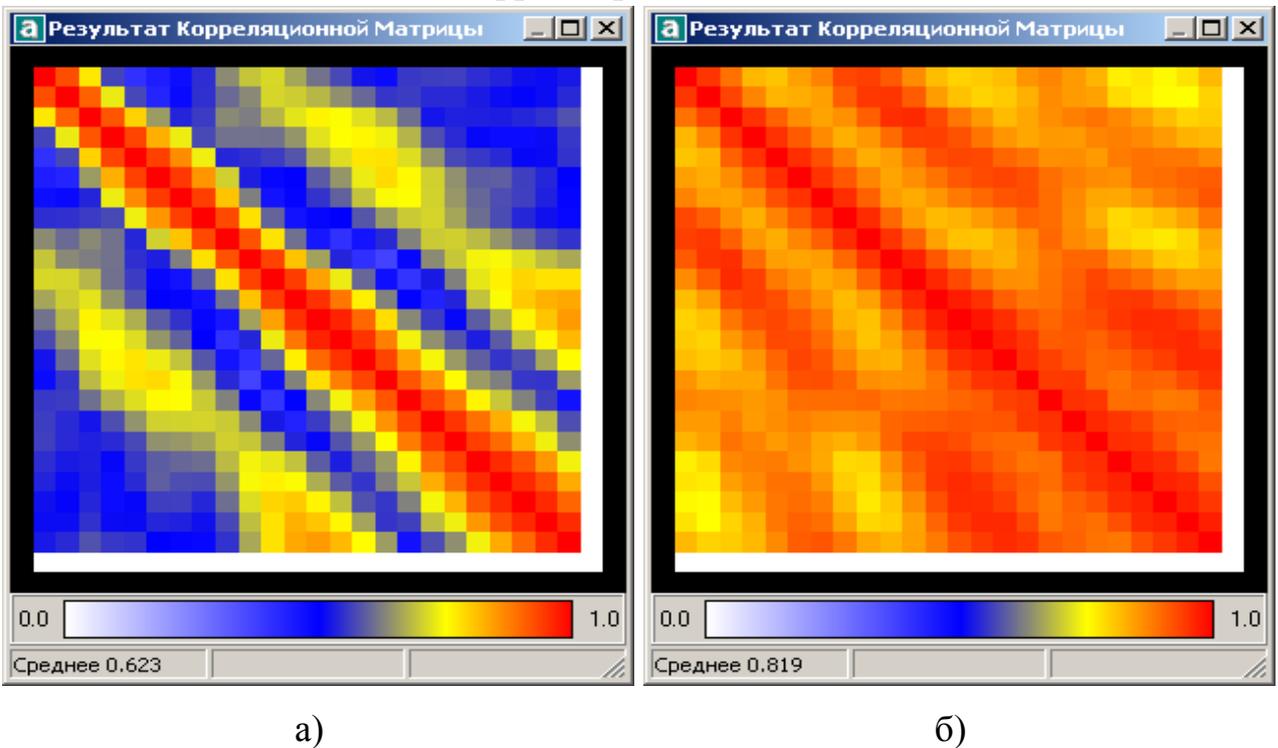


Рис. 4.31 Корреляционные матрицы сигналов: а-исходного, б - с коррективкой  $C(f)$

Средний уровень корреляции по корреляционной матрице после компенсации искажений, вызванных частотно-зависимой скоростью распространения сигналов, возрос с 0.6 до 0.8, а это свидетельствует о возможности расширения приемной апертуры и соответственно повышения энергетического потенциала и разрешающей способности антенны.

Следует отметить, что использование оценки дисперсионной характеристики скорости распространения поверхностной волны, полученной в направлении бегущей волны, позволило улучшить разрешающую способность и повысить коэффициент усиления антенны в других направлениях.

В частности, при угле компенсации  $45^{\circ}$ , наблюдается повышение коэффициента усиления антенны (с 17 до 21.6) и существенное сужение диаграммы направленности (Рис.4.32), что свидетельствует об эффективности использования дисперсионной характеристики и однородности условий распространения поверхностных волн во всем районе проведения работ.

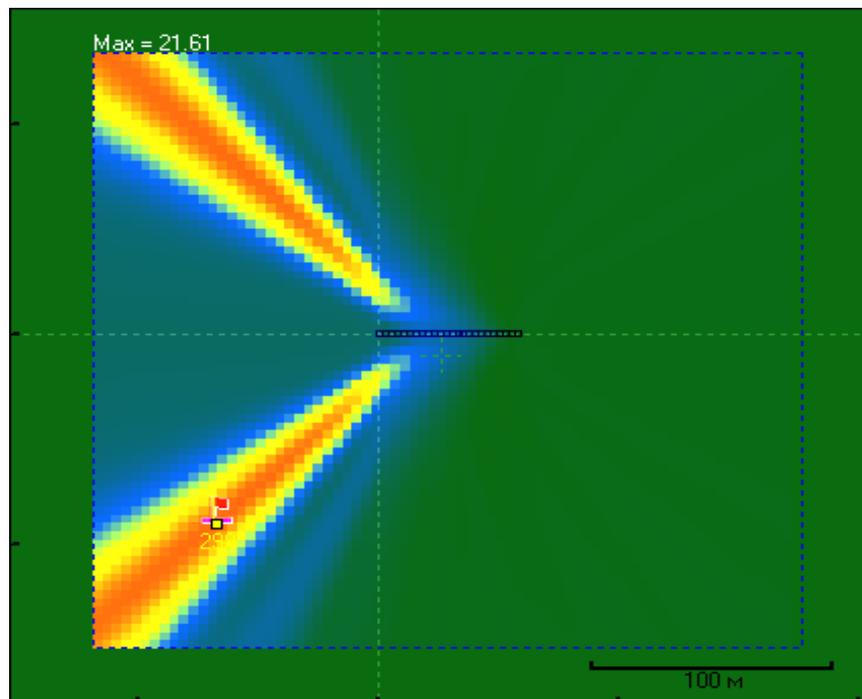


Рис. 4.32 Согласованный со средой пространственный отклик антенны.

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о целесообразности оценки дисперсионной

характеристики скорости распространения и ее учета для повышения уровня и расширения интервала пространственной корреляции сигналов на апертуре антенны и соответственно повышения ее энергетического потенциала и разрешающей способности.

#### 4.1.5. Использование волноводной модели

Учитывая, что поверхностные волны захватывают относительно узкий приповерхностный слой, толщина которого определяется длиной волны, возникает определенная ассоциация с волноводным распространением гидроакустического сигнала.

В связи с этим предпринята попытка применения волноводной модели для оценки и описания передаточной характеристики среды распространения поверхностной волны.

Для оценки частотной зависимости фазовой скорости использовались 24-х канальные сейсмограммы, полученные с помощью той же малоглубинной инженерной сейсмостанции SGD-SEL при линейной расстановке сейсмодатчиков с интервалом 2.5 метра, но в другое время и в другом районе.

Расстояние от крайнего датчика до пункта возбуждения 15м. Схема расстановки и расположение пункта возбуждения изображена на Рис.4.33.

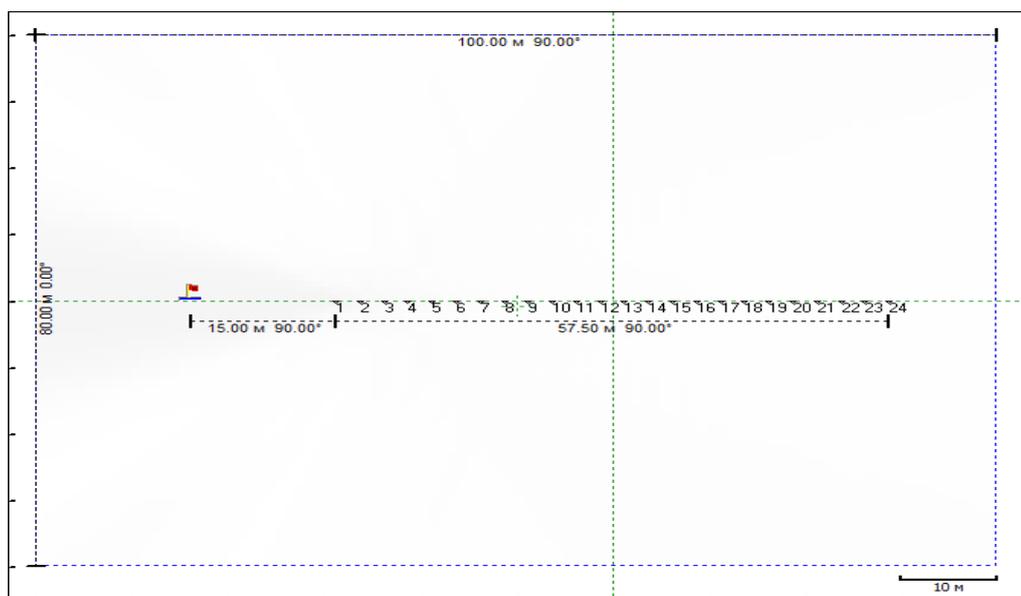


Рис.4.33. Схема расстановки и расположение пункта возбуждения.

Временные реализации сигналов на приемных элементах и их спектры представлены на Рис.4.34. и Рис.4.35. соответственно.

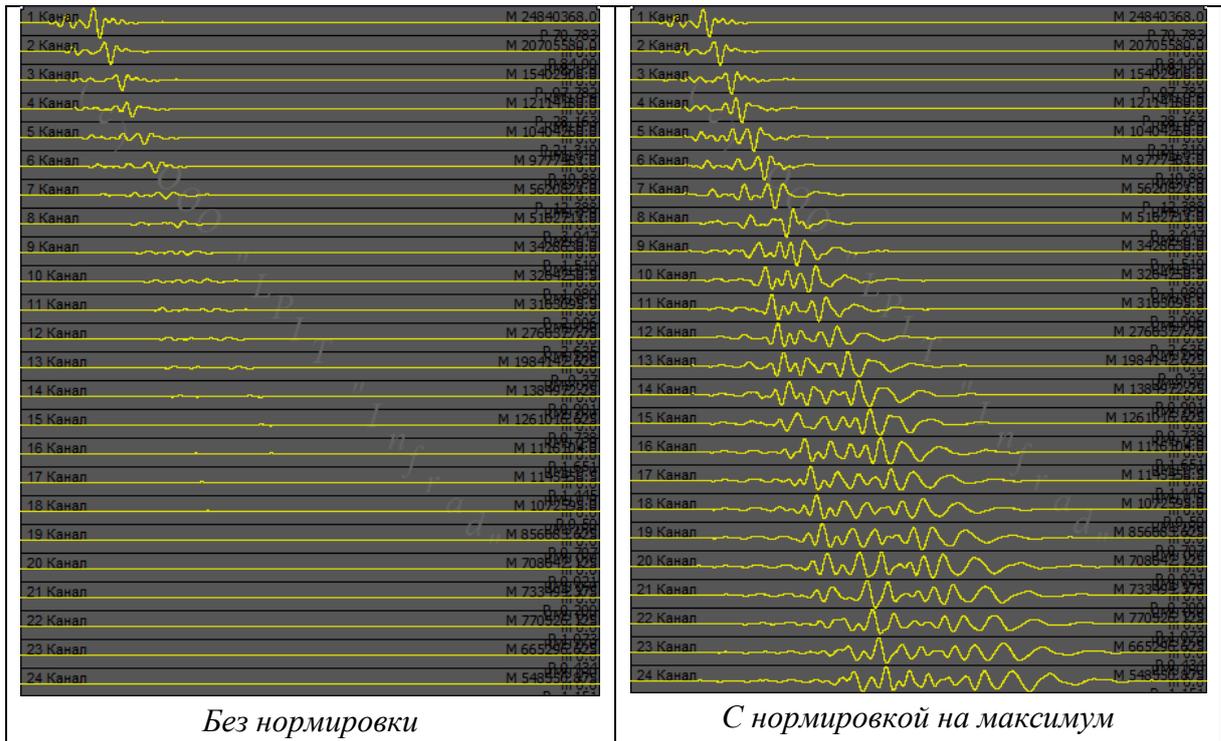


Рис.4.34. Временные реализации 1024 мс, 24 канала

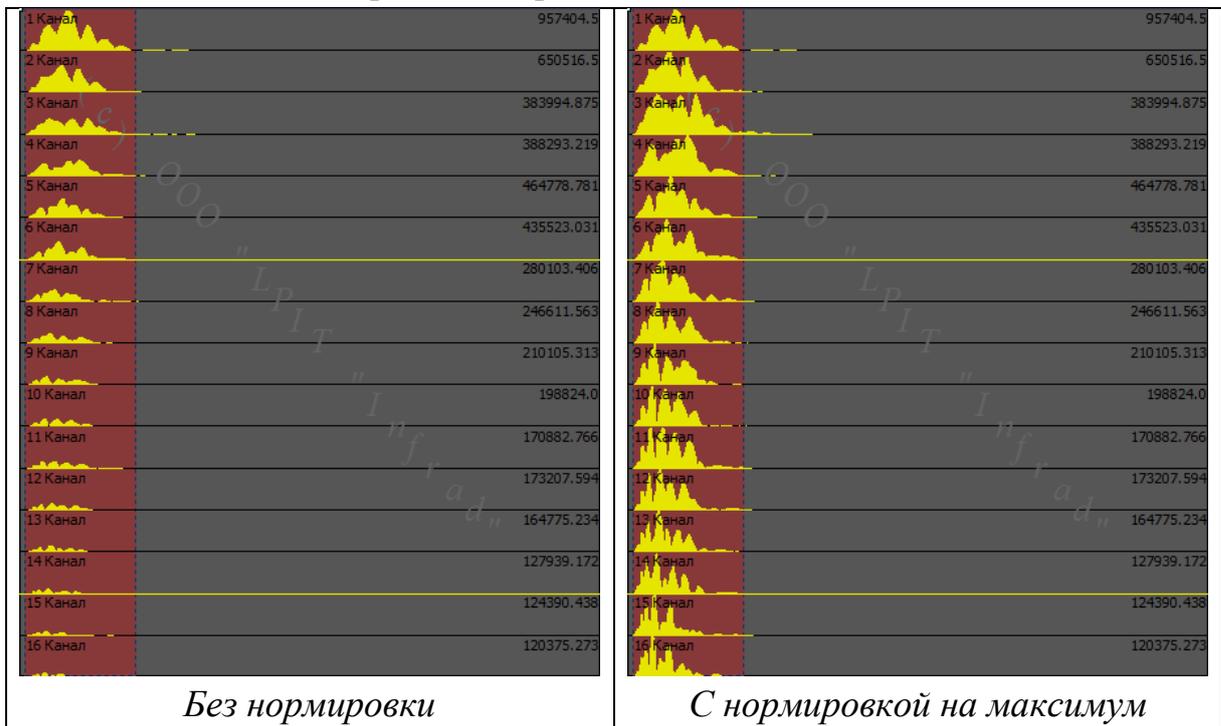


Рис.4.35. Спектры в диапазоне от 0 до 500 Гц (выделен диапазон 5-100Гц). Все остальные процедуры по оценке дисперсионной характеристике фазовой скорости выполнялись по аналогии и в полном соответствии с процедурами описанными выше. Результат представлен на рис. 4.36.

