

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Шайдуров Роман Георгиевич

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ
ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И
СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН**

Специальность:

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и
изделий

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р. техн. наук, проф.
Гарин Е. Н.

Красноярск – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР О СОСТОЯНИИ ТЕХНИКИ ПОИСКА ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ..... | 9 |
| 1.1 Основные признаки объектов поиска..... | 9 |
| 1.2 Характеристики укрывающих сред..... | 11 |
| 1.3 Классификация методов..... | 18 |
| Радары подповерхностного зондирования..... | 20 |
| Георадары..... | 22 |
| Активная нелинейная радиолокация..... | 24 |
| Параметрическая радиолокация..... | 25 |
| Комбинированные системы обнаружения..... | 28 |
| Выводы..... | 33 |
| ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СЕЙСМО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОИСКА..... | 34 |
| 2.1 Поверхностные волны Релея..... | 34 |
| 2.2 Поверхностные волны Лява..... | 40 |
| 2.3 Физические основы параметрического метода..... | 43 |
| 2.4 Собственные частоты механических вибраций объектов поиска под действием сейсмических ударов..... | 49 |
| 2.5 Энергетические оценки акустического канала..... | 52 |
| 2.6 Энергетические оценки радиолокационного канала для подповерхностного зондирования..... | 58 |
| Выводы..... | 68 |
| ГЛАВА 3. ВОЗБУЖДЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ..... | 69 |
| 3.1 Ультразвуковой параметрический метод возбуждения сейсмических волн..... | 69 |
| 3.2 Импульсный невзрывной электромагнитный сейсмоисточник..... | 73 |
| 3.3 Анализ сейсмических волн, производимых собственными шумами движущегося носителя..... | 79 |

| | |
|--|-----|
| Выводы..... | 84 |
| ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА..... | 85 |
| 4.1 Результаты экспериментальных работ первой очереди..... | 85 |
| 4.2 Результаты экспериментальных работ в сентябре 2018 г.... | 90 |
| 4.3 Опытные работы по проверке чувствительности радиолокационного метода..... | 95 |
| 4.4 Экспериментальная проверка зависимости от частоты акустического излучения и расстояния до источника..... | 100 |
| 4.5 Вероятностные характеристики обнаружения и распознавания класса объектов поиска..... | 104 |
| 4.6 Проблема создания аппаратного комплекса..... | 107 |
| Оценка тактико-технических характеристик параметрического канала..... | 108 |
| Аппаратный комплекс, система и технология работы..... | 114 |
| Выводы..... | 116 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 118 |
| ЛИТЕРАТУРА..... | 119 |

ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение объектов в укрывающих средах, представляет одну из важных задач человеческой жизнедеятельности. Поиску трубопроводов, кабелей, выполненных из различных материалов, а также металлических заглубленных объектов с учетом различных условий применения аппаратуры посвящена данная работа. Так же видятся перспективы использования нового метода в качестве поиска места повреждений трубопроводов. Отдельной задачей является создание аппаратуры для дистанционного обнаружения миноподобных объектов с целью гуманитарного разминирования. Не смотря на современное развитие техники и технологий в этой области, она остается до сих пор актуальной. Завершенные и продолжающиеся военные конфликты с использованием в большом количестве различных типов устройств, диктует необходимость создания эффективных методов безопасного обнаружения.

Основные вопросы данной области связаны с повышением точности обнаружения, селекции «целей», увеличения производительности и снижения затрат при проведении данных работ.

Традиционные используемые методы поиска основаны на применении металлодетекторов (индукционного типа). Во многих случаях металлодетекторы оказываются бесполезными для поиска объектов с низким количеством металла либо выполненных полностью из пластика, который все чаще используется в качестве основного материала для трубопроводов и коммуникаций. При высокой степени засорения земли металлическими включениями металлодетекторы дают большое количество ложных срабатываний, что негативно влияет на производительность работ.

Кроме того, применяются, либо находятся в стадии разработки, ряд методов на основе использования радиолокаторов подповерхностного зондирования, радиометрические комплексы, нейтронные и гамма-датчики.

Перспективными вариантами создания технических средств поиска, также является совмещение нескольких видов датчиков на одной платформе с целью повышения качества обнаружения целей.

Все выше перечисленные методы различаются как по дальности обнаружения, точности селекции, скорости сканирования местности и условиям работы. Необходимо также учитывать сложность и стоимость реализации подобных комплексов.

На основе оценки существующих способов поиска представляет интерес создания метода параметрической локации с использованием радара подповерхностного зондирования и сейсмического излучателя в качестве «подсветки» объектов поиска.

Цель и задачи исследования

Теоретическое и экспериментальное обоснование параметрического радиолокационного метода и возможная реализация поискового комплекса. Работа включает в себя следующие задачи исследования:

1. Разработка физических основ поиска подповерхностных объектов на основе параметрического метода радиолокации с применением в качестве модулирующего сигнала поверхностных сейсмических волн Релея;
2. Оценка энергетических параметров поисковых установок;
3. Исследование потенциальных возможностей метода по дальности и статистических характеристик обнаружения;
4. Разработка структуры аппаратных средств.

Методы исследования

Применены методы линейного и спектрального анализа, теории радиолокации и сейсморазведки, дана оценка экспериментальных и теоретических результатов работы.

Защищаемые положения

1. Представленный новый параметрический метод позволяет получить дополнительный отличительный признак для объектов поиска так и для объектов ложных тревог, что закладывает научно-технические основы нового метода.

2. Экспериментально подтверждено наличие акустических портретов объектов, что при обработке с помощью математических алгоритмов по трем измеряемым параметрам и в случае нормального закона распределения шума, вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-2}$, вероятность правильного обнаружения по критериям Неймана-Пирсона составит $P_{обн} = 0,97$.

3. В качестве источника сейсмических волн Релея предлагается использовать импульсный излучатель, работающий на электромагнитном принципе с периодическим повторением ударов.

4. Разработанная конструкция аппаратного комплекса с размещением источника сейсмических волн на базовой машине, передатчика РЛС с бортовым центром обработки информации, и выносом приемных антенн РЛС на дистанционно управляемые подвижные поисковые блоки-роботы, позволяет соблюсти требования к безопасности проведения работ.

Новые научные результаты

1. Впервые дано обоснование использования сейсмических волн Релея для возбуждения объекта поиска с регистрацией отклика узкополосной РЛС автодинного типа.

2. Для решения задачи предложено использовать РЛС в СВЧ диапазоне 10-30 ГГц, обеспечивающее получение доплеровского фазового сдвига колебаний поверхности грунта.

3. Показано, что в качестве источника сейсмических волн оптимально использование невзрывных импульсных сейсмических излучателей электромагнитного типа.

4. Наилучшую эффективность поиска можно обеспечить считыванием четырех информационных параметров, коэффициента взаимной корреляции между заранее записанных при обучении импульсных переходных характеристик объектов поиска и сигналов отклика на выходе РЛС, относительной полосой спектра сигнала и его длительности, а также дополнительного информационного признака- тангенса угла потерь в грунте, что позволяет снизить вероятность ложных тревог.

Теоретическая и практическая значимость

1. Впервые предложен и исследован радиолокационный метод поиска подповерхностных объектов на основе параметрического взаимодействия сейсмических и электромагнитных волн.

2. Получены энергетические зависимости для радиолокационного тракта, связывающиеся параметры сейсмического излучателя и радиоканала.

3. Дан анализ возможности создания роботизированного комплекса на основе базовой машины и системы управляемых поисковых блоков.

4. Впервые экспериментально показаны в натуральных условиях результаты взаимодействия механических и электромагнитных колебаний на различных объектах, и мешающих ложных целей, типа металлического мусора, камней, кирпича и т.п.

5. Дано экспериментальное подтверждение теоретических расчетов о возможности применения данного метода поиска.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на научном семинаре в Центральном научно-исследовательском испытательном институте инженерных войск Минобороны России (2018, г. Москва), на научной конференции Военной академии ВКО, «Состояние и перспективы развития системы противовоздушной обороны государств-участников СНГ» (2016, г. Тверь) и II Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (2015, г. Красноярск). Опубликовано в восьми публикациях в т. ч. семь по списку ВАК, и одна в цитируемых изданиях «Web of Science» и «Scopus». На устройство поиска диссертантом получен патент РФ №2681271.

Личный вклад автора

Основные теоретические и экспериментальные исследования проведены автором лично.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав основного текста, заключения, списка литературы из 70 наименований. Общий объем работы составляет 125 страниц и 67 иллюстраций.

Краткое содержание работы

Во введении содержится общая характеристика рассматриваемой проблемы, обосновывается актуальность выбранной темы, излагаются предпосылки выполнения диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования.

В первой главе дан обзор существующих и перспективных методов и средств поиска. Проведен сравнительный анализ. Обоснована актуальность предлагаемого метода и сформулирована постановка задачи.

Во второй главе рассмотрены варианты генерации сейсмических волн. Представлена математическая модель распространения поверхностных сейсмических волн Релея и Лява. Дан выбор и обоснование применения источника сейсмических волн носителя, на основании анализа ультразвуковых и импульсных технологий. Рассмотрена возможность использования естественных шумов от движения носителя в качестве сейсмоисточника.

В третьей главе дан системный анализ параметрического радиолокационного канала. Приведены основные уравнения параметрической радиолокации для земной и водной поверхности. Осуществлен выбор и оптимизация зондирующего радиолокационного сигнала. Дана оценка радиопомехи движения по статистически неровной поверхности, рассчитаны энергетические параметры излучателя и приемника радиолокационного сигнала, в том числе с вынесенными поисковыми блоками.

В четвертой главе приведены экспериментальные результаты работы и существующие проблемы построения аппаратуры радиолокационного параметрического комплекса.

ГЛАВА 1. Аналитический обзор о состоянии техники поиска подповерхностных объектов

1.1 Основные признаки объектов поиска

В настоящее время разработано, производится и применяется более 700 видов мин. Объединяющим фактором для всех типов является наличие взрывчатого вещества, специфичным - материал оболочки, геометрическая форма и конструкция исполнительного механизма.

На основании выявления и определения демаскирующих признаков объектов поиска формируются основные методы и принципы построения аппаратуры разминирования.

Демаскирующие признаки таких устройств обусловлены рядом факторов [1]. Основные факторы, которые имеют место практически всегда:

- наличие взрывчатого вещества (ВВ);
- наличие локально расположенной массы металла;
- характерная форма;
- неоднородности вмещающей среды (нарушение поверхности грунта, дорожного покрытия, стены здания, нарушения цвета растительности или снежного покрова и т.д.).

Дополнительные демаскирующие факторы, которые могут быть не всегда:

- наличие проводной линии управления;
- наличие часового механизма или электронного таймера;
- наличие сейсмического, магнитного или оптического датчика цели;
- наличие антенны с радиоприёмным устройством.

Итак, миноподобный объект может обнаруживаться, в основном за счет трех факторов:

- наличия сосредоточенной массы ВВ;
- характерной конструкции (формы, материала корпуса и т.д.);
- нарушение однородности окружающего фона (цвета растительности,

плотности грунта и т.д.).

Приведем демаскирующие признаки объектов поиска разделив по основным группам таблица 1.1.

Таблица 1.1

Демаскирующие признаки мин и взрывных устройств [1,2]

| Наименование контраста между объектом и вмещающей средой | Тип объекта поиска | | | |
|--|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | Противопехотная мина (ППМ) | Противотанковая мина (ПТМ) | Мины и ВУ с электронными компонентами | Мины ВУ с проводной линией управления |
| Отличие электропроводности | + | + | + | + |
| Отличие магнитной проницаемости | ± | ± | + | + |
| Отличие диэлектрической проницаемости | + | + | + | + |
| Отличие теплофизических характеристик | ± | ± | ± | ± |
| Отличие оптических характеристик | ± | ± | ± | ± |
| Отличие механических характеристик | + | + | + | + |
| Наличие паров ВВ | ± | ± | ± | ± |
| Наличие нелинейных электромагнитных свойств | ± | ± | + | ± |

+ – контраст имеется;

± – контраст имеется не всегда

1.2 Характеристики укрывающих сред

Взрывные устройства располагаются, как правило, в укрывающих (вмещающих) средах. Укрывающими средами могут быть:

- грунты различного состава и влажности (наиболее типичный случай);
- пресная вода рек и озер;
- морская вода;
- растительность;
- снег, лед;
- строительные материалы (кирпич, бетон и т.д.).

Применительно к рассматриваемому вопросу их основными материальными характеристиками являются: плотность, твердость, электрическая проводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемости, коэффициенты отражения и излучения в видимом (0,4...0,76 мкм) и инфракрасном (0,76...1000 мкм) диапазонах электромагнитных волн и др. Конкретные значения этих характеристик приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Характеристики основных укрывающих сред

| Укрывающая среда | Электромагнитные характеристики | | | Плотность г/см ³ |
|-------------------------|---------------------------------|-------|--------------|--------------------------------|
| | ϵ | μ | B_n , См/м | |
| Сухой песок | 4 | 1 | 10^{-4} | 1,2-1,65 |
| Грунт средней влажности | 10 | 1 | 10^{-2} | 1,4-1,6 |
| Влажный суглинок | 20 | 1 | 10^{-1} | 1,9-2 |
| Вода пресная | 80 | 1 | 10^{-2} | 1 |
| Вода морская | 80 | 1 | 4 | 1,01-1,05 |

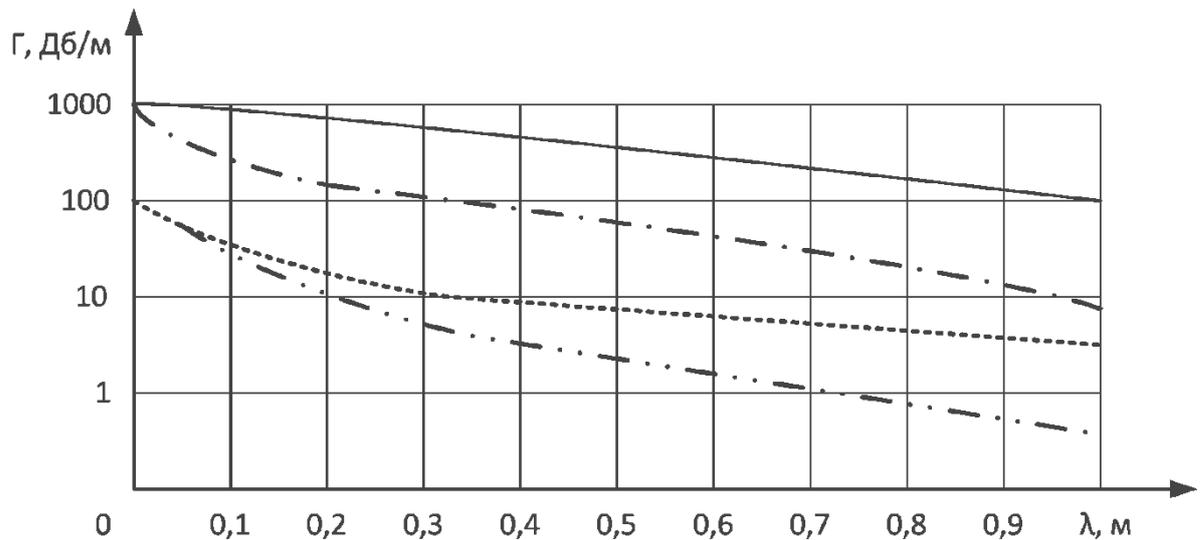


Рисунок 1.1. Зависимость удельного поглощения электромагнитной энергии вмещающей средой от длины волны λ [1, 2-6]

Рассмотрим электрические свойства пресной воды, льда и снега, поскольку являются определяющими при поглощении электромагнитных волн.

Вода является полярной жидкостью с резко выраженной зависимостью диэлектрической проницаемости от частоты. В переменных полях ее диэлектрическая проницаемость является комплексной величиной [3-8]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon' - j60\lambda\sigma_n, \quad (1.1)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \varepsilon'' / \varepsilon' = \sigma_n / \omega\varepsilon_{\text{омн}}\varepsilon', \quad (1.2)$$

где λ - длина волны, м;

σ_n - удельная электрическая проницаемость, См/м;

ω - циклическая частота рад/с;

$\operatorname{tg}\delta$ - тангенс угла потерь (рисунок 1.2)

ε' - действительная часть диэлектрической проницаемости укрывающей среды Ф/м;

ε'' - мнимая часть диэлектрической проницаемости Ф/м.

Диэлектрическая проницаемость воды зависит от ряда факторов: температуры, длины электромагнитной волны, солености. На рисунке 1.3 приведены частотные зависимости ε' и ε'' для морской (соленость $S=30\%$) и пресной воды при температуре 0° С. Максимум частотной зависимости ε'' при

$f \approx 10^{10}$ Гц обусловлен возрастанием потерь в воде вблизи частоты собственных колебаний ее молекул [4].

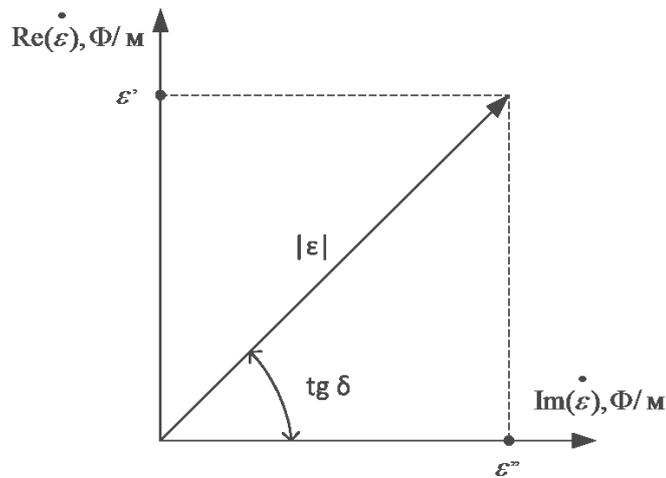


Рисунок 1.2. Графическая интерпретация электрической составляющей материальной характеристики укрывающей среды

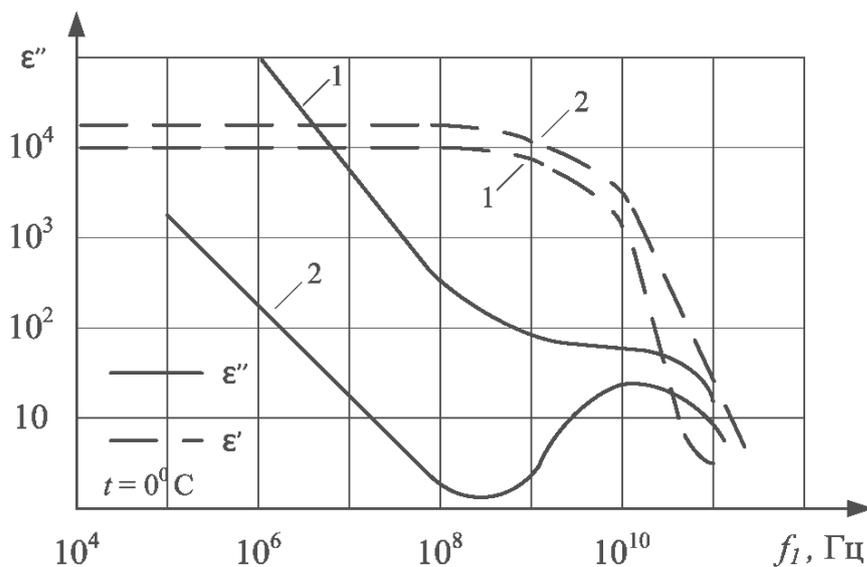


Рисунок 1.3. Частотные зависимости ϵ' и ϵ'' для морской (1) и пресной (2) воды [4,5]

На рисунке 1.4 приведены зависимости ϵ' и $\text{tg } \delta$ пресного льда от частоты и температуры. При $f = 10^8$ Гц скорость изменения диэлектрической проницаемости остается величиной постоянной ($\epsilon' \approx 3,2$) и практически не зависит от частоты и температуры. Характерны области квазирезонансного поглощения электромагнитной волны для пресного льда в диапазоне низких частот.

Сухой снег представляет собой двухкомпонентную структуру, состоящую из воздуха и кристаллов пресного льда. Наличие воды (мокрый снег) или каких-либо

примесей сильно изменяет значение его диэлектрической проницаемости. Частотные зависимости ε' и $\operatorname{tg}\delta$ для снега приведены в таблице 1.2 [3-6].

Как видно из таблицы, при $f > 10^6$ Гц для свежеснегавшего снега $\varepsilon' \approx 1,2$, а для плотного $\varepsilon' \approx 1,5$.

Характерными признаками мерзлых почв являются нулевая или отрицательная температура и наличие в них льда. Иногда встречается слоистая мерзлота, для которой характерно чередование слоев мерзлых и немерзлых пород.

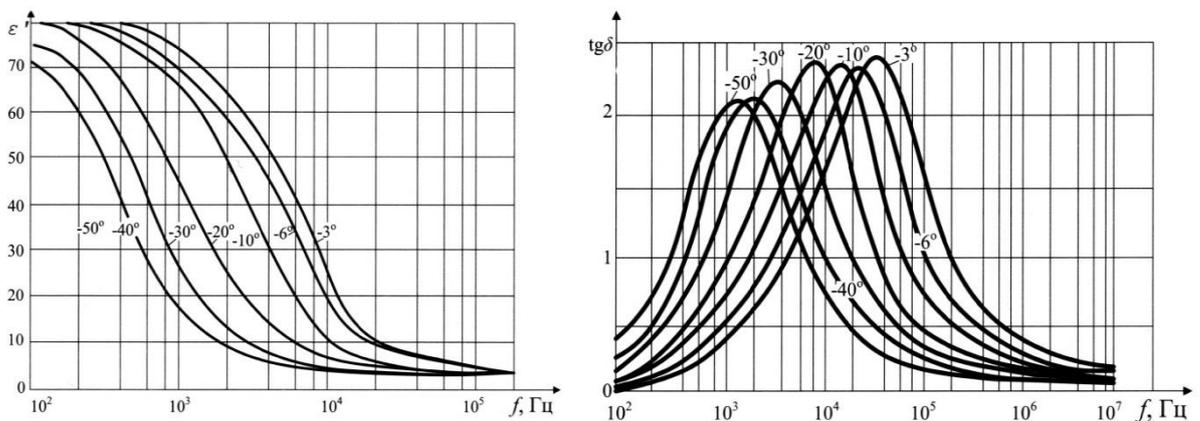


Рисунок 1.4. Частотные зависимости ε' и $\operatorname{tg}\delta$ для пресного льда при различной температуре, полученные экспериментально [4]

При замерзании воды в почвах происходит изменение их физических свойств, в частности, в значительной степени (по сравнению со случаем не мерзлой почвы) уменьшается $\operatorname{tg}\delta$ (угол потерь), а так же (в меньшей степени) ε' . В общем случае это ведет к увеличению глубинности поиска локальных объектов с использованием электромагнитных средств.

Характеристики снега [4]

| Характер снега | f , Гц | ε' | $tg\delta$ | Γ , дБ/м |
|--------------------|-----------|----------------|------------|-----------------|
| Свежевыпавший снег | | | | |
| $t=-20^0\text{ C}$ | 10^3 | 3,33 | 0,492 | $7,9*10^{-5}$ |
| | 10^4 | 1,82 | 0,342 | $4,1*10^{-4}$ |
| | 10^5 | 1,24 | 0,14 | $1,4*10^{-3}$ |
| | 10^7 | 1,2 | 0,004 | $3,9*10^{-3}$ |
| | $3*10^8$ | 1,2 | 0,0012 | $3,6*10^{-2}$ |
| $t=-6^0\text{ C}$ | $3*10^9$ | 1,2 | 0,00029 | $8,7*10^{-2}$ |
| | 10^{10} | 1,26 | 0,00042 | $4,3*10^{-1}$ |
| Плотный снег | | | | |
| | 10^5 | 1,9 | 1,53 | $7,9*10^{-5}$ |
| $t=-6^0\text{ C}$ | $3*10^5$ | 1,8 | 0,8 | $7,9*10^{-5}$ |
| | 10^6 | 1,55 | 0,29 | $7,9*10^{-5}$ |
| | $3*10^6$ | 1,55 | 0,12 | $7,9*10^{-5}$ |
| | $3*10^9$ | 1,5 | 0,0009 | $7,9*10^{-5}$ |

При замерзании воды в почвах происходит изменение их физических свойств, в частности, в значительной степени (по сравнению со случаем не мерзлой почвы) уменьшается $tg\delta$ (угол потерь), а так же (в меньшей степени) ε' . В общем случае это ведет к увеличению глубинности поиска локальных объектов с использованием электромагнитных средств.

Географические границы зоны сезонномерзлых и многолетнемерзлых почв и их толщина определяются климатическими условиями.

Для морской воды с уровнем солености 5,12% и 12,5% частотные характеристики диэлектрической проницаемости, скорости распространения радиоволн и удельного затухания в зависимости от частоты радиосигнала приведены на рисунках 1.5 и 1.6.

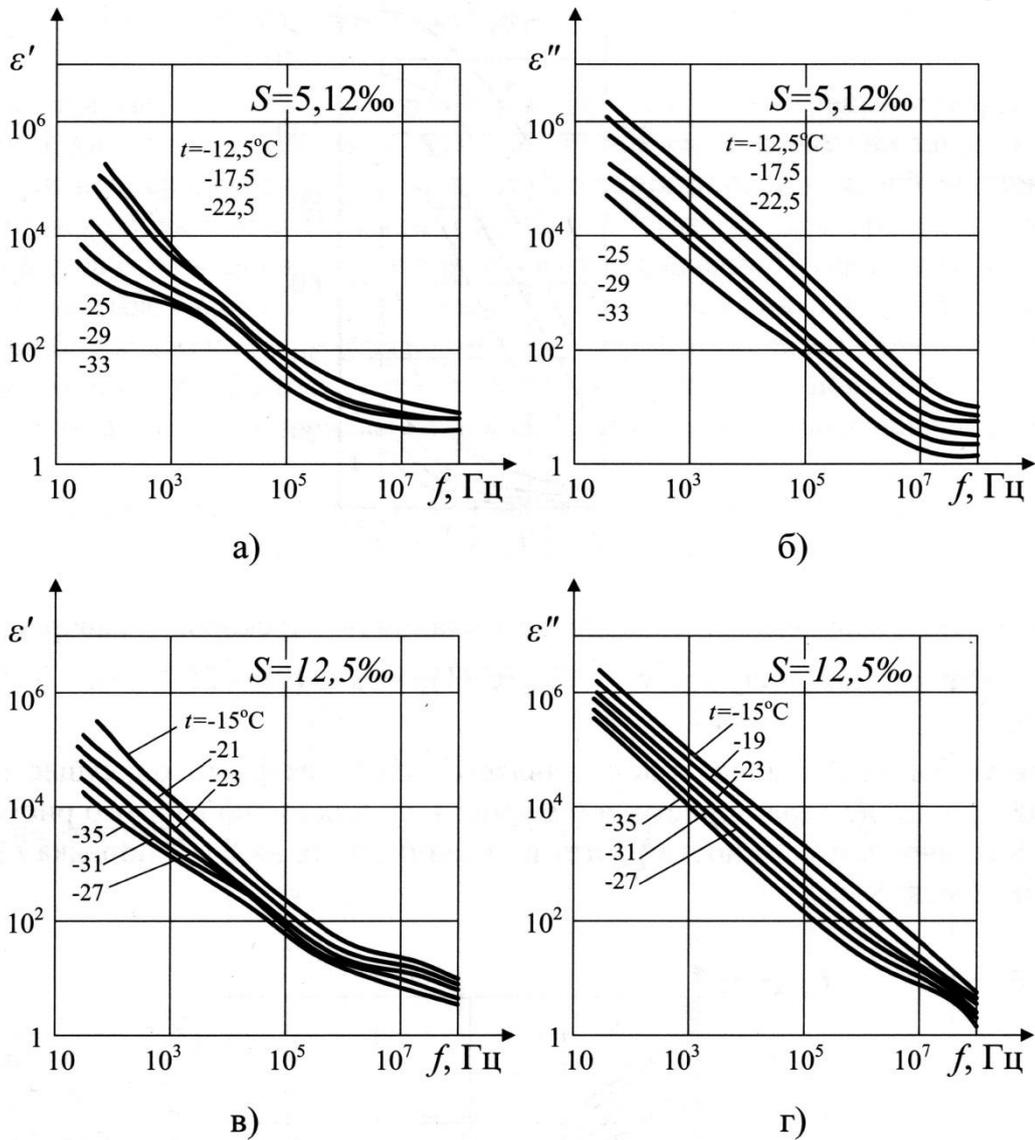


Рисунок 1.5. Электрические характеристики мерзлых почв при различных уровнях солености [2, 4]

Согласно приведенным данным, с ростом частоты зондирующего сигнала в морском льду возрастают удельное затухание и скорость распространения радиоволн, что является значительным фактором для вероятности обнаружения скрытых объектов в таких средах.

Рассмотрим электрические характеристики песчаных почв и горных пород. Особенностью верхнего слоя Земли (осадочных пород) является слоистость, с различными свойствами для каждого слоя.

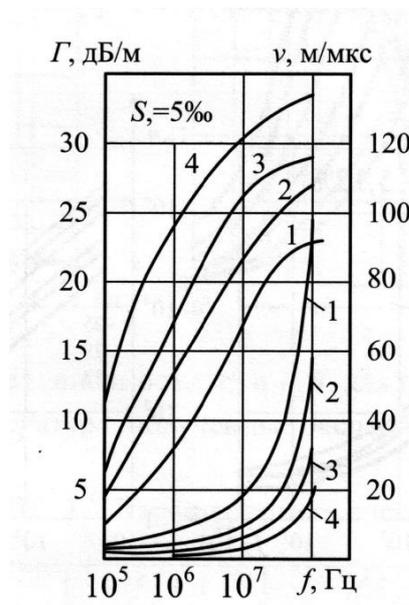


Рисунок 1.6. Частотные зависимости удельного затухания (сплошная кривая) и скорости распространения радиоволн (пунктирная) в морском льду

Основными осадочными породами являются: песок, глина, галечник, суглинок, известняк и пр. Данные породы являются пористыми и в естественных условиях содержат воду. Влагонасыщенность их также зависит и от температуры среды. [2].

Сухими горными породами считаются гранит, базальт, щебень и пр. Для сухих горных пород в диапазоне частот зондирующего сигнала 10^2 - 10^7 Гц $\varepsilon' \approx 10$ -20 и практически не зависит от частоты, а $tg\delta$ уменьшается с ростом частоты от 0,2 (при $f = 10^2$ Гц) до 0,5 (при $f = 10^7$ Гц).

Степень влажности осадочных пород является одним из факторов, определяющих их электрические характеристики (рисунок 1.7). Как видно из графика, удельное затухание Γ с увеличением влажности растет и увеличивается на 2-3 порядка при изменении длины волны от 2 м до 8 мм.

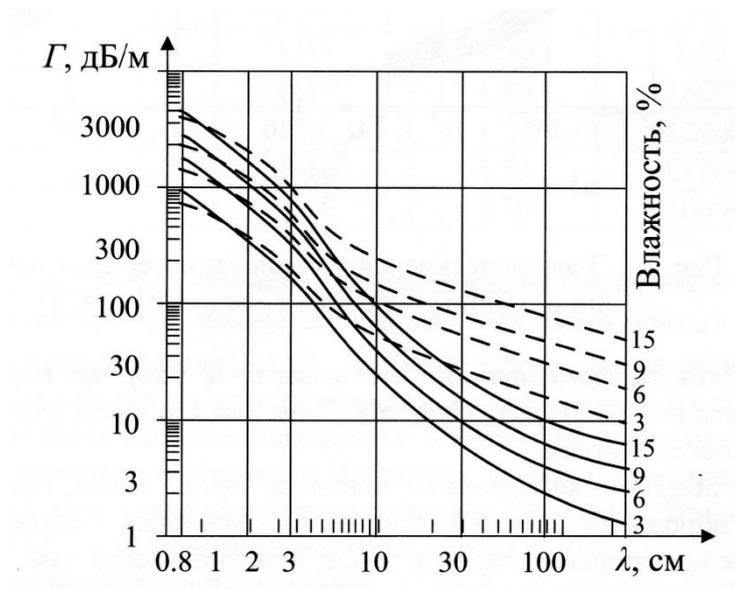


Рисунок 1.7. Зависимости удельного затухания песчаного (-) и глинистого (--) грунтов от длины волны радиосигнала для различной влажности [4, 7]

Таким образом, процесс обнаружения и регистрации демаскирующих признаков скрытых объектов во многом будет зависеть от электрофизических свойств укрывающих сред. Параметры обнаружения, (вероятность обнаружения, глубина обнаружения объекта) зависят от уровня содержания воды и ее минерализации. Как показывает анализ электрофизических свойств, все укрывающие среды, кроме растительности, являются фильтром нижних частот.

1.3 Классификация методов

На сегодняшний день в целях поиска используются как давно применяемые технические средства поиска, так и перспективные роботизированные комплексы, с использованием комбинированных методов обнаружения. Особое внимание уделяется технологиям, которые позволяют определять объекты дистанционно с малым содержанием металлических компонент. Развитие вычислительных мощностей микропроцессоров на сегодняшний день позволяют создавать компактные поисковые устройства и применение различных математических алгоритмов обработки сигналов и визуализации полученной информации.

Достаточно полная классификация методов обнаружения приведена в монографии Щербакова Г. Н. и Анцелевича М. А. [1].

Методы обнаружения даны на рисунке 1.8. Современное состояние возможных методов обнаружения объектов искусственного происхождения характеризуется многообразием [8-34]. Их анализ показывает, что каждый обладает определёнными ограничениями. Конечно, при этом необходимо учитывать, как априорную информацию об объекте поиска (размеры, материалы и т.д.), так и свойства укрывающей среды.