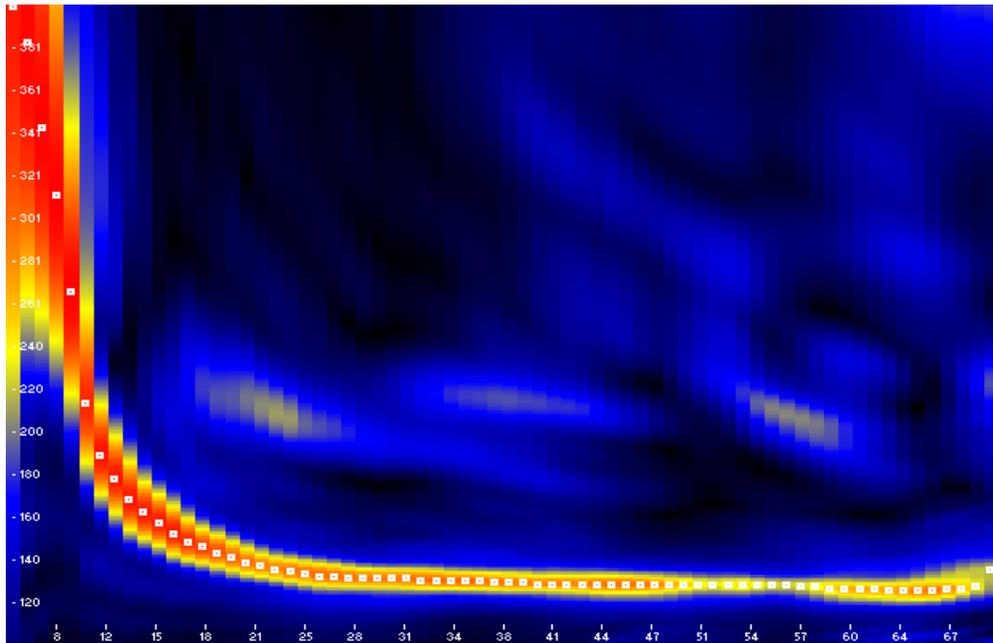


Рис. 4.36. Результат оценки фазовых скоростей

Процесс подбора параметров модели Пекериса для данной дисперсионной характеристики привел к следующим результатам: глубина слоя  $H = 5\text{ м}$ , скорость распространения в слое  $C1 = 125\text{ м/с}$ , скорость распространения в полупространстве  $C2 = 1500\text{ м/с}$ , плотность в слое  $P1 = 1500\text{ кг/м}^3$ , плотность в полупространстве  $P2 = 2600\text{ кг/м}^3$ .

Для данной модели волновода дисперсионная характеристика распространяющейся моды представлена на рис.4.37.

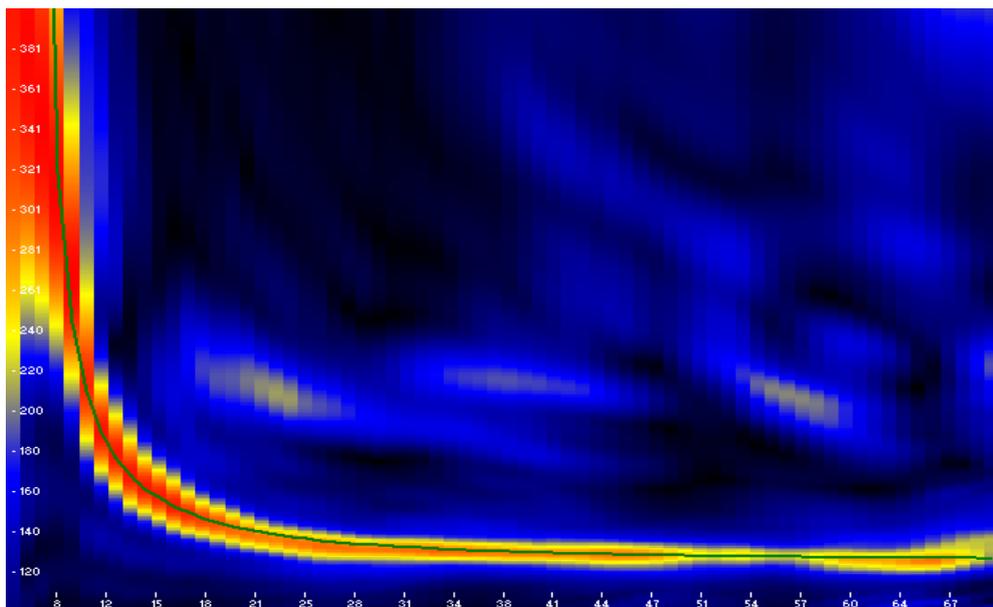


Рис.4.37. Дисперсия реальной фазовой скорости и модельной моды Пекериса.

На рис. 4.38 и .4.39 представлены результаты пространственной фильтрации источника излучения с использованием средней фазовой скорости и частотно-зависимой по дисперсионной характеристике моды Пекериса.

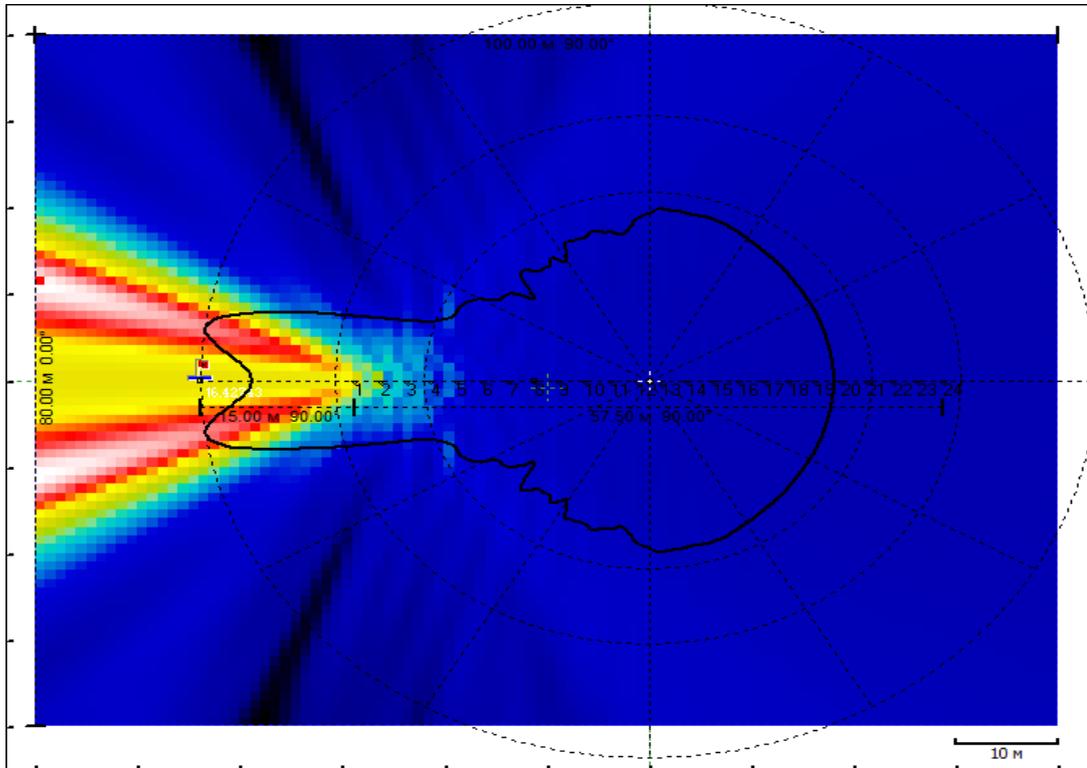


Рис. 4.38. Несогласованная пространственная фильтрация.

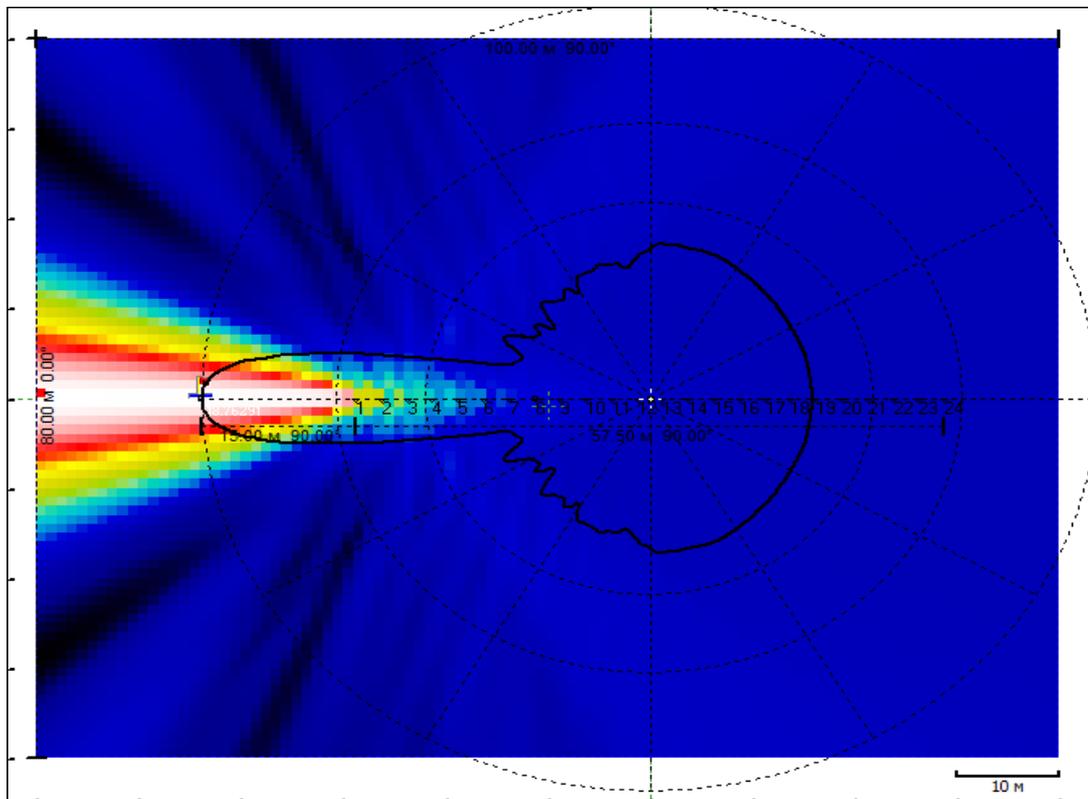


Рис. 4.39. Согласованная пространственная фильтрация.

Использование частотно-зависимой скорости распространения в соответствии с модельной дисперсионной характеристикой привело к устранению неоднозначности оценки углового положения источника излучения, повышению коэффициента концентрации и коэффициента усиления антенны на 25 %.

#### 4.1.6. Оценка параметров затухания

Оценка параметров затухания сигналов проводилась по данным 24-х канальных сейсмограмм, полученных с помощью той же малоглубинной инженерной сейсмостанции SGD-SEL при линейной расстановке сейсмодатчиков с интервалом 2.5 метра. Пункт возбуждения находился на расстоянии 1го метра от первого сейсмоприемника.

Для нахождения закона затухания, построена зависимость  $E(f,r)$  энергии сигнала на частоте  $f_{и}$ . На Рис.4.40 представлены  $E(f)$  от  $r$  для 20-ти частотных полос в диапазоне 3-55 Гц. На Рис.4.41. представлены  $E(f,r)$  в логарифмическом масштабе, с нормировкой на максимум  $E(f)$  от расстояния  $r$ . Расчет энергетике производился в каждой полосе частот  $\Delta f$ ,

$$E(f) = \frac{1}{\Delta f} \sum_{i=0}^{\Delta f} S(f+i) \quad (4.8)$$

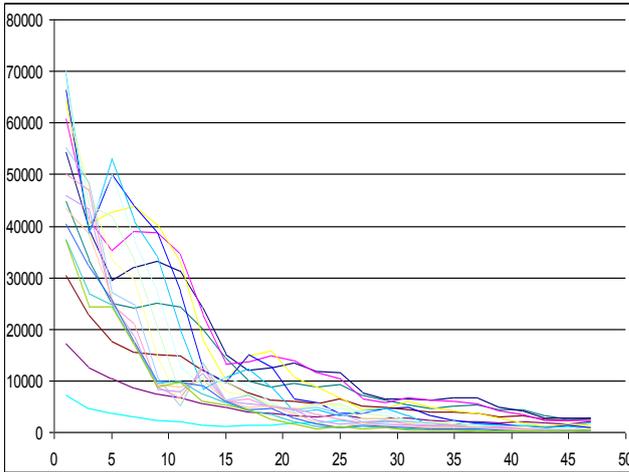
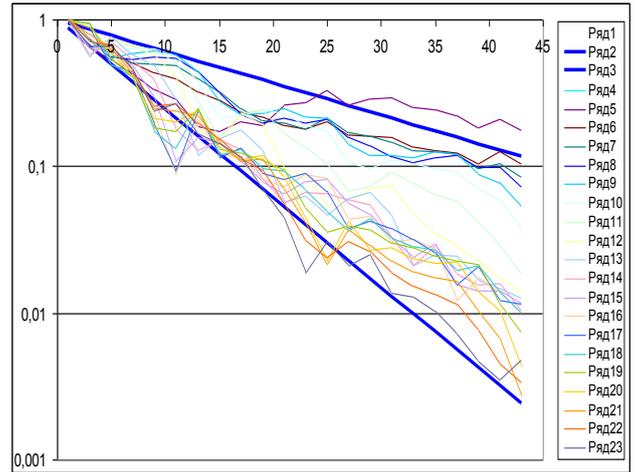
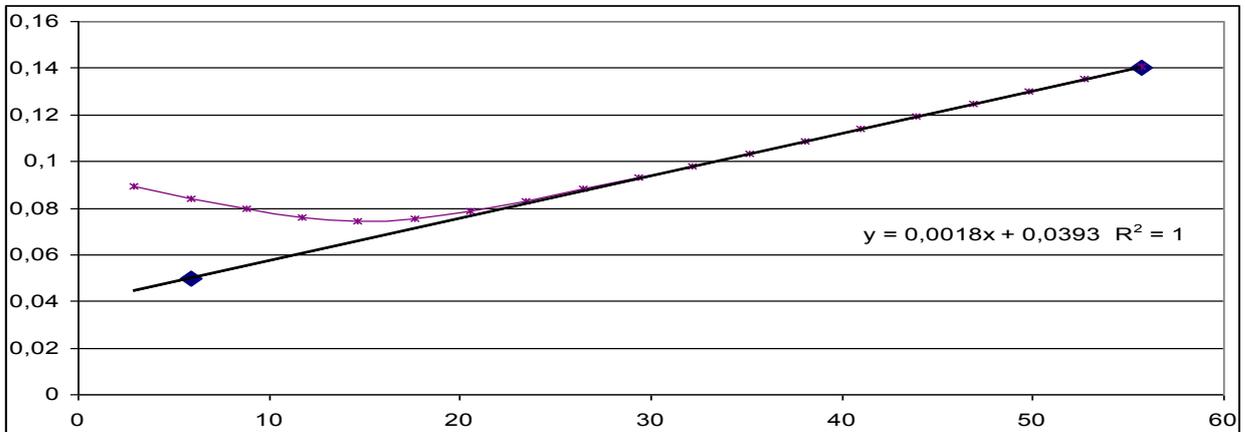
На Рис.4.34 толстыми линиями представлены расчетные зависимости  $E(f,r)$  для граничных частот 6 и 55 Гц. Расчет параметров закона затухания производился применительно к закону затухания плоской волны

$$E(f, r) = e^{-\beta(f) \cdot r} \quad (4.9)$$

Полученная в результате функция зависимости коэффициента затухания от частоты была близка к линейной, и для её аналитического выражения использовалось уравнение прямой.

$$\beta(f) = k \cdot f + \beta_0 \quad (4.10)$$

Данная прямая изображена на рис.4.42 толстой линией. Тонкой линией обозначена частотная характеристика затухания с учетом передаточной характеристики датчика.

Рис.4.40 Зависимость  $E(f,r)$ .Рис.4.41 Зависимость  $\log(E(f,r))$ .Рис.4.42 Расчетные значения  $\beta_0 = 0.039$ ,  $k = 0.00185$ .

В качестве аппроксимирующей кривой была выбрана гипербола, асимптотой которой является полученная прямая.

$$\beta^*(f) = \sqrt{(f - f_0)^2 + \Delta f^2} \cdot k + \beta_0^* \quad (4.11)$$

где,  $f_0$  - резонансная частота сейсмодатчика;

$\Delta f$  - ширина резонанса;

$\beta_0^* = \beta(f_0)$  - коэффициент затухания на частоте резонанса.

Далее полученные значения были использованы для моделирования. В качестве опорного был взят реальный сигнал с ближайшего к точке излучения сейсмоприемника (Рис.4.43). Затем данный опорный сигнал пересчитывался для каждого канала с учетом дальности, частотных коэффициентов затухания и фазовых скоростей.

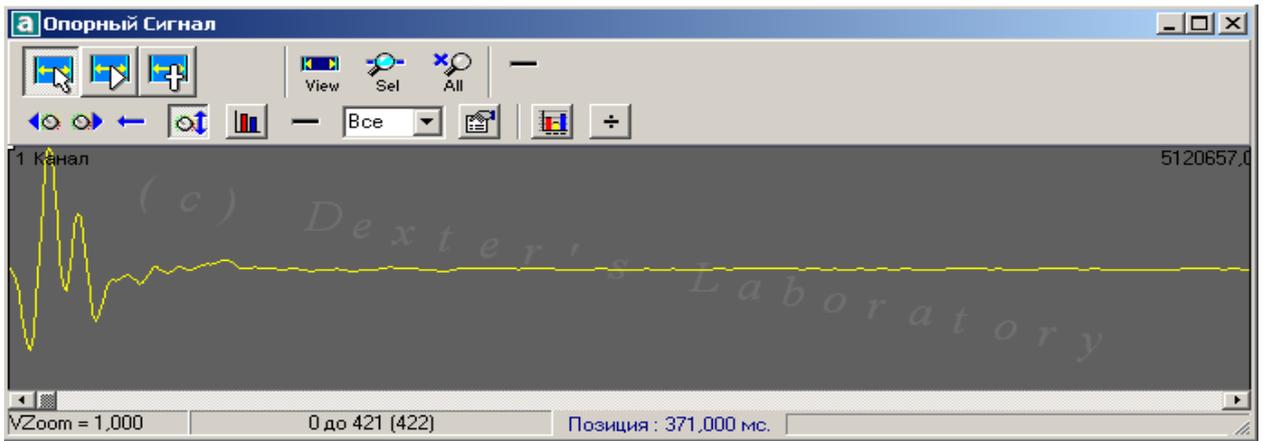


Рис.4.43 Временная реализация опорного сигнала.

На рис.4.44 и 4.45 представлены модельные реализации сигналов на приемных элементах антенны и их спектры, которые очень хорошо коррелируют с экспериментально полученными и представленными на рис.4.46 и рис. 4.47.

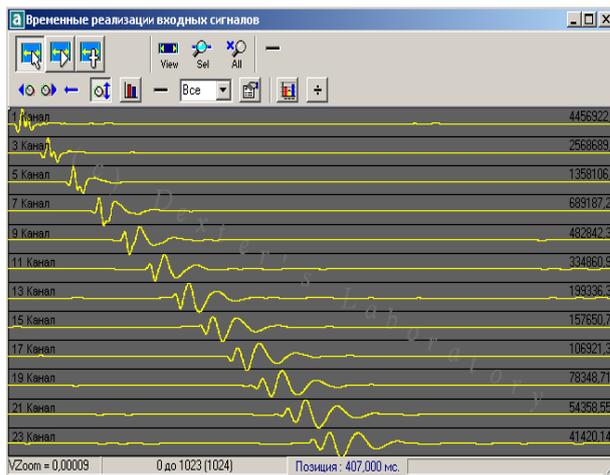


Рис.4.44 Сигналы модельные.

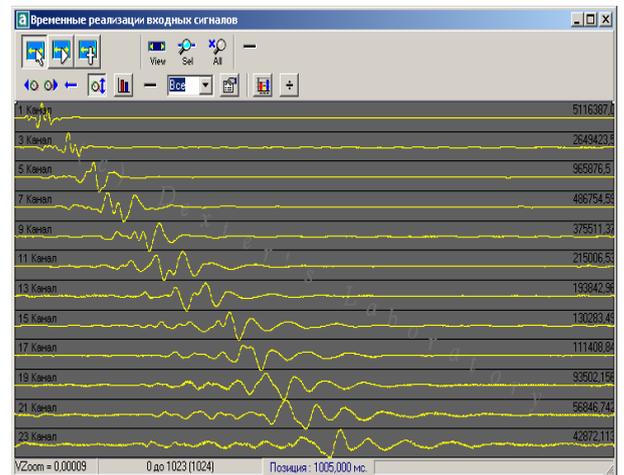


Рис.4.45. Сигналы реальные.

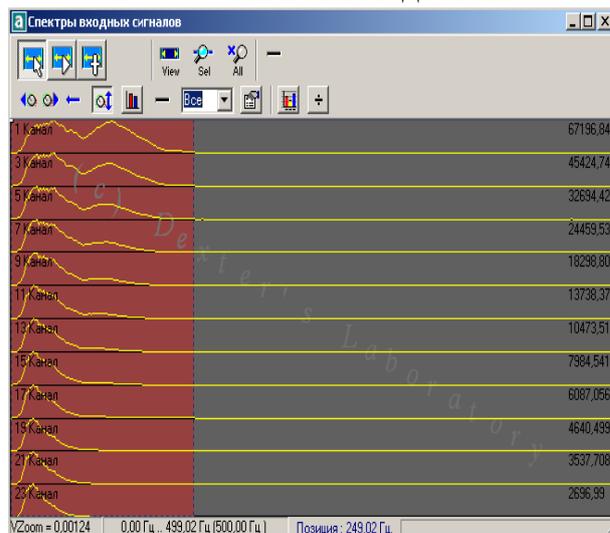


Рис.4.46 Спектры модельных сигналов.

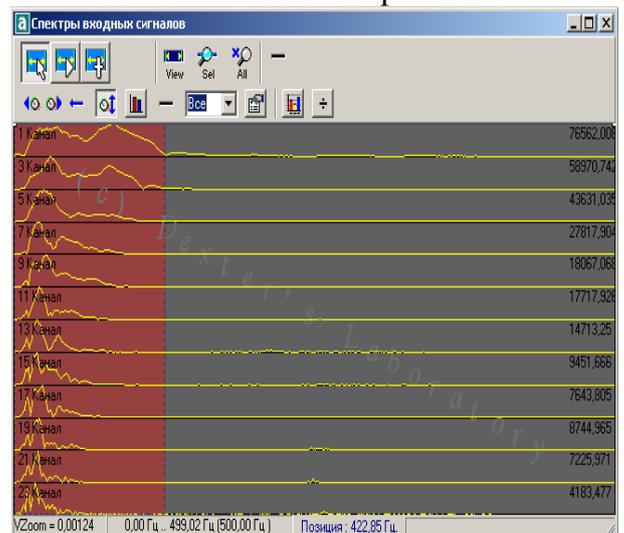


Рис.4.47 Спектры реальных сигналов.

## 4.2. Экспериментальная отработка технологии позиционирование источника излучения<sup>6</sup>

Экспериментальная отработка технологии позиционирование излучателя и проверка программного обеспечения, реализующего процедуру позиционирования излучателя осуществлялась в лабораторных и натурных условиях на ультразвуке (частота несущей в диапазоне 40-50 кГц) с использованием системы универсальных гидроакустических модулей (УГМ), способных работать в режимах излучения и приема, размещенных на едином магистральном кабеле на расстоянии 30-40м друг от друга.

### 4.2.1. Позиционирование излучателя

На рисунке 4.48 показана группа из 8 УГМ, используемых в качестве элементов пространственно-развитой приемной системы.



Рис. 4.48 Лабораторные испытания системы позиционирования излучателя  
На рисунке 4.49 приведен план расстановки приемных модулей (УГМ) и

<sup>6</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Колигаев С.О.**, Колигаев О.А. Некоторые особенности позиционирования объектов в гидроакустических и сейсмоакустических информационных системах. // Геоинформатика, 2010. №4. С.23-27.
2. **Колигаев С.О.**, «Способ обнаружения и определения текущего местоположения нарушителя охраняемой зоны», Патент РФ № 2311686, 2007г.
3. **Колигаев С.О.** Позиционирование объектов в сейсмоакустической информационной системе // Сборник трудов XIV научной конференции преподавателей, студентов, аспирантов и молодых специалистов Международного университета «Дубна», Дубна, 2007г.

результаты позиционирования источника излучения. Излучатель последовательно устанавливался в четыре точки, в каждой из которых проводилось его позиционирование. Среднеквадратическая ошибка оценке координат излучателя не превысила 10см.



Рис 4.49 Конфигурация выносной части и результаты позиционирования. Результаты динамического позиционирования излучателя с использованием данной пространственно-развитой системы приемных модулей в натуральных условиях гидроакустического полигона представлены на рис. 4.50.



Рис. 4.50 Конфигурация выносной части и результаты позиционирования

Для подтверждения реальной возможности позиционирования низкочастотного импульсного пневматического источника излучения низкочастотной приемной пространственно-распределенной системой, проведены эксперименты с пневматическим излучателем, использование которого наиболее вероятно при реализации СЛБО в морских условиях, в той же системе приемных модулей. По техническим причинам он мог запитываться только с берега, его буксировка была невозможна, и мог устанавливаться только в ограниченном пространстве. Учитывая рабочий частотный диапазон приемных гидроакустических модулей в данной системе позиционирования, при работе с пневмопушкой использовались сигналы из этого же частотного диапазона, несмотря на то, что уровень их на несколько порядков меньше уровня сигнала основного диапазона пневмопушки. С целью моделирования условий работы с реальной низкочастотной приемной системой, для позиционирования использовалась огибающая сигнала, отфильтрованная в полосе 70Гц, соответствующая реальной полосе сейсморазведочного сигнала. На рис. 4.51 представлены огибающие сигнала пневмопушки на приемных модулях системы позиционирования на частоте 60 кГц в полосе 1 кГц. На рис. 4.52 представлены эти огибающие в полосе (0-70) Гц. На рис. 4.53 представлены взаимные корреляционные функции этих огибающих, по которым оценивались относительные задержки сигнала.

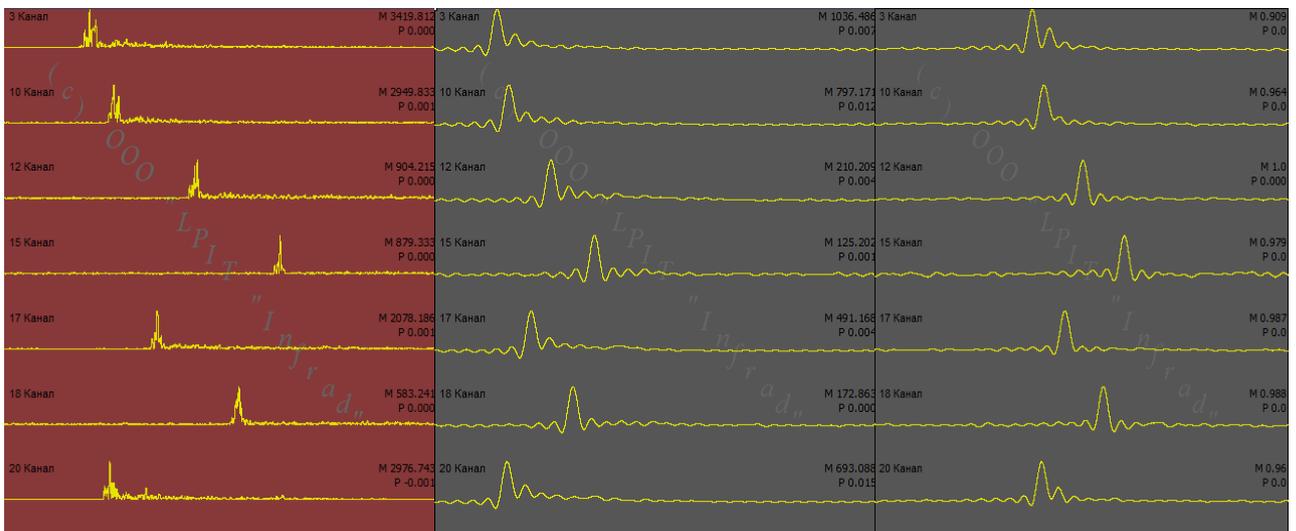


Рис. 4.51 Огибающие

Рис.4.52 НЧ фильтрация

Рис. 4.53 ВКФ

На рис 4.54 и 4.55 представлены результаты позиционирования пневмопушки разностно-дальномерным методом по взаимно-корреляционной функции с применением метода сеток и метода наименьших квадратов соответственно.

Представленные результаты показывают, однозначную реализуемость возможности позиционирования излучателя приемной выносной частью, используемой для реализации собственно метода СЛБО, поскольку даже при столь неоптимальной для положения позиционируемого объекта конфигурации приемных реперных точек достигается вполне приемлемая (до 1 м) точность позиционирования излучателя.



Рис. 4.54 Метод сеток



Рис. 4.55 МНК

#### 4.2.2. Позиционирование источника поверхностных сейсмических волн

Одним из приложений рассмотренных методов позиционирования является возможность использования их в решении задачи обнаружения и локализации нарушителя применительно к сейсмоакустическим системам охранной сигнализации особо важных объектов.

Для решения задачи сопровождения (локализации и оценки координат) точки излучения (шагов нарушителя) необходимо обеспечение пространственного разнесения точек приема по соответствующим

координатам. В частности для плоской геометрии задачи достаточно разнесения приемников по координатам  $(X, Y)$ .

Для решения координатной задачи в условиях принципиальной невозможности синхронизации системы излучения-приема, естественно использование гиперболического (разностно-дальномерного) метода позиционирования.

Оцениваемыми параметрами являются:

- временные задержки сигналов на приемных элементах относительно выбранного опорного сейсмоприемника;
- скорость распространения сигнала  $C_0$ ;
- координаты приемников  $(x_n, y_n)$  в некоторой системе координат.

Оценка координат приемников в данной задаче не представляет никакой сложности и производится после установки их на рубеже охраны.