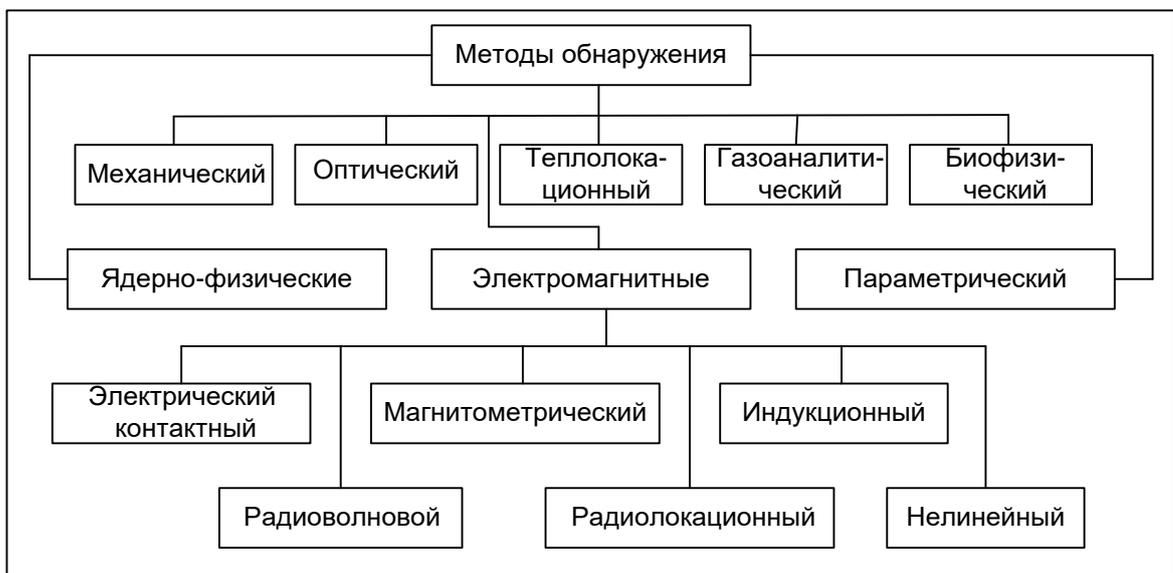


Рисунок 1.8. Основные методы поиска объектов в укрывающих средах [1]

Выбор и возможности электромагнитных методов для различных по проводимости сред и объектов рассмотрены в [35].

Для повышения эффективности обнаружения искусственных объектов целесообразно объединение различных поисковых методов в одном роботизированном комплексе с единым вычислительным центром.

Несомненно, самой сложной проблемой является обнаружение подповерхностных объектов с малым количеством металла.

Один из новых перспективных направлений обнаружения - это параметрический, запатентованный в Сибирском федеральном университете [36] и

основанный на регистрации взаимодействия возбуждающего (силового) и зондирующего (информационного) физических полей, на объектах поиска. Сочетание этих полей может быть различным. Рассмотрим более подробно радиолокационные методы как наиболее близкие к теме работы, в потенциале обеспечивающие дистанционность поиска.

Радиолокаторы подповерхностного зондирования

Физической основой метода является радиолокационное облучение поверхности земли в диапазоне частот 300-3000 МГц и считывание отраженных сигналов приемными антеннами, расположенными либо прямо над поверхностью или дистанционно. В монографии [9] достаточно подробно описано состояние радиолокационной техники за рубежом. Используются методы частотного зондирования с изменяемыми циклами рабочих частот и видеоимпульсные, со стробоскопическим преобразованием отраженных сигналов. Представляют интерес работы, проводимые исследователями в США [10], в частности проект HSTAMIDS (Handheld Standoff Mine Detection System) по доработке классического импульсного миноискателя модулем подповерхностного локатора со ступенчато изменяемой частотой зондирования поверхности. В разных странах [11–13] (США, Великобритания, Германия (рисунок 1.9). применяются разработки видеоимпульсных радиолокаторов.

Например MIR (Micropower Impulse Radar) США, разработка лаборатории Pacific Northwest Laboratories (PNL) Министерства энергетики США. Система поиска пластиковых мин Superscan фирмы ERA Technology Великобритания [14].



Рис. 1.9. Экспериментальная разработка подповерхностного радиолокатора, German Aerospace Centre (ФРГ)

Все эти разработки страдают одним общим недостатком- повышенным влиянием неровностей поверхности земли, травяного покрова, осадков в виде дождя и снега, по той причине, что длина рабочей волны, используемой РЛС зачастую соизмерима с неоднородностями грунта. Снижение рабочей частоты увеличивает возможную глубину поиска, но снижает разрешающую способность при фазовых измерениях. Немаловажным фактором является сложность и высокая стоимость аппаратных средств, в частности использования фазированных антенных решеток и систем управления. Указанные негативные факторы известных конструкций РЛС приводят к снижению вероятностных характеристик правильного обнаружения и повышенного уровня ложных тревог. Налицо потребность введения в технологию РЛС дополнительных параметров обнаружения и распознавания, другой физической природы фактически не связанных с электромагнитным облучением объекта поиска.

Такой технологией является защищаемый в диссертации параметрический метод основанный на возбуждении механических колебаний корпусов объектов поиска сейсмическими волнами Релея [36]. В этом случае РЛС является средством считывания информации.

Георадары

Принцип построения подобного вида аппаратуры (рисунок 1.10) состоит на регистрации параметров диэлектрической проницаемости либо проводимости на границе раздела сред. Излучаемый радиоимпульс проходя через среду с высоким поглощением радиоволн, отражается от предметов, находящихся в земле.



Рис. 1.10. Один из промышленных георадаров используемых в качестве поиска инженерных коммуникации

Применяя антенна, либо несколько антенн фиксирует отраженный от объектов сигнал и с помощью дополнительной цифровой обработки определяются границы с различными проводимостями. В основном такие приборы строятся на основе импульсного широкополосного радиолокатора с рабочими частотами 100–1000 МГц. Излучаемая частота РЛС и длительность зондирующего видеоимпульса порядка 1-5 нс выбирается из соображений глубины поиска предметов и разрешающей способности. Поскольку принимаемый сигнал является широкополосным, это накладывает дополнительные требования к конструкциям антенных устройств и тракту обработки получаемого сигнала. Принимаемый сигнал в этом случае обрабатывается с помощью стробоскопического преобразования.

Основным преимуществом данного метода является достаточная детализация получаемой информации, эффективная аппаратная проработка поисковых комплексов и значительный опыт эксплуатации в различных условиях и целях применения. Однако имеет так же ряд ограничений. Это непосредственное размещение антенн над грунтом (0,1-0,15 м) что не позволяет применять подобный метод на значительных дистанциях. Подобный комплекс, используемый армией США HMDS HUSKY MKII изображен на рисунке 1.11.



Рис. 1.11. Георадар HMDS HUSKY (США)

При применении георадаров в ручных переносных комплексах существует проблема в подготовке операторов, поскольку информация о геометрии объекта поиска регистрируется только благодаря перепадам параметров диэлектрической проницаемости, либо проводимости, на границах сред, что накладывает требования о плавности и однородности перемещения антенного блока и значительная задержка на обработку получаемой информации. По опыту применения подобных устройств возникает проблема при работе с обводненными либо мерзлыми грунтами.

Активная нелинейная радиолокация

Локатор нелинейного сканера (рисунок 1.12) облучает объект поиска для получения отклика от возможных полупроводниковых элементов, находящихся в нем. Это в свою очередь могут быть радиоэлементы, размещенные в корпусе объекта, переходы и крепления металлических элементов с различными проводимостями. При облучении полупроводниковых элементов с нелинейными характеристиками зондирующим импульсом, в приемном сигнале возникают нелинейные искажения в виде появления кратных гармоник.



Рис. 1.12. Вид нелинейного радара «Коршун»

Прибор фиксирует несколько гармоник получаемого сигнала. Для большинства областей применения подобной аппаратуры обычно оцениваются вторая и третья гармоника. На основании величины их амплитуд в дальнейшей обработке сигнала позволяет судить о характеристике объекта поиска и появляется возможность проводить селекцию целей и снижать уровень ложных тревог.

Для снижения взаимного влияния приемников друг на друга необходима их точная калибровка. Для селекции целей и снижения вероятности ложных тревог в нелинейных локаторах применяется «эффект затухания».

Демодулированный аудиоотклик от полупроводника объекта поиска, при приближении к нему антенны локатора значительно снижается уровень принимаемых шумов. При удалении антенны происходит обратная картина и шум возвращается к нормальному уровню. Демодулированный аудиосигнал имеет наименьшую величину непосредственно над полупроводником, размещенным внутри объекта поиска, и нормальный уровень - в стороне от него.

Основные варианты конструкции нелинейных локаторов построены с применением непрерывного зондирующего сигнала, однако есть и с импульсным режимом поиска. Поскольку все полупроводники и в том числе металлические окисленные переходы в близи от прибора им фиксируются, стоит проблема снижения уровня этих помех. Применение подобной аппаратуры в населенных пунктах связано с массой промышленных помех в диапазоне частот работы антенн, что приводит к ложным срабатываниям и замедляет процесс поиска.

Параметрическая радиолокация

Обнаружение подповерхностных объектов на основе параметрической локации изложен в ряде работ Щербакова Г. Н. [37, 38].

Суть параметрической локации состоит в использовании различных методов возбуждения, основанных на различных физических принципах и регистрации реакции объектов поиска. Возникающие контрасты между исследуемым пространством и объектами искусственного происхождения являются основными критериями, позволяющими производить поиск и селекцию целей. Возбуждение искусственных объектов может производиться различными типами полей, такими как электромагнитные, сейсмические, ионизирующие, лазерные и т. д. Рассеянное объектом поле может отличаться от падающего амплитудой, фазой, частотой и поляризацией. Под внешним воздействием эти параметры могут изменяться во времени и пространстве. Характеристики изменения этих параметров будут зависеть, прежде всего от типа возбуждающего поля и индивидуальных особенностей объекта поиска.

Регистрация отклика объектов производится так же различными способами и их комбинациями. Сочетание нескольких физических методов поиска и всего комплекса аппаратуры реализующий их, считаются параметрическими.

Процесс формирования вторичного отраженного сигнала может быть, как линейным, так и нелинейным. Нелинейные методы были описаны выше. Возбуждение объектов сейсмическими волнами мы можем отнести к линейным методам. Ряд работ, проводимых исследователями в США (Haupt R. W., Dimitri M. Donskoy и др.) посвящены акустическим методам и различным способам регистрации их реакции.

Следует отметить что основной задачей, которая стоит перед исследователями, это реализация дистанционности поиска. Такие требования накладывает необходимость соблюдения безопасности проведения работ.

Параметрические методы так же характеризуются наличием значительного количества возможных сочетаний, зондирующих и возбуждающих физических полей. Сочетание этих методов должно выбираться с учетом многих факторов: наличия информации об особенностях объекта поиска, характеристик окружающей среды, требуемой дальности обнаружения и др. Существуют методы поиска с использованием сейсмических волн и регистрации отклика объекта с помощью геофонов, так называемая геолокация. Наиболее перспективными следует считать применение электромагнитных и лазерных полей в различных диапазонах частот. Это обусловлено их способностью проникать через укрывающие среды. Возможно так же применение различных сочетаний зондирующих и возбуждающих полей в одной поисковой системе- с целью увеличения вероятности обнаружения, снижения уровня ложных тревог и классификации целей.

Ожидаемые дальности обнаружения малоразмерных объектов, реализуемых при использовании параметрических локаторов, лежат в пределах от десятков сантиметров до десятков метров. Ближняя зона поиска характерна для локации объектов в сильно поглощающих средах, дальняя – при использовании направленных СВЧ, ультразвуковых и лазерных возбуждающих полей в свободном пространстве.

Наиболее близким к методу параметрической локации является исследуемый в лаборатории Линкольна США [65].

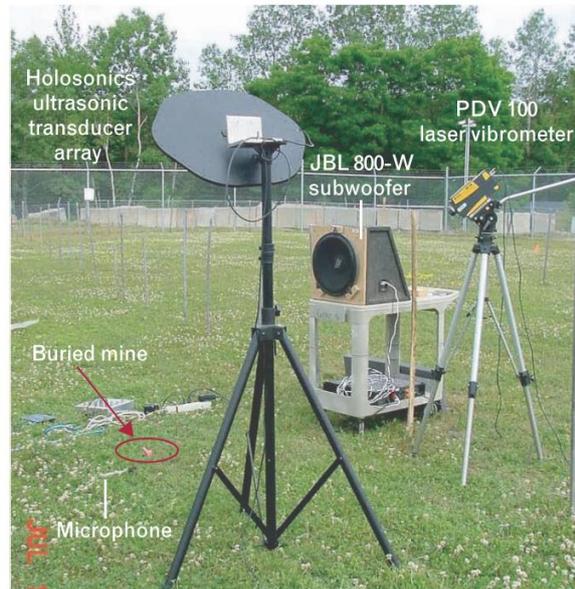


Рис. 1.13. Схема эксперимента, лаборатория Линкольна (США)

Метод основан на использование ультразвуковых волн, излучаемых фазированной антенной решеткой (ФАР) для «подсветки» объектов поиска и считыванием колебаний поверхности с помощью лазерного вибromетра. Излучаемые разностные ультразвуковые волны образуют сконцентрированную область на поверхности и вызывают параметрическое преобразование с частот ультразвука в более низкие, звукового диапазона. Это дает возможность дистанционно и локально возбудить участок поверхности, что обычными средствами сделать проблематично. Реакцию объекта поиска на сейсмическое воздействие фиксируют лазерным вибromетром. Заявленные возможные дальности обнаружения мин могут составить до 30 м, что соответствует требованиям по безопасному проведению работ. Возможный концепт поискового комплекса приведен на рисунке 1.14.

Данный метод более подробнее рассмотрен в главе 3, где приведена энергетическая оценка применения ультразвуковых антенных решеток в качестве сейсмического излучателя.

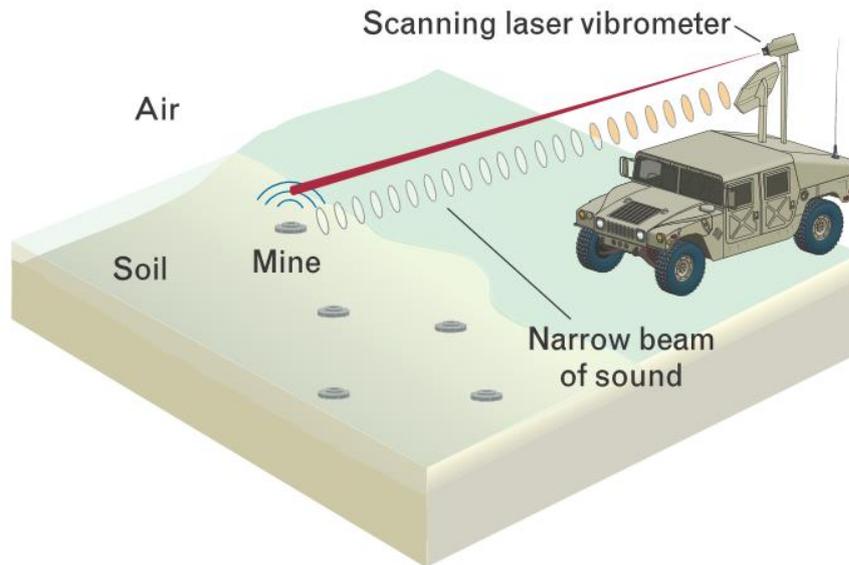


Рис. 1.14. Возможный концепт поискового комплекса.
Лаборатория Линкольна (США)

Комбинированные системы обнаружения

Поскольку безопасность проведения работ накладывают требования на дистанционность обнаружения объектов, то одним из возможных способов размещения радиолокационных датчиков, могут являться удаленно управляемые роботизированные системы [9]. Современное развитие программно-аппаратных средств позволяет сделать вывод о перспективности таких решений и проведение работ в этой области.

Разработка фирмы Жаусог [46]- дистанционная система (до 30 м) обнаружения мин в различных корпусах, установленных как на поверхности, так и заглубленных в почву. Аппаратный комплекс размещается на шасси автомобиля и представляет собой подповерхностный радар со ступенчато изменяющейся частотой сигнала. Антенное устройство было выполнено в виде трех рупорных антенн. Комплекс использует непрерывный сигнал со ступенчато изменяемой частотой в диапазоне от 0,5 до 4,0 ГГц. Такой разброс зондирующих частот позволяет определять различные типы используемых мин и проводить их идентификацию.

Аналогичные исследования проводятся в German Aerospace Centre (<http://www.dlr.de>). Принцип реализации комплекса схож с запатентованным методом от компании Jausor. Подповерхностный радар состоит из двух излучателей и четырех приемных антенн. Передатчики используют постоянный излучаемый сигнал, ступенчато изменяемый в диапазоне от 500 МГц до 3 ГГц.

Одними из перспективных являются работы по созданию комбинированного датчика, состоящего из сейсмоакустического канала и подповерхностный радиолокатора, предназначенного для обнаружения заглубленных объектов поиска. Воздушный акустический излучатель (рисунок 1.15) вызывает вибрации (сейсмические волны) в грунте, которые регистрируются с помощью лазерного доплеровского виброметра. Проведенные исследования в этой области продемонстрировали, что уровень колебаний почвы над миной, будет отличаться от остальной поверхности грунта.



Рис. 1.15. Экспериментальная установка на основе воздушных акустических излучателей и лазерного виброметра (США)

Использование подповерхностного радиолокатора обеспечивает дополнительную информацию по сравнению с лазерными методами, это позволяет увеличить вероятность обнаружения и снизить уровень ложных тревог, одновременно исключая зависимость поискового оборудования от климатических условий и состояния подстилающей поверхности.

Рассматриваются два варианта устройства: первый вариант предназначен для обнаружения с близких расстояний (30 см) от поверхности земли, а второй - на расстоянии до 7 м впереди носителя аппаратуры [47]. Для улучшения параметров обнаружения исследуются и другие потенциальные датчики: многочастотный лазер, интерферометр полного поля и другие.

Проект ILDP (Improved Landmine Detection Project) — представляет собой безлюдное транспортное средство, с размещенными на нем различными датчиками для обнаружения мин как в металлических корпусах, так и пластмассовых. Данное транспортное средство управляется дистанционно оператором. Производитель Computing Devices намерен использовать датчики обнаружения четырех типов: электромагнитные, тепловизионные, подповерхностные радиолокационные и активации тепловыми нейтронами.

Электромагнитный датчик системы содержит линейную решетку катушек. Транспорт-носитель перемещается со скоростью до 10 км/ч и обследует полосу шириной 2–6 м на высоте 0,1 м, что говорит о принадлежности такого вида сенсора к георадарам. Подвес антенн обеспечивает огибание профиля грунта и обеспечивает необходимое расстояние до поверхности. Дополнительно применяется тепловизионный датчик, для обследования поверхности в инфокрасном спектре. В качестве подповерхностного радиолокатора предполагается использовать РЛС EL/M-2190 фирмы Elta Electronics Industries (Израиль). По своим тактико-техническим характеристикам данная РЛС позволяет обнаруживать даже неметаллические мины на глубине до 30 см. В 1992 г. ряду компаний были представлены технические задания на разработку поисковых датчиков и антенных систем. Миноискатель должен обнаруживать не менее 92% металлических мин, 80% неметаллических противотанковых мин и 50% неметаллических противопехотных мин. Комплексное использование

различных типов поисковых модулей в перспективе может повысить эти показатели до 98–100%, 95–100% и 70% соответственно.

При поддержке DARPA фирма SAIC Radiation Technologies разработала роботизированную систему обнаружения мин с использованием детектора рассеянных нейтронов. Детектор представляет собой решетку шириной 1,2 м с тремя датчиками SAIC, каждый из которых имеет источник нейтронов массой 10 мг Californium-252. В процессе проведения испытаний детектор позволил обнаруживать заглубленные пластиковые мины на глубине 5 см при скорости движения носителя до 1,6 км/ч.

Цель программы HDM (Hyper-Spectral Mine Detection) применение спектрометров, работающих в коротковолновой и средневолновой частях инфракрасного диапазона обладающие пространственной модуляцией изображений и преобразованием Фурье. Подобного типа аппаратура планируется к размещению на воздушных судах.

Система быстрого разминирования и нейтрализации (Rapid Route and Area Mine Neutralisation System – RRAMNS) [48, 49] разрабатывается в интересах австралийской армии, и строится так же по принципу комплексного применения датчиков на различных физических принципах, разрабатываемых рядом коммерческих компаний. Набор датчиков будет способен обнаруживать мины с разными типами взрывателей, а также мины без металлических компонентов. Система будет оснащена устройством маркировки и привязки к местности с помощью GPS приемника. Примерный концепт поискового мобильного комплекса, разрабатываемый в Израиле с применением нескольких видов сенсоров приведен на рисунке 1.16.

Проведя анализ существующих и перспективных средств и методов обнаружения мин, сформулируем проблему построения аппаратуры с возможностью дистанционного обнаружения отдельных подповерхностных объектов с расстояния до 30 метров, при проведении работ в любое время суток и в любых метеоусловиях с учетом многочисленных помех от неоднородностей окружающей среды и различных включений.



Рис. 1.16. Концепт мобильного поискового комплекса с использованием георадара, инфракрасного спектрометра и нелинейного радара (Израиль)

В задачу диссертации входит научное обоснование параметрического электромагнитного метода обнаружения, на основе взаимодействия сейсмических и ЭМ волн. Поскольку в подобной постановке вопроса задача ставится впервые, то в материалах диссертации нужно отразить следующие вопросы:

- Определить оптимальную рабочую частоту радиолокатора, выбрать метод модуляции сигналов;
- Оценить требуемую мощность излучения сейсмического источника;
- Получить экспериментальные данные по импульсным переходным характеристикам и спектру механических колебаний объекта для различных ее модификаций;
- Разработать экспериментальный стенд для проведения натурных испытаний;

- Разработать состав и параметры аппаратного программного комплекса;
- Обобщить материалы натуральных испытаний для формирования ТЗ на прикладную НИОКР.

Выводы

1. Большая часть поисковых приборов в России и в мире- это средства ближнего действия, до 1 м.

2. Поисковые приборы, разработанные и используемые в мировой практике, применяются для обнаружения подповерхностных объектов различных типов. Спектр применения достаточно широк, это археология, поиск и картирование инженерных коммуникаций. Одним из важных приложений является поиск миноподобных объектов в целях гуманитарного разминирования.

2. Для дальнего обнаружения используют либо радиолокационные системы со ступенчатым изменением частоты, работающие на принципах электромагнитного контраста объекта поиска и грунта, либо нелинейные, основанные на обнаружении активных полупроводниковых элементов взрывателей.

3. Имеется необходимость привлечения новых физических принципов распознавания, к коим относится метод возбуждения механического резонанса корпусов объектов под действием внешнего акустического возбуждения. Диссертация посвящена научно-техническому обоснованию этого метода.

ГЛАВА 2

Теоретические основы параметрического сейсмо-электромагнитного метода поиска

Ниже излагаются физические основы параметрического метода поиска, даются оценки собственных частот колебаний объектов искусственного происхождения, энергетических параметров радиолокатора и сейсмического излучателя, определяются оптимальные радиочастоты для случаев считывания вибраций непосредственно с грунта и для подповерхностной радиолокации с выделением параметров вибраций их корпуса.

2.1 Поверхностные волны Релея

Теория распространения упругих поверхностных волн вдоль плоской свободной границы изотропного твердого полупространства разрабатывается более ста лет. Работы автора в области применения сейсмических волн для сейсморазведки освещены в публикациях [50-53]. Достаточно полный анализ физических основ волн Релея и Лява проведен в работах Бондарева В. И. [54].

Совместим начало декартовой системы координат с поверхностью упругого однородного полупространства. Ось oz направлена вовнутрь полупространства рисунок 2.1. Параметры среды будем считать всюду постоянными. Ось ox ориентируем по направлению распространения поверхностной гармонической волны Релея. Будем рассматривать двумерную задачу, т. е. считать, что свойства волны не зависят от координаты y .

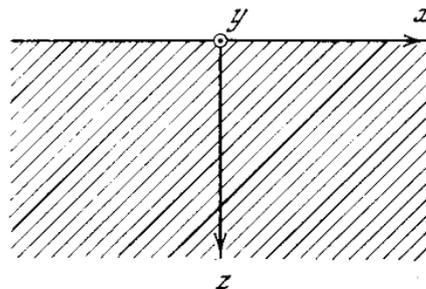


Рис. 2.1. Твердое полупространство

Волновое уравнение для вектора смещения в изотропной однородной идеально упругой среде записывается в следующей форме:

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2} = \mu \Delta \bar{U} + (\lambda + \mu) \text{grad div} \bar{U} \quad (2.1)$$

Здесь \bar{U} - вектор смещения частиц среды; ρ – плотность; λ и μ – упругие постоянные (параметры Ламе) среды; Δ – оператор Лапласа.

На свободной границе L_0 в области, не занятой источником должно выполняться граничное условие:

$$U_{x1} = U_{x2} \quad (2.2)$$

$$U_{z1} = U_{z2}; \quad (2.3)$$

индексы 1, 2 относятся к средам $z < 0$ и $z > 0$.

Решение уравнения (2.1) с учетом граничных условий имеет следующий вид:

$$U_x = A_0 \left(\frac{i\omega}{V_R} \right) \left[\exp \left(-\frac{\omega}{V_R} \sqrt{1 - q^2 \gamma^2} \cdot z \right) - \frac{2\sqrt{(1 - q^2 \gamma^2)(1 - q^2)}}{2 - q^2} \exp \left(-\frac{\omega}{V_R} \sqrt{1 - q^2} \cdot z \right) \right], \quad (2.4)$$

$$U_z = A_0 \left(\frac{\omega}{V_R} \right) \sqrt{1 - q^2 \gamma^2} \left[\frac{2}{2 - q^2} \exp \left(-\frac{\omega}{V_R} \sqrt{1 - q^2} \cdot z \right) - \exp \left(-\frac{\omega}{V_R} \sqrt{1 - q^2 \gamma^2} \cdot z \right) \right], \quad (2.5)$$

здесь опущен множитель

$$\exp \left[-i\omega t - x/V_R \right],$$

где V_R - скорость волны Релея;

γ - отношение скоростей поперечной и продольной волн в среде с параметрами λ, μ, ρ ($V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$; $V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$);

A_0 – произвольная константа;

q – корень уравнения:

$$q^6 - 8q^4 + (24 - 16\gamma^2)q^2 - 16(1 - \gamma^2) = 0 \quad (2.6)$$

Уравнение (2.6) имеет только один действительный корень, лежащий в физически допустимом интервале от 0 до 1. Численное значение этого корня зависит от величины γ и изменяется в сравнительно узких пределах (таблица 2.1):

Таблица 2.1

| | | | |
|-------------|--------|--------|--------|
| γ^2 | 0 | 0,333 | 0,500 |
| $q=V_R/V_S$ | 0,9554 | 0,9194 | 0,8741 |

Для быстрого решения уравнения предложена приближенная формула (ошибка менее 0.5%):

$$q = 1 - \frac{1}{8 \cdot (3 - 4\gamma^2)}. \quad (2.7)$$

На поверхности земли (при $z=0$) компоненты смещения можно представить в виде:

$$U_x = A_0 \cdot \left(\frac{i\omega}{V_R} \right) \cdot \frac{q^2}{2} \cdot \exp \left[-i\omega \left(t - \frac{x}{V_R} \right) \right]; \quad (2.8)$$

$$U_z = A_0 \cdot \frac{\omega}{V_R} \cdot \sqrt{1 - q^2\gamma^2} \cdot \frac{q^2}{2 - q^2} \cdot \exp \left[-i\omega \left(t - \frac{x}{V_R} \right) \right]. \quad (2.9)$$

По физическому смыслу компоненты смещения должны быть действительными величинами. Найдя действительные части обоих выражений по формуле Эйлера, получим:

$$U_x(x,t) = A_0 \frac{\omega}{V_R} \frac{q^2}{2} \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{V_R} \right) \right];$$

$$U_z(x,t) = A_0 \frac{\omega}{V_R} \sqrt{1 - q^2\gamma^2} \frac{q^2}{2 - q^2} \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{V_R} \right) \right]. \quad (2.10)$$

Отсюда видно, что траектория движения частиц почвы на поверхности земли при прохождении волны Релея в любой момент времени и в любой точке пространства будет представлять собой в осях ox и oz эллипс:

$$\frac{x^2}{\left(A_0 \frac{\omega}{V_R} \frac{q^2}{2}\right)^2} + \frac{z^2}{\left(A_0 \frac{\omega}{V_R} \frac{q^2}{2} \frac{1-q^2/2}{\sqrt{1-q^2}}\right)^2} = 1. \quad (2.11)$$

При этом, как легко убедиться путем непосредственных расчетов (2.4, 2.5), вертикальная компонента всегда превосходит по амплитуде горизонтальную компоненту. Наглядное представление о характере колебаний в волне Релея можно получить из данных, приведенных на рисунке 2.2.

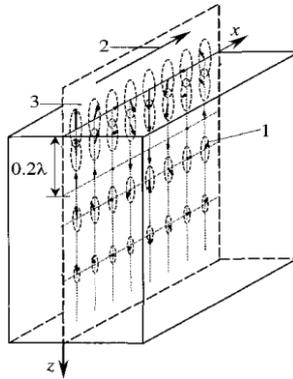


Рис. 2.2. Схематическое изображение траекторий движения частиц грунта по эллиптическим орбитам на разных глубинах при прохождении в среде волны

Релея: 1 – графики изменения амплитуды смещения частиц;

2 – направление распространения волны Релея; 3 – вектор смещения частиц

Во внутренних точках среды при увеличении глубины размеры осей эллиптической орбиты уменьшаются. Начиная с некоторой глубины ($z=0.2\lambda_R$), горизонтальная компонента вектора смещения меняет свой знак, а направление движения частиц по эллипсу меняется на противоположное. Обе компоненты вектора смещения быстро затухают по мере увеличения координаты z . Это означает, что колебания в волне Релея очень быстро затухают по мере удаления от свободной поверхности вглубь среды. Если вычислить плотность энергии в волне Релея, то нетрудно убедиться, что 95% всей энергии волны Релея сосредотачивается в приповерхностном слое, мощность которого можно приближенно определять по формуле:

$$h_{эф} = 0.6(1 + \sigma)\lambda_R, \quad (2.12)$$

где σ – коэффициент Пуассона; λ_R – длина волны Релея.

На рисунке 2.3 представлены рассчитанные зависимости амплитуд смещений U_x , U_z в релеевской волне от глубины. Кривые даны в безразмерной форме: амплитуды смещений отнесены к амплитуде нормального смещения на поверхности. Глубина отложена в долях длины волны λ_R . Кривые рассчитаны для значений коэффициента Пуассона σ , равная 0,25 и 0,34. Из графиков видно, что смещение, нормальное к поверхности, сначала возрастает, а затем монотонно убывает с глубиной; смещение, параллельное поверхности меняет знак на глубине примерно $0,2 \lambda_R$ [55].

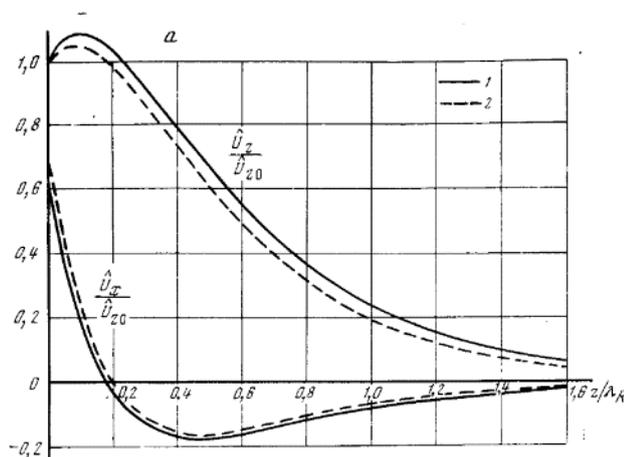


Рис. 2.3. Зависимости амплитуд смещений U_x , U_z в релеевской волне от относительной глубины z/λ_R

На рисунке 2.4. приведены кривые распределения средней по времени плотности энергии в релеевской волне по глубине для сред с коэффициентом Пуассона в пределах $0 \div 0,5$ (все реальные среды). Средние плотности энергии отнесены к средним плотностям энергии у поверхности ($z=0$). Как видно из графика, для всех твердых сред плотность энергии сначала быстро убывает при удалении от свободной поверхности, затем убывание замедляется (при $\sigma < 0,1$) или сменяется максимумом (при $\sigma > 0,1$), после чего наступает плавный экспоненциальный спад плотности энергии с глубиной.

Кривые смещений и плотности энергии в релеевской волне (рисунок 2.3 и 2.4) иллюстрируют, что релеевская волна локализована в поверхностном слое толщиной $\lambda_R - 2\lambda_R$, т.е. релеевская волна является типично поверхностной.