Сложнее обстоит дело с оценкой скорости распространения и временных задержек, поскольку скорость распространения сигналов существенно зависит от характеристик грунта, в общем случае неоднородных даже в пределах относительно небольших участков. Поэтому, использоваться должны значения скорости распространения, получаемые в процессе предварительной калибровки района функционирования средства обнаружения, которая заключается в оценке времени распространения сигнала при известных положениях точек излучения и приема. Ситуация усугубляется и дисперсионным характером скорости распространения поверхностных волн. Конечно, наилучшим способом решения проблемы скорости распространения является оценка параметров закона её частотной зависимости. Однако применительно к системам охранной сигнализации, особенно к быстроразвертываемым, наиболее радикальным способом решения вопроса о скорости распространения является введение ее в состав неизвестных системы уравнений. Снижение уровня определенности системы уравнений при этом практически не скажется на точности оценок координат, а скажется, в первую очередь, на точности оценки искусственно введенного

неизвестного параметра со скоростью распространения, знание которого не имеет в данном случае практического значения. Самое главное, что в результате в процессе решения системы уравнений методом наименьших квадратов автоматически будет оцениваться эффективная скорость, обеспечивающая минимальную погрешность оценок координат.

Как указано ранее, оптимальной процедурой оценки разности времен распространения сигнала от точки излучения до нескольких точек приема (временных задержек) с точки зрения точностных характеристик является использование корреляционных функций, поэтому выбранный способ позиционирования и с этой точки зрения является оптимальным..

При этом на первом этапе корреляционной обработки сигналов осуществляется собственно процедура обнаружения нарушителя, заключающаяся в оценке уровня корреляции сигналов и сравнении их с порогом. При превышении уровня корреляции порога производится оценка временной задержки по положению максимума корреляционной функции, которые далее используются при решении системы уравнений для оценки координат источника излучения (нога нарушителя, наступающего на почву).

Структурная схема устройства, реализующего способ обнаружения и сопровождения представлена на рис.4.56

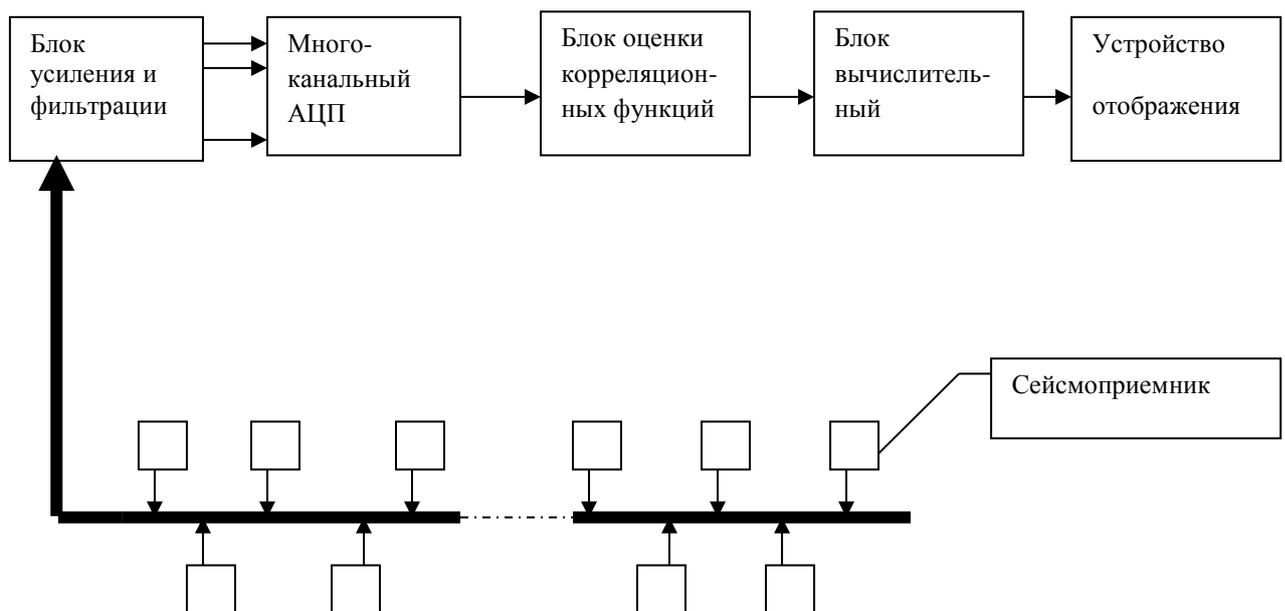


Рис. 4.56 Структурная схема устройства обнаружения и сопровождения

Сигналы с приемных элементов (сейсмодатчиков), установленных вдоль охраняемого рубежа, по системе передачи информации (в данном случае аналоговой кабельной) поступают на вход устройства усиления и фильтрации, осуществляется помимо усиления сигналов их низкочастотная фильтрация.

После низкочастотной фильтрации сигналы поступают на вход многоканального АЦП, где осуществляется аналого-цифровое преобразование сигналов с частотой дискретизации, превышающей по крайней мере удвоенную частоту Найквиста (Котельникова) относительно частоты среза фильтров нижних частот, использующихся в блоке усиления и фильтрации. Далее оцифрованные сигналы поступают в цифровой блок оценки корреляционных функций, где осуществляется их взаимно-корреляционная обработка, производится процедура обнаружения и оценки относительных задержек сигналов на приемных элементах. Длительность выборки, по которым делаются все эти оценки выбирается таким образом, что бы в них попадало не более одного полезного сигнала в соответствии с предполагаемым темпом движения нарушителя. При этом в процессе оценки корреляционных функций осуществляется дополнительная полосовая фильтрация с выбором наиболее информативной части спектра, соответствующей спектральной характеристике отклика среды распространения на импульсное воздействие, которое в принципе может быть различным для различных условий распространения.

Оценки относительных задержек сигналов поступают в блок вычислительный, где в результате решения системы уравнений определяются координаты точки излучения, которые далее поступают на устройство отображения.

Экспериментальная проверка способа обнаружения и позиционирования применительно к рубежному сейсмическому средству охраны проводилось с использованием макетного образца системы охранной сигнализации на базе 16-ти элементной сейсмической косы.

На рис. 4.57 представлена конфигурация расположения сейсмоприемников в косе. Приемники были выложены в две линии по восемь приемников в линии. Расстояние между приемниками в линии 8 метров. Расстояние между линиями приемников так же 8 метров. Такая конфигурация выносной части обеспечивает необходимый уровень обусловленности матрицы системы линейных уравнений, в данном случае решаемой методом наименьших квадратов.

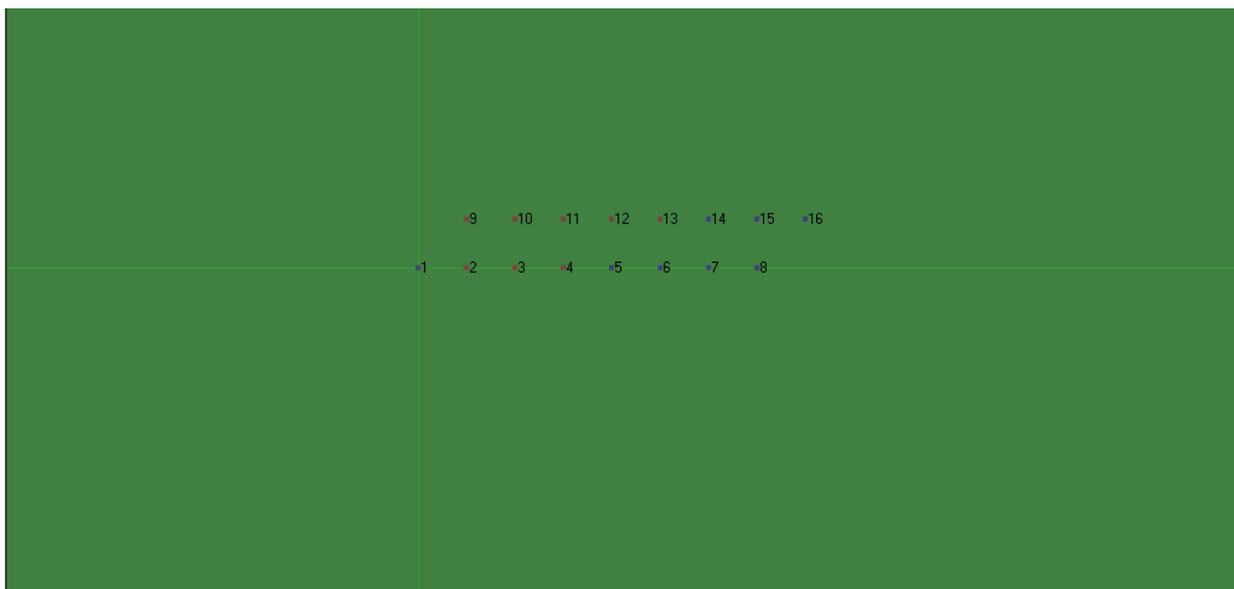


Рис. 4.57 Конфигурация расположения сейсмоприемников

На Рис. 4.58 представлены результаты расчета взаимно-корреляционных функций сигналов приемных элементов относительно опорного 7-го приемного элемента, полученные в результате обработки текущей выборки. Цифрами на Рис. 4.58 отмечены уровни корреляции сигналов приемников с сигналами 7-го приемника. Видно, что уровни корреляции сигналов составляют величины 0.8 – 0.9 и даже более.

В максимумах корреляционных функций, уровни которых превышали заданный порог (0.85) производилась оценка относительных задержек сигналов (относительно опорного) и далее в результате решения системы уравнений оценивались координаты источника излучения, которые отображались на экране монитора.

В результате на экране монитора в процессе последовательного отображения текущих координат «нарушителя» автоматически строилась трасса его перемещения.

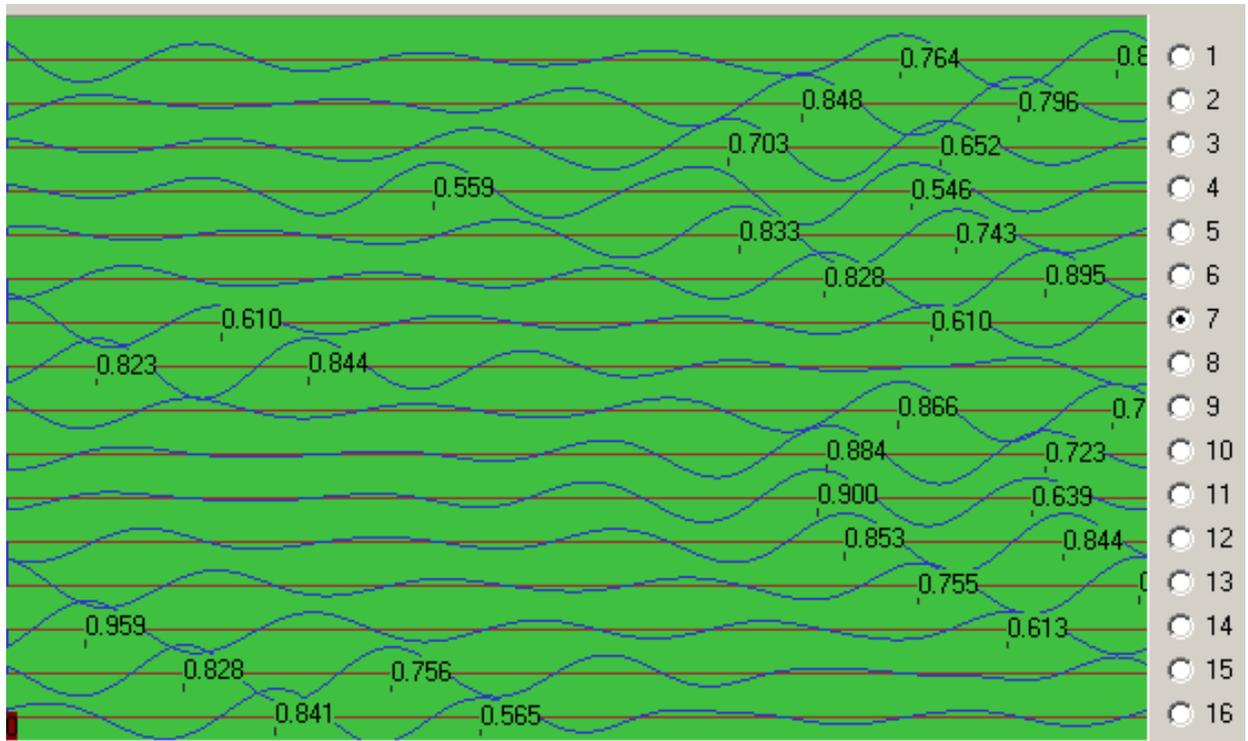


Рис. 4.58 Взаимно-корреляционные функции

На рисунке 4.59 представлены результаты обнаружения и оценки координат «нарушителя» при его перемещении поперек рубежа.

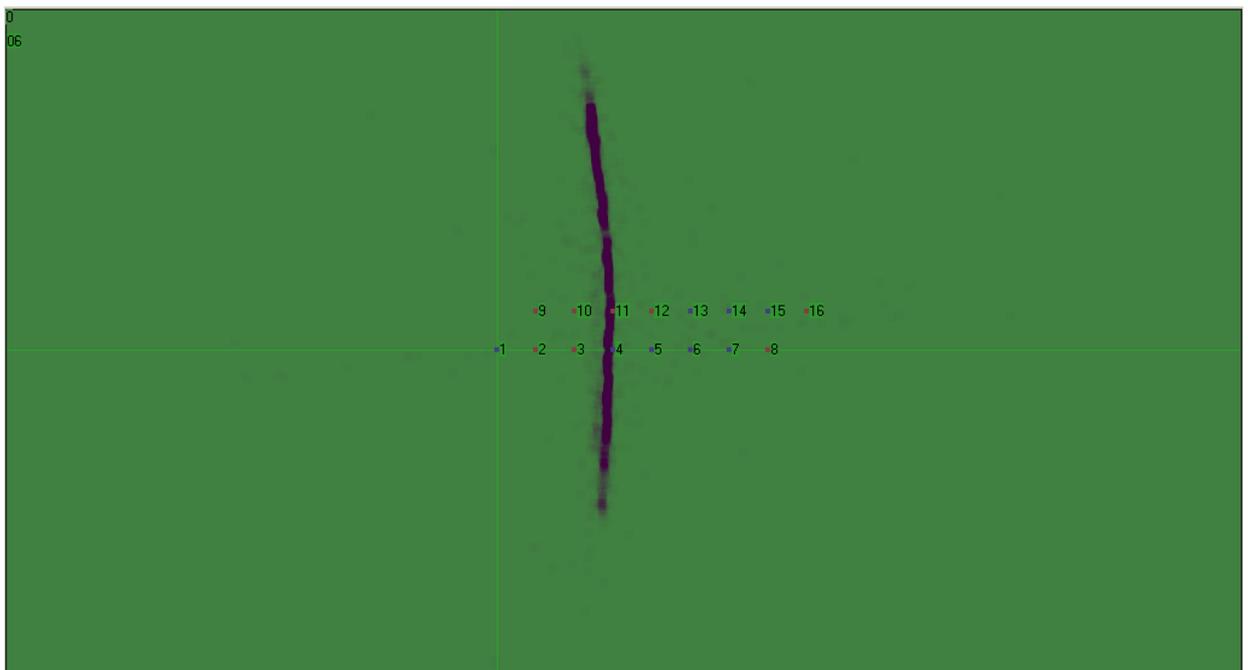


Рис. 4.59 Трасса отметок «нарушителя»

На рисунке 4.60 представлены результаты обнаружения и позиционирования «нарушителя» при его движении вдоль рубежа внутри расположения приемных элементов. Устойчивое обнаружение и «сопровождение» с минимальной дисперсией оценок координат наблюдается при попадании «нарушителя» внутрь области расположения приемной системы с хорошей обусловленностью системы уравнений.