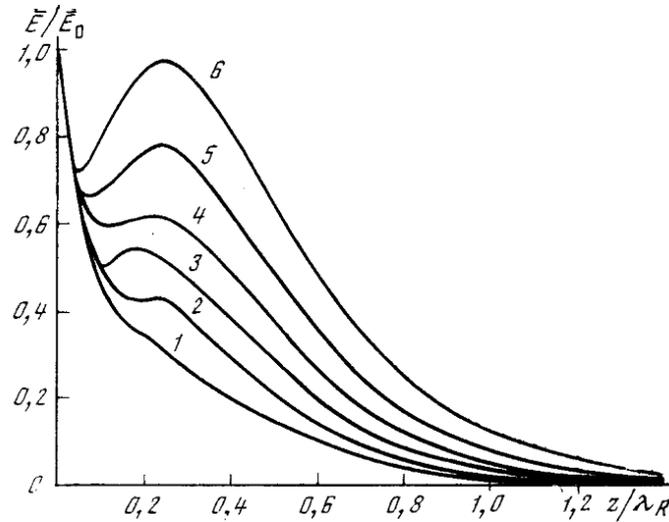


Рис. 2.4. Зависимости средней по времени плотности энергии в релеевской волне от относительной глубины

1— $\sigma=0$; 2—0,1; 3—0,2; 4—0,3; 5—0,4; 6—0,5.

Существенно сложнее обстоит дело с теорией распространения поверхностных волн типа Релея при наличии слоистости полупространства или в случае возрастания с глубиной скоростей распространения продольных и/или поперечных волн. В этих случаях будут регистрироваться несколько поверхностных волн релеевского типа. Эти волны принято называть гармониками (модами, обертонами) и присваивать им номера, начиная с нулевого. При этом нулевой называют ту гармонику релеевских волн, которая по своим свойствам близка к волне Релея. Отличительной чертой всех гармоник релеевских волн в этом случае является дисперсия, т. е. зависимость их фазовой и групповой скоростей от частоты.

2.2 Поверхностные волны Лява

Рассмотрим среду, состоящую из однородного полупространства, перекрытого однородным слоем мощности h . Кровля этого слоя является свободной границей. Сделаем естественное предположение, что скорость распространения поперечных волн в слое V_{s1} меньше скорости распространения поперечных волн V_{s2} в полупространстве. Предположим, что в таких условиях проводятся сейсмические работы с использованием поперечных волн типа SH . В этом случае наряду с объемными волнами SH могут существовать родственные им поверхностные волны типа Лява.

Начало декартовой системы координат поместим на дневной поверхности. Ось oz направим вертикально вниз, ось ox – по направлению распространения сейсмических волн рисунок 2.5.

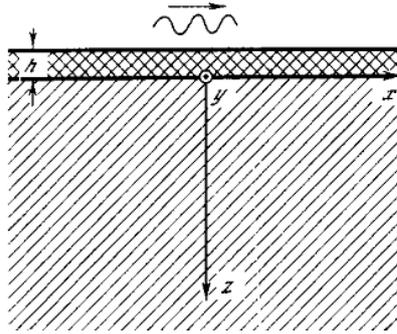


Рис. 2.5 Твердое полупространство со слоем

В соответствии с предположением о структуре упругих волн вектор смещения в искомой волне должен иметь вид в слое:

$$U_1(x, z, t) = A(z) \exp(-i\omega(t - x/V_L)) \quad (2.13)$$

в полупространстве:

$$U_2(x, z, t) = B(z) \exp(-i\omega(t - x/V_L)), \quad (2.14)$$

где ω – круговая частота; V_L – скорость распространения волны Лява.

Вектор смещения и все его компоненты должны удовлетворять волновому уравнению вида:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

Подставляя в это уравнение соответственно компоненты $U_1(x, z, t)$ и $U_2(x, z, t)$, получим функции $A(z)$ и $B(z)$.

Из очевидных физических соображений следует допустить, что скорость распространения волн Лява должна быть заключена в интервале

$$V_{s1} < V_L < V_{s2} \quad (2.16)$$

Граничные условия на свободной поверхности требуют обращения в нуль всех компонент нормального вектора напряжения P_z . На границе слоя и полупространства должна выполняться непрерывность компонент вектора напряжения и вектора смещения.

С учетом граничных условий и соотношения (2.16) компоненты смещения могут быть представлены в виде:

$$U_1^{(k)} = B_{01} \left(\frac{\cos mz}{\cos mh} \right) \exp(-nh) \exp[-i\omega t - x/V_L^k]; \quad (2.17)$$

$$U_2^{(k)}(x, z, t) = B_{01} \exp(-nz) \exp[-i\omega(t - x/V_L^k)]. \quad (2.18)$$

где V_L^k – фазовая скорость гармоники k волны Лява,

$$m = \sqrt{\frac{\omega^2}{V_{s1}^2} - \frac{\omega^2}{(V_L^k)^2}}; \quad n = \sqrt{\frac{\omega^2}{(V_L^k)^2} - \frac{\omega^2}{V_{s2}^2}}.$$

V_L^k является решением уравнения:

$$\frac{h\omega}{V_{s1}} \frac{\sqrt{q^2 - 1}}{q} = k\pi + \text{arctg} \left(\frac{\rho_2 \sqrt{\gamma^2 q^2 - 1}}{\rho_1 \sqrt{q^2 - 1}} \right), \quad (2.19)$$

где $\gamma = V_{s1}/V_{s2}$; $q = V_L/V_{s1}$;

k – целое число, определяющее порядок (номер) гармоники волны Лява. Значение: $k=0$ соответствует первой, основной гармонике волн Лява. Полученное

характеристическое уравнение является трансцендентным. Оно определяет бесчисленное множество зависимостей $(V_{L(\omega)})_k$ искомой скорости волн Лява от параметров разреза и частоты.

Найденная скорость волны Лява носит название фазовой скорости и ее величина, помимо прочего, зависит от частоты колебаний и номера гармоники k - номера корня уравнения (2.19). Это означает, что в изучаемом разрезе может наблюдаться целая серия гармоник волн Лява. В реальных условиях в зависимости от параметров разреза и частоты обычно могут наблюдаться две или более гармоник.

Из уравнения (2.19) следует, что при неограниченном увеличении частот ($\omega \rightarrow \infty$) фазовая скорость любой гармоники волн Лява асимптотически приближается к скорости распространения поперечных волн в слое. Наоборот, при неограниченном уменьшении частоты ($\omega \rightarrow 0$) фазовые скорости всех гармоник приближаются к значению скорости распространения поперечных волн в полупространстве рисунок 2.6.

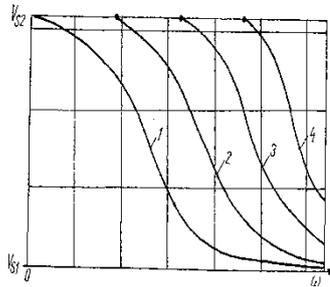


Рис. 2.6 Схематическое изображение зависимости фазовой скорости гармоник волн Лява от частоты в двухслойной среде:

1 – для основной моды; 2, 3, 4 – высших гармоник.

Полученные формулы описывают все кинематические и динамические особенности распространения гармоник волн Лява в рассмотренной модели среды. Основными особенностями поверхностных волн Релея, Лява являются не только их локализация в узком приграничном слое полупространства, но и очень слабое затухание вдоль направления распространения.

Структура и поведение волн Релея, Лява слабо меняются при распространении вдоль поверхности сложной формы.

Все это позволяет использовать поверхностные волны как инструмент для изучения свойств поверхности и подповерхностного слоя на достаточно больших расстояниях. В частности, волны Релея, можно применить для возбуждения собственных механических колебаний объектов искусственного происхождения в земле на расстояниях в несколько десятков метров от источника упругих волн. В поверхностной волне под действием механических колебаний объекта происходят изменения, которые могут быть зафиксированы радиолокатором.

Поверхностные волны Лява, переходящие в асимптотике по частоте в поперечные волны, могут быть использованы для расширения возможностей идентификации объектов поиска и улучшения вероятностных характеристик их обнаружения. Однако в настоящем исследовании мы ограничимся лишь использованием продольных поверхностных волн Релея, как энергетически более целесообразные, затухающие с расстоянием медленнее чем волны Лява.

2.3 Физические основы параметрического метода

Основа метода состоит в возбуждении собственных механических колебаний у объектов поиска с помощью поверхностных акустических волн Релея [36, 56-58]. Вынужденные колебания корпусов объектов поиска на определенных частотах, дистанционно влияют на отраженный радиолокационный сигнал, создаваемый РЛС.

Анализируя принятый радиолокационный сигнал, мы можем выделить модуляцию его фазы, вызванную механическими колебаниями корпуса объекта. Частота и амплитуда промодулированного отраженного сигнала является дополнительным информационным признаком объекта. Частота последнего F прямо пропорциональна отношению площади поперечного сечения к его массе m :

$F \approx \frac{S}{m}$, что может служить для классификации цели.

На рисунке 2.7 изображена реализация способа.

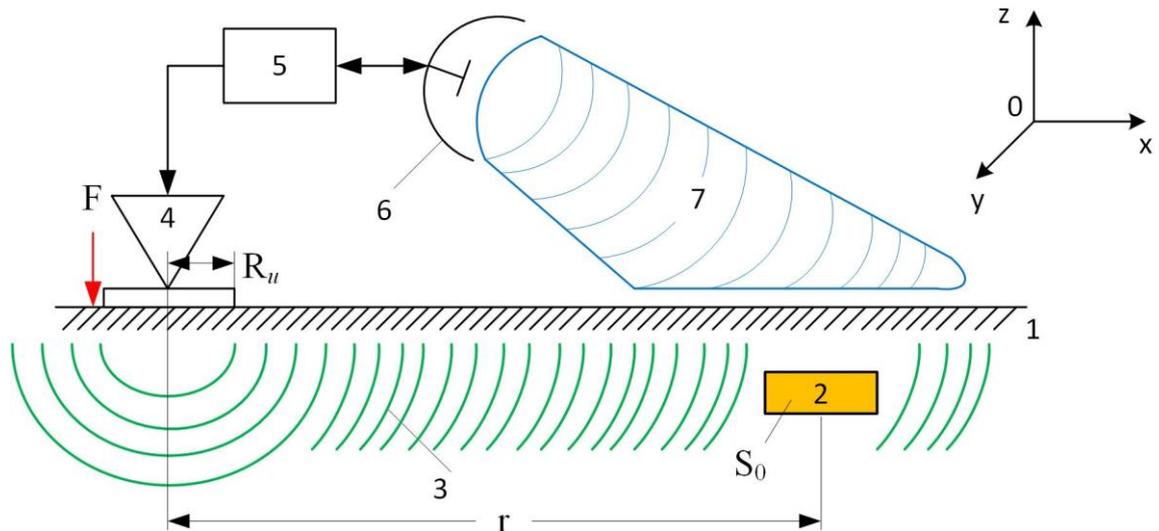


Рис. 2.7. Способ реализации радиолокационного параметрического способа обнаружения подповерхностных объектов

Способ реализуется следующим образом: приемопередатчик радиолокатора 5 сканирует поверхность земли 1 качающимся лучом 7 впереди транспорта - носителя поисковой установки, 6 антенна радиолокатора. Поверхностная волна Релея 3 распространяется от сейсмического излучателя 4 и возбуждает механические колебания во всех приповерхностных неоднородностях, включая объект поиска 2. Последние существенно отличаются по частоте и амплитуде вибраций от других объектов поиска, что и является информационным признаком распознавания объекта поиска.

Объекты естественного происхождения - камни, неоднородности рельефа, обычно являющиеся причинами ложных тревог, в новом методе имеют свои частоты колебаний отличные от объекта поиска.

На рисунке 2.8 показана поблочная схема поискового комплекса, с помощью которой можно реализовать описываемый метод.

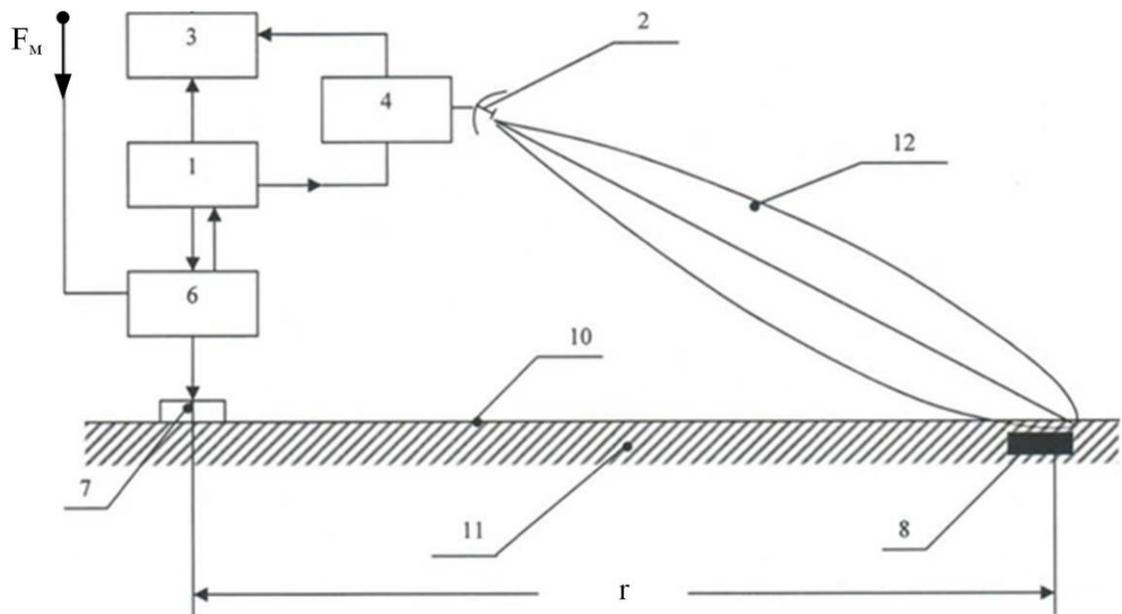


Рис. 2.8 – Структурная схема реализации параметрического радиолокационного метода.

Устройство состоит из приемо-передатчика РЛС -1, соединенный с приемо-передающей антенной -2, которая подключена также ко входу радиоприемника -3 через циркулятор -4. Выход радиоприемника по несущей или промежуточной частоте подключен к одному из входов фазового детектора -5, на второй вход которого подключен опорный сигнал частоты возбуждаемых акустических колебаний F_M от вибрационного источника -6 с излучающей плитой -7, облучающих объект поиска -8. Информационный параметр вибрирующего на частоте объекта поиска в виде фазовой модуляции несущей частоты f регистрируется индикатором -9. Объект поиска -8, находящийся под поверхностью грунта -10 возбуждается акустическим колебанием -11, генерируемым вибрационным источником -6. Антенна приемо-передатчика радиолокационного сигнала формирует впереди поисковой зоны электромагнитный луч -12.

Принцип работы поискового устройства следующий, установка перемещается на определенное расстояние, равным дальности действия РЛС, составляющее от 10 до 30 м. После остановки устанавливается сейсмический источник -6. Плотный прижим источника к поверхности возможно осуществлять с помощью веса передвижного модуля и при подачи на него питания, вдоль

поверхности грунта -10 распространяется акустическая поверхностная волна Релея -11 на частоте F_M , которая вызывает механические колебания корпуса объекта поиска.

Изменяя частоту колебаний F_M сейсмического источника, возможно возбудить каждый из объектов на своей резонансной частоте. При этом радиолокационный приемо-передатчик выделяет из отраженного от поверхности сигнал частоты модуляции F_M , задержкой по времени $t_3 \frac{r}{v}$, где r - дальность до объекта поиска; v - скорость акустической волны. Наличие в зоне облучения РЛС объекта поиска фиксируется на индикаторе -9. В случае если объекты поиска не обнаружены, то поисковой комплекс передвигается на следующую дистанцию действия РЛС, после чего процесс повторяется.

Если интенсивность сейсмоакустической волны у поверхности объекта поиска будет равна I_a , а площадь его поперечного сечения равна S , то амплитуда силы звукового давления на поверхность объекта поиска составляет:

$$P = I_a \cdot S.$$

Поскольку уравнение динамики поверхности объекта с учетом влияния среды можно записать как:

$$m \frac{d^2 \Delta a_{x,z}}{dt^2} - P = 0, \quad (2.20)$$

то ускорение смещения поверхности объекта будет равно:

$$a = \frac{d^2 \Delta a_{x,z}}{dt^2} = \frac{P}{m}, \quad (2.21)$$

где m - масса объекта поиска и присоединенного груза.

Учитывая механический резонанс корпуса объекта поиска под действием сейсмического воздействия, действие силы P увеличивается на величину добротности Q_0 , следовательно выражение (2.21) можно записать как:

$$a = \frac{P \cdot Q_0}{m}. \quad (2.22)$$

Поскольку интенсивность релеевской волны у поверхности границы раздела затухает обратно пропорционально расстоянию r , то оценить величину

действующей силы у поверхности объекта можно с помощью приближенного соотношения:

$$P = I_1 \frac{R_u}{r} S_0 e^{-\alpha_r r} \quad (2.23)$$

где $I_1 = \frac{F}{\pi R_u^2}$ - интенсивность сейсмоакустической волны вблизи источника;

R_u - эффективный радиус контактной поверхности излучателя сейсмоакустических волн (сигналов) с грунтом; F - сила удара излучателя сейсмоакустических волн (сигналов); S - площадь поверхности корпуса объекта поиска, перпендикулярная действующей силе; r - расстояние до объекта поиска, α_r - коэффициент поглощения радиоволн в грунте.

Из решения уравнения (2.20) смещение корпуса объекта под действием силы акустического давления составляет:

$$\Delta a_{x,z} = \int_0^\tau \int_0^{t_1} \frac{P Q_0}{m} dt_1 d\tau, \quad (2.24)$$

где τ - время действия силы акустического давления.

При единичном ударе на интервале $[0, \tau]$ величина $P = const$, из выражений (2.23) и (2.24) получаем:

$$\Delta a_{x,z} = \frac{F}{\pi R_u^2} \frac{R_u}{r} S_0 \frac{Q_0}{m} \tau^2. \quad (2.25)$$

При периодическом повторении сейсмоакустических импульсов, отраженный от объекта радиолокационный сигнал можно записать как:

$$U(t) = U_m \sum_{i=1}^n \sin(\omega_i t + \frac{2\pi \Delta a_{x,z}}{\lambda_i} \sin \Omega t), \quad (2.26)$$

где $\omega_i t = 2\pi f_i$ - циклическая частота радиолокационного сигнала; λ_i - длина волны радиолокационного СВЧ сигнала; $\Omega = 2\pi F_M$ - циклическая частота сейсмоакустического сигнала; i - текущий номер гармоники.

Для периодического импульсного сигнала, когда 90% его энергии сосредоточено в первой гармонике, фазовый сдвиг первой гармоники принимаемого радиолокационного эхо-сигнала будет равен:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta a_{x,z}}{\lambda_i} \sin \Omega t . \quad (2.27)$$

С помощью фазового детектирования отраженного от объекта радиолокационного сигнала, выделяя коэффициент фазовой модуляции $\Delta\varphi$, получим величину смещения $\Delta a_{x,z}$, которая прямо пропорциональна отношению

$$\Delta a_{x,z} = S_0 \frac{Q_0}{m} .$$

Величина смещения объекта, при одинаковых геометрических размерах, тем больше, чем выше добротность его корпуса и меньше масса. Для объектов искусственного происхождения, параметр $S_0 \frac{Q_0}{m}$ будет явно отличаться от естественных объектов (например, камней) или искусственных (металлический мусор).

Величина координаты (дальность до объекта r) в выражении (2.25) определяется через время запаздывания t_x отраженного радиолокационного сигнала. Положение объекта поиска относительно центра поисковой установки определяется путем сканирования диаграммы направленности радиолокатора в горизонтальной плоскости.

Проведем расчет величины фазового сдвига несущей отраженного радиолокационного сигнала, пользуясь соотношениями (2.25) и (2.27). Пусть сила удара равна 10 т, что соответствует, его эквивалентной силе $F = 10^4 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}^2} = 10^5 \text{ Н}$.

Прочие параметры: $f = 2,5$ ГГц; $\lambda_1 = 0,3$ м; $r = 10$ м; $R_{\text{и}} = 0,1$ м; $S_0 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$; $m = 0,3$ кг; $Q = 1$; $\tau = 10^{-3} \text{ с}$.

Подстановка этих значений в (2.25) дает: $\Delta a_{x,z} = 80 \text{ мкм}$; $\Delta\varphi = 0,95^\circ$.

Рассчитанные значения r и $\Delta\tau$ указывают на возможность практической реализации предлагаемого способа поиска. Поскольку, что техника фазовых измерений сегодня позволяет регистрировать сдвиги фаз не хуже $0,1^\circ$.

Взятая за основу расчета масса объекта 0,3 кг. Варьируя параметрами P_1 , τ , f можно получить оптимальные для идентификации объектов поиска

информационные характеристики $m, Q, \Delta a_{x,z}$. В качестве генератора сейсмических волн возможно применение широко используемых в сейсморазведке невзрывных электромагнитных источников как импульсного так и непрерывного типа с силой удара до $10^6 H$. Так же возможно создание сравнительно маломощных и компактных источников на силу удара порядка 10000 кг.

Параметрический метод поиска подповерхностных объектов позволит обеспечить дистанционный поиск с указанием координат обнаруживаемых объектов. Использование акустического поля расширяет пространство информационных признаков объектов поиска, что приведет к существенному улучшению тактико-технических характеристик поисковых установок, а радиолокатор, входящий в их состав обеспечит необходимую для безопасности дистанционность обнаружения и производительность поиска.

2.4 Собственные частоты механических вибраций объектов поиска под действием сейсмических ударов

Объекты поиска могут иметь самую разную конфигурацию. По своей структуре это чаще всего оболочки из металла с наполнителем, который имеет свойства диэлектрика.

Получить точное решение уравнения колебаний произвольной конструкции не удаётся.

В работе [59] приводится решение задачи расчета собственных частот и формы колебаний сферической оболочки из упругого материала. Собственные частоты такой оболочки имеют комплексные значения.

Для однофазной оболочки комплексная частота находится из трансцендентного уравнения

$$\begin{aligned} & \cos[k(a-l)] \left\{ \frac{4\mu k}{l} \left(\frac{4\mu}{a^2} - \rho\omega^2 \right) - \frac{4\mu k}{a} \left(\frac{4\mu}{l^2} - \rho\omega^2 \right) \right\} + \\ & + \sin[k(a-l)] \left\{ \frac{(4\mu k)^2}{al} + \left(\frac{4\mu}{l^2} - \rho\omega^2 \right) \left(\frac{4\mu}{a^2} - \rho\omega^2 \right) \right\} = 0, \end{aligned} \quad (2.28)$$

где $k^2 = \rho\omega^2 / (\lambda + 2\mu)$;

ρ - плотность материала оболочки;

a - внешний радиус оболочки;

l - внутренний радиус ($l < a$);

λ, μ - параметры Ламе;

$\omega = \omega_r + i\omega_i$ - комплексная собственная частота, мнимая часть которой определяет затухание собственных колебаний оболочки.

Рассмотрим уравнение (2.28) для тонкой оболочки $(a-l) \cdot \sqrt{\rho / (\lambda + 2\mu)} < 1$, на частотах $f = (0,1 \div 1)k\Gamma u$, т.е. для малого аргумента $\cos[k(a-l)]$ и $\sin[k(a-l)]$.

Уравнение (2.28) при таких условиях примет следующий вид

$$\left\{ \frac{4\mu k}{l} \left(\frac{4\mu}{a^2} - \rho\omega^2 \right) - \frac{4\mu k}{a} \left(\frac{4\mu}{l^2} - \rho\omega^2 \right) \right\} + [k(a-l)] \left\{ \frac{(4\mu k)^2}{al} + \left(\frac{4\mu}{l^2} - \rho\omega^2 \right) \left(\frac{4\mu}{a^2} - \rho\omega^2 \right) \right\} = 0 \quad (2.29)$$

При расчетах коэффициента Ламе λ и μ удобно выразить через модуль Гука E и коэффициент Пуассона ν , значение которых приводится в справочниках. Выражения для коэффициентов Ламе следующие:

$$\lambda = \frac{2\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)}; \quad \mu = \frac{E}{1+\nu}. \quad (2.30)$$

В работе [60] проведены достаточно детальные исследования собственных колебаний системы: замкнутая сферическая оболочка – концентрический упругий наполнитель.

Для тонкой оболочки, т.е. при $(a-l)/a \ll 1$ получено простое выражение собственной частоты:

$$\omega^2 = \frac{2E}{a^2 \rho (1-\nu)} \quad (2.31)$$

Численные оценки

Исходные данные:

плотность материала - железо $\rho = 7,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; алюминий $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;

модуль Гука – железо $E = 211 \cdot 10^4 \text{ бар}$; алюминий $E = 68 \cdot 10^4 \text{ бар}$;

коэффициент Пуассона $\nu = 0,28$;

внешний радиус оболочки $a = 0,2; 0,15; 0,1, \text{ м}$;

внутренний радиус $l < a$: $l = 0,197; 0,199; 0,147; 0,149, \text{ м}$.

Расчеты проведены в системе Matlab, результаты показаны в таблицах 2.2, 2.3.

Таблица 2.2

Результаты расчета по формуле (2.31)

| железо | | | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| $a, \text{ м} / l, \text{ м}$ | 0,2/0,199 | 0,2/0,197 | 0,15/0,149 | 0,15/0,147 |
| $f, \text{ Гц}$ | 30,78 | 30,94 | 41,087 | 41,37 |
| алюминий | | | | |
| $f, \text{ Гц}$ | 29,84 | 29,99 | 39,8 | 40,09 |

Таблица 2.3

Результаты расчета по формуле (2.32)

| железо | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|
| $a, \text{ м}$ | 0,2 | 0,15 | 0,1 |
| $f, \text{ Гц}$ | 22 | 29 | 43 |
| алюминий | | | |
| $f, \text{ Гц}$ | 21,05 | 28,09 | 42,09 |

Согласно расчетам, собственные частоты оболочки радиуса 15 см, толщиной 3 мм из железа изменяются от 30 до 40 Гц. Увеличение размеров и плотности материала приводит к уменьшению собственной частоты колебаний.

В работе [61] для различных типов мин получены следующие величины (таблица 2.4).

Таблица 2.4

Динамические параметры существующих мино-подобных объектов

| Mine type | First Resonance frequency f_0 (Hz) | Dynamic stiffness $K_m \cdot 10^{-7}$ (Pa/m) | Dynamic mass M_m (kg/m ²) | Damping constant R_m (kg/s·m ²) | Description |
|-----------|--------------------------------------|--|---|---|-------------|
| TS-50 | 520 | 10 | 9 | 4000 | AP Plastic |
| VS-50 | 330 | 6 | 13 | 3300 | AP Plastic |
| PONZ-2 | 380 | 50 | 85 | 26000 | AP Plastic |
| PPM-2 | 320 | 4 | 10 | 4000 | AP Plastic |
| OZM-72 | 330 | 80 | 190 | 18000 | AP Metal |
| VS-1.6 | 220 | 2.5 | 12 | 1700 | AT Plastic |
| TMA-5 | 190 | 0.2 | 1.4 | 300 | AT Plastic |
| SH-55 | 280 | 2.5 | 8 | 3000 | AT Plastic |
| VS-НСТ-2 | 465 | 2.8 | 3.3 | 500 | AT Plastic |
| TM-62P3 | 200 | 7 | 45 | 9000 | AT Plastic |
| PTMIBA-3 | 260 | 2.5 | 10 | 1300 | AT Plastic |
| TMA-4 | 250 | 17 | 65 | 20000 | AT Metal |
| TM-46 | 250 | 4 | 16 | 1200 | AT Metal |
| AT-72 | 200 | 2 | 14 | 1800 | AT Wood |

2.5 Энергетические оценки акустического канала

Источник силой F в течение времени τ действует на плиту массой m_s , расположенную на грунте. Ускорение, с которым перемещается плита $a = a_0 + a_\tau$, где a_0 - ускорение в момент $t=0$, a_τ - ускорение в момент времени $t=\tau$ равный длительности сейсмического импульса.

Если предположить, что ускорение изменяется от a_0 до a_τ линейно и в момент $t=\tau$ $a_\tau = 0$, то среднее значение ускорения $a = \frac{a_0}{2}$.

Смещение плиты и грунта происходит по оси z , рисунок 2.9.

По закону Ньютона $F = am$ или $F = \frac{d^2z}{dt^2} \cdot m = \frac{a_0}{2} m$, где $m = m_s + m_g$,

m_g - присоединённая масса грунта, m_s - масса плиты.

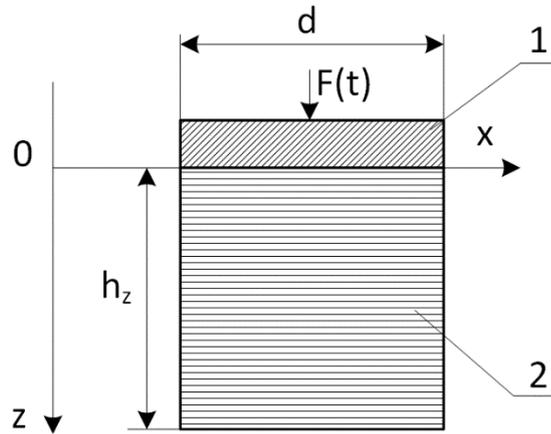


Рис. 2.9 – Расчетная модель генерации сейсмического сигнала.

1 – плита источника; 2 – присоединённый грунт; $F(t)$ – ударное воздействие;
 d – диаметр опорной плиты

При давлениях близких к пределу прочности пород, глубина зоны присоединённого грунта близка к величине [54]:

$$h_z = (2 \div 2,5)d, \quad (2.32)$$

где d - эффективный диаметр опорной плиты – рис. 2.9.

Амплитуда смещения под действием силы F

$$\Delta a_z = \frac{a_0}{2} \int_0^\tau dt \int_0^\tau dt = \frac{a_0 \tau^2}{2} = \frac{F \tau^2 S_0}{m} \quad (2.33)$$

Смещение грунта около источника A_0 связано со смещением плиты

$$A_0 = k \cdot \Delta a_z,$$

где k - коэффициент, зависящий от свойств грунта (плотности, модулей упругости). Значение k можно оценить экспериментально.

Согласно (2.4), амплитуда смещения грунта прямо пропорциональна квадрату длительности импульса сейсмического воздействия τ , что указывает на возможность существенного улучшения чувствительности метода путем увеличения параметра τ .

Присоединенная масса грунта определяется через (2.32). Для координаты z , когда сейсмическая волна падает на поверхность объекта сверху, при диаметре

$d = 2R_M$, где R_M - его радиус, глубина присоединённого грунта H будет равна $2R_M$, а его масса:

$$m_{2Z} = \pi R_M^2 h_Z \rho, \quad (2.34)$$

здесь ρ -плотность грунта.

Для боковой поверхности:

$$m_{2X} = \pi R_M h_Z \rho H, \quad (2.35)$$

где h_Z -высота корпуса.

Существование свободной сейсмической границы – поверхности полупространства, контактирующего с воздушной средой, обуславливает появление особого класса волн – поверхностных.

Энергия источника вертикальной силы, действующего на поверхности земли, распределяется между различными возбуждёнными сейсмическими волнами примерно в следующей пропорции: 7% - продольные волны, 25% - поперечные волны, 68% - поверхностные волны релеевского типа.

Уравнения колебания частиц среды при распространении волны Релея имеет следующий вид [55]:

$$\begin{aligned} A_x &= iA_m \left[\exp\left(-\frac{\omega k_1 z}{V_R}\right) \left(\left(\frac{V_2}{V_S}\right)^2 - 2 \right) + 2k_1 k_2 \exp\left(-\frac{\omega k_1 z}{V_R}\right) \right] \cdot \exp\left(-i\omega\left(t - \frac{x}{V_R}\right)\right) \\ A_y &= A_m \left[\exp\left(-\frac{\omega k_1 z}{V_R}\right) \left(\left(\frac{V_2}{V_S}\right)^2 - 2 \right) + 2 \exp\left(-\frac{\omega k_1 z}{V_R}\right) \right] \cdot \exp\left(-i\omega\left(t - \frac{x}{V_R}\right)\right), \end{aligned} \quad (2.36)$$

где:

$$\frac{V_R}{V_S} = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu};$$

ν - коэффициент Пуассона;

$$k_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{V_R}{V_p}\right)^2}; \quad k_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2};$$

$$\frac{V_S}{V_p} = \frac{\sqrt{1 - 2\nu}}{\sqrt{2(1 - \nu)}},$$

V_p - скорость продольной волны в среде,

V_s - скорость поперечной волны,

V_R - скорость волны Релея:

$$V_R = \frac{0,87 \cdot 1,12\nu}{1+\nu} \left(\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot V_p$$

A_m - коэффициент, зависящий от силы звука I , в области расположения объекта, т.е. от параметров источника упругих волн, параметров среды, расстояния.

Траектория движения частиц почвы при прохождении волны Релея в любой момент времени и в любой точке пространства представляет собой эллипс при этом вертикальная компонента всегда превосходит горизонтальную. Обе компоненты вектора смещения быстро затухают с глубиной, при этом 95% всей энергии волны Релея сосредоточено в приповерхностном слое мощностью [54].

$$z = 0,6(1+\nu)\lambda_R,$$

где ν - коэффициент Пуассона, λ_R - длина волны.

При распространении поверхностной упругой волны амплитуда смещения в почве убывает пропорционально [55]:

$$(k_R x)^{-\frac{1}{2}} e^{-\alpha r}, \quad (2.37)$$

где α - коэффициент затухания в среде;

$k_R = \omega/V_R$ - постоянная распространения; ω частота колебаний волны Релея; V_R - скорость волны Релея в подповерхностном слое; r - расстояние.

На расстоянии r от источника упругих колебаний амплитуда смещения частиц среды будет равна:

$$A = A_0 k \frac{e^{-\alpha r}}{(rk_R)^{1/2}} = \frac{F\tau^2 k}{2m} \frac{e^{-\alpha r}}{(rk_R)^{1/2}} \quad (2.38)$$

В свою очередь амплитуда смещения в упругой волне связана с силой упругих колебаний I [62]:

$$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho V}}, \quad (2.39)$$

где $\omega = 2\pi f$ - частота колебаний,

ρ - плотность среды,

V - скорость распространения упругой волны, $V = V_R$.

Давление упругой волны имеет две составляющих:

$$P_x = A_x \rho \cdot V_R \cdot \omega, \text{ и } P_z = A_z \rho V_R \cdot \omega \quad (2.40)$$

Скорость смещения частиц:

$$U_x = A_x \cdot \omega, \quad U_z = A_z \cdot \omega \quad (2.41)$$

Учитывая (2.38) и (2.39), получим:

$$I = \frac{A^2 \omega^2 \rho V_R}{2} = \left(\frac{F \tau k^2}{2m} \right)^2 \frac{\omega \rho V_R^2}{2r} e^{-2ar} \quad (2.42)$$

Рассмотрим поведение миноподобных объектов в поле упругой волны. Объект деформирует поле волны. Около объекта формируется сумма падающей и отражённой волн, следовательно, амплитуды давления (6) смещения грунта (2) и скорости смещения (7) примут следующий вид:

$$P_{x0} = P_x (1 + \gamma); \quad P_{z0} = P_z (1 + \gamma); \quad (2.43)$$

$$A_{x0} = A_x (1 + \gamma); \quad A_{z0} = A_z (1 + \gamma) \quad (2.44)$$

$$U_{x0} = U_x (1 + \gamma); \quad U_{z0} = U_z (1 + \gamma),$$

где γ - коэффициент отражения волны у препятствия по амплитуде смещения частиц сред.

Кроме того, объект испытывает на себе радиационное давление P_s , которое зависит от свойств среды и объекта [63]:

$$P_s = \frac{I}{V_R} (1 + \gamma^2), \quad (2.45)$$

При нормальном падении волны на объект:

$$\gamma = \frac{n-1}{n+1}; \quad n = \frac{\rho_1 V_{\rho_1}}{\rho_2 V_{\rho_2}}, \quad (2.46)$$

где ρ_1 - плотность; V_{ρ_1} - скорость распространения упругой волны в 1^{ой} среде (грунте),

ρ_2 - плотность и V_{ρ_2} - скорость распространения упругой волны во 2^{ой} среде (материал объекта).

Суммарные давления на объект определяются давлениями P_s , P_{xo} , P_{zo}

$$P_{\Sigma x} = P_s + P_{xo}; P_{\Sigma z} = P_s + P_{zo}.$$

Давления $P_{\Sigma x}$, $P_{\Sigma z}$ действуют на объект в течение времени τ и вынуждают его колебаться с амплитудами смещения [1]:

$$\Delta a_x = \frac{P_{\Sigma x} \cdot S_x \cdot \tau^2}{m_0 + m_{2x}}, \quad \Delta a_z = \frac{P_{\Sigma z} \cdot S_z \cdot \tau^2}{m_0 + m_{2z}}, \quad (2.47)$$

где S_x, S_z - эффективная площадь взаимодействия объекта и упругой волны соответственно по осям x и z ,

m_0 - масса объекта, m_{2x} , m_{2z} - масса присоединенного грунта.

Как видим, смещения объекта под действием искусственных сейсмических колебаний будут иметь различные значения по осям x и z .

Соотношения (2.47), позволяют провести оценку амплитуды смещения миноподобного объекта под действием искусственных сейсмических колебаний.

Радиолокационный сигнал, отражённый от объекта с учетом смещения фазы будет иметь следующий вид:

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\varphi \cdot \sin \Omega t), \quad (2.48)$$

где $\omega = 2\pi f$ - частота исходного радиолокационного сигнала;

Ω - частота колебаний объекта.

С учетом малости $\Delta\varphi$, можно записать следующим образом:

$$U(t) = U_m \left[\sin(\omega t) + \frac{\Delta\varphi}{2} \sin(\omega + \Omega)t - \frac{\Delta\varphi}{2} \sin(\omega - \Omega)t \right], \quad (2.49)$$

т.е. в отражённом сигнале появляется составляющая на разностной частоте $\omega - \Omega$ с амплитудой $U_m \Delta\varphi / 2$, которую можно выделить амплитудным детектором.

2.6 Энергетические оценки радиолокационного канала для подповерхностного зондирования

Исследуем энергетические соотношения радиолокационного канала для двух вариантов реализации комплекса с совмещенным приемопередатчиком РЛС размещенным на базовой машине, так и с разнесением передатчика и приемника, где РЛС подсветки находится на базовой машине, а отраженный сигнал принимается на выносных подвижных блоках.

На Рисунке 2.10 представлены геометрия расположения радиолокатора в точке O_1 (для совмещенного приемопередатчика), и разнесенного варианта с размещением передатчика в точке O_1 и приема отраженного сигнала в точке O_2 . Объект поиска расположен в точке M на наклонном расстоянии R_1 между двумя объектами.

Вначале получим основное уравнение радиолокации для совмещенного варианта.

1) Излучатель электромагнитных колебаний с КНД G мощностью P_0 создает в воздухе над объектом плотность потока мощности (ППМ):

$$P_{12} = \frac{P_0 G}{4\pi R_1^2}; \quad (2.50)$$

2) ППМ, проникающая в землю:

$$P_{21} = P_{12} \cdot \gamma^2 = \frac{P_0 G}{4\pi R_1^2} \gamma^2, \quad (2.51)$$

γ - коэффициент преломления на границе воздух-земля;

3) ППМ около объекта в земле:

$$P_{2z} = P_{21} \cdot e^{-2\alpha h} = \frac{P_0 G \gamma^2}{4\pi R_1^2} \cdot e^{-2\alpha h}, \quad (2.52)$$

где α - коэффициент затухания поля электромагнитных волн в земле,
 h - расстояние от поверхности Земли до объекта.

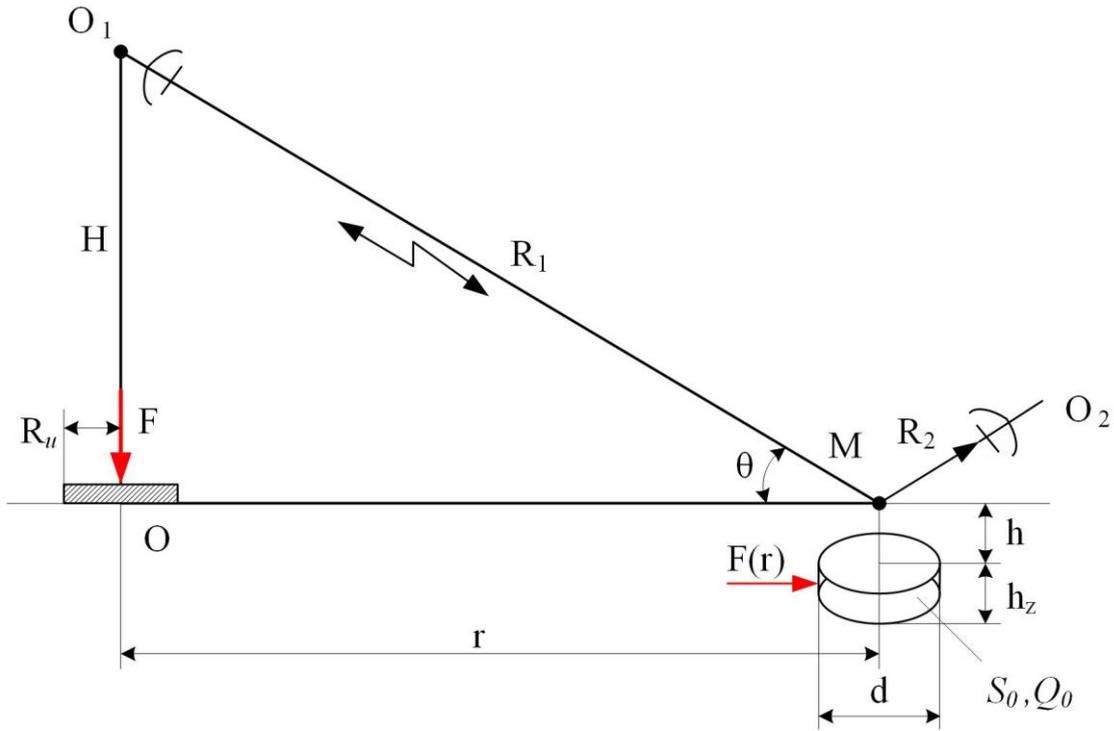


Рис. 2.10

4) ППМ электромагнитной волны рассеянная на поверхности грунта:

$$P_{20} = \frac{P_0 G \gamma^2}{4\pi R_1^2} e^{-2\alpha h} \cdot S_{эф} \cdot k_0^2 \quad (2.53)$$

где $S_{эф}$ - эффективная площадь рассеяния объекта,

k_0 - коэффициент отражения от объекта.

5) Коэффициент преломления по напряженности поля

$$\gamma = \frac{2z_2 \cos \theta}{z_2 \cos \theta + z_1 \cos \varphi}, \quad (2.54)$$

где θ - угол падения электромагнитной волны на землю,

φ - угол преломления,

z_1 - волновое сопротивление воздуха,

z_2 - волновое сопротивление земли.

$$b) \quad z_2 = \frac{\omega \sqrt{\mu_2 \varepsilon_2}}{2} \sqrt{(1 + tg \delta_2^2) - 1}, \quad (2.55)$$

волновое число грунта

где $\omega = 2\pi f$, f - частота электромагнитных колебаний,

μ_2, ε_2 - магнитная и диэлектрическая проницаемость земли,

$$tg \delta_2 = \frac{\sigma_2}{\omega \varepsilon_2}, \quad \sigma_2 - \text{проводимость земли.}$$

7) $S_{эф}$ - можно принять как эффективную площадь рассеяния шара радиуса a : $S_{эф} = \pi a^2$.

Считая, что рассеянная мощность, отраженной от объекта радиоволны, излучается точечным источником, определим плотность потока мощности в районе приемной антенны РЛС:

$$P_{II} = \frac{P_{02}}{4\pi R_1^2} \quad (2.56)$$

В этом случае мощность сигнала, отраженная от объекта на входе приемника РЛС:

$$P_{II} = P_{II} \cdot S_A \quad (2.57)$$

Где S_A - площадь зеркала антенны РЛС.

Отношение сигнал/шум на входе приемника $\frac{P_S}{P_N}$ должно быть оценено с учетом коэффициента фазовой модуляции отраженной от объекта сигнала. При амплитуде сдвига корпуса объекта поиска под действием сейсмического удара Δa_z , фазовый сдвиг отраженного сигнала составит:

$$\Delta\varphi_z = 2\pi \frac{\Delta a_z}{\lambda} \quad (2.58)$$

Поскольку $\Delta\varphi \ll 1$, то индекс фазовой модуляции будет соответствовать глубине амплитудной модуляции:

$$m_\varphi \approx \Delta\varphi_z \quad (2.59)$$

Мощность собственного шума на входе приемника:

$$P_N = kT_k^0 \Delta f, \quad (2.60)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ - постоянная Больцмана,

$T_k^0 \approx 300^0$ - температура входных цепей приемника,

Δf - полоса пропускания цепей приемника.

Численные оценки

Исходные данные: $f = 10 ГГц$; $d = 0,5 м$; $H = 2 м$; $R_1 = 10 м$; $h = 0,1 м$; грунт-песчаник,

с проводимостью $\sigma_r = 2 \cdot 10^{-2} \frac{См}{м}$; отношение сигнал/шум $K_N = 10$; полоса пропускания приемника $\Delta f = 100 Гц$.

Коэффициент направленности антенны:

$$G = \frac{4\pi d^2}{4\lambda^2} = 900 \quad (2.61)$$

Необходимую мощность передатчика РЛС найдем через общую системную формулу для совмещенной системы:

$$P_{oc} = \frac{(4\pi)^3 R_1^4 K_N P_N}{\sigma m_\phi^2 G \lambda^2 \gamma^4} \quad (2.62)$$

Подстановка вышеперечисленных параметров в (2.62) дает $P_{oc} = 31$ мВт.

Здесь ЭПР объекта поиска оценена как ЭПР шара с диаметром 0,3 м.

$$\sigma = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.63)$$

Для расстояния $R_1 = 30$ м, мощность передатчика должна быть в 81 раз больше и составит 2,5 Вт.

Большим недостатком совмещённого варианта является низкая разрешающая способность по поверхности, определяемая сечением луча РЛС падающим на землю. Преодолеть можно лишь увеличив КНД антенны G и введением сканирования лучом по азимуту. Оптимальным решением задачи является вынос приемной антенны с базовой машины на передвижной управляемый антенный блок. В этом случае, разрешающая способность по поверхности определяется лишь сечением площади отраженного сигнала, т.е. практически размером искомого объекта. При этом мощность передатчика можно оценить с помощью формулы:

$$P_{OP} = \frac{(4\pi)^2 R_1^2 R_2^2 K_N P_N}{G \sigma m_\phi^2 S_{ПА} \gamma^4} \quad (2.64)$$

Здесь $S_{ПА}$ - площадь приемной антенны на выносном блоке. Отношение (2.62) и (2.64) дает выигрыш по мощности излучения разнесенного варианта по отношению к совмещенному:

$$\frac{P_{OC}}{P_{OP}} = \frac{4\pi R_1^2 S_{ПА}}{R_2^2 \lambda^2} \quad (2.65)$$

К примеру при $R_1=10$ м; $R_2=0,3$ м; $S_{ПА}=0,01$ м²; $\lambda=3\cdot 10^{-2}$ м отношение (2.65) составляет:

$$\frac{P_{OC}}{P_{OP}} = 1,5 \cdot 10^5$$

Коэффициент параметрической модуляции фазы отраженного от объекта поиска сигнала зависит от плотности потока акустической мощности I_x , I_z падающей на корпус объекта, соответственно по осям x и z :

$$\Delta\varphi \approx m_\varphi = \frac{\Delta a_{z,x}}{\lambda} \quad (2.66)$$

$$\Delta a_z = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I_z}{\rho_r V_a}}. \quad (2.67)$$

Для боковой стенки по координате x ,

$$\Delta a_x = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I_x}{\rho_r V_a}}, \quad (2.68)$$

где $\omega = 2\pi F$ -рабочая частота, $F = 40$ гц, ρ_r -плотность грунта, например песка $\rho_r = 1500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $V_a = 400 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ - скорость продольной релеевской волны вблизи поверхности. Интенсивность релеевской волны через силу удара в импульсе P_{II} или силу вибраций можно определить как:

$$I_{x,z} = \frac{P_{II} r}{R_u S_0} \left| \frac{Bm}{\text{м}^2} \right|, \quad (2.69)$$

где R_u -эффективный радиус контактной поверхности плиты излучателя сейсмических волн, r - расстояние между вибратором и объектом поиска.

Требования по мощности удара сейсмоисточника существенно зависят от расстояния и свойств подстилающего грунта. Худший вариант-сухой песок.

По опыту работ импульсной невзрывной сейморазведки с источником «Енисей КЭМ-4» [64], для получения силы удара в 25 т, требуется затратить электрическую мощность в импульсе порядка $P_A = 25$ кВт.

Если в приемнике использовать фазовую демодуляцию радиосигнала на

частоты 10 ГГц ($\lambda = 0,03$ м), то требуемая чувствительность определяется величиной механического сдвига корпуса под действием сейсмической волны. К примеру, при $\Delta a_z = 50$ мкм, индекс фазовой модуляции радиосигнала составит $\frac{\Delta a_z}{\lambda} = 1,6 \cdot 10^{-3}$, а по сдвигу фаз $\Delta \varphi_z = 2\pi \frac{a_z}{\lambda}$. Такие сдвиги аппаратно выделить достаточно легко.

Из (2.64) выделим коэффициент модуляции m , как функцию зависящую от других системных характеристик комплекса:

$$m = \frac{4\pi R_1 R_2 \sqrt{K_N P_N}}{\gamma^2 \sqrt{G \sigma S_{ПА} P_{OP}}} \quad (2.70)$$

Из этого соотношения видно, что коэффициент m , т. е. чувствительность приемника к разрешению малых целей, можно поднять снижением входных шумов P_N , увеличением мощности передатчика P_{OP} , эффективной площади приемной антенны и КНД антенны передатчика G .

Разрешающая способность по малым целям в основном зависит от соотношения эффективных площадей рассеивания поверхности почвы σ_{II} к ЭПР искомого объекта σ .

Необходимо чтобы это отношение всегда превышало заданный порог обнаружения целей, например $\frac{\sigma}{\sigma_{II}} \geq 10$.

Если отражающая площадь поверхности сопоставима с отражающей способностью объекта $S_0 = \frac{\pi d^2}{4}$, то соответственно ЭПР подобной диффузно-рассеивающей поверхности составляет величину [9]:

$$\sigma_{II} = 4S_0 p, \quad (2.71)$$

где p - коэффициент отражения. В соответствии с граничными условиями Леонтовича коэффициент p по мощности можно оценить как:

$$p \approx \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)^2, \quad (2.72)$$

где ε_1 , ε_2 соответственно диэлектрические проницаемости воздуха и

подстилающей поверхности.

Так, если $\varepsilon_1=1$, $\varepsilon_2=10$, то $p=0,01$. В этом случае отношение $\frac{\sigma}{\sigma_{II}} = \frac{1}{4p} = 25$ т.

е. в этом случае можно ожидать приемлемое разрешение поискового комплекса по малым объектам.

Параметр сейсмического канала входит в (2.64) виде амплитуды механического смещения корпуса $\Delta a_{z,x}$ под действием вибраций и может быть оценен двумя способами:

Первый- приближенно по соотношению (2.47), соответственно по координатам x и z :

$$\Delta a_x = \frac{P_{\Sigma x} \cdot S_x \cdot \tau^2}{m_0 + m_{2x}}, \quad \Delta a_z = \frac{P_{\Sigma z} \cdot S_z \cdot \tau^2}{m_0 + m_{2z}} \quad (2.73)$$

Где $P_{\Sigma x}$, $P_{\Sigma z} = \left| \frac{\text{кГ} \cdot \text{М}}{\text{М}^2 \text{с}^2} \right|$ -давление сейсмической волны на поверхность объекта S_x или S_z - перпендикулярной ее вектору силы; m_0 - масса объекта; m_{2x} , m_{2z} - масса присоединенного грунта к поверхностям S_x, S_z соответственно; τ - длительность сейсмического удара.

В этих формулах сила удара учитывается через давление сейсмической волны в $\left| \frac{\text{кГ}}{\text{М}^2} \right|$. Второй способ оценки смещения корпуса можно рассчитать через плотность потока мощности сейсмической волны (2.39, 2.42)

$$\Delta a_{x,z} = A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho V_r}} \quad (2.74)$$

Поскольку приближенно сила удара импульсного источника $F = \left| \frac{\text{кГ} \cdot \text{М}}{\text{с}^2} \right|$ соответствует электрической мощности, затрачиваемой в момент удара $P_a = |vm|$ то, не используя более сложных соотношений, можно определить смещение корпуса через оценку плотности потока мощности в районе ее расположения в нижнем полупространстве:

$$I = \left| \frac{vm}{\text{М}^2} \right| = \frac{P_a e^{-\alpha r}}{2\pi r^2} \quad (2.75)$$

Здесь коэффициент поглощения продольной волны в горных породах на частоте $f = 100 \text{ Гц}$ оценивается как $\alpha = 10^{-2} \frac{1}{\text{м}}$ [54].

Дадим оценку смещения корпуса объекта по первому способу с помощью формулы (2.75), с учетом массы объекта m_0 , массы присоединённого грунта m_x и m_z , площади контактирующих с грунтом поверхностей объекта S_x , S_z , и давления сейсмической волны F выраженной в $\left| \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right|$.

В соответствие с формулой (2.25),

$$\Delta a_{x,z} = \frac{F}{\pi R_u^2} \frac{R_u}{r} S_0 \frac{Q_0}{m} \tau^2 e^{ah} \quad (2.76)$$

Из (2.76) видно, что величина смещения корпуса, зависит от соотношения $\frac{S_0}{m}$. При увеличении площади S_0 возрастает масса присоединённого грунта m_r , входящая в общую массу грунта и объекта, сопротивляющаяся сейсмическому удару.

В таблице 2.4 приведены зависимости смещения корпуса объекта от расстояния до сейсмического излучателя r при силе удара $F = 1000 \text{ кг}$ или соответствующей мощности излучения $P_a = 1000 \text{ Вт}$ с использованием формул (2.76, 2.77, 2.78) и следующих исходных данных:

$$r = 1 \div 10 \text{ м}; \quad V = 500 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad \rho = 1500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad f = 100 \text{ Гц}; \quad m_0 = 8 \text{ кг}; \quad \tau = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad R_M = 0.15 \text{ м};$$

$$S_{0z} = \pi R_M^2; \quad R_u = 0.2 \text{ м}; \quad h = 0.1 \text{ м}; \quad Q_0 = 1.$$

Таблица 2.4

Зависимости смещения корпуса объекта от расстояния
до сейсмического излучателя

| r [м] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Δa_{z1} | $6,5 \cdot 10^{-5}$ | $3,23 \cdot 10^{-5}$ | $2,13 \cdot 10^{-5}$ | $1,59 \cdot 10^{-5}$ | $1,26 \cdot 10^{-5}$ | $1,04 \cdot 10^{-5}$ | $8,79 \cdot 10^{-6}$ | $7,62 \cdot 10^{-6}$ |
| Δa_{x1} | $1,3 \cdot 10^{-4}$ | $6,5 \cdot 10^{-5}$ | $4,29 \cdot 10^{-5}$ | $3,19 \cdot 10^{-5}$ | $2,52 \cdot 10^{-5}$ | $2,08 \cdot 10^{-5}$ | $1,77 \cdot 10^{-5}$ | $1,53 \cdot 10^{-5}$ |
| Δa_{x2} | $3,26 \cdot 10^{-5}$ | $1,62 \cdot 10^{-5}$ | $1,08 \cdot 10^{-5}$ | $8,04 \cdot 10^{-6}$ | $6,4 \cdot 10^{-6}$ | $5,31 \cdot 10^{-6}$ | $4,53 \cdot 10^{-6}$ | $3,94 \cdot 10^{-6}$ |

Для оценки массы присоединенного грунта по рисунку (2.11)

использовались следующие формулы:

$$m_z = \pi R_M^2 h_z \rho; \quad \Delta h_z = 4R_M; \quad (2.77)$$

$$m_x = \pi R_M^2 h \rho \quad (2.78)$$

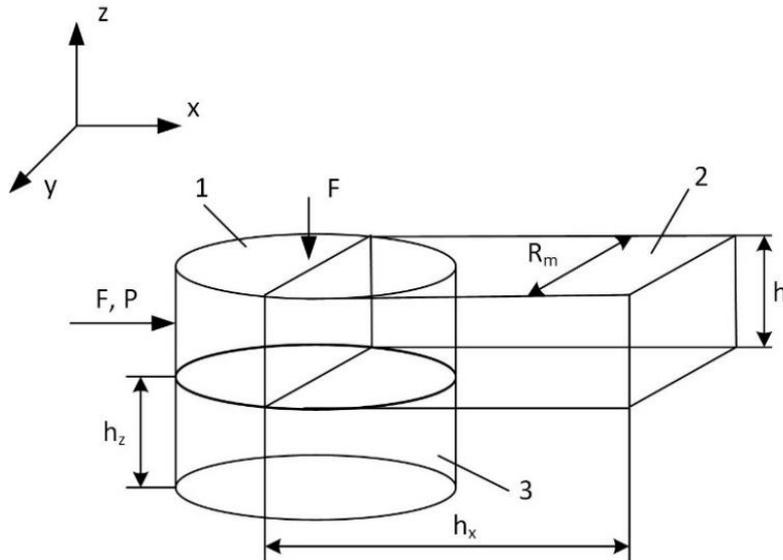


Рис. 2.11. К оценке присоединенного грунта к объекту поиска. 1- объект, 2- объем присоединённого грунта по оси x, 3- объем присоединённого грунта по оси z

График зависимости смещения объекта от расстояния при фиксированной мощности излучателя в 1000 Вт, приведен на рисунке 2.12. Зависимость требуемой мощности сейсмического излучателя от расстояния r при смещении корпуса на величину $\Delta a_z = 50$ мкм показана на рисунке 2.13. При этом не учитывалась глубина прохождения сейсмической волны Релея, $h_R \approx \lambda_R$, в которой сосредоточено до 95% всей энергии.

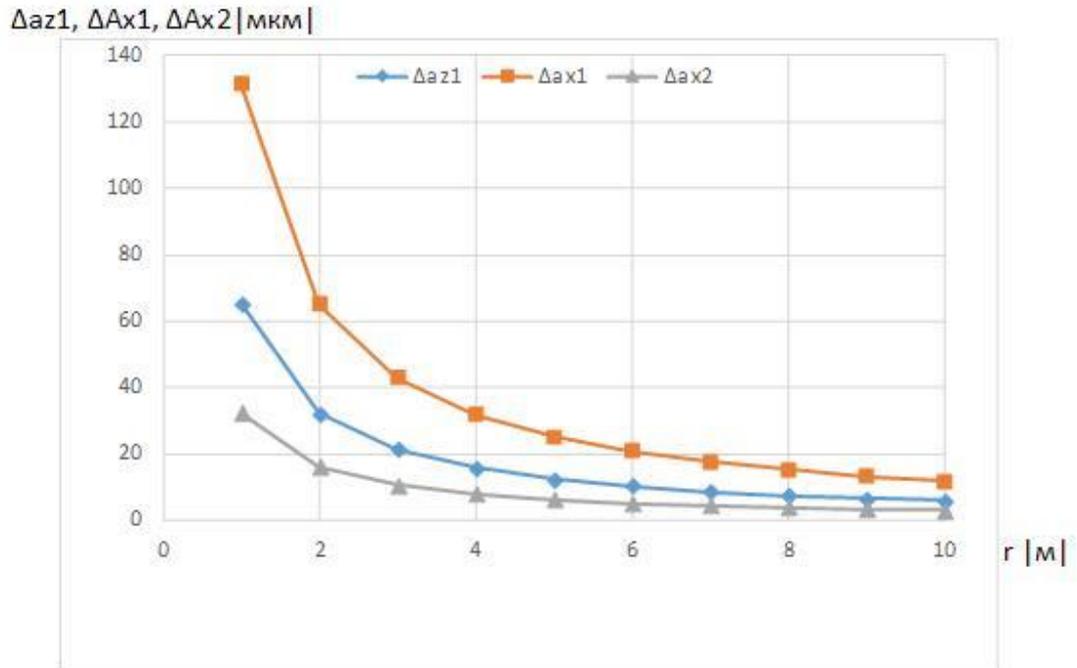


Рис. 2.12. График зависимости смещения объекта от расстояния при фиксированной мощности излучателя в 1000 Вт

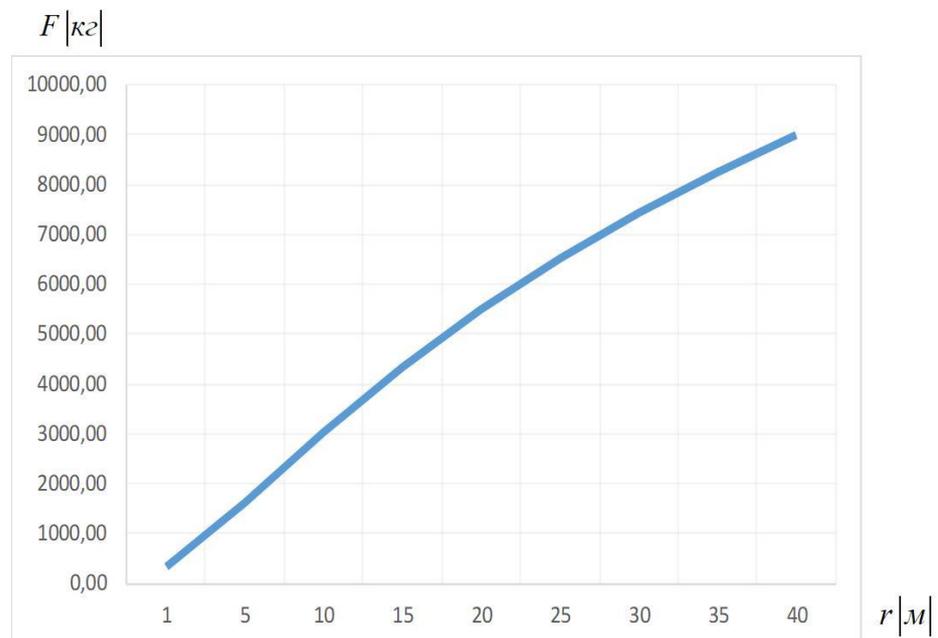


Рис. 2.13. График зависимости силы удара сейсмического источника от расстояния до объекта, при фиксированном значении его смещения

Резервом снижения мощности удара является импульсно-периодический режим возбуждения вибраций на частотах ожидаемого механического резонанса

корпусов объектов F_i и увеличение плотности потока мощности за счет поверхностного распространения волн Релея.

Выводы

1. С точки зрения зондирования объектов под слоем грунта на глубину 10-20 см необходимо использовать рабочую частоту РЛС порядка 1-2,5 ГГц, ($\lambda = 30-12\text{см}$), однако, с учетом регистрации смещения присоединённой массы грунта, рабочую частоту РЛС возможно поднять до 10 ГГц и более.

2. Для обеспечения дальности действия сейсмического канала в 100 м необходимая мощность сейсмического вибратора составит 5000-10000 Вт.

3. При этом ожидаемые амплитуды вибрации корпуса объекта находятся в пределах 40-80 мкм с фазовым доплеровским сдвигом в $0,4^{\circ} - 0,95^{\circ}$.

4. Оптимальным вариантом системы поиска, с точки зрения разрешения малых целей, является вариант с выносом приемника за пределы базовой машины на подвижный управляемый робот-сенсор. Возможна реализация переносного поискового прибора, например, совмещенного с радиоволновым.

ГЛАВА 3

Возбуждение сейсмических колебаний

При реализации параметрического метода импульсный невзрывной излучатель целесообразно разместить в задней части транспорта-носителя, расположив его на гидравлическом подвесе в виде саночного блока, опускаемого в период работы на поверхность земли. Это накладывает ограничения на конструкцию и выбор сейсмоисточника. Возможны несколько вариантов создания источников, это ультразвуковой излучатель с фазированной решеткой и параметрическим методом возбуждения сейсмических волн, импульсный невзрывной электромагнитный источник и пневматический источник. Поскольку пневматический источник не позволяет излучать импульсы со стабильными по времени и силе удара параметрами и производит разрушающее воздействие на подстилающую поверхность, ниже оцениваются возможности двух видов источников, ультразвуковой и электромагнитный, а также приводятся материалы по собственным шумам движущегося транспорта-носителя.

3.1 Ультразвуковой параметрический метод возбуждения сейсмических волн

В работах американской исследовательской лаборатории им. Линкольна [65] в 2006 г. описаны результаты экспериментальных исследований по методу обнаружения заглубленных объектов возбуждением поверхности Земли ультразвуковым излучением и считыванием вибраций почвы лазерным лучом (Рисунок 3.1). Основные принципы применения ультразвуковых излучателей в параметрических системах также изложены автором в [66].

В качестве ультразвукового излучателя использовалась фазированная решетка пьезоэлектрических элементов в количестве 160 шт. на апертуре примерно 30 см. Излучение производилось на двух частотах порядка 20 кГц с разносом по частоте 500-1500 кГц, так чтобы в результате параметрического

эффекта поверхность почвы подвергалась акустическому давлению на этой резонансной частоте.

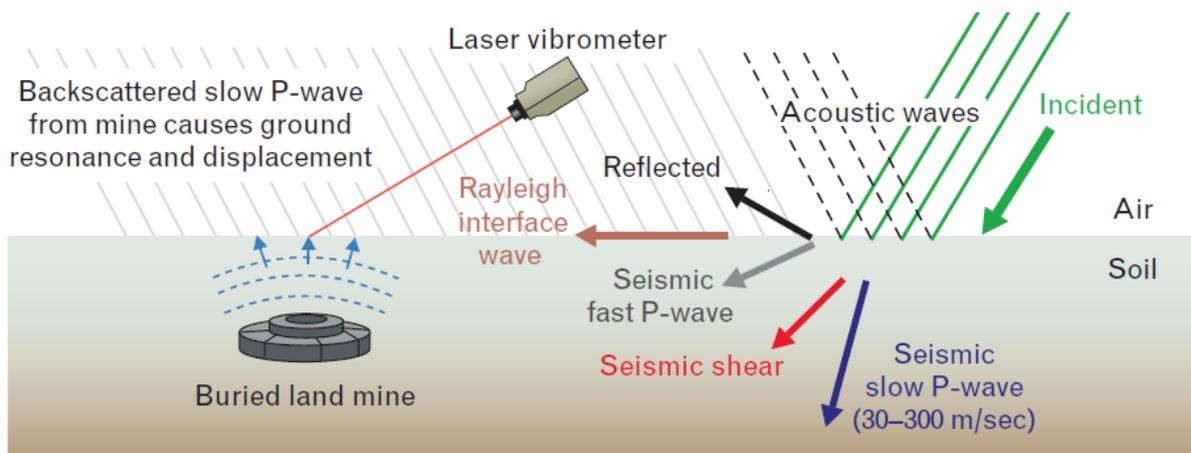


Рис.3.1.

При облучении лазером места акустического воздействия из его отраженного сигнала выделялись доплеровские частоты вибрации почвы, что и служило признаком обнаружения.