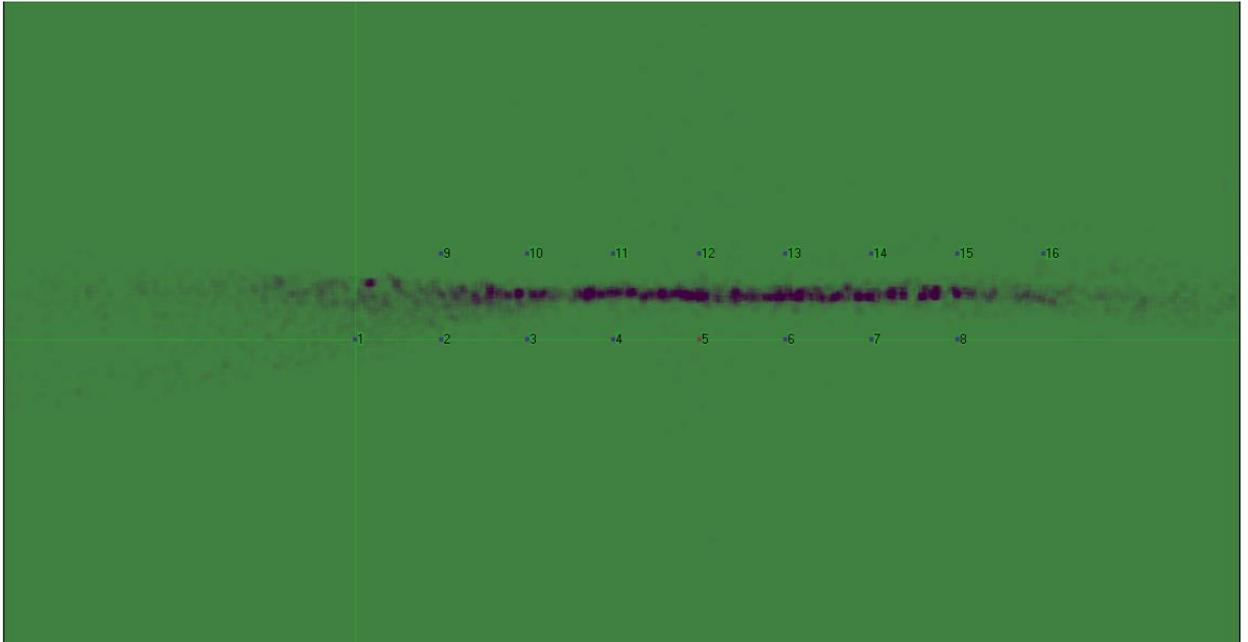


Рис. 4.60 Трасса отметок «нарушителя».

Из представленных результатов видно уверенное обнаружение «нарушителя» и его сопровождение. Дальность обнаружения и, соответственно, сопровождения цели составляла не менее 50-ти метров от ближайшей линии расположения приемников, а в ряде случаев достигала 100–150 метров.

При этом реализуется оптимальная процедура оценки временных задержек, обеспечивающая минимизацию погрешности оценки координат.

Следует отметить, что в отличие от рассмотренной задачи, где в силу специфики используемых поверхностных волн не всегда наберется достаточное количество приемников с необходимым уровнем корреляции сигнала, в задаче позиционирования гидроакустического излучателя такая ситуация менее вероятна. Поэтому в случае высокого уровня корреляции

прямого сигнала на большинстве приемных элементов и при достаточном пространственном развитии приемной части возникает возможность выбирать для формирования системы уравнений именно те приемники, которые обеспечивают оптимальную конфигурацию реперных точек в обеспечение хорошей обусловленности матрицы навигационных коэффициентов.

### 4.3. Экспериментальная отработка программного пакета ПОСиГС применительно к геофизическим методам поиска полезных ископаемых<sup>7</sup>

#### 4.3.1. Пассивная сейсмолокация (СЛОЭ)

Практическая отработка программного обеспечения, направленного на реализацию пассивных методов сейсмолокации проведена с использованием экспериментальных данных, полученных в процессе перфорации скважины. Ценность экспериментальных данных заключается в наличии известных координат места перфорации, что обеспечивает возможность верификации результатов мониторинга, а также то, что для сейсмоакустического мониторинга использованы две приемные системы.

Сравним результаты мониторинга процесса перфорации скважины с использованием сейсмических антенн с апертурами различной конфигурации, представленных на Рис.4.61. Белым цветом – апертура «Окружности», желтым цветом – апертура «Звезда», флажком указана проекция места перфорации на поверхность.

На Рисунках 4.62 и 4.63 представлены корреляционные матрицы сигнала перфорации и шума на апертурах «Окружности» и «Звезда».

<sup>7</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. Кузнецов О.Л., Гайнанов В.Г., Радван А.А., Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.** Применение сейсмических рассеянных и эмиссионных волн для повышения эффективности освоения месторождений углеводородов // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология.* – 2017. – № 4. – С. 54-59
2. Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.**, Мониторинг микросейсмической эмиссии - новое направление развития сейсморазведки», журнал // *Приборы и системы разведочной геофизики*, № 03/2014.
3. Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., Каляшин С.В., **Колигаев С.О.**, Радаван А.А. Мониторинг микросейсмической эмиссии для обеспечения экологической безопасности разведки и разработки нефтяных месторождений на акватории. // *Вестник РАН.* – 2014. – Т. 14. – №4. С. 8-14.
4. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Радван А.А., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.** Сейсмические исследования на разрабатываемых месторождениях нефти и газа (промысловая сейсмометрия) // *Каротажник.* — 2016. — Т. 270, № 12. — С. 39–66.
5. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Твердохлебов Л.И., Эльжаев А.С., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.**, Юров А.А., Вьюшкина М.В. Инновационные технологии сейсморазведки // *Neftegaz.RU.* – 2020 - .№4 - С. 68-75
6. Kouznetsov O.L., Lyasch Y.F., Chirkin I.A., Rizanov E.G., LeRoy S.D., **Koligaev S.O.** Long-term monitoring of microseismic emissions: Earth tides, fracture distribution and fluid content// *Interpretation.* - 2016.- V4.- №2. - P. T191-T204.
7. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Твердохлебов Л.И., Гурьев С.В., Юров А.А., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.**, Lyasch Y.F., LeRoy S.D., Radwan A.A. Сланцевая революция: мифы, рифы и перспективы. Новая концепция освоения сланцевых месторождений нефти и газа. // *Вестник РАН,*—2022.—Т. 22. № 4.—С. 60–68.
8. Kuznetsov O, Chirkin I, Radwan A, Ismail A, Lyasch Y, LeRoy S, Rizanov E, Koligaev S, Abdelmaksoud A. // *Arabian Journal of Geosciences.* 2021. Vol. 4. № 14. Article №288. P. 1-11

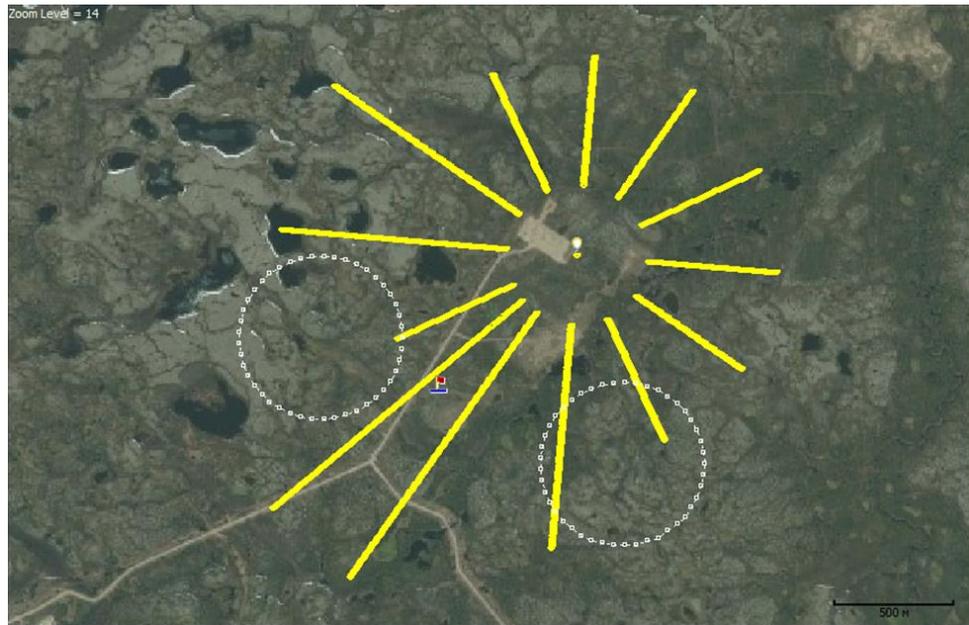


Рис 4.61 Конфигурация приемных систем.

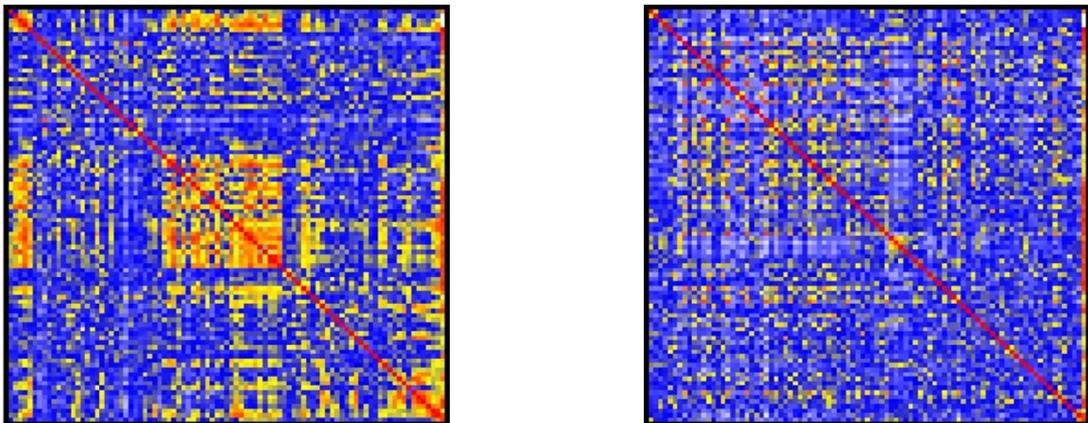


Рис 4.62 «Сигнал+шум» и «Шум» на апертуре «Окружности»

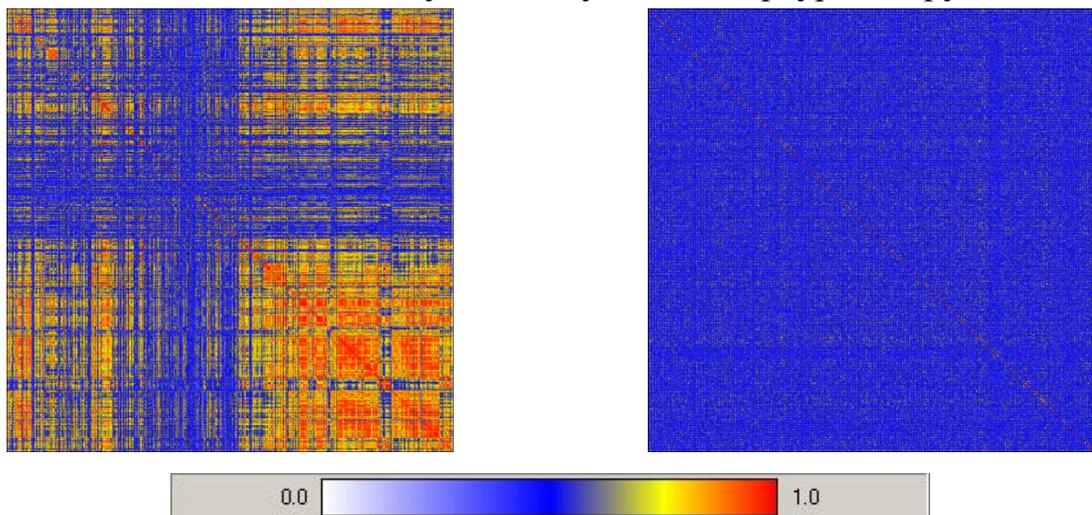


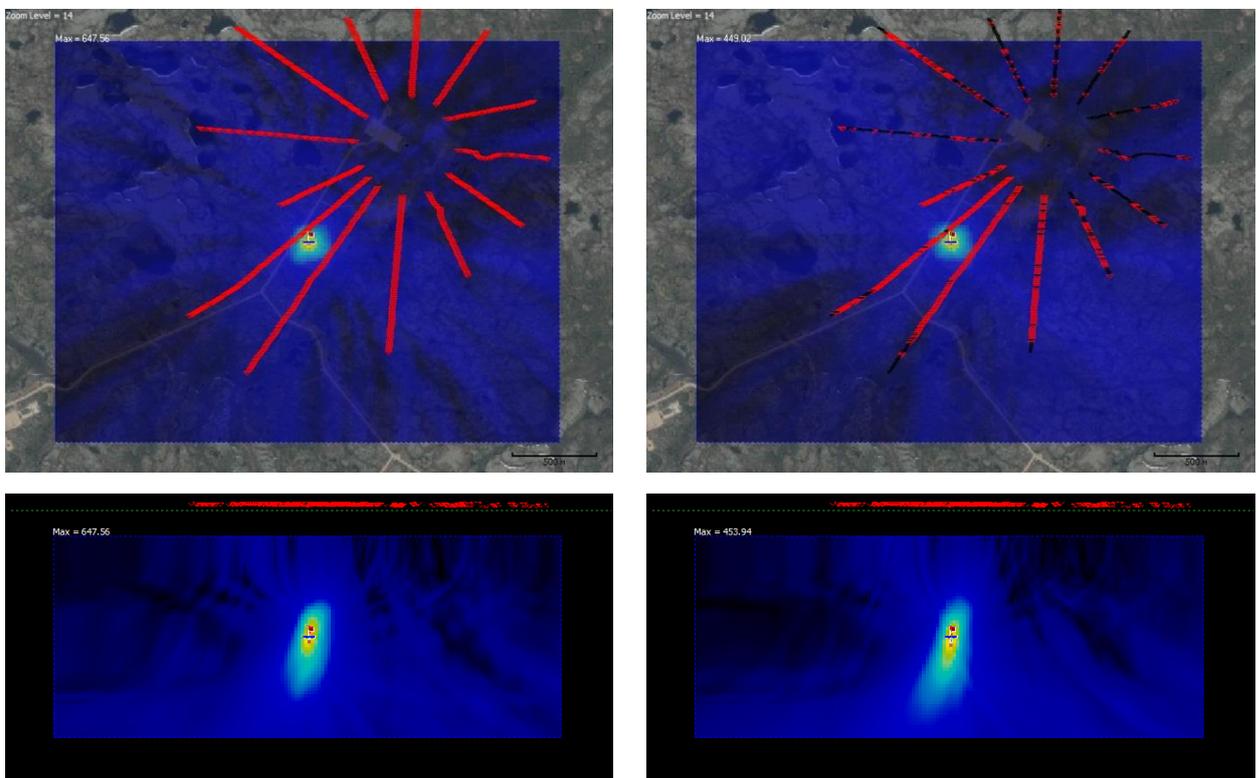
Рис 4.63 «Сигнал+шум» и «Шум» на апертуре «Звезда».