Ниже, для оценки необходимой чувствительности измерительной аппаратуры, определяемой амплитудой сдвига корпуса объекта под действием акустических колебаний порождаемых интерференцией двух ультразвуковых волн на рабочих частотах f_{a1} и f_{a2} разнесенных по частоте на низкочастотное излучение F вблизи механического резонанса корпуса, дается энергетический расчет этого метода для установки на рисунке 3.2. и определяются поисковые возможности в зависимости от мощности излучения ультразвука и расстояния.

Фазированная антенная решетка- 1 (ФАР), с эффективной площадью S_{a1} , излучает в сторону объекта- 2 ультразвуковой сигнал на частотах f_{a1} и f_{a2} , так что $f_{a1} - f_{a2} = F$ в районе точки- 3, в результате параметрического взаимодействия низкочастотный сигнал Δf действует в полосе возбуждения механического резонанса корпуса.

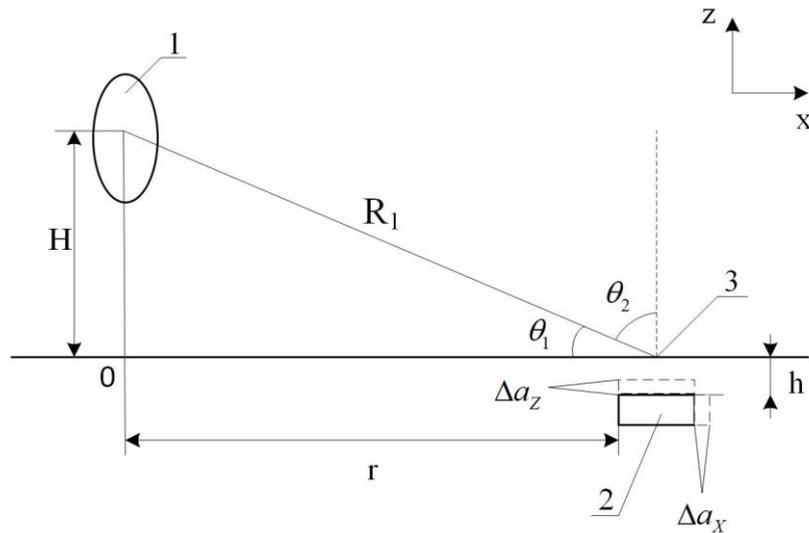


Рис. 3.2.

При заданных условиях $f_{a1} = 20 \text{ кГц}$, $f_{a2} = 20,5 \text{ кГц}$, $\Delta f = 500 \text{ Гц}$, КПД параметрического преобразования $\eta = \frac{P_f}{P_f} \approx 1\%$, необходимо построить зависимость смещения корпуса под действием силового импульса на частоте Δf от мощности излучения ФАР и расстояния r : $\Delta a_z = f(P_{a1}, r)$; $r = 1-10 \text{ м}$; $P_{a1} = 100-10000 \text{ Вт}$.

Плотность потока мощности акустического излучения в районе объекта для горизонтального и вертикального смещения:

$$\Pi_x = \frac{P_{a1} Q e^{-\alpha R_1} \eta D \cos \theta}{4\pi R_1^2}, \quad (3.1)$$

$$\Pi_z = \frac{P_{a1} Q e^{-\alpha R_1} \eta D \sin \theta}{4\pi R_1^2}. \quad (3.2)$$

Где: P_{a1} - мощность акустического излучения фазированной решетки на частоте 20 кГц;

$Q = 4\pi \frac{S_A}{\lambda^2}$ - КНД акустической решетки;

$S_A = 0,5 \text{ м}^2$ - площадь акустической антенны;

θ - угол скольжения ультразвукового луча вблизи объекта;

$\alpha = 1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{м}}$ - коэффициент поглощения ультразвука в воздухе;

$\eta = 1\%$ - коэффициент преобразования мощности акустического излучения в низкую частоту на границе раздела земля-воздух [63].

D - коэффициент преломления акустической волны на частотах излучения ФАР.

Согласно [63]:

$$D = \frac{4m_\rho}{(m_\rho + 1)} \cdot \cos \theta, \quad (3.3)$$

где:
$$m_\rho = \frac{\rho_1 v_{a1}}{\rho_2 v_{a2}}. \quad (3.4)$$

m - отношение акустических сопротивлений воздуха и земли.

Для воздуха, при влажности 70%, плотность составит $\rho_1 = 1.2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, для земли

$$\rho_2 = 2000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$v_{a1} = 340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ - скорость распространения ультразвуковой волны в воздухе;

$v_{a2} = 1000 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ - средняя скорость релеевских волн.

В этих расчетах поглощение сейсмической волны F на глубине заложения m h учитывать не будем, из-за малости величины h .

Таким образом, максимальное смещение объекта в пространстве при действии акустического излучения на дистанции 10 м, при $P_{a1} = 1000$ Вт составляет:

$$\Delta a_x = 0.04 \text{ мкм}; \quad \Delta a_z = 0.034 \text{ мкм}.$$

На дистанции 1 м:

$$\Delta a_x = 4 \text{ мкм}; \quad \Delta a_z = 3.4 \text{ мкм}.$$

Это на пределе разрешающей способности акселерометров и лазерных виброметров.

Возможны варианты улучшения чувствительности этого метода за счет существенного увеличения мощности акустического излучателя, использования частот механического резонанса объектов поиска, улучшения КПД преобразования ультразвука в низкочастотный сигнал на границе раздела земля-воздух. Таким образом параметрический метод поиска за счет дистанционности облучения

ультразвуком является перспективным, но требует дальнейших серьезных научных исследований для доведения до практики.

3.2 Импульсный невзрывной электромагнитный сейсмоисточник

Приведем основные конструктивные особенности и метод работы электромагнитного импульсного сейсмоисточника серии «Енисей». На рисунке 3.3 изображена его упрощенная конструктивная схема [67]. Основа источника – опорная плита 1, опоры 2, пригруз источника 3, магнитопровод 4, обмотки возбуждения якоря электромагнита 5, магнитопровода 6, рамы якоря 7, демферов 8. При пропускании тока через обмотку возбуждения между магнитопроводом якоря и полюсами магнитопровода индуктора пригруза, создается магнитный поток Φ , который приводит пригруз в движение вверх с силой $P(t)$.

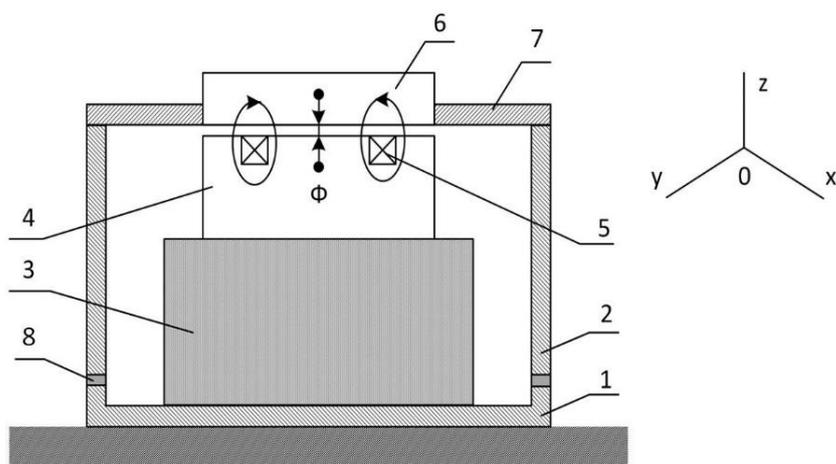


Рис. 3.3. Конструктивная схема невзрывного импульсного источника

Изначально опорная плита находится на грунте придавленная весом пригруза (пригруз представляет из себя металлический балласт позволяющий плотно прилегать опорной плите к поверхности грунта в независимости от растительности и пр.), с импульсом тока на обмотку электромагнита 4, пригруз поднимается вверх по координате Z , соответственно освобождая центр опорной плиты и передавая собственный вес на края опоры. В следствии этого, поверхность грунта приобретает форму волны (рисунок 3.4).

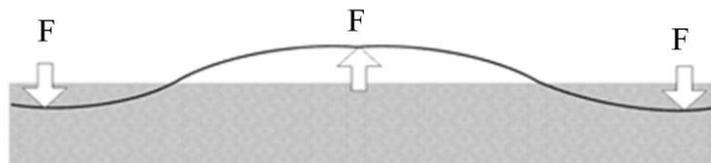


Рис. 3.4. Графическое представление действия сил на поверхность

Фронт начала импульса движения пригруза сглаживается наличием демпферов 9, что приводит к запаздыванию деформации грунта по времени на величину $(\tau - \tau_r)$ от фронта нарастания силового воздействия индуктора.

В соответствии с законом Гука связь силы давления на грунт σ с его деформацией:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3.5)$$

где E - модуль Юнга, ε - деформация грунта.

Допустим что зазор между якорем и корпусом равен δ_0 , соответственно время прохождения индуктором зазора $\tau_y = \frac{\delta_0}{v_y}$, где v_y - скорость движения индуктора.

Соответственно время механического воздействия по консолям пригруза и стойкам до грунта составит:

$$\tau_M = \frac{x_1 + x_2}{v_M}. \quad (3.6)$$

Общее время действия импульса на грунт

$$\tau = \tau_y + \tau_M. \quad (3.7)$$

Где постоянная времени смещения грунта

$$\tau_r = \frac{\delta_0}{v_r}, \quad (3.8)$$

v_r - скорость смещения грунта.

При действии силового импульса, условие пластической деформации грунта $\tau > \tau_r$.

Примем скорость деформации грунта $v_r = 1$ м/с, а зазор электромагнита $\delta_0 = 5$ мм, то $\tau_r = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 5 \text{ мс}$.

Время прохода якоря зазора δ_0 равно длительности импульса тока, поступающего на индуктор:

$$\tau_{\text{я}} = 5 \text{ мс}; \delta_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

тогда скорость движения якоря:

$$v_{\text{я}} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 1 \text{ м/с}.$$

Оценим время запаздывания акустической волны в консолях пригруза и стойках для случая $x_1 + x_2 = 2$ м:

$$v_m = 4000 \text{ м/с}; \tau_p = \frac{2}{4000} = 0,5 \text{ мс}.$$

Суммарное время запаздывания действия импульса силы на грунт с учетом демпфирования пригруза и стоек τ_d :

$$\tau = \tau_{\text{я}} + \tau_p + \tau_d + 0,5 = 5,5 \text{ мс} + \tau_d.$$

Таким образом, конструктивные особенности данного типа источников позволяют соблюсти условие, $\tau > \tau_r$ т. е. время силового воздействия больше времени деформации грунта, в отличие от падающего груза, где скорость удара всегда выше скорости смещения. Это позволяет с наименьшими потерями преобразовать импульс источника в сейсмическую волну.

На рисунке 3.5 показаны зависимости импульса тока в обмотке электромагнита; $\varepsilon(t)$ - изменение деформации грунта; $P_m(t)$ - силовое воздействие на грунт от времени.

Рассмотрим структурную схему электромагнитного сейсмического источника (рисунок 3.6). Основными элементами источника являются короткоходовый электромагнит, обеспечивающий создание усилия на опорную плиту, схемы возбуждения на конденсаторе, силовых тиристорах и диодах (VS, VD), так же в устройство входит система управления и зарядное устройство ЗУ.

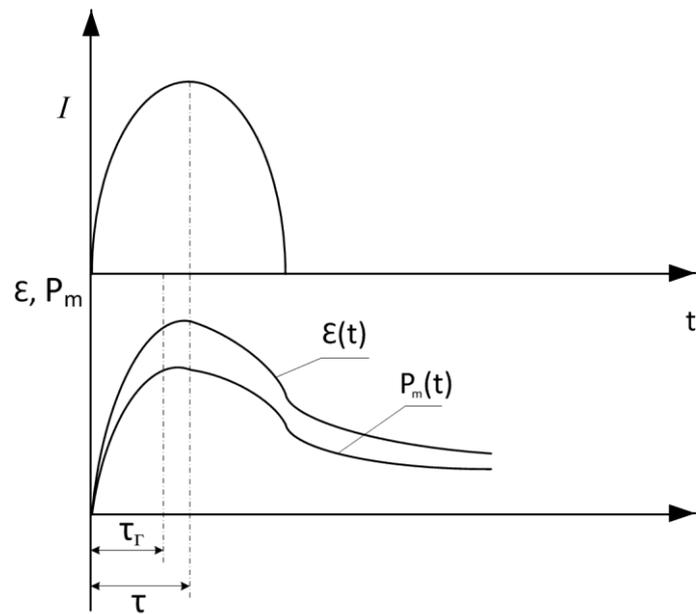


Рис. 3.5. Графики динамики изменения деформации грунта - $\varepsilon(t)$; - силовое воздействие - $P_m(t)$ и импульса тока I

Питание источника может осуществляться как напрямую от бортового генератора, так и от предварительно заряженных аккумуляторных батарей.

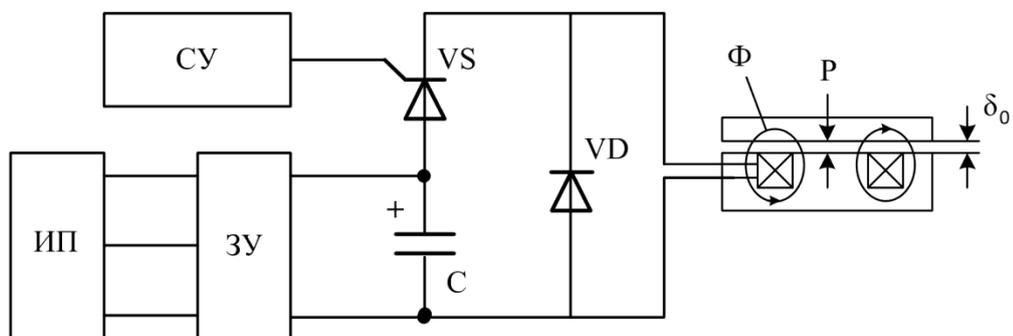


Рис. 3.6. Структурная схема электромагнитного сейсмического источника

С целью получения электромагнита с высокой индукцией насыщения B_s , он выполняется из низкоуглеродистой электротехнической стали. Плоский зазор электромагнита обеспечивает однородность магнитного поля и наибольшего значения силы с высоким коэффициентом преобразования магнитной энергии в механическую.

Развиваемая сила F по формуле Максвелла:

$$F(t) = \frac{B_0^2 S}{2\mu_0} \quad (3.9)$$

где: $B(t)$ - индукция в зазоре электромагнита, μ_0 - магнитная постоянная воздуха, S - площадь зазора между якорем и полюсами индуктора.

На рисунке приведено изменение тока в электромагните, и создаваемой силы, и изменения зазора. В момент t_0 открывается тиристор VS , и заряженный конденсатор C , разряжается за время t_1 на обмотку возбуждения якоря. За время разряда ток увеличивается по синусоиде с угловой частотой ω , зависящей от емкости конденсатора C и индуктивности обмотки L .

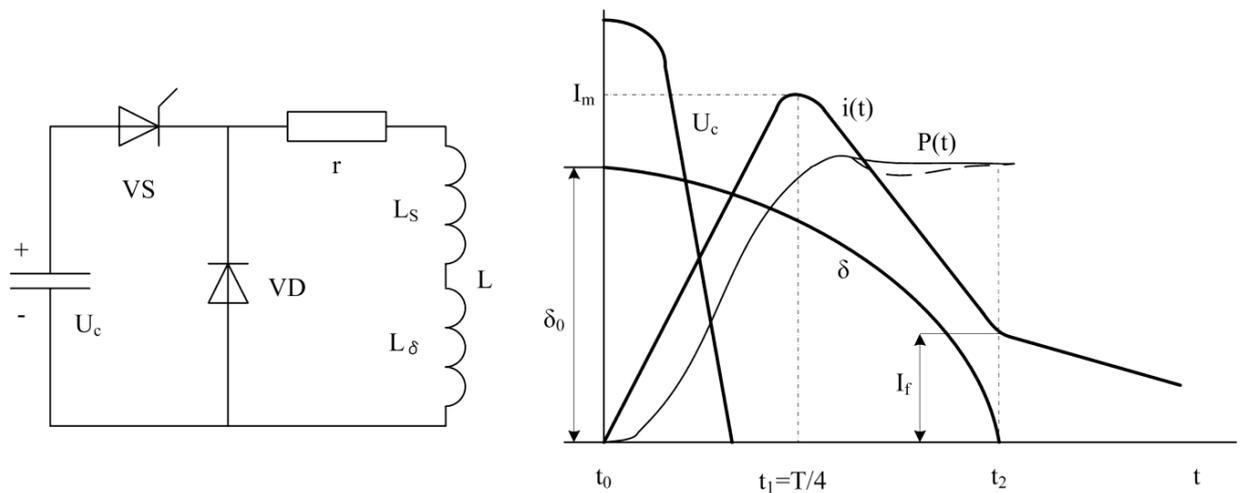


Рис. 3.7. Упрощённая электрическая схема источника и изменение тока возбуждения $-i(t)$, $P(t)$ –усилия, зазора электромагнита $\delta(t)$ в зависимости от времени

Индуктивность катушек определим, как:

$$L_\delta = w^2 G_\delta = w^2 \mu_0 \frac{S_n}{2(\delta_0 - x)}, \quad (3.10)$$

Где $S_n = b \cdot l = S/2$ –площадь ш- образного электромагнита, δ_0 - начальное значение зазора, а x - его уменьшение при выборе зазора под действием силы P . К моменту t_1 , емкость C полностью разряжена, а его энергия передается в магнитное поле электромагнита и намагничивает магнитопровод и зазор. В момент t_1 напряжение на диоде VD изменяет знак и приводит к выключению тиристора VS и

закорачиванию обмотки возбуждения. Время t_0-t_1 характеризует длительность фронта нарастания $i(t)$ и силы $P(t) \equiv i^2(t)$. Проведенные испытания показали, что за время t_0-t_1 фронта нарастания тока и силы уменьшение зазора δ_0 минимально, а плита под действием силы $P(t)$ только начинает ускорение и деформирование грунта. Преобразование магнитной энергии в механическую происходит на интервале t_1-t_2 , с сокращением зазора δ_0 . На основе экспериментальных данных следует, что в номинальных режимах работы сейсмоисточника потокосцепление обмотки электромагнита в течении времени t_1-t_2 выбора основной части зазора меняется незначительно, что обеспечивает примерное постоянство силы удара при работе как на жестком, так и на мягком грунтах.

На рисунке 3.7 показан характер изменения силы $P(t)$ с учетом вогнутости показан пунктиром. Приняв силу постоянной в течение хода электромагнита дает возможность упростить рассмотрение динамики работы сейсмоисточника.

Автором [68] предложено использование подобного типа сейсмических источников в поисковом комплексе. Конструктивно сейсмоисточник в транспортном положении сопряжен с транспортом-носителем с помощью гидравлического подъемника (рисунок 3.8).

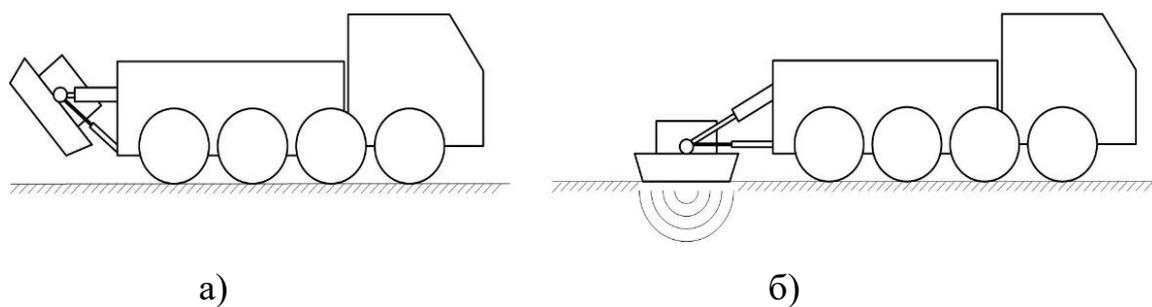


Рис. 3.8. Концепт транспорта носителя, а) в транспортном положении, б) рабочем

В рабочем положении источник выполненный в виде саней опускается с помощью гидравлического привода на поверхность почвы, при этом происходит пригруз сейсмоисточника за счет массы транспорта-носителя для надежного контакта с землей. В таком положении происходит перемещение транспорта-

носителя с одновременным излучением сейсмических колебаний через полозья каркаса сейсмоисточника.

По данным, [64] для источника СЭМ-50 при силе удара 50 т его масса составляет 1000 кг. Возможна его доработка с целью минимизации по массе. Так разработанный с участием диссертанта экспериментальный источник АСС, при силе удара 1500 кг имеет массу всего 100 кг.

3.3 Анализ сейсмических волн, производимых собственными шумами движущегося носителя

Считая объект поиска и подстилающую поверхность грунта колебательной системой с импульсной характеристикой $\Phi(t)$, рассмотрим возможность выделения этой функции из шумов движущегося носителя поисковой системы.

Будем считать, что автокорреляционная характеристика сейсмического шума ТМ описывается S-функцией, что соответствует широкополосному (белому) шуму

$$\delta(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t-\tau)dt \quad (3.13)$$

Где $x(t)$ - реализация шума

В соответствии с теоремой Винера [43] функция взаимной корреляции действующего акустического шума $X(t)$ и реакции объекта поиска $y(t)$ определяется как:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t-\tau)dt \quad (3.14)$$

$$\text{Где } y(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\Phi(t-\tau)dt \quad (3.15)$$

Подстановка (3.15) в (3.14) дает:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \int_{-\infty}^{\infty} x(t_1)\Phi(t_1-\tau)dt_1 \quad (3.16)$$

Используя теорему перестановки операторов [43], функцию (3.16) можно записать в виде:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\tau_1) \int_{-\infty}^{\infty} X(t)x(t-t_1-\tau)dt \quad (3.17)$$

С учетом 5(3.13):

$$R_{xy}(\tau) = \int \delta(t)\Phi(t-\tau)dt \quad (3.18)$$

На основании фильтрующих свойств дельта функции $\delta(t)$ выражение (3.18) можно представить как:

$$R_{xy}(\tau) = \Phi(\tau) \quad (3.19)$$

Таким образом для выделения реакции объекта поиска на широкополосный шум $x(t)$, необходимо зарегистрировать функцию взаимной корреляции между воздействующим сейсмическим шумом и реакцией объекта поиска, снимаемой с выхода приемника РЛС.

На рисунке 3.8 изображена диаграмма направленности антенны РЛС с выделением по времени двух полей обзора, что можно достичь запоминанием отраженного сигнала с разномом по времени на величину

$$\tau_T = \frac{D}{v_T} \quad (3.20)$$

Где: D - диаметр зоны обнаружения объекта поиска т.е. «пятно» радиолокационного луча на поверхности земли; v_T - скорость движения ТМ.

При $D=0,25$ м, $v_T=1$ м/с, величина $\tau_T = 2,5$ мс.

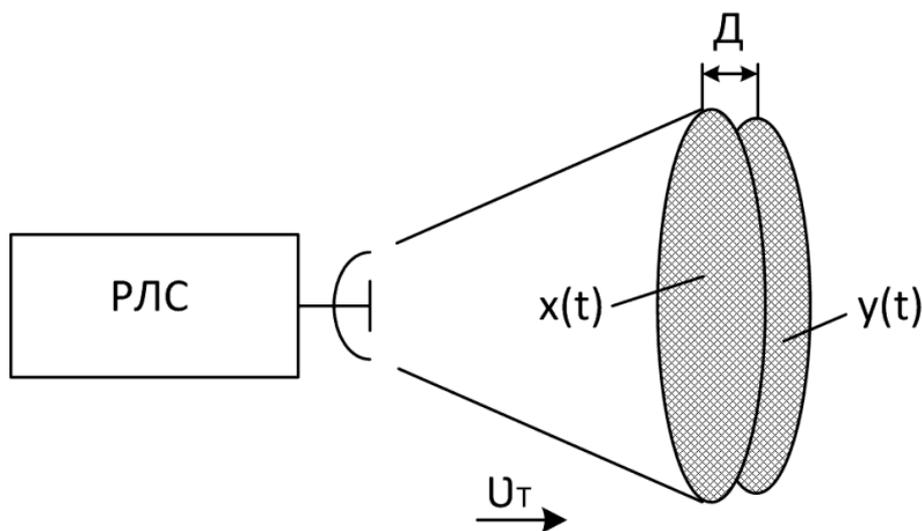
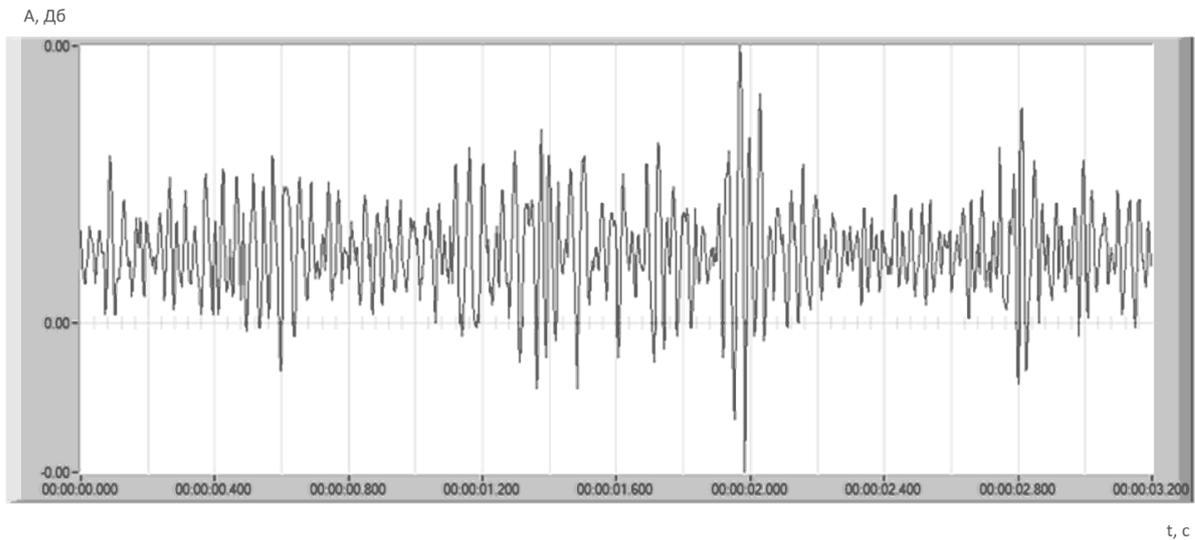


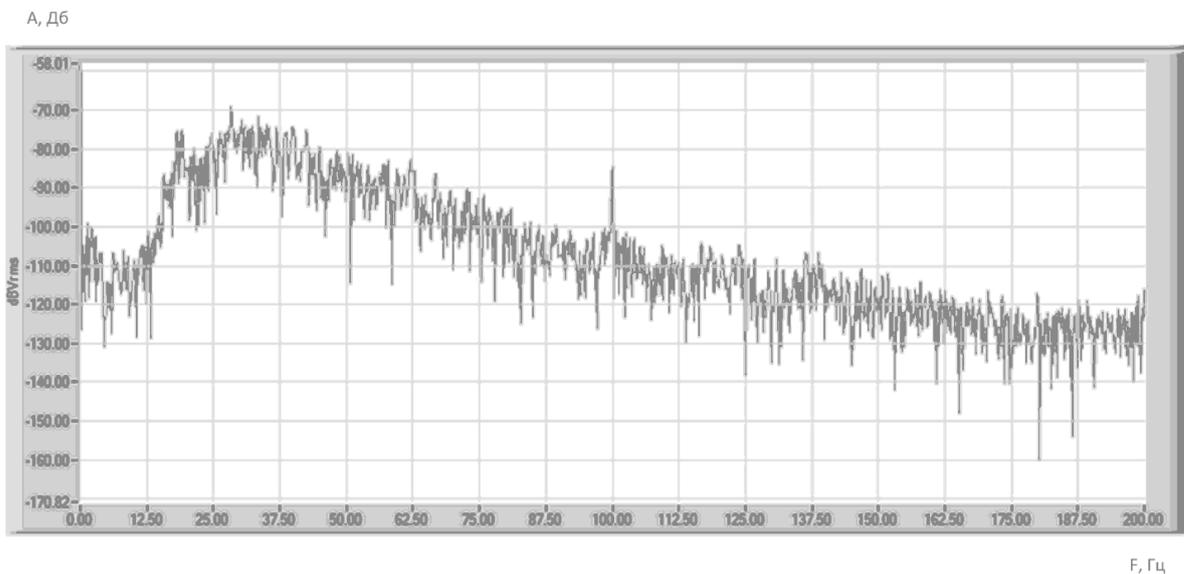
Рис. 3.8. Схема зоны поиска при использовании шума ТМ

Разумеется, что при другой спектральной характеристике сейсмического шума алгоритм (3.19) должен быть модифицирован.

На рисунке 3.9а приведена осциллограмма сигнала с выхода сейсмоприемника, а на 3.9б его спектральная характеристика, снятые вблизи стоящего автомобиля с работающим двигателем на холостом ходу. Судя по графикам, мы имеем Марковский шум с экспоненциальным затуханием по частоте.



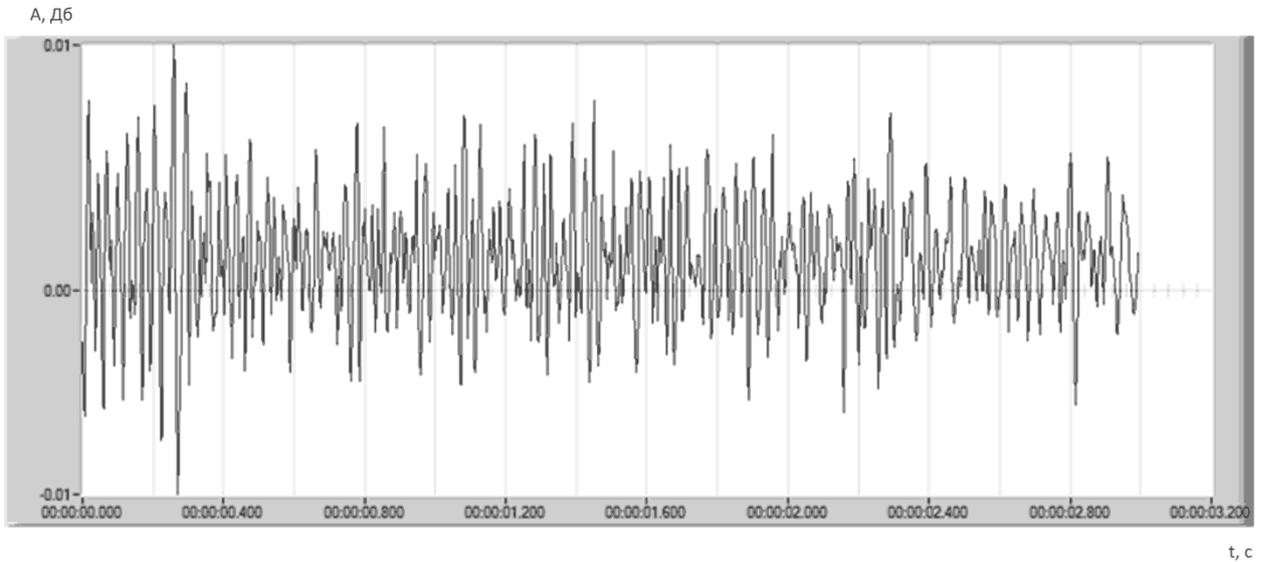
а)



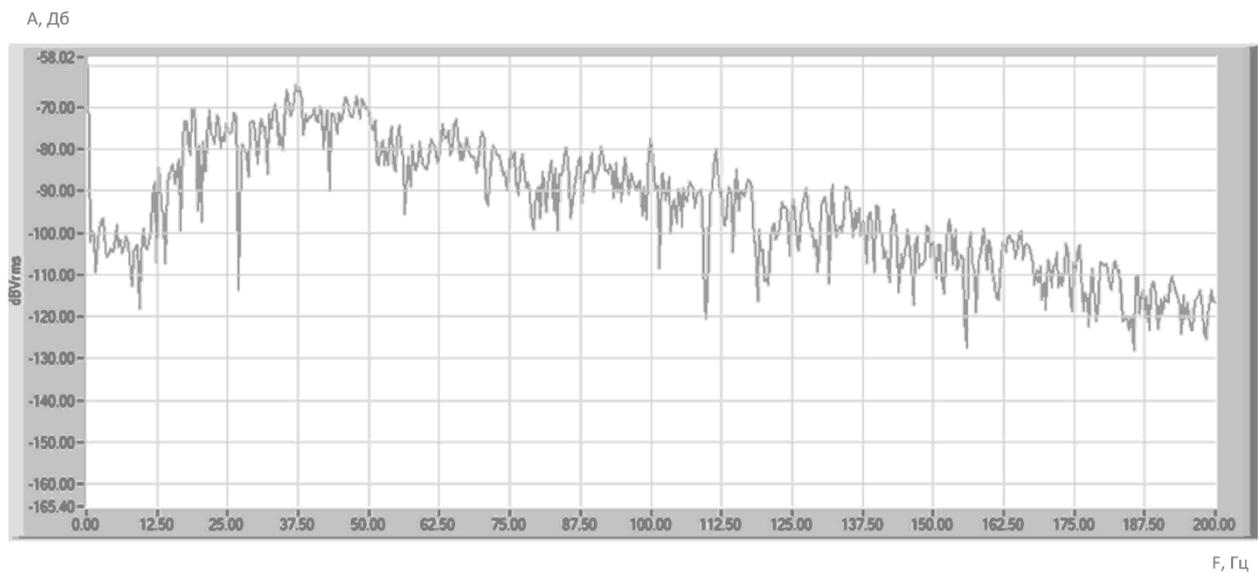
б)

Рис.3.9. Запись шумов стоящего автомобиля с работающим двигателем на холостом ходу, а)- амплитуда шумов, б) спектральная характеристика шума

На Рисунке 3.10 показаны те же характеристики, но в движении со скоростью 4 км/ч. В спектре сигнала появились более низкочастотные составляющие и возрос уровень шума.



а)

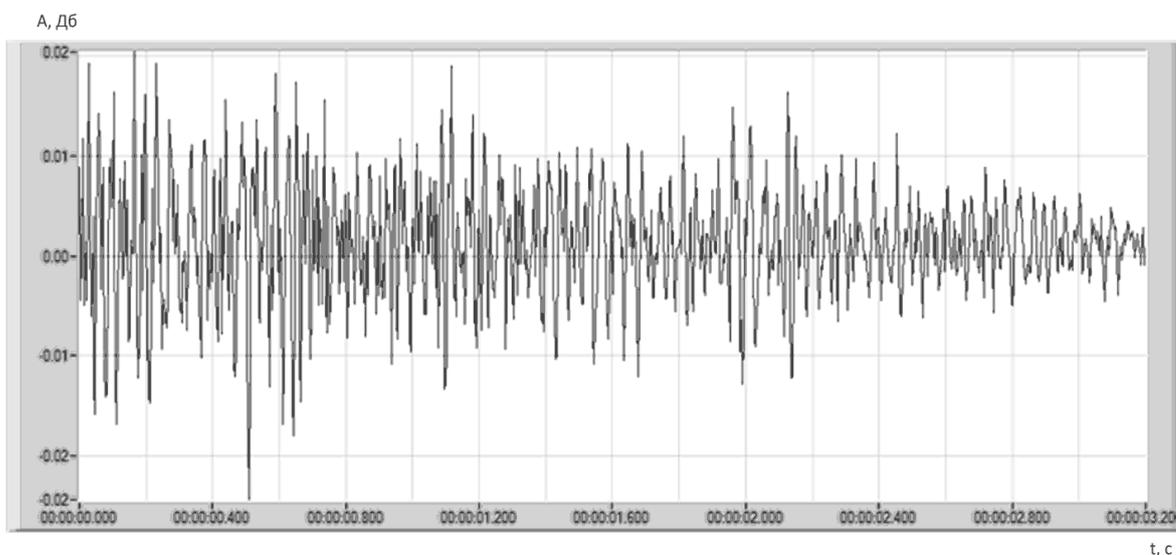


б)

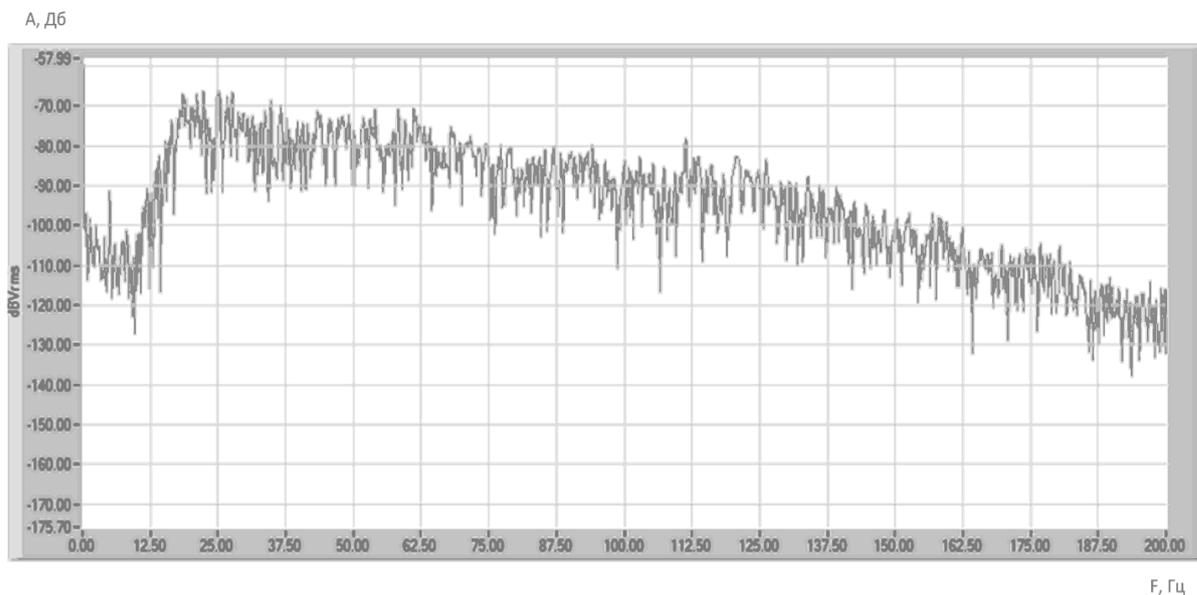
Рис.3.10. Запись шумов движущегося автомобиля со скоростью 4 км/ч

а)- амплитуда шумов, б) спектральная характеристика шума

При увеличении скорости прохождения автомобиля до 8 км/ч, спектр сигнала выравнивается по частоте по сравнению с холостым ходом Рис.3.9, а амплитуда возрастает примерно в два раза по сравнению с Рис.3.10, что указывает естественную связь уровня создаваемого сейсмического шума от движущегося автомобиля со скоростью движения.



а)



б)

Рис.3.11. Запись шумов движущегося автомобиля со скоростью 8 км/ч

а)- амплитуда шумов, б) спектральная характеристика шума

Для гусеничных носителей можно ожидать расширения спектра наблюдаемого шума и роста его амплитуды пропорционально массе носителя.

Приведенные материалы могут быть использованы при оценке отношения сигнал/шум на входе приемника радиолокатора за счет совместного действия шумов движущегося носителя и рассеивания электромагнитного поля от статистически неровной поверхности земли.

Выводы

1. Среди невзрывных источников сейсмических колебаний в диапазонах частот 20-100 Гц наиболее целесообразно использование источников электромагнитного типа. Их принцип достаточно отработан в задачах сейсморазведки, существует серийное производство с отлаженной технологией построения электромагнитных источников для различных задач.

2. Представляет интерес исследование параметрического источника с возбуждением сейсмических колебаний ультразвуковой фазированной решеткой на высокой частоте 20-30 кГц, проводимой лабораторией им. Линкольна (США). Однако, из-за малого КПД преобразования ультразвуковых волн (порядка 1%) в область более низких инфразвуковых частот 20-100 Гц, для приемлемых дальностей действия (более 10 м) этот принцип требует больших мощностей (более 100 кВт), что технически трудно реализуемо.

3. Экспериментальные исследования сейсмических шумов движущегося автомобиля показало их широкополосность и возможность использования в качестве носителя информации в некоторых специфичных случаях, а также для оценки помехоустойчивости параметрической системы при действии внешних шумов, создаваемых транспортными средствами.

ГЛАВА 4

Экспериментальные результаты и проблемы создания аппаратного комплекса

4.1 Результаты экспериментальных работ первой очереди

Первый этап натурных испытаний [62] был посвящен анализу спектральных характеристик как объектов поиска, так и объектов, имитирующих ложные цели (пустотелой алюминиевой фляжки и камней). В качестве объекта исследования рассматривался пластиковый наполненный цилиндр диаметром 500 мм и высотой 120 мм. Объекты располагались на поле покрытым травой с достаточно плотным грунтом. Схема эксперимента представлена на рисунке 4.1.



Рис. 4.1. Экспериментальный стенд

1- импульсный невзрывной источник, 2- направленный автодинный радар на частоте $f = 2.5 ГГц$, 3- трехосевые датчики сейсмических волн x, y, z, 4- генератор, 5- СВЧ приёмник, 6- индикатор СВЧ поля для настройки локатора, 7- осциллограф, 8- преобразователь DC-AC, 9- аккумулятор, 10- генератор, 11- УНЧ для маломощного акустического излучателя, 12- маломощный акустический излучатель

Для излучения сейсмических волн использовался невзрывной электромагнитный источник «Енисей 1.6» [64], с силой удара 1500 кг, а также удары кувалдой весом 10 кг.

В свою очередь регистрация реакции объектов на сейсмическое воздействие производилось с помощью акселерометра, помещаемого как рядом с объектом исследования, так и на нем. На рис. 4.2 приведены показания акселерометра, закреплённого на корпусе объекта исследования и частотные спектры этих временных зависимостей (4.2а, 4.2б). На рисунках 4.2с, 4.2д аналогичные зависимости приведены для объекта – алюминиевая фляжка (АФ). Показания акселерометра получали для трех направлений: x , y , z . Аналогично были получены результаты измерений объектов, являющихся ложными целями (камень, кирпич). В качестве акселерометра использовался ADXL335 с чувствительностью 0,3 В/г.

По данным эксперимента (рисунок 4.2) оценим амплитуды и скорости смещений объекта по соотношениям

$$\Delta a = \frac{U}{0.03} \cdot \frac{1}{(2\pi f)^2}; \quad V = \frac{U}{0.03} \cdot \frac{1}{2\pi f}, \quad (4.1)$$

где U - показания акселерометра (рис. 4.2а), f - частота колебания объекта (рисунок 4.2б).

Результаты расчёта по формуле (4.1):

$$\Delta a_x = 3.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad \Delta a_y = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}, \quad \Delta a_z = 2.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Теоретические расчёты и экспериментально полученные данные показывают удовлетворительное совпадение. Результатом эксперимента можно ожидать следующие значения доплеровских смещений частоты и фазы:

$$\Delta f_z = \frac{V_z}{C} \cdot f = 2.4 \cdot 10^9 \frac{2 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^8} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ Гц}$$

$$\Delta \varphi_z = 2\pi \frac{\Delta a_z}{\lambda} = 6.28 \frac{2.8 \cdot 10^{-5}}{0.12} = 84 \cdot 10^{-4} \text{ рад} = 0.084^\circ.$$

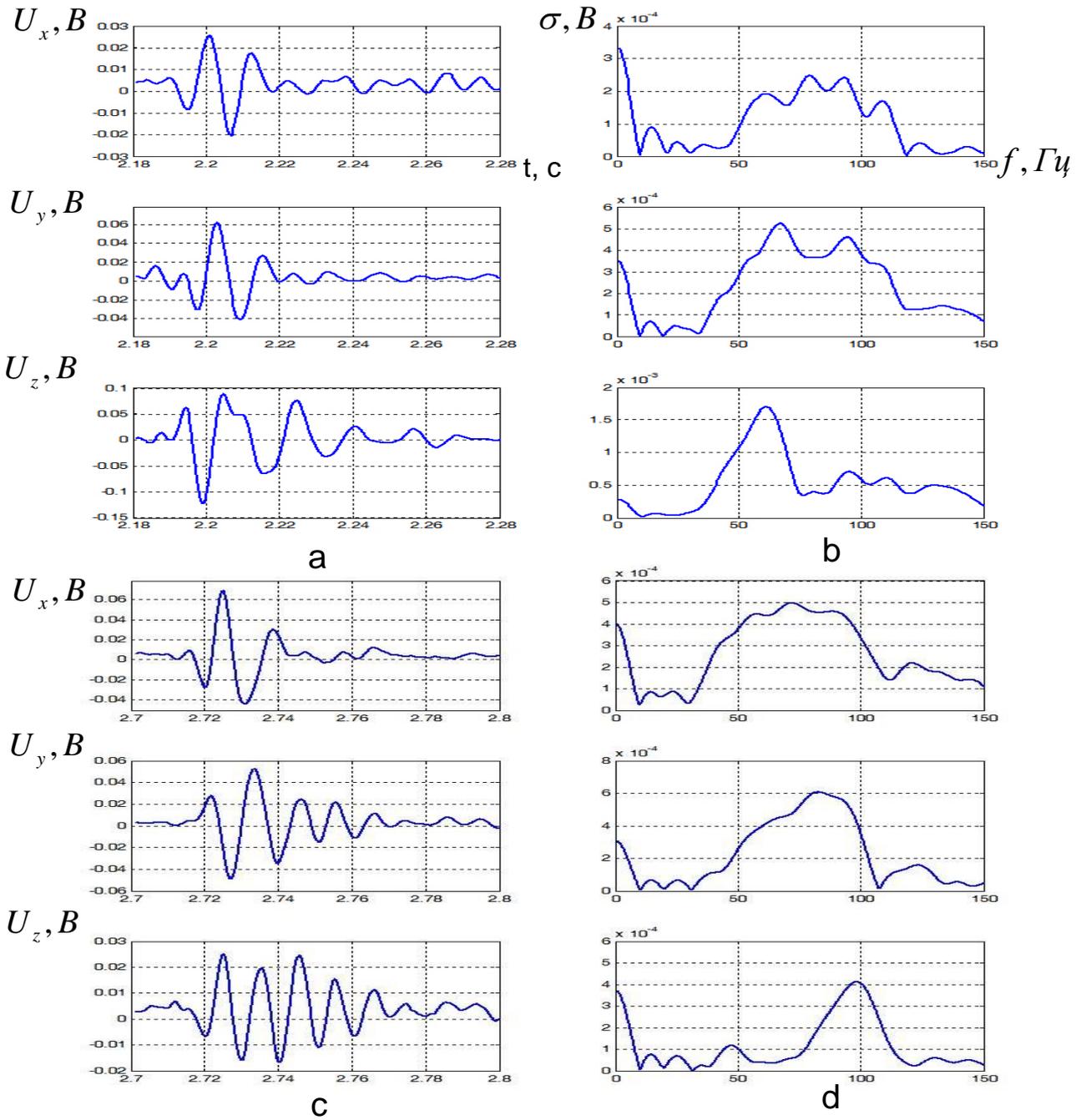


Рис. 4.2. Результаты эксперимента по показаниям акселерометра
 а- временные зависимости для трех координат (x, y, z) колебания объекта исследования, б- спектральные плотности реакции объекта для соответствующих координат (x, y, z), с- временные зависимости для трех координат (x, y, z) колебания объекта АФ, д- спектральные плотности для трех координат (x, y, z) колебания объекта АФ

Анализ результатов показывает, что смещение частоты увеличивается по сравнению с теоретическими расчётами, в то время как смещение фазы в 5 раз меньше теоретического, что можно объяснить трудно контролируемой длительностью сейсмического удара, зависящего от параметров почвы.

Продолжением дальнейших экспериментальных исследований стало получение информации о смещении объекта под действием сейсмических волн с помощью радиолокатора. Схема эксперимента приведена на рисунке 4.3.

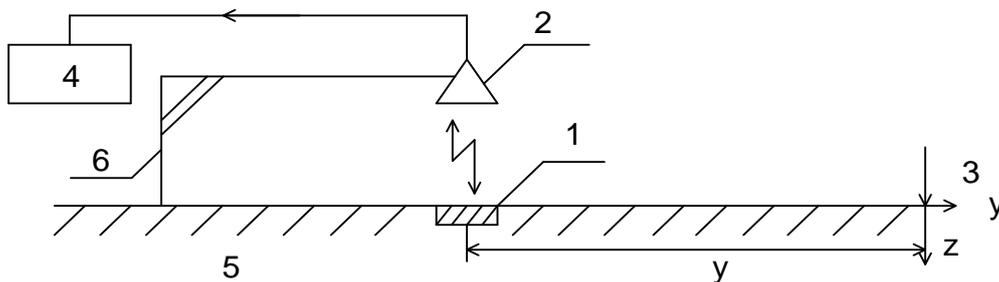


Рис. 4.3. Схема эксперимента с использованием радара

1 – объект поиска, 2 – радар, 3 – направление удара по грунту, 4 – анализатор спектра, 5 – грунт, 6 – стойка подвеса радара

Объект исследования размещался в двух положениях, на поверхности грунта и заглубленной в землю на 0,1 м. Так же были получены измерения для пустой поверхности. Полученные нормированные результаты с выхода анализатора спектра приведены на рисунке 4.4.

Поскольку радиолокатор имеет широкую диаграмму направленности и фиксирует колебание не только объекта поиска, но и большого участка поверхности грунта, содержащего посторонние предметы, визуальное спектры полученных сигналов мало различимы. Для идентификации объекта поиска в различных положениях и отличие от измерений, полученных от пустой поверхности земли, была произведена специальная обработка графиков подобных рисунку 4.4, для пяти зависимостей. Принцип алгоритма заключается в оценке ширины полосы частот в области максимумов спектральной характеристики отражённого радиосигнала:

$$\Delta f_{in} = F_n(f_{in}); \Delta f_{ok} = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p (\Delta f_{in}^j), \quad (4.2)$$

где Δf_{in} - ширина полосы частот для разных объектов для набора частот f_{in} , которые соответствуют максимальным уровням спектральной плотности в данной реализации, где Δf_{in} берётся по уровню 0,7 от максимального значения.

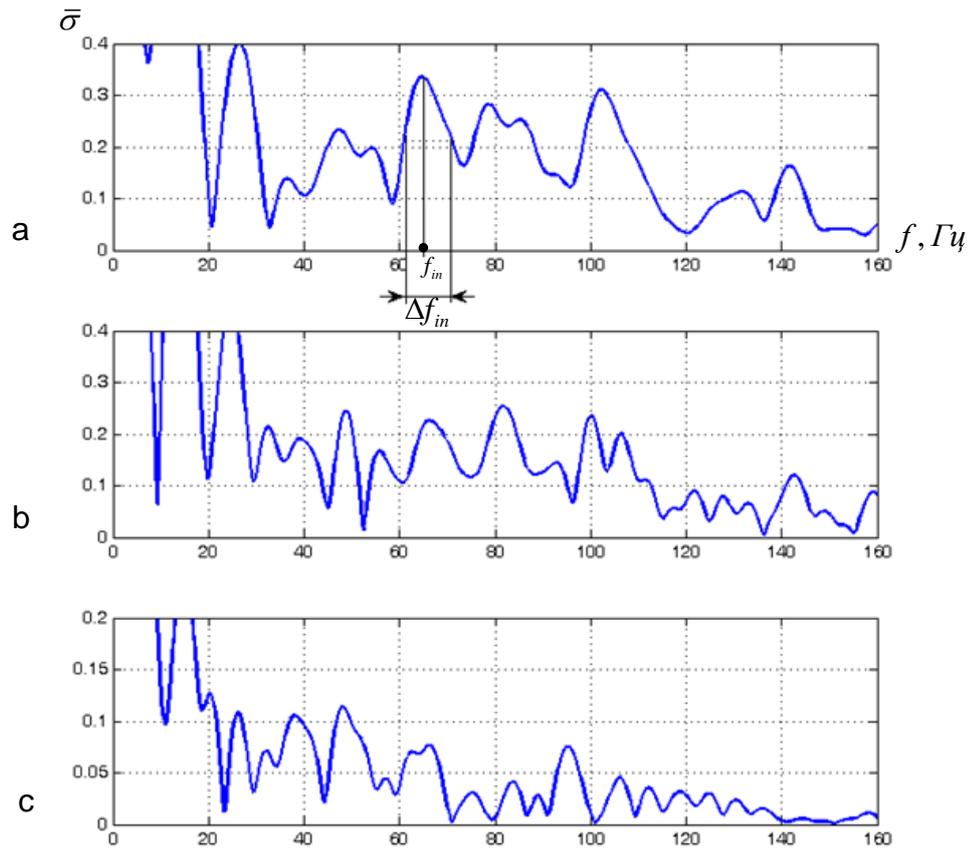


Рис. 4.4. Фрагменты показаний анализатора спектра для одной реализации
 а – однородная поверхность земли, б – объект исследования на поверхности Земли, с – объект исследования заглублен в землю

В каждой реализации количество f_{in} может быть разным, затем этот набор Δf_{in} усредняется по реализациям в заданной полосе частот $f_k = (0 \div 40); (40 \div 80); (80 \div 120); (120 \div 160)$, Гц;

p - количество f_{in} в данной полосе f_k .

Результаты обработки по алгоритму 4.2 полученных экспериментально спектров (рисунок 4.4) приведены на рисунке 4.5.

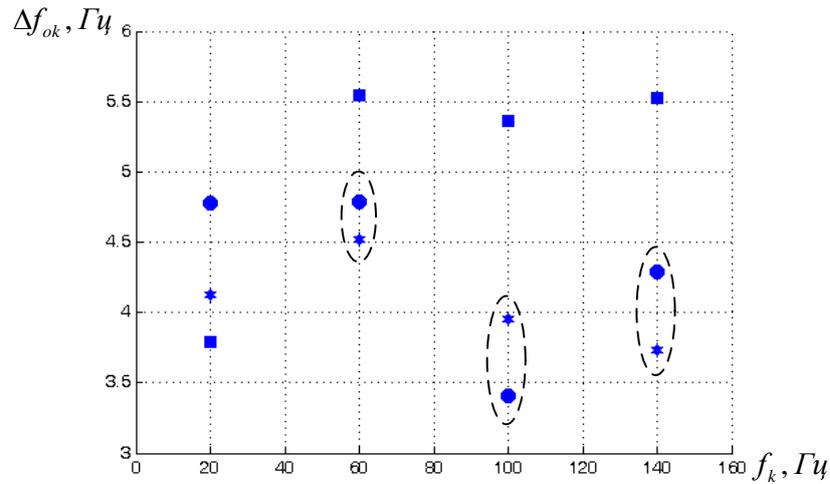


Рис. 4.5. Результаты обработки экспериментальных спектров по алгоритму (4.2)

- - $\Delta f_{ок}$ - соответствует однородной поверхности Земли;
- * - $\Delta f_{ок}$ - объект исследования на поверхности земли;
- - $\Delta f_{ок}$ - объект присыпан землей;
- (---) - области объектов поиска.

Проведя анализ полученных данных (рисунок 4.5) видим, что положения объекта отличаются друг от друга на частотах $f > 40$ Гц по параметру ширины полосы частот в спектре сигнала. Из этого можно сделать вывод, что искусственный объект под воздействием сейсмической волны представляет собой избирательный фильтр, который в свою очередь сужает полосу частот механических колебаний своего корпуса. Полученные результаты на частотах до 40 Гц могут трактоваться как неопределенность, связанная с неоднородностью сейсмического воздействия.

4.2 Результаты экспериментальных работ в сентябре 2018 г

В дополнение материалов работ, изложенных в параграфе 4.1, осенью 2018 года были проведены дополнительные экспериментальные исследования на открытой площадке в земляном грунте (рисунок 4.6).

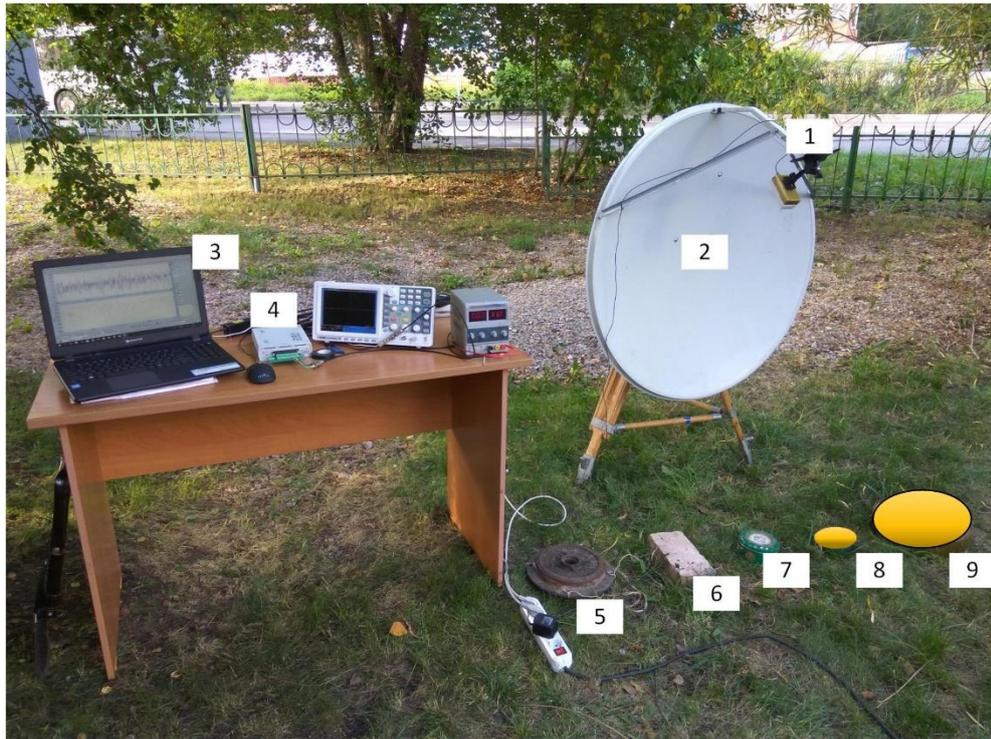


Рис. 4.6. Экспериментальный стенд на базе РЛС ДЛ-10. 1-Доплер-локатор ДЛ-10, 2- рефлектор антенны, 3- ПК, 4- АЦП LTR-CEU-1-4, 5-9 объекты поиска соответственно (кирпич, стальной диск, жестяная банка, объект исследования №1, объект исследования №2)

Работы проводились с двумя типами объектов исследования №1 и №2 представляющие собой пластиковые наполненные цилиндры 400 и 150 мм в диаметре. В качестве объектов ложной тревоги использовался стандартный кирпич, металлический диск и жестяная банка. Так же исследовался фон подстилающей поверхности т. е. грунта. Сигналы отклика всех объектов записывались с выхода акселерометра ZetLab BC 110, с чувствительностью 100 мВ/г, устанавливаемого на корпусе объектов и радиолокатора ДЛ-10. Результаты наблюдений приведены на рисунке 4.7 и рисунке 4.8.

Сейсмические удары имитировались свободным падением груза массой 5 кг с высоты 1м. Согласно рис. 4.7 по показаниям акселерометра объекты исследования отличаются более длительными колебаниями во времени, 41 мс и 50 мс соответственно. Длительности колебаний для кирпича и грунта соответственно составили 30 и 16 мс.

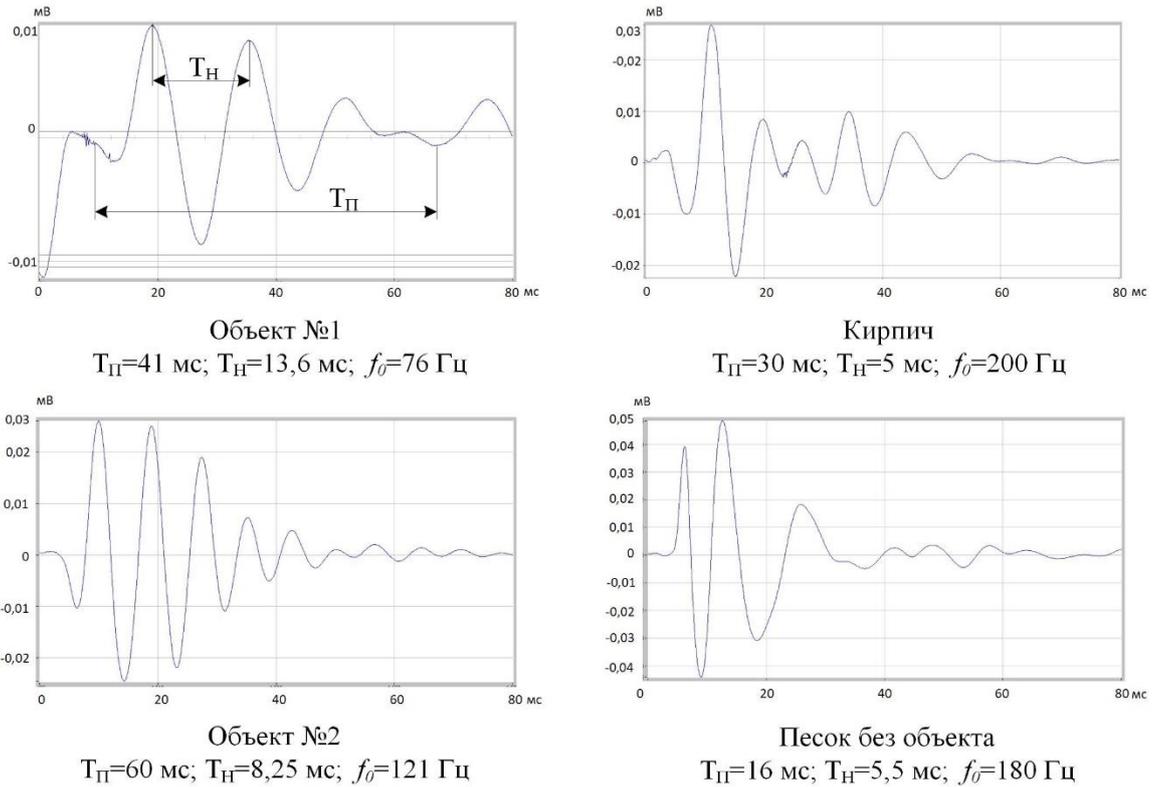


Рис. 4.7. Импульсные переходные характеристики, снятые акселерометром с объектов и подстилающей поверхности

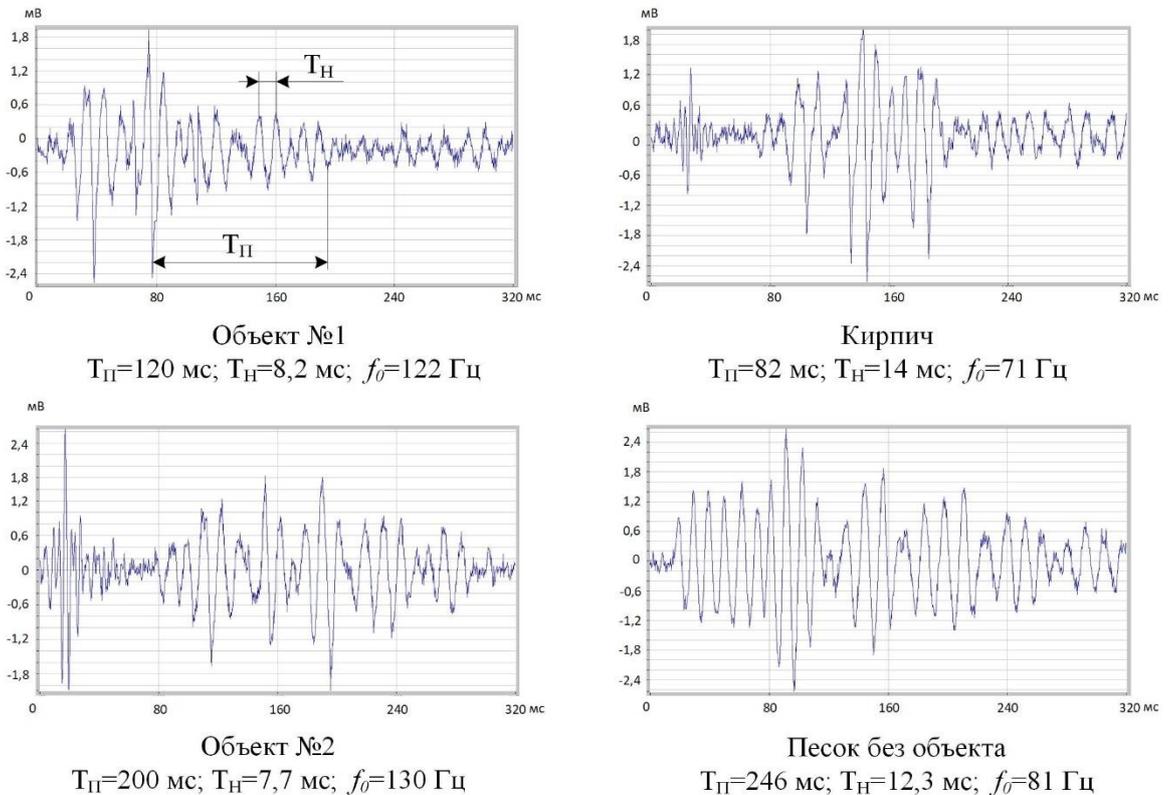


Рис. 4.8. Импульсные переходные характеристики, снятые РЛС ДЛ-10 с объектов и подстилающей поверхности

Показания акселерометра и РЛС ДЛ-10 на частоте 10 ГГц приведены в таблице 4.1, 4.2.

Таблица 4.1

Показания акселерометра на корпусе объекта и грунта

| | Объект №1 | Объект №2 | кирпич | грунт |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------|-------|
| Длительность сигнала $T_{ПС}$, мс | 41 | 50 | 30 | 16 |
| Частота несущей, f_H , Гц | 73 | 121 | 200 | 136 |
| Период T_H , мс | 13,6 | 8,25 | 5 | 7,3 |

Таблица 4.2

Показания РЛС ДЛ-10

| | Объект №1 | Объект №2 | кирпич | грунт |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------|-------|
| Длительность сигнала $T_{ПС}$, мс | 90 | 100 | 82 | 246 |
| Частота несущей, f_H , Гц | 122 | 130 | 71 | 81 |
| Период T_H , мс | 8,2 | 7,7 | 14 | 12,3 |

Анализ этих данных показывает достаточно четкое различие параметров вибраций объектов исследования и мешающих объектов (кирпич, грунт) по длительности посылок и частоты как с выхода акселерометра, так и РЛС. Учитывая что несущие частоты 10 ГГц с длиной волны $\lambda = 3$ см вряд ли может проникнуть в грунт на глубину более чем λ , то по полученным данным можно считать что РЛС фиксировала лишь вибрации поверхности грунта. Для глубины нахождения объектов 3-10 см необходимо снизить рабочую частоту РЛС до 1 ГГц ($\lambda = 30$ см).

Полученные ИПХ (рисунок 4.7) были обработаны с помощью взаимно корреляционной функции ВКФ:

$$R(\tau) = \int_0^{\tau} u_1(t)u_2(t-\tau)dt \quad (4.3)$$

График распределения ВКФ между объектами приведен на рисунке 4.9.