Существенно меньший уровень корреляции шума на антенне с апертурой «Звезда» можно объяснить расположением линий приемных

антенн относительно основного шумящего района, находящегося в центре апертуры, а также тем фактом, что в антенне типа «Звезда» приемные каналы выполнены с группированием приемных элементов, что позволило снизить влияние поверхностного шума.

Следует отметить отсутствие корреляция сигналов на ряде приемных каналов антенн, что позволяет сделать вывод о том, что размеры апертур превышают интервал корреляции сигнала. По результатам анализа корреляционных матриц были выбраны приемные каналы с уровнем корреляции более 0.5, по которым проведена повторная обработка.

Результаты представлены на Рис. 4.64 и 4.65.

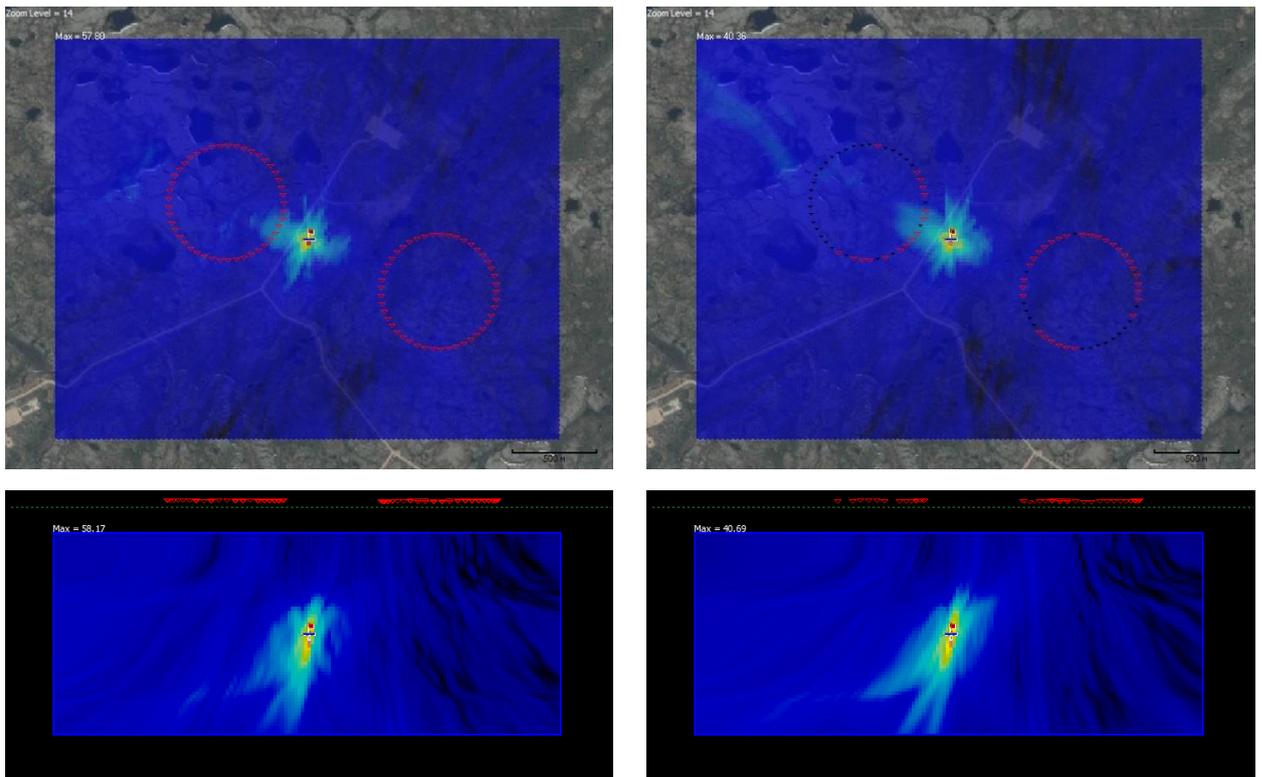


*а) 1002 канала*

*б) 536 каналов*

Рис 4.64 Локализация места перфорации апертурой «Звезда».

Видно, что существенное уменьшение количества приемных каналов несущественно сказалось на результатах сейсмолокации, что говорит о правильно отброшенных каналах, не оказывающих полезного влияния на результаты пространственной фильтрации.



а) 90 каналов

б) 46 каналов

Рис 4.65 Локализация места перфорации апертурой «Окружности»  
 Результаты дальнейшего мониторинга собственно процесса гидроразрыва пласта показаны на рис. 4.66

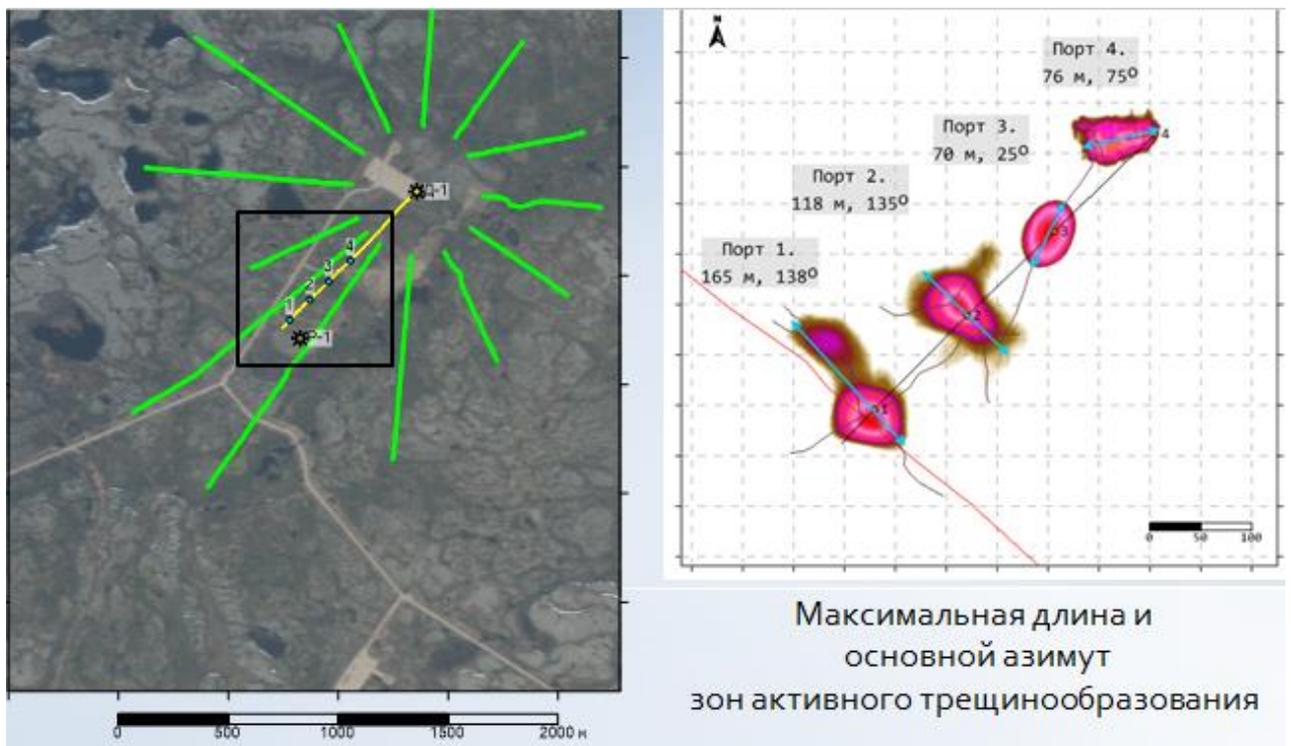


Рис. 4.66 Мониторинг ГРП

### 4.3.2. Активная сейсмолокация (СЛБО)

Отработка программно-алгоритмического обеспечения пакета «ПОСиГС» для активной сейсмолокации проведена на реальных данных комплексных сейсмических исследований, произведенных в штате Техас США.

Общая методология обработки полученных данных с помощью программ пакета «ПОСиГС», описание ее этапов и интерпретация результатов подробно описаны в диссертации Абдельхалима Ахьмеда Абдельфаттаха Радвана на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук «Повышение геологической эффективности сейсмических исследований на месторождениях нефти и газа на основе комплексного изучения отраженных, рассеянных и эмиссионных сейсмических волн», защищенной в 2017г.

Поэтому здесь приведено общее описание исходных данных и некоторые результаты их обработки, по которым были определены участки бурения с максимально возможным притоком нефти.

Объектом исследований является геологическая среда, имеющая следующие размеры: площадь прямоугольной формы 10x5 миль, глубинный интервал от -21000 фт до -3000 фт.

В качестве исходных данных для обработки были представлены:

- сейсмограммы ОПВ 3D-наблюдений с общим количеством трасс ~11293794;
- куб скоростей RMS для площади исследования;
- схема сейсмических наблюдений МОГТ-3D на площади исследования с координатами пунктов излучения и приема.

Схема наблюдения МОГТ-3D на площади исследования, представленная на рис. 4.67, была разбита на отдельные идентичные (по форме) однопозиционные локаторы, у которых центры апертур излучения и приема совмещены.

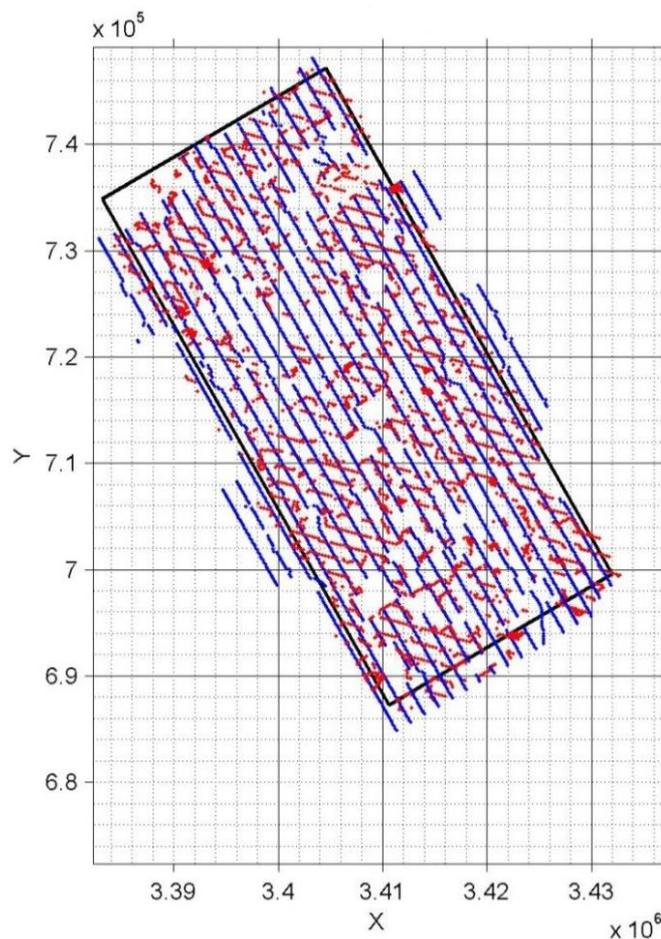


Рис. 4.67. Все пункты приема и возбуждения на площади исследования.

Апертура приема формировалась в виде квадрата с размером стороны 6160 футов. Общее количество пунктов приема в апертурах неравномерно и составило от 107 до 140, что было обусловлено поверхностными условиями.

Апертура излучения имеет форму кольца с диаметром 14000 футов. Количество пунктов излучения в апертурах варьировалось от 40 до 317, что также было обусловлено поверхностными условиями.

Общее количество сейсмических трасс в сейсмическом локаторе варьировалось от 5244 до 41844.

В качестве примера на рис. 4.68 представлена конфигурация одного из локаторов с приемной частью из 140 приемников и излучающей частью синтезируемой 194 точками отстрела.

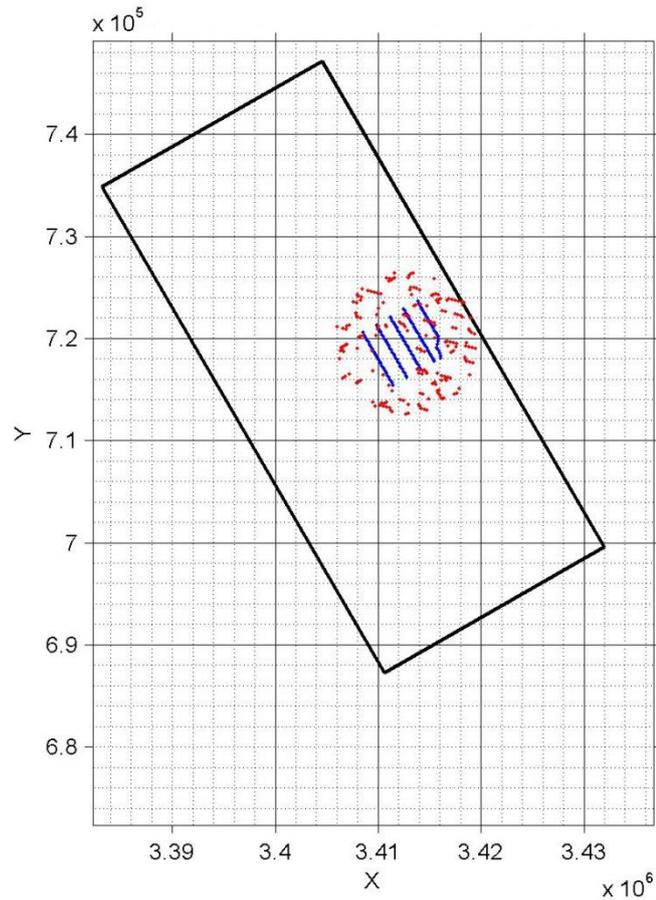


Рис. 4.68 Локатор обзора №67.

Размещение данных локаторов на площади исследований выполнено с их смещением (перекрытием) вдоль и поперек линии приема с шагом 4400 футов и 3080 футов соответственно. Общее количество локаторов на площади исследования составило 89, что позволило изучать каждую точку геологической среды с различных направлений и с высокой кратностью обзора.

На рис. 4.69 и 4.70 представлены отображения исследуемого пространства отдельно в поле рассеянных и отраженных волн соответственно, а на рис. 4.71 представлены ортогональные сечения исследуемого пространства в совместном поле отраженных и рассеянных волн.