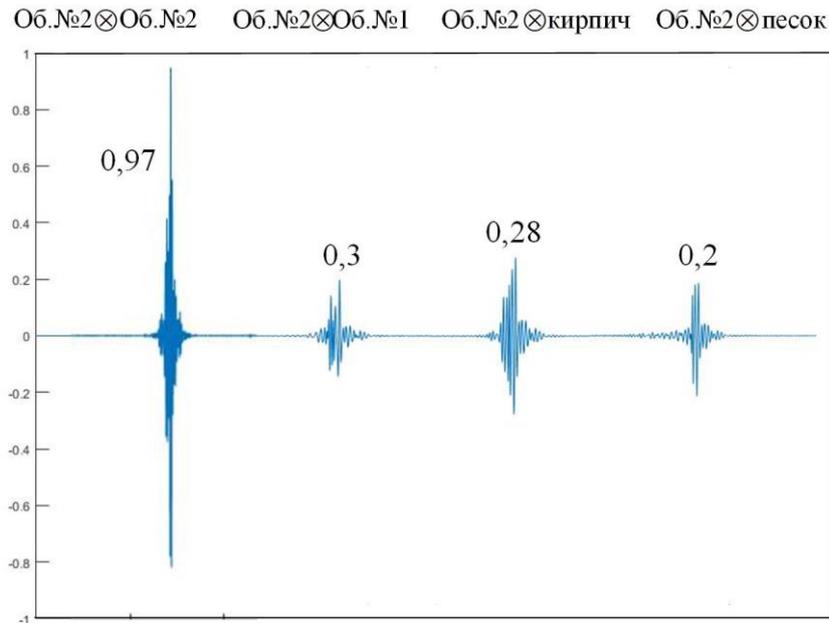


Рис. 4.9. График распределения коэффициента ВКФ объекта исследования №2 с другими объектами

На основании полученных коэффициентов взаимной корреляции (КВК), можно сделать вывод, что каждый из исследуемых объектов имеет свой индивидуальный акустический портрет. Различие коэффициента ВКФ между объектами составляет до трех раз.

Кроме того, для получения максимальной информационной отдачи и повышения отношения сигнал/шум, необходимо сигнал сейсмического источника согласовать с импульсным откликом корпуса объекта поиска $S(t)$ в виде зеркального сопряженного $S(\tau-t)$ импульса. В этом случае, как известно, отношение сигнал/шум достигнет предела:

$$q = \frac{2\mathcal{E}}{N} = \frac{\int_0^{T_H} S(t)S(\tau-t)dt}{N} \quad (4.4)$$

где N - спектральная плотность шума.

Поскольку в процессе поиска оператору как правило неизвестна импульсная характеристика объекта, то достаточно импульс сейсмоисточника промодулировать несущей частотой F_H (см. таблицу 4.1), а его длительность согласовать со скоростью поиска. Так при скорости $V=1$ м/с и диаметра объекта поиска $D=30$ см, длительность импульса сейсмоисточника должна быть не более чем $D/2$. При периоде собственных колебаний корпуса $T_H=10$ мс в возбуждающий сейсмический импульс войдет как $h = \frac{T_{ПС}}{T_H} = 15$ периодов колебаний, а это во столько же раз улучшит энергетику поискового устройства относительно расчетной (см. глава 2, 3).

Если за минимальную дальность поиска считать $r \geq 10$ м и длину базовой машины с установленным сейсмоисточником $L=5$ м, то для получения сдвига корпуса объекта в 50 мкм, рассчитанной к изменению фазового параметра РЛС, то до дальности $L+r=15$ м достаточно силы удара согласно рис. 2.13, $F=4000$ кг. Это без учета оптимального согласования сигнала сейсмоисточника с импульсной характеристикой объекта поиска и свойств волны Релея, которая содержит до 90% энергии в поверхностном слое грунта порядка 2-5 м, что дает дополнительный выигрыш в энергетике не менее чем 5-6 раз. Таким образом, в потенциале параметрического поискового устройства имеется запас для увеличения отношения сигнал/шум и улучшения вероятностной характеристики достоверного обнаружения объекта поиска и снижения уровня ложных тревог.

4.3 Опытные работы по проверке чувствительности радиолокационного метода

На рисунке 4.10 изображена схема экспериментальной установки для проверки чувствительности радиолокационного метода к амплитуде вибрации объекта поиска.

Использовались экспериментальные локаторы автодинного типа на рабочие частоты 2,5 и 10 ГГц с мощностью излучения около 1 мВт. В качестве мишени объекта применялся диффузор громкоговорителя, амплитуда вибрации которого предварительно измерялась микрометром.

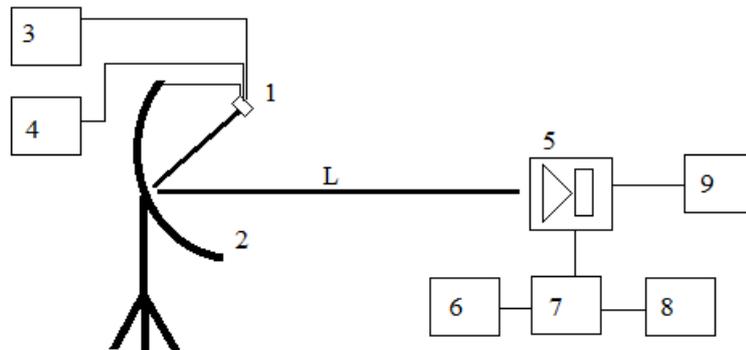


Рис. 4.10. Структурная схема экспериментальной установки

1 – доплер-локатор ДЛ10, 2 – параболическая антенна, 3 – осциллограф, 4 – источник питания ДЛ и перестраиваемый полосовой фильтр (ППФ), 5 – акустический излучатель (АИ), 6 – источник питания PSM-2010, 7 – усилитель мощности, 8 – низкочастотный генератор, 9 – осциллограф, L – расстояние 9 м.

В таблице 4.3 приведены результаты измерений на дистанции 9 м.

Таблица 4.3

Измерение при $f=33$ Гц, $L=9$ м, ДЛ- 2.5, $U_{\text{шум}}=0.35$ В

| Амплитуда напряжения U_m , В | Амплитуда смещение А, мм | Напряжение на выходе ДЛ, В | Отношение с/ш дБ |
|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------|
| 6 | 4.5 | 1.4 | 12* |
| 1.5 | 1.12 | 0.7 | 6 |
| 0.6 | 0.45 | не виден | $\ll 0$ |

Точность измерения расстояния определялась путем измерения минимальной амплитуды смещения отражателя закрепленного на диффузоре акустического излучателя.

Доплер-локатор ДЛ10 (1) устанавливаются в фокусе параболической антенны (2), расположенной на расстоянии 9 м от акустического излучателя (5).

Измерения выходного сигнала с доплер-локаторов и амплитуды переменного напряжения, подаваемого на АИ проводились с помощью осциллографов (3 и 9). Калибровка АИ проводилась на частоте $F=33$ Гц, потому что при больших значениях частоты амплитуда вибрации убывает с ростом частоты, что создает трудности для точности измерения ее амплитуды.

На частоте 33 Гц, при максимальной амплитуде напряжения подаваемого на АИ 6 В амплитуда смещения диффузора с отражателем акустического излучателя составляла 3 мм.

При дальнейших измерениях значение амплитуды вибрации определялась по усредненной эмпирической формуле, связывающей амплитуду вибрации A с частотой F и амплитудой напряжения U_m подаваемого на АИ сигнала.

$$A = 16,5 \frac{U_m}{F},$$

где A - в мм, U_m - в вольтах, F - в герцах.

Используя это выражение устанавливалась необходимая амплитуда вибрации акустического излучателя.

Амплитуда напряжения на акустическом излучателе измерялась с помощью осциллографа. Измерения проводились так же на частотах 64 Гц, 128 Гц и 256 Гц. Результаты приведены в таблицах 4.4-4.7.

Уменьшая амплитуду напряжения на акустическом излучателе до значения при котором выходной сигнал с доплер-локатора превышал уровень шумов в два раза из эмпирической формулы получали требуемую амплитуду вибрации.

Результаты измерений

За счет большего усиления в приемном тракте ДЛ-10 уровень шума на его выходе выше (0,6 В), чем у ДЛ-2.5 (0,35).

Таблица 4.4

Измерение при $f=64$ Гц, $L=9$ м, ДЛ- 2.5, $U_{\text{шум}}=0.35$ В

| Амплитуда напряжения U_m , В | Амплитуда смещение A , мм | Напряжение на выходе ДЛ, В | Отношение с/ш дБ |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|
| 6 | 2 | 0.45 | ≤ 0 |

Таблица 4.5

Измерение при $f=32$ Гц, $L=9$ м, ДЛ-10, $U_{\text{шум}}=0.6$ В

| Амплитуда напряжения U_m , В | Амплитуда смещение A , мм | Напряжение на выходе ДЛ, В | Отношение с/ш дБ |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|
| 0.2 | 0.15 | 3 | 15* |
| 0.2 | 0.15 | 2.8 | 12* |

Таблица 4.6.

Измерение при $f=64$ Гц, $L=9$ м, ДЛ-10, $U_{\text{шум}}=0.6$ В

| Амплитуда напряжения U_m , В | Амплитуда смещение A , мм | Напряжение на выходе ДЛ, В | Отношение с/ш дБ |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|
| 6 | 2 | 4 | $>15^{**}$ |
| 0.6 | 0.2 | 4 | $>15^{**}$ |
| 0.3 | 0.1 | 2.4 | 12* |

Измерение при $f=128$ Гц, $L=9$ м, ДЛ-10, $U_{шум}=0.65$ В

| Амплитуда напряжения U_m , В | Амплитуда смещение A , мм | Напряжение на выходе ДЛ, В | Отношение с/ш дБ |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 6 | 1 | 4 | $\gg 16^*$ |
| 0.6 | 0.1 | 2 | $\geq 10^*$ |
| 0.3 | 0.05 | 1.3 | 6 |

*из-за нестабильности позиционирования параболической антенны измерения проводились при большем отношении с/ш. Реальные значения смещения следует ожидать такими же, как и для частоты 128 Гц.

**При этих измерениях низкочастотный тракт входил в ограничение сигнала и поэтому отношение с/ш не определялось.

Выводы по результатам проеденных экспериментов

1. На частоте 33 Гц ДЛ-2,5 обеспечивал чувствительность 1,1 мм при отношении с/ш=6 дБ. Соответственно ДЛ-10 показал чувствительность 0,1 мм при отношении с/ш=12-15 дБ, при этом на частоте 128 Гц ДЛ-2,5 не реагировал на смещение с максимальной амплитудой 6 В. Измерения для большей амплитуды смещения отражателя не проводились из-за ограниченной номинальной мощности АИ. Лучший результат показал ДЛ-10 с чувствительностью 0,05 мм при отношении с/ш=6 дБ.

2. Погрешность смещения отражателя диффузора на частотах 32 Гц и 64 Гц составила 12,5%. При одинаковой амплитуде входного сигнала, амплитуда на частотах 32 Гц и 64 Гц падала в два раза при одинаковой амплитуде напряжения АИ 4.5мм и 2мм. Это подтверждает уменьшение амплитуды смещения с ростом частоты.

3. Получена эмпирическая формула, связывающая амплитуду смещения с частотой и напряжением подаваемом на АИ.

4. Рекомендации по доработкам доплер-локатора для улучшения точности регистрации амплитуды вибрации смещения

5. Поскольку выходной шум высокочастотного модуля ДЛ-10 составлял $\sim 3-5$ мкВ, а входной шум низкочастотного тракта $\sim 0,4$ мкВ, то в дальнейшем возможно увеличение разрешения доплер-локатора с использованием более малошумящего смесителя, а также более мощного передатчика ДЛ.

6. В ряде случаев наряду с полезным сигналом на входную антенну возможно поступление более сильной помехи существенно превышающей по амплитуде полезный сигнал. Что потребует применения смесителя с расширенным динамическим диапазоном.

4.4 Экспериментальная проверка зависимости от частоты акустического излучения и расстояния до источника

Использовался малогабаритный акустический излучатель с мощностью удара 300 кг, работающий в непрерывном режиме на частоте 90 Гц. Для сравнения характеристики в области низких частот < 40 Гц механический удар по поверхности земли производился кувалдой массой 10 кг. Считая, что ускорение кувалды в момент удара было порядка $3g \approx 30 м/с^2$, то сила удара составляла 300 кг. Грунт в районе испытаний был песчаным, что для распространения по поверхности акустических волн является худшим случаем из-за его низкой плотности.

На рисунках 4.11-4.13 представлены осциллограммы и спектральные характеристики принимаемых на сейсмоприемник сигналов для различных расстояний до излучателя.

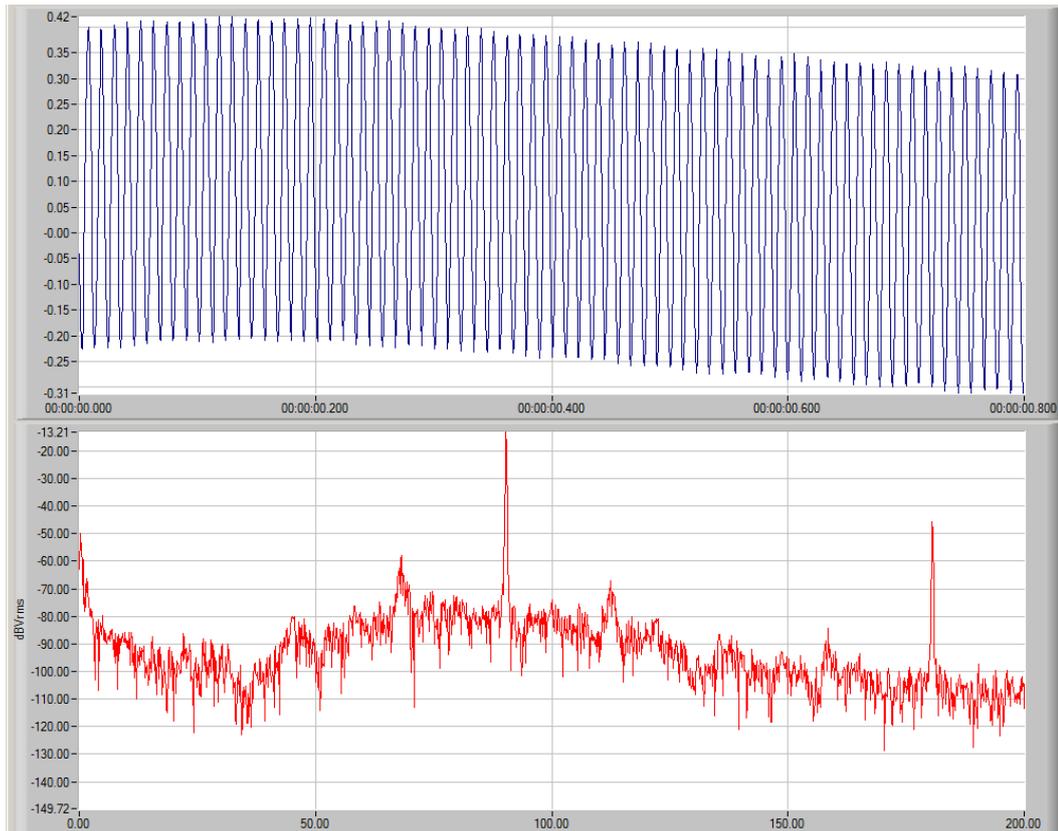


Рис. 4.11. Осциллограмма и спектр сигнала 90 Гц на расстоянии 2 м от вибратора

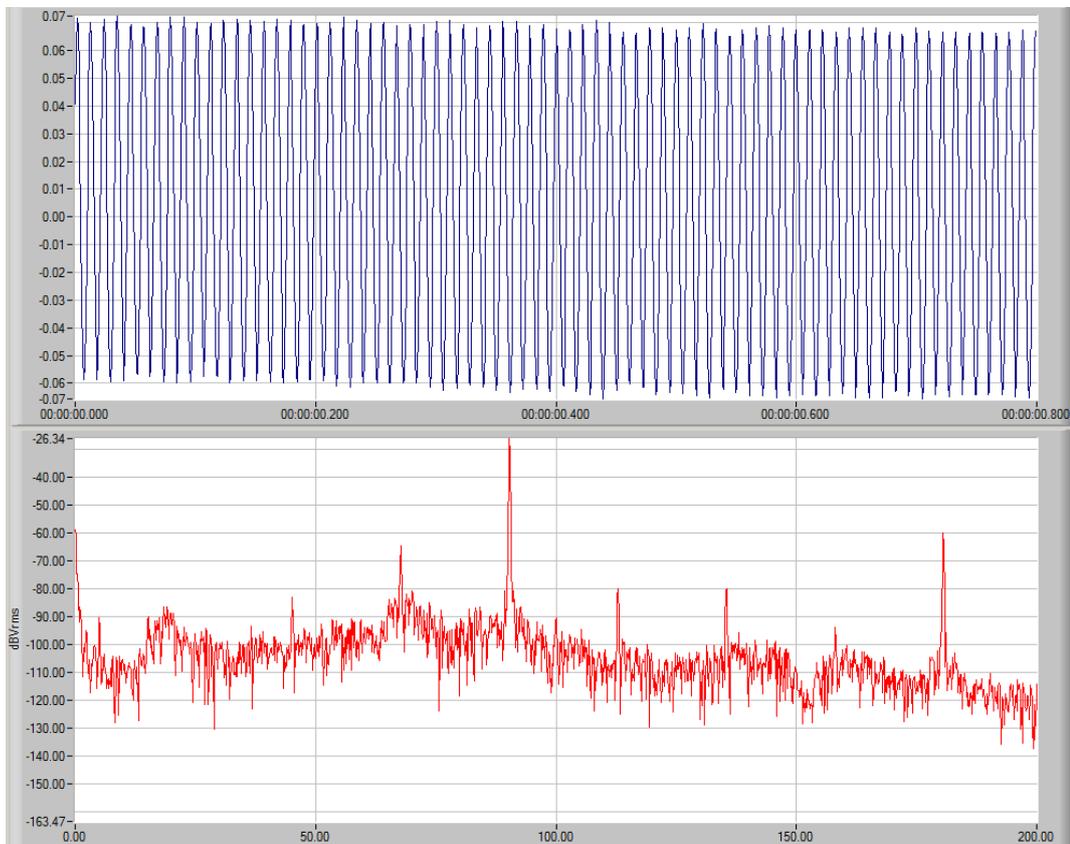


Рис. 4.12. Осциллограмма и спектр сигнала 90 Гц на расстоянии 10 м от вибратора

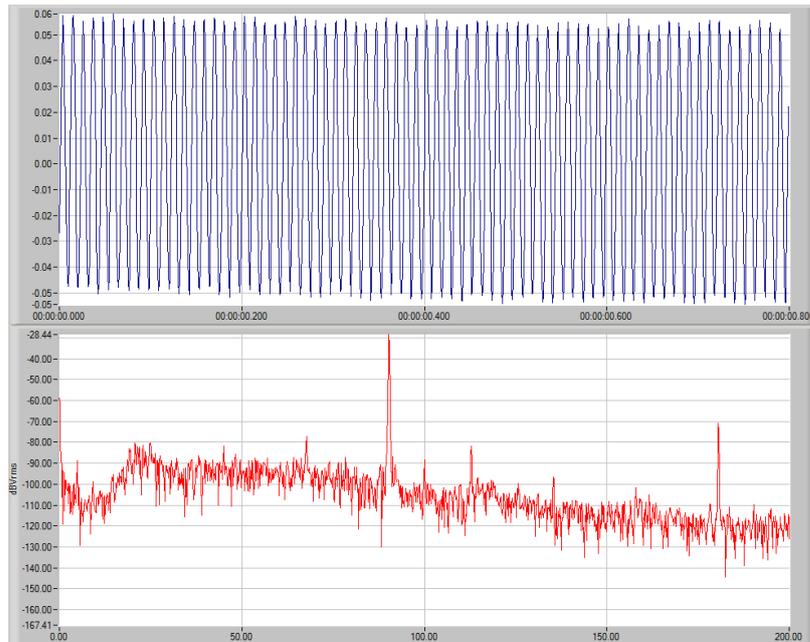


Рис. 4.13. Осциллограмма и спектр сигнала 90 Гц на расстоянии 20 м от вибратора

Аналогичные характеристики показаны на рисунке 4.14 для случая удара кувалдой. Как видим по амплитуде удара сигналы, получаемые от непрерывного излучателя и кувалды сопоставимы, что вполне соответствует выше приведенным оценкам силы удара от используемых источников.

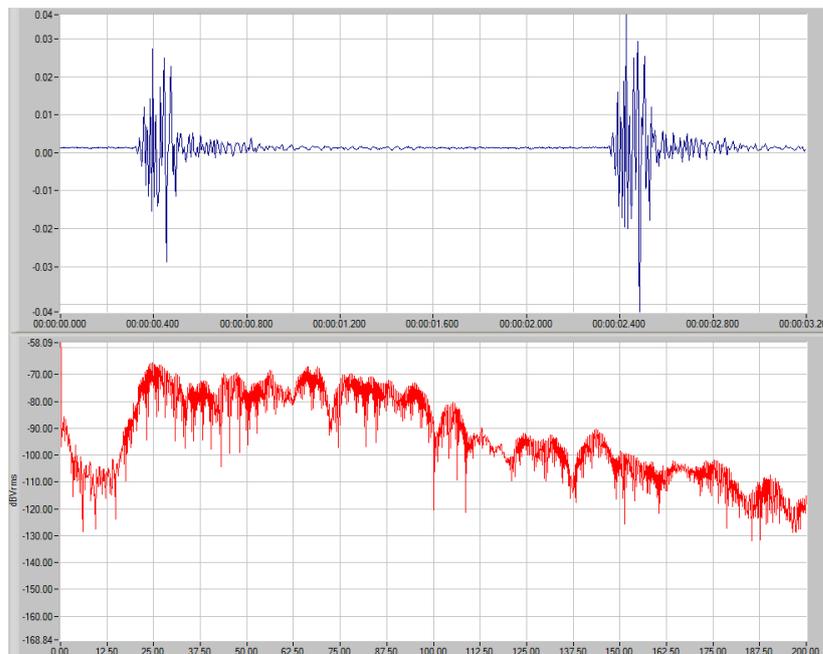


Рис. 4.14. Осциллограмма и спектр сигнала на расстоянии 20 м от места удара кувалдой

Зависимости амплитуды сигнала от расстояния в пределах 2-20 м на рабочих частотах вибратора 40 и 90 Гц приведены на рисунке 4.15.

Если исключить ближнюю зону удара, равную при скорости распространения сейсмических волн $v_p = 500 \text{ м/с}$ при рабочей частоте 90 Гц порядка $\lambda/2 \approx 7 \text{ м}$, то можно видеть что затухание акустического сигнала на частоте 90 Гц в пределах 10-20 м не превышает 2-3 Дб, а на частоте 40 Гц, 5-6 Дб.

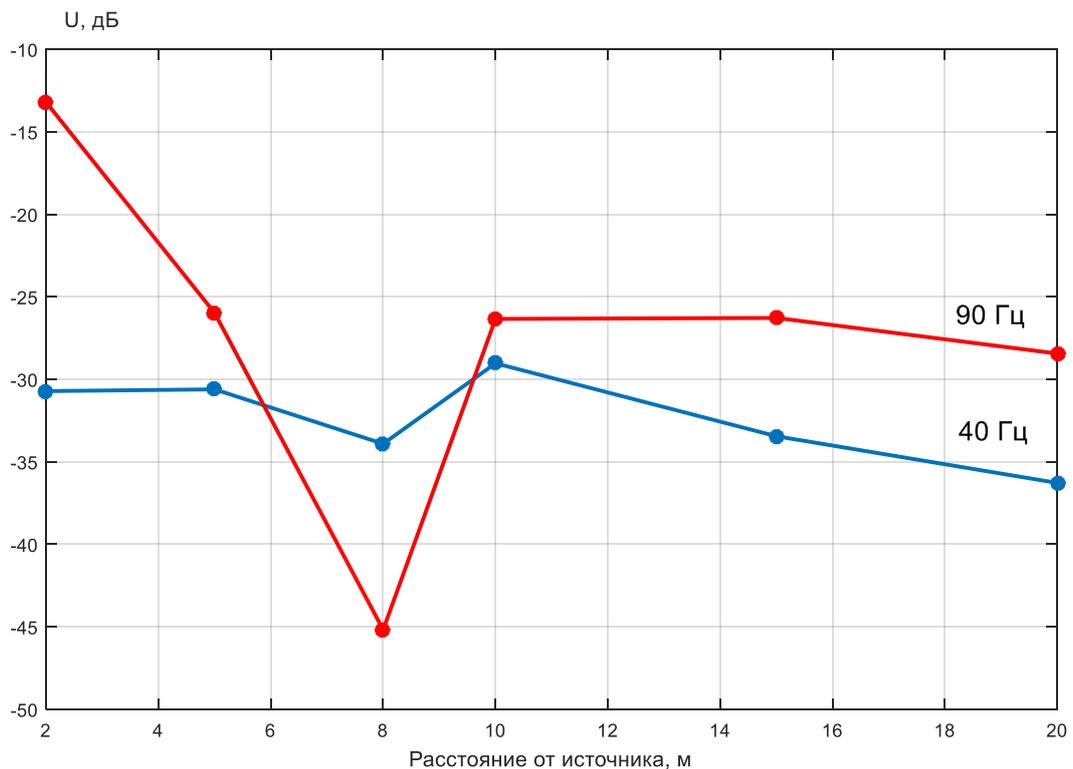


Рис. 4.15

Таким образом эти результаты дают возможность оценить поглощение акустического сигнала при распространении вдоль поверхности земли, определить необходимую мощность или силу удара «подсвечивающего» сигнала для получения необходимого сигнал/сумм на входе приемника РЛС. Полученные данные вполне соответствуют теоретическим оценкам затухания релеевских волн вдоль поверхности земли.

4.5 Вероятностные характеристики обнаружения и распознавания класса объектов поиска

В процессе поисковых работ решается задача- обнаружения объекта поиска, распознавание его вида и принятие решения о пропуске либо маркировке. Критериями обнаружения являются вероятности правильного обнаружения P_o , пропуска цели P_n и ложной тревоги $P_{лт}$, зависящие от отношения сигнал/шум.

При превышении заданного порога снижает скорость перемещения и далее выполняется алгоритм распознавания по параметрам принимаемых сигналов, в частности наряду с параметрами F , ΔF , q , определяются взаимно-корреляционные функции (ВКФ) или их коэффициентов (КВК) в виде оценки интеграла (4.5):

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \overline{u_c(t)} \overline{u_c(t-\tau)} dt \quad (4.5)$$

Где $\overline{u_c(t)}$, $\overline{u_0(t)}$ - соответственно нормализованные значения амплитуды реализации и принимаемого сигнала, T - время наблюдения сигнала.

На рисунке 4.16 представлена графическая зависимость вероятностей P_o и $P_{лт}$, от отношения сигнал/шум на входе приемника РЛС [68] для нормального распределения шума.

Характеристики (кривые) обнаружения по критерию Неймана-Пирсона

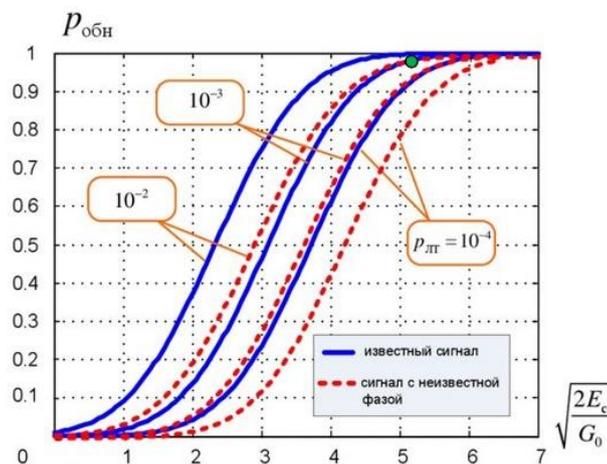


Рис. 4.16. Характеристики обнаружения

Если комбинировать поисковую систему с другим физическим принципом работы, например радиоволновым, наиболее используемого на практике с оценкой тангенса угла потерь ЭМ сигнала $tg\varphi = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$, то при равном параметрическом методу отношения сигнал/шум по мощности суммарная величина q_u увеличивается в $\sqrt{2}$, а вероятность P_o увеличивается с 0,8 до 0,9.

Метод распознавания типа объекта (образа) может быть реализован либо через алгоритм построения нейронных сетей, путем формирования при обучении регрессивной математической модели:

$$M(x_i) = \alpha_{11}x_1 + \alpha_{12}x_2 + \alpha_{13}x_3 \quad (4.6)$$

Здесь: x_1, x_2, x_3 - измеряемые параметры сигнала РЛС;

$\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}$ - коэффициенты регрессии, получаемые в процессе обучения.

При превышении $M(x_i)$ некоторого задаваемого порога M_{II} , бортовой компьютер дает сигнал на остановку поискового модуля.

На рисунке 4.17 изображена Диаграмма обнаружения объекта по трем наблюдаемым параметрам. Здесь в трех точках располагаются параметры сигналов, получаемых с датчиков. Каждый из образов окружает некоторое статистическое облако разброса параметров (дисперсия результатов измерений) получаемых в результате повторения обучения системы. Разделение классов объектов производится построением гиперплоскости III_i на векторах, разделяющей получаемые информационные параметры образа объекта.

Под гиперплоскостью понимается поверхность, разделяющая попалам среднее расстояние между двумя соседними параметрами. Понятно, что при некотором классе объектов, подобное построение III_i производится для каждого класса и решение принимается путем анализа сигналов по каждому из типов искомым объектов $R(0), \Delta F_o, T_o, f_o$.

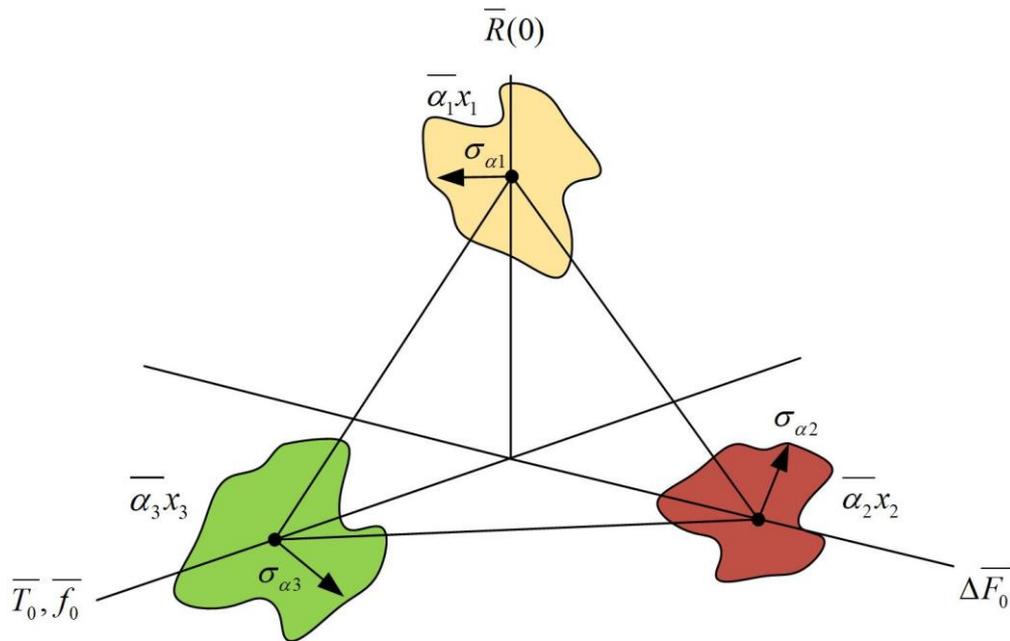


Рис. 4.17. Диаграмма обнаружения объекта по трем наблюдаемым параметрам

Если параметры x_i независимы друг от друга, то статистические вероятности обнаружения P_o , $P_{лт}$, q определяются с помощью рисунка 4.10 как:

$$q = \sqrt{\sum_{i=1}^3 q_{x_i}^2} \quad (4.7)$$

Это позволяет, при одинаковом отношении сигнал/шум по каждому параметру, повысить общий в 3,3 раза по напряжению или в 9 раз по мощности и достичь, согласно графика распределения Неймана-Пирсона при вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-2}$, вероятность обнаружения цели $P_o = 0,95$.

Таким образом, параметрический метод позволяет в потенциале получить существенное улучшение статистических характеристик поиска, а в комбинации с радиоволновым методом в целом, достичь необходимых результатов. Включение дополнительных информационных каналов позволит дополнительно улучшить параметры P_o , $P_{лт}$.

4.6 Проблема создания аппаратного комплекса

Возможный вариант подобного комплекса, включающий базовую машину с командой операторов и несколько управляемых на расстоянии подвижных блоков-роботов (БР) с навесными сенсорами различных классов изображен на рисунке 4.18 [69]. На данный поисковой комплекс автором был получен патент [70].