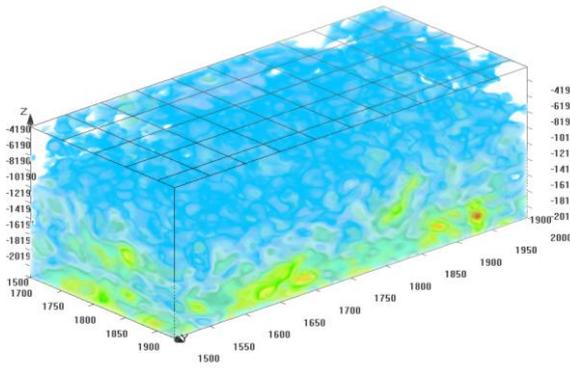


Рис. 4.69. Куб энергии рассеянных ВОЛН

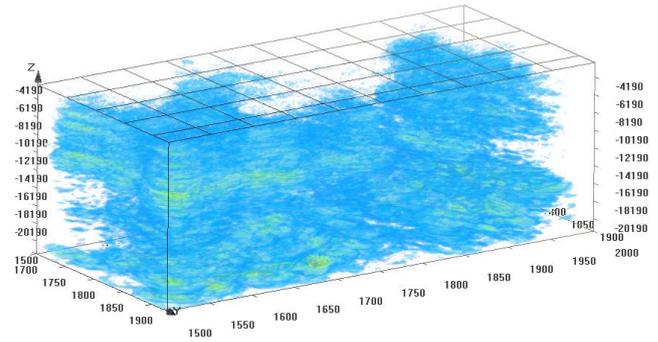


Рис. 4.70. Куб энергии отраженных ВОЛН

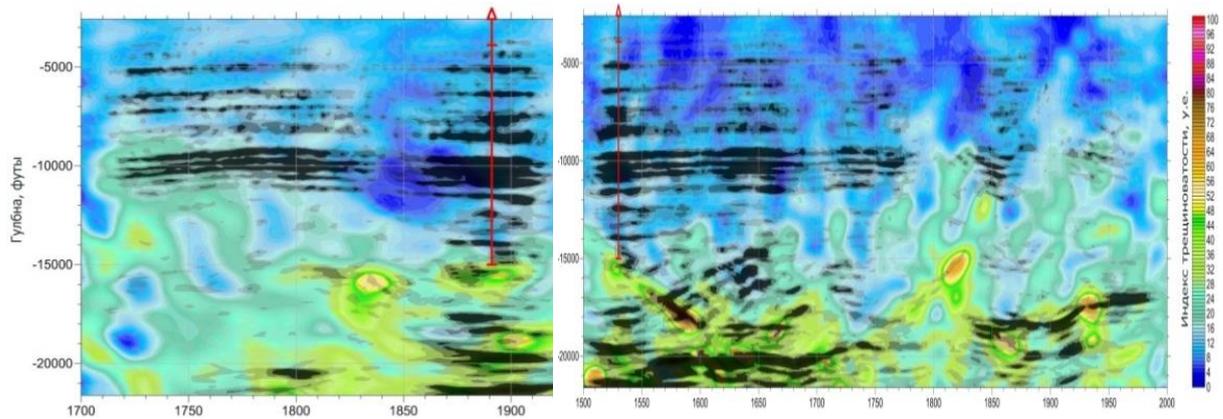


Рис. 4.71. Ортогональные сечения исследуемого пространства

#### Выводы по Главе 4

1. Экспериментально подтверждена реализуемость и эффективность *защищаемой технологии* динамического позиционирования излучателя по прямому гидроакустическому сигналу с использованием стационарной приемной апертуры, реализующей *защищаемый способ* обнаружения и определения текущего местоположения источника сейсмоакустического излучения, основанный на оценке параметров функции взаимной корреляции сигналов на приемных элементах пространственно-развитой приемной системы.
2. Экспериментально подтверждена реализуемость и эффективность *защищаемой технологии* позиционирования элементов пространственно-развитой приемной системы в волноводных условиях мелкого моря

дальномерным и разностно-дальномерным методами с оптимизацией конфигурации реперных точек по критерию меры обусловленности матрицы навигационных коэффициентов и использованием дисперсионных свойств передаточной характеристики среды распространения.

3. Экспериментально подтверждена реализуемость и эффективность *защищаемой технологии* оценки параметров передаточной характеристики реального акустического волновода, как среды распространения гидроакустических сигналов и технологии оценки параметров ее математической модели.

4. Показана реальная возможность повышения эффективности пространственной фильтрации сейсмоакустических полей в дисперсионных средах. В частности, показано, что учет дисперсионной характеристики среды распространения сигналов приводит к повышению уровня и расширению интервала пространственной корреляции сигнала.

5. Показана возможность использования двуслойной модели Пекериса в качестве передаточной характеристики среды волноводного распространения, как гидроакустических, так и поверхностных сейсмических сигналов.

6. Тестирование (верификация) разработанного программного обеспечения, реализующего современные методы пространственной фильтрации сейсмических полей, проведено непосредственно на классифицированных экспериментальных данных, полученных в процессе перфорации скважины в ходе подготовительных работ к гидроразрыву пласта.

7. Алгоритмы пространственно-временной обработки, реализующие в пакете программ «ПОСиГС» современные геофизические методы, такие как сейсмолокация очагов эмиссии и сейсмолокация бокового обзора, прошли апробацию на разрабатываемых месторождениях в процессе обширных геофизических исследований, включая мониторинг гидроразрыва пласта.

## Заключение

### *Итоги выполненного диссертационного исследования*

Результатами диссертационного исследования подтверждено, что для реализации в морских условиях современных методов геофизических исследований, основанных на пространственной фильтрации, как первичных, так и вторичных сейсмоакустических полей в качестве приемных антенн целесообразно использование стационарных донных сейсмоакустических антенных решеток, обеспечивающих возможность максимального пространственного развития и круглогодичного функционирования в режиме 4-D мониторинга месторождения.

Создание же излучающей антенны, в обеспечение формирования направленных свойств в сейсмолокаторе бокового обзора, в морских условиях практически возможно только с использованием метода синтезирования апертуры.

При этом наиболее сложными технологическими задачами создания такого рода морского сейсмолокатора со стационарной приемной и синтезируемой излучающей апертурами, являются задачи оценки местоположения приемных элементов пространственно-развитой приемной и динамического позиционирования источника излучения в процессе синтезирования излучающей апертуры, решение которых возможно только методами гидроакустического позиционирования.

Аналитически, математическим моделированием, лабораторными и натурными экспериментальными исследованиями показано, что для решения задачи оценки местоположения приемных элементов пространственно-развитых донных стационарных сейсмоакустических антенн целесообразно совместное использование дальномерного (сферического) и разностно-дальномерного (гиперболического) метода позиционирования с длинной базой при такой конфигурации реперных точек установки излучателей, при которой минимизируется число обусловленности навигационной матрицы. Расстановка излучателей или последовательная установка одного излучателя

в точки с координатами, заданными в соответствии с этим критерием, обеспечивает минимизацию погрешности оценок координат позиционируемых приемных элементов.

Дополнительная сложность задачи позиционирования элементов пространственно-развитой стационарной донной приемной выносной части сейсмолокатора обусловлена необходимостью ее решения в условиях волноводного распространения гидроакустических сигналов, характерных для мелководных условий шельфовой зоны Арктического региона, наиболее перспективного с точки зрения наличия месторождений углеводородного сырья.

Учет же волноводного характера распространения гидроакустического сигнала для повышения уровня корреляции сигналов на приемных элементах антенны возможен лишь при условии наличия адекватной математической модели передаточной характеристики и правильного подбора ее параметров.

В результате пространственно-временной обработки большого массива экспериментальных данных показана реальная возможность использования двуслойной модели Пекериса, параметры которой остаются неизменными применительно к обширному району шельфовой зоны Баренцева моря.

Проведенными натурными исследованиями показана возможность использования модели Пекериса и для описания дисперсионного характера распространения поверхностной сейсмической волны. Использование модели позволило в результате согласованной со средой обработки сигнала на 20% повысить уровень, расширить интервал пространственной корреляции сигнала, возбуждаемого импульсным источником, и улучшить направленные свойства пространственно-развитой сейсмической антенны.

Доказанная возможность использования такой модели среды распространения имеет самостоятельное значение для повышения

эффективности систем охранной сигнализации, использующих в качестве информационных параметры поверхностной сейсмической волны.

Однако, учитывая тот факт, что возбуждаемая источником излучения поверхностная волна является одной из наиболее существенных помеховых составляющих для сейсмолокатора бокового обзора, то наличие адекватной модели передаточной характеристики среды распространения позволяет надеяться на возможность ее эффективного подавления в процессе согласованной со средой пространственно-временной обработки.

Особое внимание в диссертационной работе уделено наиболее сложному элементу технологии СЛБО в морских условиях, а именно вопросу позиционирования излучателя в процессе синтезирования излучающей апертуры. Результатами математического моделирования и натурных экспериментов подтверждена целесообразность и реальная возможность решения этой проблемы разностно-дальномерным методом позиционирования с использованием собственной стационарной донной приемной системы сейсмолокатора.

Наличие пространственно-развитой многоэлементной приемной системы обеспечивает возможность выбирать для использования в качестве реперов в каждый конкретный момент излучения приемные элементы с максимальным уровнем корреляции сигналов, координаты которых минимизируют число обусловленности навигационной матрицы.

К сожалению, в рамках диссертационной работы не удалось отработать непосредственно в морских условиях в технологической последовательности все подсистемы сейсмолокатора с соответствующим программно-алгоритмическим обеспечением, их реализующим в программном комплексе «ПОСиГС», но практически все они по отдельности отработаны если не в морских, то в наземных условиях.

В частности, весь основной функционал СЛБО и СЛОЭ, реализованный в программном комплексе «ПОСиГС», отработан и оттестирован на большом массиве реальных данных, полученных в процессе

обширных геофизических исследований на разрабатываемых месторождениях внутри страны и за ее пределами.

### ***Выводы***

Программный комплекс «ПОСиГС» решает практически все задачи, связанные с реализацией в морских условиях современных геофизических методов, основанных на пространственной фильтрации сейсмоакустических полей, таких как СЛОЭ и СЛБО, и может быть использован в процессе поиска, разработки и контроля эксплуатации шельфовых месторождений углеводородного сырья.

### ***Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы***

Одной из серьезных проблем, возникающих при реализации методов глубинного сейсмоакустического мониторинга, особенно в условиях действующего месторождения, является проблема выделения полезного сигнала на фоне различного рода помех. В большей степени это относится к активным методам, где формируемая при излучении поверхностная волна становится дополнительной помехой для локатора.

Наиболее действенным способом повышения эффективности локатора, использующего любой тип физических полей, является обеспечение возможности подавления помех и, в первую очередь, пространственно-локализованных и стационарных.

Опробованный в диссертационной работе вариант использования двуслойного волновода Пекриса в качестве модели среды распространения поверхностной волны и разработанный механизм оценки параметров модели позволяет приступить к отработке технологии ее применения для подавления поверхностной помехи и повышения эффективности сейсмолокаторов очагов эмиссии и, особенно, сейсмолокаторов бокового обзора.

### Список литературы

1. Агеева Н.С., Крупин, В.Д., Перельгин В.П., Студеничник Н.В. Построение геоакустической модели дна в мелком море // Акустический журнал, 1993. Т.40. №2. С. 181-188
2. Александров С.И., Мишин В.А., Буров Д.И. Наземный микро-сейсмический мониторинг гидроразрыва пласта: контроль качества и перспективы // Геофизика. – 2014. № 2. С. 31-34
3. Ампилов Ю.П., Батулин Д.Г. Новейшие технологии сейсмического мониторинга 4D при разработке морских месторождений нефти и газа // Технология сейсморазведки. 2013. №2. С. 31-36
4. Ампилов Ю.П., Владов М.Л., Токарев М.Ю. Технологии морской сейсморазведки в широком частотном диапазоне: проблемы и возможности // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 4. С. 42-65
5. Астахова Н.В, Добрянский В.М., Колигаев О.А., **Колигаев С.О.**, Крайнов А.Б, Лобов Р.В., Шикалов А.А. Способ морской сейсморазведки. Патент РФ №2502091. 2013 (авторский вклад 30%).
6. Астахова Н.В, Добрянский В.М., Колигаев О.А., **Колигаев С.О.**, Крайнов А.Б, Лобов Р.В., Шикалов А.А. Способ оценки геологической структуры верхних слоев дна. Патент РФ №2503037. 2013 (авторский вклад 30%).
7. Бардышев В.И. Горизонтальная приемная случайная антенная решетка, согласованная с гидроакустическим волноводом // Акустический журнал, 2012. Т.58. №5. С. 610-613
8. Белов А.И., Комаров А.. Построение акустической модели морского дна мелководного района на основе данных геолого-геофизических исследований и экспериментов по распространению звука // Акустический журнал. 1998. Т.44. №3. С. 312-317
9. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка акустических параметров модели дна в мелком море с использованием априорной геолого-геофизической

информации и преобразования Вигнера // Акустический журнал, 2014, Т.60 №2. С. 190-195

10. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка шумности движущихся источников на основе идентификации акустической модели морского дна // Акустический журнал. 2013. Т.59. №6. С. 722-734

11. Беседина Т.Н., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Локализация источника звука в океанических волноводах // Акустический журнал. 2015. Т.61. №2. С. 207-215

12. Беседина Т.Н., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Определение глубины источника звука в мелком море на фоне интенсивного шума // Акустический журнал. 2015. Т.61. №6. С. 718-728

13. Богоявленский В.И., Арабский А.К., Арно О.Б., Меркулов А.В., Миронов В.И., Балканов В.В., Кирсанов С.А., Богоявленский И.В. Способ сейсмического мониторинга образования техногенных залежей углеводородов при разведке и разработке углеводородов на акваториях. Патент 2691630. 2018.

14. Богоявленский В.И., Дмитриевский А.Н., Якубсон К.И. Способ сейсмического мониторинга в процессе разработки месторождений углеводородов на акваториях. Патент 2539745. 2015.

15. Богоявленский В.И., Максимов Г.А., Гладилин А.В. Способ сейсмического мониторинга процесса освоения месторождения углеводородов на шельфе. Патент 2502735. 2014.

16. Богоявленский В.И. Способ сейсмического мониторинга разработки месторождений углеводородов на акваториях. Патент 2540005. 2015.

17. Буров Д.И., А.В. Кусевич Практика применения сейсмомониторинга гидроразрыва пласта // Технологии сейсморазведки. 2012. № 1. С. 63–66.

18. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов. М. Сов. Радио. 1979. 272с.

19. Гайнанов В.Г. Разработка компьютерной технологии одноканальных и многоканальных сейсмоакустических исследований на акваториях:

автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 25.00.10/ Москва. 2009. С.44-45

20. Гайнанов В.Г., Верхницкий А.А., Токарев М.Ю., Шматков А.А. Трехмерные сейсмоакустические наблюдения на акваториях // Neftegaz.ru. 2017. №1. С. 56-68.

21. Гладилин А.В., Максимов Г.А., Лесонен Д.Н., Дерев А.В. Гидроакустическая система для позиционирования. Патент 2568071. 2014.

22. Голубева Е.В., Елисеевнин В.А. Диаграмма направленности по мощности гидроакустической антенны в волноводе // Акустический журнал, 2008. Т.54. №6. С. 956-961.

23. Голубева В.Н., Елисеевнин В.А. Отклик горизонтальной линейной антенны в области дислокации фазового фронта звукового поля в волноводе // Акустический журнал. 1998. Т.44. №5. С. 697-699.

24. ГОСТ Р 51794-2001. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек.

25. Грачев Г.А., Кузнецов Г.Н. Средняя скорость распространения модулированных колебаний вдоль плоского волновода // Акустический журнал. 1986. Т.32. №2. С. 258-260.

26. Грачев Г.А., Кузнецов Г.Н. Ослабление интерференционных максимумов акустического поля в мелком море // Акустический журнал. 1985. Т. 31. №5. С. 75-678.

27. Грачев Г.А., Кузнецов Г.Н. О средней скорости изменения фазы акустического поля вдоль плоского волновода // Акустический журнал. 1985. Т.31. №2. С. 266-268.

28. Гуленко В.И. Разработка и исследование пневматических источников упругих волн для морской сейсморазведки: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 25.00.10./ Краснодар. 2003. С. 9-11.

29. Дифференциальный (DGPS) сервис, <http://www.geomir.ru/catalog15.html>.

30. Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А., Филиппова Д.С., Сафарова Е.А.. Цифровой нефтегазовый комплекс России // Георесурсы. 2020. Спецвыпуск. С. 32–35. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.SI.32–35>.
31. Елисеевнин В.А. О коэффициенте концентрации гидроакустической антенны в волноводе // Акустический журнал. 2006. Т.52. №1. С. 131-133.
32. Елисеевнин В.А. Усредненный отклик горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акустический журнал. 2004. Т.50. №2. С. 193-197.
33. Елисеевнин В.А. Использование интерференционной структуры звукового поля в волноводе для определения направления на источник// Акустический журнал. 2001. Т.47. №3. С. 341-345.
34. Елисеевнин В.А. Определение направления на источник в волноводе с помощью горизонтальной линейной антенны // Акустический журнал. 1996. Т.42. №2. С. 208-211.
35. Елисеевнин В.А. Диаграмма направленности компенсированной излучающей горизонтальной линейной антенны в волноводе // Акустический журнал. 1989. Т. 35. №3. С. 468-472.
36. Елисеевнин В.А. Отклик низкочастотной горизонтальной линейной антенны в свободном пространстве и в волноводе // Акустический журнал. 1985. Т.31. №6. С. 805-807.
37. Елисеевнин В.А. О работе горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акустический журнал. 1983. Т. 29. №1. С. 44-49.
38. Есипов И. Б., Тарасов С. П., Чулков В. Л. Параметрическая гидроакустическая антенна - перспективный инструмент для мониторинга океана на протяженных трассах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т.7. №2. С.46-57.
39. Есипов И.Б., Попов О.Е., Солдатов Г.В. Компрессия сигнала параметрической антенны в мелководном волноводе // Акустический журнал. 2019. Т.65. №4. С. 490-498.
40. Зверев В.А. Радиооптика. М. Советское радио. 1975. С.98-135.

41. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Сейсмоакустические исследования на акваториях. М. Недра. 1983. С. 147-150.
42. Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. Красный Октябрь. 2005. 420с.
43. Кедров О.К, Кедров Э.О. Идентификация сейсмических явлений на станции "Тал-гар" с учетом трассы источник-станция // Физика Земли. 2003. №12. С. 14-22
44. Кедров Э.О. О влиянии подземных ядерных взрывов на региональную сейсмичность // Физика Земли. 2002. №3. С. 194-206.
45. Кедров Э.О, Кедров О.К. Спектрально-временной метод идентификации сейсмических явлений на расстояниях 15-40° // Физика Земли. 2006. №5. С. 47-64.
46. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М. Мир. 1980. 580с.
47. Колигаев О.А., **Колигаев С.О.** О расстановке датчиков в системе позиционирования // Депонировано ФГУП ВИМИ – Федерального информационно-аналитического центра оборонной промышленности. Сборник рефератов НИОКР №1. Серия ИМ. 2007. (0.4 п.л., авторский вклад 75%).
48. Колигаев О.А., Старожук Е.А., Астахова Н.В., **Колигаев С.О.**, О контроле шумоизлучения морских нефтегазопромысловых комплексов // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа северного ледовитого океана». Новосибирск. 2010. С.85-87. (0.2 п.л., авторский вклад 30%).
49. **Колигаев С.О.** и др. «Программный комплекс станции контроля шумности морских нефтегазовых комплексов». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. №2012616017. 2012. (авторский вклад 25%).
50. **Колигаев С.О.**, Колигаев О.А. Некоторые особенности позиционирования объектов в гидроакустических и сейсмоакустических информационных системах // Геоинформатика. 2010. №4. С. 23-27. RSCI. Импакт-фактор РИНЦ: 0,537. (0.375 п.л., авторский вклад 70%).

51. **Колигаев С.О.** О применении принципов позиционирования объектов в сейсмоакустических информационных системах охранной сигнализации // Сборник трудов кафедры общей и прикладной геофизики Международного университета «Дубна». М. РАЕН. 2007. С.85-91. (0.4 п.л.).
52. **Колигаев С.О.** Способ обнаружения и определения текущего местоположения нарушителя охраняемой зоны. Патент РФ № 2311686. 2007.
53. **Колигаев С.О.** Пакет обработки сейсмо- и гидроакустических сигналов - «ПОСиГС». Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2015662772. 2015.
54. **Колигаев С.О.,** Колигаев О.А., Колтин Г.П. Регистрация, обработка и анализ экспериментальной информации (функциональное ПО). Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2015617212. 2015. (авторский вклад 70%).
55. **Колигаев С.О.,** Колтин Г.П. Синхронизация работы с береговым комплексом калибруемой системы. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2015617220. 2015. (Авторский вклад 50%).
56. **Колигаев С.О.,** Колигаев О.А. Практическое применение волновода Пекериса в качестве геофизической модели Баренцева моря // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование «Maresedu-2020», Т.3, С.498-501 (0.25 п.л., авторский вклад 75%).
57. **Колигаев С.О.,** Колигаев О.А. Некоторые практические результаты использования волновода Пекериса при исследовании низкочастотных гидроакустических полей в Баренцевом море // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021)». Т.1. С.99-104. (0.3 п.л., авторский вклад 75%).
58. **Колигаев С.О.,** Колигаев О.А. О позиционировании пространственно-развитых приемных выносных частей и излучателя в процессе синтезирования излучающей апертуры в морских системах сейсмолокации //

Тезисы докладов IX Международной научно-технической конференции «Освоение ресурсов нефти и газа Российского шельфа: Арктика и Дальний Восток (ОМНР-2023). М. Газпром ВНИИГАЗ. С. 74. (0.06 п.л., авторский вклад 75%).

59. **Колигаев С.О.**, Чиркин И.А., Ризанов Е.Г. Сейсмические антенны // Труды конференции «Сейсмические технологии-2016». М, ИФЗ, 2016. С. 49-52. (0.3 п.л., авторский вклад 75%).

60. Крючкова В.В. Акустические волны в пористых флюидонасыщенных средах: компьютерное моделирование на мезоуровне // «Физическая мезомеханика». 2000. №3. С.87-92.

61. Кузнецов Г.Н., Лебедев О.В. О возможности применения модели с эквивалентной плоской волной для повышения точности пеленгования низкочастотных сигналов в мелком море // Акустический журнал. 2012. Т. 58. №5. С. 628-638.

62. Кузнецов О.Л., Арутюнов С.Л., Курьянов Ю.А., Чиркин И.А., Колигаев О.А., **Колигаев С.О.**, Старожук Е.А. О применении стационарных донных сейсмоакустических систем в геофизических исследованиях и разработке нефтегазовых месторождений на шельфе // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа северного ледовитого океана». Новосибирск. 2010. С.31-34. (0.5 п.л., авторский вклад 30%).

63. Кузнецов О.Л., Гайнанов В.Г., Радван А.А., Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.** Применение сейсмических рассеянных и эмиссионных волн для повышения эффективности освоения месторождений углеводородов» // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2017. № 4. С. 54-59. RSCI. Импакт-фактор РИНЦ: 0,411. (0.42 п.л., авторский вклад 30%).

64. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Радван А.А., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.** Сейсмические исследования на разрабатываемых месторождениях нефти и

- газа (промысловая сейсмометрия) // Каротажник. 2016. Т. 270, № 12. С. 39–66. Импакт-фактор РИНЦ (2016):0.254 (1.8 п.л., авторский вклад 15%).
65. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Курьянов Ю.А., Щленкин С.И., Арутюнов С.Л., Дыбленко В.П., Рогоцкий Г.В. Новые технологии и решение прикладных задач. М.: Государственный научный центр РФ ВНИИгеосистем, 2007. 432 с. (Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред: Т. 3)
66. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., Колигаев С.О. Долговременный мониторинг микросейсмической эмиссии – новые возможности изучения геологической среды // Вестник университета «Дубна». Серия "Естественные и инженерные науки". 2014. № 2 (30). С. 47 – 61, (0.82 п.л., авторский вклад 25%).
67. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Твердохлебов Л.И., Эльжаев А.С., Ризанов Е.Г., Колигаев С.О., Юров А.А., Вьюшкина М.В. Инновационные технологии сейсморазведки // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2020. №4 (100). С. 68-75. Импакт-фактор РИНЦ: 0,326. (0.5 п.л., авт. вклад 20%).
68. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Твердохлебов Л.И., Гурьев С.В., Юров А.А., Ризанов Е.Г., Колигаев С.О., Lyasch Y.F., LeRoy S.D., Radwan A.A. Сланцевая революция: мифы, рифы и перспективы. Новая концепция освоения сланцевых месторождений нефти и газа. // Вестник РАЕН. 2022. Т. 22. № 4. С. 60–68. Импакт-фактор РИНЦ: 0,171. (0.5 п.л., авт. вклад 10%).
69. Лаверов Н.П., Послов Ю.В., Лобковский Л.И., Тулупов А.В., Воронов М.А., Ганжа О.Ю. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4. С. 4-13.
70. Лобковский Л.И., Ковачев С.А., Миронюк С.Г., Левин С.В. Технические средства и методы обеспечения геодинамической безопасности на разрабатываемых шельфовых месторождениях углеводородов // Инженерная практика. 2012. № 12. С.82-85.
71. Левченко Д.Г., Ковачев С.А., Лобковский Л.И., Ильинский Д.А., Рогинский К.А. Кабельные донные сейсмостанции для комплексного

мониторинга морских нефтегазоносных месторождений // Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2015)». М. 2015.

72. Левченко Д.Г., Лобковский Л.И., Ильинский Д.А., Леденев В.В., Рогинский К.А., Раушенбах И.Б. Опыт разработки и испытания комплексной кабельной донной сейсмостанции // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 4. С. 39-51.

73. Максимов Г.А., Гладилин А.В., Лекомцев В.М. Способ определения положения бурового инструмента в процессе бурения. Патент РФ №2572668. 2014.

74. Максимов Г.А., Гладилин А.В., Лесонен Д.Н., Овчинников О.Б. Геофизический комплекс для мониторинга и морской сейсморазведки. Патент РФ №2576351. 2014.

75. Милн П.Х. Гидроакустические системы позиционирования. Л. Судостроение. 1989. 231с.

76. Морозов В.П. Курс сфероидической геодезии. Изд. 2. М. Недра. 1979. 296с.

77. Папкина Ю.И. Взаимосвязь модели гидроакустического плоскостойкого волновода на жестком основании с волноводом Пекериса // Акустичний вісник. 2013–2014. Т.16. № 1. С. 47–53.

78. Папкина Ю.И. Моделирование нижней границы для гидроакустического волновода // Акустический журнал. 2015. Т. 61. №1. С. 69-75.

79. Папкина Ю.И., Папков С.О. Звуковое поле в морском волноводе с цилиндрической неоднородностью // Акустический журнал. 2019. Т.65. №5. С. 650-661.

80. Потокий М. В. Картография с основами топографии, комплекс программно-методических материалов по предмету. 2003. С. 56-66.

81. Радио-технические системы, п/р Казаринова Ю.М. М. Высшая школа. 1990. С. 297- 306.

82. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Л. Судостроение. 1990. 320 с.

83. Системы точного позиционирования. [http://icentre-gfk.ru/naprd/nard\\_stp\\_op.htm](http://icentre-gfk.ru/naprd/nard_stp_op.htm).
84. Скучик Е. Основы акустики. Т. 1. М. Мир. 1976. 520 с.
85. Смаришев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. Л. Судостроение. 1973. 278 с.
86. Смирнов В.А., Скворцова Н.Н., Кончечков Е.М., Ларичев В.А., Максимов Г.А. Программный комплекс для позиционирования акустических донных систем. // Системы и средства информатики. 2020. № 30 (4). С. 113–123.
87. Степченков Ю.А. и др. Редактирование резонансных явлений и вычитание поверхностных волн в технологии сейсморазведки высокой четкости. [http://geovers.com/base/files/gr11/papers/4\\_Stepchenkov\\_UA.pdf](http://geovers.com/base/files/gr11/papers/4_Stepchenkov_UA.pdf).
88. Сысоев С. Н., Рыбаков Р. А., Черкасов Ю. В., Кузьменков И. В., Панфилов А.К. Сейсмоакустические сигнализаторы раннего предупреждения несанкционированного проникновения на охраняемую территорию // Датчики и системы. Sensors & Systems. 2013. №3 (166). С. 36-39.
89. Твердохлебов Л.И., Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Каляшин С.В., **Колигаев С.О.**, Гурьев С.В., Юров А.А., Ризанов Е.Г. Использование сейсмоакустического мониторинга для повышения эффективности освоения ресурсов нефти и газа российского шельфа // Тезисы докладов IX Международной научно-технической конференции «Освоение ресурсов нефти и газа Российского шельфа: Арктика и Дальний Восток (ОМНР-2023)». с. 16.
90. Толстой И., Клей К.С. Акустика океана. М.. Мир. 1969. 301с.
91. Урик Р.Д. Основы гидроакустики. Л. Судостроение. 1978. 448с.
92. Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н. О плохо обусловленных системах линейных уравнений // ЖВМ и МФ. 1961. Т.1. №3. С.412-417.
93. Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Определение параметров очагов региональных землетрясений по записям поверхностных волн // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 4. С. 16–27.
94. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М. Мир. 1980. 279 стр.

95. Ханова А.А. Численное решение систем нелинейных уравнений // Научно-технический журнал «Экспонента-ПРО». 2004. №1.
96. Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., Каляшин С.В., **Колигаев С.О.**, Радаван А.А. Мониторинг микросейсмической эмиссии для обеспечения экологической безопасности разведки и разработки нефтяных месторождений на акватории // Вестник Российской академии естественных наук. 2014 (4). Т. 14. С. 8-14. Импакт-фактор РИНЦ: 0,171. (0.4 п.л., авторский вклад 20%).
97. Чиркин И.А., Ризанов Е., **Колигаев С.О.** Мониторинг микросейсмической эмиссии – новое направление развития сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2014. Т. 49. № 3. С. 6-15. Импакт-фактор РИНЦ: 0,083. (0.6 п.л., авторский вклад 35%).
98. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. Т.1. М. Мир. 1987. С. 326-353.
99. Avrorin A.D., Avrorin A.V., Belolaptikov I.A., Kebkal K.G., Kebkal O.G., **Koligaev S.O.** Baikal-GVD collaboration. A positioning system for Baikal-GVD. 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019). 2019. Madison. WI. U.S.A.
100. Kouznetsov O.L., Lyasch Y.F., Chirkin I.A., Rizanov E.G., LeRoy S.D., **Koligaev S.O.** Long-term monitoring of microseismic emissions: Earth tides, fracture distribution and fluid content// Interpretation.- 2016.- V4.- №2. - P. T191-T204. Scopus, SJR: 0.662. (0.85 п.л., авторский вклад 25%).
101. Kuznetsov O, Chirkin I, Radwan A, Ismail A, Lyasch Y, LeRoy S, Rizanov E, **Koligaev S**, Abdelmaksoud A. Man-made earthquakes prevention through monitoring and discharging of their causative stress-deformed states // Arabian Journal of Geosciences. 2021. Vol. 4. № 14. Article №288. P. 1-11. Scopus, SJR: 0.406. (0.6 п.л., авторский вклад 15%).