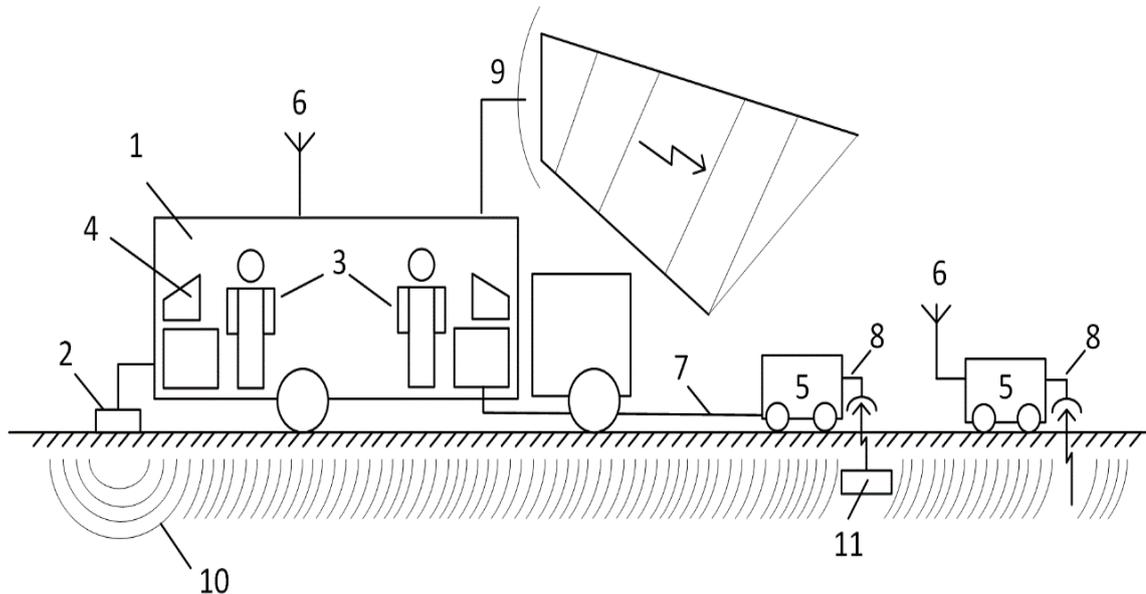


Рис.4.21. Возможный вариант робототехнического комплекса

1- базовая машина, 2- сейсмический вибратор; 3- операторы БР; 4- пульт управления БР; 5- БР; 6- радиоканал управления БР; 7- проводная линия управления БР; 8- совмещенный сенсорный модуль; 9- антенна бортовой РЛС; 10- сейсмическая волна; 11- объект поиска

На базовой машине, кроме команды операторов, управляющих индивидуально каждым из БР, размещены передатчик радиолокатора с дальностью действия 100-200 м и навесной сейсмический вибратор с рабочим диапазоном частот в пределах механических резонансов корпусов поисковых объектов.

Поисковыми элементами на борту БР являются набор приёмников, с антеннами для приема отраженных от почвы радиолокационных сигналов, излучаемых передатчиком РЛС с базовой машины и радиоволновые датчики.

Система синхронизации обеспечивает временное разделение сигналов комплекса, при котором в начале используется параметрическая система с передатчиком РЛС и затем радиоволновые датчики. Примерная конструкция блока-робота приведена на рис. 4.19.

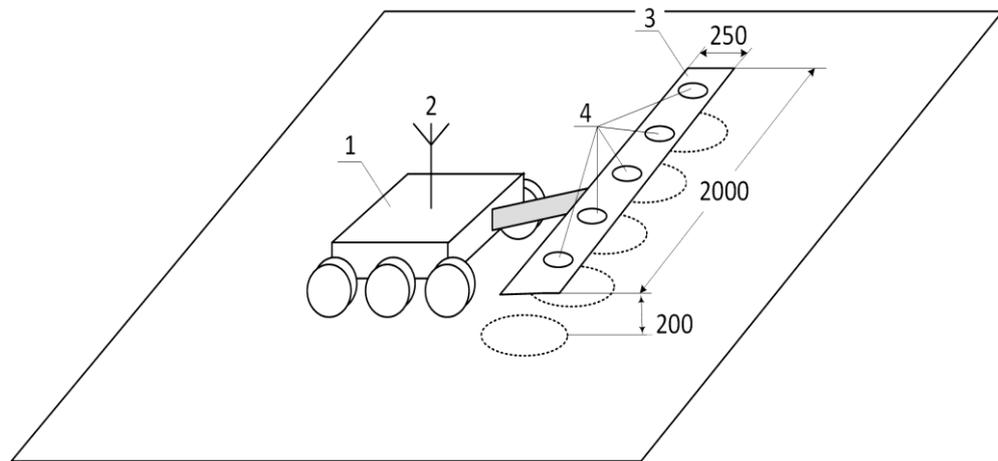


Рис. 4.19. Конструкция блока-робота

1- корпус БР, 2- антенна управляющего радиоканала, 3- рама, 4- антенны параметрического и радиоволнового сенсора

Все данные наблюдений по обоим каналам передаются на компьютер оператора по проводной связи либо по радиотракту.

Компьютер оператора снабжен программой нейрокомпьютерного распознавания целей по комплексу наблюдаемых параметров.

При обнаружении объекта поиска, оператор останавливает БР, производит маркировку места заложения, с записью координат. Такова в общем виде конструкция комплекса и его алгоритм работы.

Оценка тактико-технических характеристик параметрического канала

На рисунке 4.20 изображена схема одновременного возбуждения полупространства земля-воздух сейсмическими волнами Релея и

электромагнитными волнами со считыванием отражённых сигналов в точке облучения.

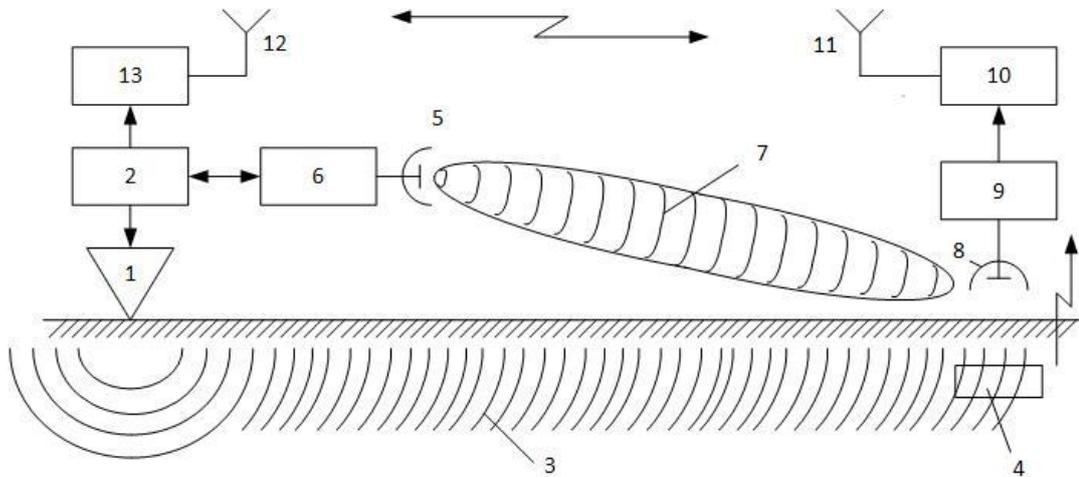


Рис. 4.20. Схема реализации параметрического метода с вынесенным приемником

Под действием сейсмического (акустического) вибратора, состоящего из ударно-волнового датчика -1, возбуждаемого генератором -2 в поверхностном слое земли создается сейсмическая волна Релея- 3, распространяющаяся вдоль со скоростью v_a . Через некоторое время $t_a = \frac{r}{v_a}$, где r - расстояние между точкой излучения и объектом поиска- 4, с направленной антенны -5 радиопередатчика -6 излучается квазинепрерывный радиосигнал -7 в сторону объекта, а отражённый ЭМ сигнал от поверхности почвы принимается антенными элементами БР- 8 после обработки входным каскадом приёмника-9 передается по каналу связи -10, 11, 12 на приёмоиндикатор оператора-13.

Временная диаграмма излучения и приёма сигналов предоставлена на рисунке 4.21.

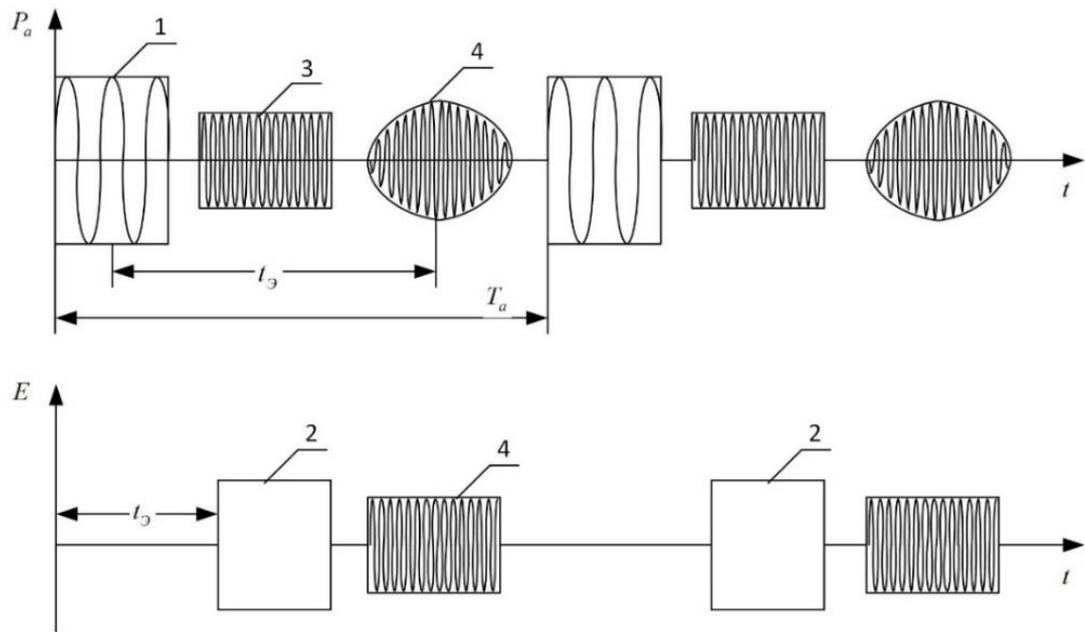


Рис. 4.21. Временная диаграмма излучения и приёма

Импульсы излучения вибратора-1 повторяются с периодом T_a определяемым видом подстилающего грунта и возможно устанавливаются заранее при работе, например, с песчаным покрытием. Через время задержки t_3 включается передатчик радиоволнового модуля поиска и принимаются сигналы от грунта -3, в момент, когда импульс сейсмического возбуждения еще не подошел к приемнику. В момент-4 включается приёмник параметрического сенсора, обрабатывающего отраженные сигналы механического сдвига почвы и объектов поиска. Таким образом реализуется двухканальная схема работы, включающая получение информации о тангенсе угла потерь $tg\varphi = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ даваемым радиоволновым каналом и параметр механического сдвига Δx , где ε - диэлектрическая проницаемость почвы, σ - ее электропроводность, ω - рабочая частота радиоволнового канала. Передатчик классического радиоволнового миноискателя располагается совместно с приемником на поисковом элементе.

В таблице 4.8 представлена зависимость скорости поперечных v_a сейсмических волн для различных видов почв [30].

Как видим, наименьшую скорость распространения сейсмических волн имеет песок v_a до 100 м/с.

Таблица 4.8

| Среда распространения | Песок | Сухая почва | Супесь | Глина |
|-----------------------|---------|-------------|--------|---------|
| Скорость v_a , м/с | 100-500 | 200 | 300 | 200-800 |

При заданной максимальной дальности действия сейсмического вибратора $r_a = 100$ м, время запаздывания сейсмической волны составит $t_a = 0,2$ с. Откуда период повторения сейсмического сигнала должен быть не менее чем $T_a \geq 1$ с. Поскольку на расстоянии $r_a = 100$ м время запаздывания ЭМ сигнала незначительно, то радиопередатчик- б может излучать с запаздыванием во времени относительно сейсмического импульса на время $T_a = 0,9$ с.

Далее оценим необходимую чувствительность приемника РЛС, если будем использовать фазовый метод демодуляции отражённого от поверхности почвы сигнала. В соответствие с [62] амплитуду механического смещения корпуса под действием сейсмического воздействия силой удара P_a (Н) можно оценить как:

$$\Delta a_x \approx \frac{P_a}{4\pi R_a^2} \cdot \frac{R_a}{r_a} S \frac{Q}{m} \tau^2, \quad (4.8)$$

где R_a - радиус излучающей плиты сейсмоисточника, S (m^2) - площадь боковой поверхности объекта, m ($кг$) - ее масса, τ ($с$) - длительность полупериода возбуждающего сейсмического удара, P_a ($Н$) - сила удара, r_a ($м$) - расстояние от сейсмоисточника, Q - добротность корпуса.

Как видно из (4.8), амплитуда механического смещения корпуса объекта Δa_x в первую очередь зависит от отношения S/m , т. е. площади его поверхности к массе. Этот параметр специфичен, поэтому может быть заранее внесены в базовую память системы распознавания.

При фазовом методе демодуляции полученного сигнала, смещение фазы отражённого радиосигнала составит:

$$\Delta \varphi = \omega \frac{\Delta a_z}{v_3}, \quad (4.9)$$

где ω - рабочая частота ЭМ сигнала, Δa_z - вертикальное смещение поверхности почвы, $v_3 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}$ - скорость ЭМ волны в почве, ε - диэлектрическая проницаемость почвы.

По данным экспериментальных исследований вертикальный сдвиг объекта примерно соответствует горизонтальному $\Delta a_x \approx \Delta a_z$.

С учетом глубины слоя скин-эффекта ЭМ волны в почве, при ожидаемом заглублении объекта $h \approx 0,3$ м рабочая длина ЭМ волны должна быть этого же порядка. Поэтому целесообразной рабочей частотой, разрешённой к применению для этих целей регламентом радиосвязи может быть $f_3 \approx 2,5$ ГГц.

Пусть $\Delta a_z = 10^{-6}$ м; $\varepsilon = 9$; тогда из (4.9) получаем:

$$\Delta \varphi = 2\pi f_3 \frac{\Delta a_z}{v_3} = 2\pi f_3 \frac{\Delta a_z \sqrt{\varepsilon}}{c} \approx 0,01 \text{ град}$$

Откуда следует что чувствительность приемника РЛС по амплитуде должна быть не менее чем:

$$\delta_E = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \varphi}{180^\circ} \approx 1 \cdot 10^{-4}$$

При требовании в отношении сигнал/шум порядка 10 Дб общая необходимая чувствительность приемника составит $\delta_E = 1 \cdot 10^{-5}$;

Поскольку, при минимальной фазовой манипуляции радиосигнала, ее индекс соответствует амплитудной модуляции, то в итоге требуемое отношение сигнал/шум по амплитуде должен быть не менее $q_E = \frac{1}{\delta_E} = 1 \cdot 10^5 = 50$ Дб.

Далее дадим оценку требуемой мощности сейсмического удара:

Пусть $\Delta a_z = 10^{-6}$ м; $R_a = 0,1$ м²; $r_a = 100$ м; $m = 10$ кг; $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ с. В этом случае: $P_a = 500$ Н. На фото (рисунок 4.22) показан экспериментальный сейсмический вибратор с силой удара 500 Н. Если длительность импульса повысить в два раза, то этот вибратор может дать силу удара в 1200 Н.

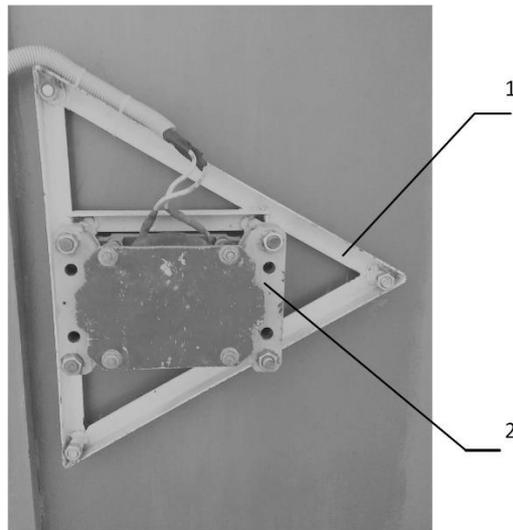


Рис. 4.22. Экспериментальный сейсмический вибратор с силой удара 500 Н
1- Электромагнитный вибратор, 2- рама крепления вибратора

Потенциальным резервом для увеличения смещения $\Delta a_{z,x}$, кроме как длительность полупериода удара τ_{II}^2 , является также в целом длительность виброимпульса τ_B .

При средней частоте механического резонанса $F_M \approx 20 \text{ Гц}$ [45] и длительности виброимпульсного воздействия $\tau_B \approx 200$ мс произведется 5 ударов вибратора. Это равносильно увеличению мощности удара в 5 раз. Это снижает потенциал по отношению сигнал/шум на величину в 20 Дб до $q_E = 80$ Дб.

Оценим требуемую напряжённость первичного ЭМ поля через собственный шум приёмника. Будем исходить из необходимой полосы частот приёмника ΔF_M , для всех возможных собственных частот механических колебаний объектов разного типа.

В этом случае мощность теплового шума на входе приёмника составит:

$$P_{ш} = \kappa T_K^0 \Delta F_M q_{ш} \quad (4.10)$$

Где: $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-23}$ - постоянная Больцмана, T_K^0 - температура входных цепей по Кельвину;

$q_{ш} = 50 \text{ Дб}$ - коэффициент шума; ΔF_M - полоса пропускания приемника.

Сигнал первичного поля приемника с учетом ослабления вторичного поля в 50 дБ.

$$P_{\text{ПР}} = P_{\text{Ш}} \cdot 10^5$$

В итоге имеем при $\Delta F_M = 1000$ Гц, $q_{\text{Ш}} = 50$ дБ

$$P_{\text{ПР}} = \kappa T_K^0 \Delta F_M q_{\text{Ш}} \cdot 10^5 = 4,14 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

Требуемую мощность передатчика $P_{\text{П}}$ РЛС получим через известное уравнение:

$$P_{\text{П}} = \frac{4\pi P_{\text{ПР}} R_1^2}{Q_{\text{П}} S_{\text{ПР}}} \quad (4.11)$$

Здесь $Q_{\text{П}} = 4\pi \frac{S_{\text{П}}}{\lambda^2} \eta$ - коэффициент направленного действия антенны передатчика;

$S_{\text{ПР}} \approx \frac{\lambda^2}{4}$ - эффективная площадь элемента приемной антенны поискового БР в виде рупора.

При длине волны соответствующей рабочей частоте РЛС 2,5 ГГц, $\lambda = 0,12$ м, эффективной площади передающей антенны РЛС $S_{\text{П}} = 0,1$ м², и КПД антенны $\eta = 0,5$, на максимальном расстоянии до объекта $r = 100$ м, требуемая мощность передатчика $P_{\text{П}}$ РЛС составит 3,3 Вт. Если принять $S_{\text{П}} = 0,4$ м², то соответственно импульсную мощность передатчика можно снизить в 4 раза.

Аппаратный комплекс, система и технология работы

Количество периферийных роботов-носителей может составить 5-6 на борт, с соответствующим числом операторов. Управление производится по видеоканалу с размещением видеокамер как на самом роботе-носителе, так и на машине оператора. Представляет интерес конструкция периферийных управляемых роботов-носителей оснащенных датчиками различного типа. Это могут быть высокопроходимые самодвижущиеся машины, массой 10-50 кг, для обработки открытых площадей. Поскольку масса полезного груза используемых сенсоров

небольшая 1-2 кг, возможна установка на БПЛА типа квадрокоптеров. Процесс сканирования местности обеспечивает оператор.

Принцип работы электромеханического вибратора показан на рисунке 4.26. Он содержит ударную плиту-1, ударник с электромеханическим приводом-2 и возбудитель вибратора -3, синхронизируемый от бортового синтезатора частот- 4.

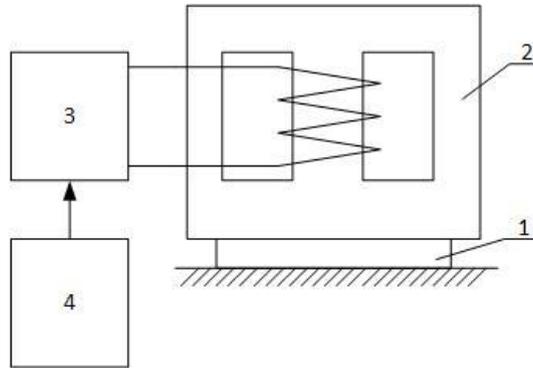


Рис. 4.23. Схема электромеханического вибратора

Конструктивно вибратор размещается в металлическом кожухе в виде саней, подвешенным на корме базовой машины и приводится в контакт с грунтом гидравлическим приводом.

Поисковый элемент, собственно двухканальный сенсор на подвеске робота-носителя, управляемого по видеоканалу оператором базовой машины. Предварительная обработка информации и перевод в цифровую форму производится в самих элементах миноискателей и передается оператору базовой машины по радиоканалу, либо проводной линии.

Технология работы заключается в том, что задачу по обследованию площади, с базовой машины решают - носители сенсоров подвижные БР. Базовая машина останавливается, начинает работать вибратор, а БР обследуют площадь на расстоянии 10-100 м вдоль трассы поиска с шириной полосы 10 м, охватываемой БР.

При обнаружении объекта поиска, БР отмечает место положение объекта. Таким образом реализуется задача безопасности проведения работ с увеличением производительности поиска.

Возможен вариант комплектования поискового элемента БР датчиками инфракрасного излучения со считыванием отражённого света фотодиодом. В этом случае на борту базовой машины не понадобится радиолокатор, поскольку считывание вибраций будет происходить непосредственно в выносном поисковом элементе (рисунок 4.27).

Поскольку освещение поверхности грунта будет производиться в инфракрасном диапазоне с длиной волны $\lambda = 3 \text{ мкм}$, то чувствительность одного поискового элемента будет существенно выше, чем при облучении радиоволнами. Полученная информация должна передаваться по радиоканалу на базовую машину.

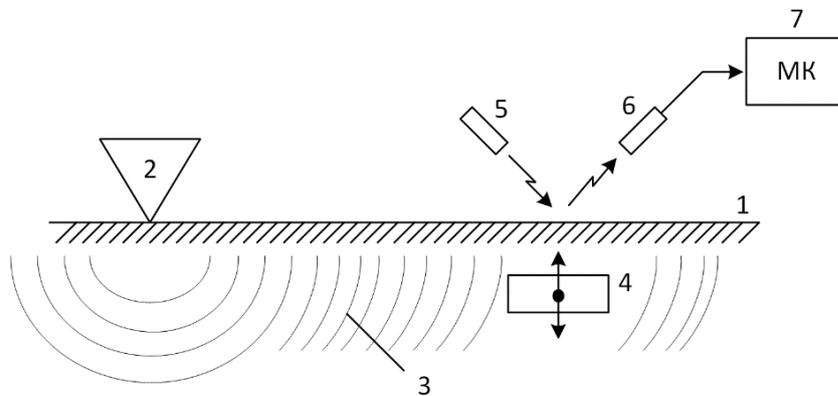


Рис. 4.27. Схема поискового фотопараметрического элемента

- 1- Поверхность грунта, 2- сейсмоисточник, 3- сейсмическая волна, 4- объект поиска, 5- ИК источник, 6- ИК приемник, 7- микроконтроллер

Описанный аппаратный комплекс может быть использован в первую очередь для гуманитарного разминирования больших площадей, а так же для проведения работ по поиску инженерных коммуникаций. Двухканальный принцип построения поискового элемента в сочетании радиоволнового искателя и параметрического, с привлечением дополнительного признака распознавания механического смещения корпуса под действием сейсмических ударов позволяет снижать число ложных тревог, увеличив вероятность верного обнаружения цели и тем самым ускорить процесс поиска.

Выводы

1. Разработаны экспериментальные стенды для проверки чувствительности метода: автодинные маломощные радиолокаторы (до 5 мВт) двух диапазонов частот – 2,5 и 10 ГГц; сейсмический излучатель с силой удара до 100 кг; акустический вибратор с амплитудой вибраций 50-3000 мкм.

2. Проведены лабораторные испытания чувствительности радиолокаторов на дистанции 9 м. При соотношении сигнал/шум в 3 Дб радиолокаторы определяют смещение отражателя вибратора не хуже 50 мкм.

3. Испытания на открытых площадках с использованием объекта исследования №1 показали, что однородная поверхность под действием вибрации давала спектральные линии на частотах 60-140 Гц в полосе частот 5,2-5,5 Гц, при нахождении объекта поиска на поверхности 4-4,4 Гц, а на глубине 5 см давала полосу частот от 3,5 до 4,5 Гц. При этом на более высоких частотах 100-140 Гц разнос по ширине спектра по сравнению с 60 Гц оказался более высоким.

Таким образом ширина спектра вибраций может быть использована для ее идентификации относительно поверхности грунта.

4. Экспериментальная проверка затухания сейсмического сигнала с расстоянием на песчаной почве показала соответствие с теоретической оценкой для релеевских волн по закону $\frac{1}{r}e^{-ar}$, где r -расстояние между точками удара и наблюдения.

5. Разработаны структурные схемы параметрических поисковых приборов двухрядного типа на дистанцию до 30 м и робототехнического комплекса с площадью поиска на одной точке стояния базовой машины 10х100 м².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны научно-технические основы параметрического метода поиска подповерхностных объектов на основе взаимодействия сейсмических волн релеевского типа и электромагнитных излучателей радиолокатора (РЛС) в диапазоне частот в пределах 1-10 ГГц.

2. Исследованы энергетические зависимости сейсмического и радиолокационного канала от расстояния. Даны оценки мощности сейсмических вибраторов и передатчиков РЛС.

3. Сравнение между электромагнитными ударными излучателями и параметрическим, на основе использования фазированной ультразвуковой решетки (США), показало существенное преимущество сейсмического вибратора, исследованного в диссертации.

4. Разработаны маломощные автодинные радиолокаторы диапазонов частот 2,5-10 ГГц, позволившие провести экспериментальную проверку чувствительности РЛС к вибрациям с амплитудой до 50 мкм.

5. Экспериментально выявлены различия между шириной спектра отражённого РЛС сигнала от одновременной вибрирующей поверхности земли и с заглубленном в нее объектом.

Заглубленный объект поиска отличается более узким спектром вибраций, что может использоваться для его идентификации.

6. Разработана структурная схема параметрического поискового комплекса в комбинации с радиоволновым искателем, а также представлен робототехнический комплекс для безопасной работы на больших площадях.

7. Оптимальным вариантом поискового комплекса является система с выносом приемной антенны на управляемый подвижный блок-робот (сенсор). В этом случае приемные антенны размещаются на этот блок в виде рамы с шириной захвата 1,5-2 м, а в целом в поисковый комплекс может входить 5-6 блоков-роботов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щербаков, Г. Н. Новые методы обнаружения скрытых объектов / Г. Н. Щербаков, М. А. Анцелевич. - М.: Эльф ИПР, 2011. -503 с.
2. Щербаков, Г.Н. Методы обнаружения мин – применительно к проблеме гуманитарного разминирования, криминалистики, строительства и борьбы с терроризмом / Г.Н. Щербаков. - М.: Связьиздат, 1960. -390 с.
3. Долуханов, М. П. Распространение радиоволн / М. П. Долуханов. - М.: Связьиздат, 1960. -390 с.
4. Финкельштейн, М. И. Радиолокация слоистых земных покровов / М. И. Финкельштейн, В. Л. Мендельсон. - М.: Сов. радио, 1977. -174 с.
5. Смит, Кинг. Г. Антенны в материальных средах. Пер. с англ./ Смит Г. Кинг. - М.: Мир, 1984. -824 с.
6. Черный, Ф. Б. распространение радиоволн / Ф. Б. Черный. - М.: Сов. радио, 1962. -471 с.
7. Лешанский, Ю. И. Экспериментальные параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн / Ю. И. Лешанский // Изв. ВУЗов СССР. Сер. «Радиофизика». -1971. –Вып. 4.
8. Адаменко, М. В. Металлоискатели / М. В. Адаменко -М.: ДМК-пресс, 2006. -128с.
9. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А. Ю. Гринева. -М.: Радиотехника, 2005. -416с.
10. Radar Upgrades Handheld Mine Detectors. - Jane's International Defense Review. February 1997.
11. World's Fastest Solid-State Digitizer. - Energy & Technology Review, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, UCRL-52000-94-4 (April 1994), pp. 1-6.
12. Micropower Impulse Radar. - Science & Technology Review, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, UCRL-52000-96-1/2 (January/February 1996), pp. 16-29.

13. Azevedo, S. G. et al. Statement of Capabilities: Micropower Impulse Radar (MIR) Technology Applied to Mine Detection and Imaging. - Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, UCRL-ID-120801, March 1995.
14. Mine Detection Enter New Era. - Defence, March 1987.
15. Арбузов, С. О. Магниточувствительные поисковые приборы/ С. О. Арбузов // Специальная техника. -2000. - №6.
16. Любимов, В. В. Диагностические магнитометры для проведения электромагнитного мониторинга в условиях города и современные методы и средства индивидуально-массовой визуализации его результатов. Обзор. Препринт / В. В. Любимов. –М.: ИЗМИРАНД, 1998. -20 с.
17. Щербаков, Г.Н. Обнаружение объектов в укрывающих средах. Для криминалистики, археологии, строительства и борьбы с терроризмом / Г. Н. Щербаков. -М.: Арбат-Информ, 1998.
18. Магниторазведка. Справочник геофизика / Под ред. В.Е.Никитского, Ю.С.Глабовского. -М.: Недра,1980.
19. Афанасьев, Ю.В. Феррозонды / Ю.В. Афанасьев. -Л.: Энергия, 1969.
20. Бараночников, М.Л. Микромагнитоэлектроника Т.1. / М.Л. Бараночников. -М.: ДМК Пресс, 2001.
21. Щербаков, Г. Н. Антенно-контактный метод обнаружения локальных объектов в укрывающих средах / Г. Н. Щербаков, М.А. Анцелевич, Д.Н. Удинцев, Ю.М. Меркушин, Д.В. Востриков // Специальная техника. -2005. -№2.
22. Петренко, Е.С. Некоторые особенности поиска взрывчатых веществ и взрывоопасных предметов с помощью собак, газоаналитических приборов и химических экспресс-тестов / Е. С. Петренко // Специальная техника. -2002. -№ 4.
23. Airborne Minefield Detection: Pilot Project. Final Report. - Contract No. REG/661-97/2. European Commission.
24. Carter, L.J., O'Sullivan. M.J., Hung, Y.J., Teng, J.C-C. Thermal Imaging for Landmine Detection. — In Proc. of Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines, MD'98. Edinburgh, UK, 12-16 October 1998, pp. 110-114.
25. Dmitrienkov, A.A., Ivashov, S.I., Sablin, V.N., Ufraykov, B.A. Passive-Active

MM Wave Radiometer for Detection of Mines installed on the Ground Surface. - In Proc. of 5th International Conference on Radar Systems. Oral Session 1.7, May 17-21, 1999, Brest, France.

26. Passive MMV Radiometers Detect Hidden Mines. - Jane's International Defense Review. March 1997.

27. Daniels, D.J. A Low Cost, Hand-Held, Microwave Radiometer for Surface Laid Mines. - In Proc. of Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines, MD'98. Edinburgh, UK, 12-16 October 1998, pp. 222-226.

28. Гречишкин, В. С. Ядерные квадрупольные взаимодействия в твердых телах / В. С. Гречишкин. -М.: Наука, 1973.

29. Minebuster: cracking the mine-detection riddle with sub-nuclear particles. - Jane's International Defense Review, April 1998, pp. 70,71.

30. Luis W.Alvarez. Nitrogen detection. Patent USA, №4756866. July 12 1988 / Oct. 9, 1985.

31. Способ и устройство для обнаружения и идентификации скрытых взрывчатых веществ и наркотических средств пат. 2226686 Рос. Федерация: Раевский В.Г., Карев А.И., Коняев Ю.А. Заявл. 10.04.2004; опубл. 14.08.2002, Бюл. №10.

32. Karev A.I., Raevsky V.G., Konyaev J.A. et al. // Proceeding of NATO Advanced Research Workshop #977941 «Detection of Explosives and Land Mines: Methods and Field Experience», St.-Petersburg, 11th-14th of September 2001, Russia, NATO-Series book, Kluwer Academic Publisher, Netherlands.

33. Марков, В. А. Методика очистки местности от взрывоопасных предметов / В. А. Марков, И. В. Марков, Б. В. Прибылов // «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам» Труды Второй Международной научно-практической конференции. СПб.: 2006. -51 с.

34. Charles L. Optiz. Man-portable and helicopter-borne METRRA systems. «Microwaves», august, 1976.

35. Щербаков, Г.Н. Выбор электромагнитного метода зондирования для поиска объектов в толще укрывающих сред / Г.Н. Щербаков, М. А. Анцелевич, Д. Н. Удинцев // Специальная техника. - 2005. -№1.

36. Способ поиска объектов искусственного происхождения в земле и устройство для его осуществления: пат. 2390801 Рос. Федерация / Шайдуров Г.Я.; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. - №2008149679/28; заявл. 16.12.2008; опубл. 27.05.2010, Бюл. №15.

37. Щербаков, Г. Н. Параметрическая локация - новый метод обнаружения скрытых объектов / Г. Н. Щербаков // Специальная техника. 2000. -№4.

38. Щербаков, Г. Н. Применение нелинейно-параметрических методов распознавания скрытых объектов при решении антитеррористических задач/ Г. Н. Щербаков, М. А. Анцелевич, Д. Н. Удинцев, А. В. Удавихин, В. С. Волошко // Специальная техника. 2005. -№6.

39. Справочник по радиолокации / Редактор М. Сколник. -М.: «Советское радио», 1978.

40. Теоретические основы радиолокации / Под редакцией Дулевича В.Е. -М.: «Советское радио», 1978.

41. Бонд, К. Д. и др. Взаимная модуляция при туннельном прохождении электронов через пленки алюминий - окисел алюминия / К.Д. Бонд // ТИИЭР. -1979. -№12.

42. Князев, А. Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / А. Д. Князев. -М.: «Радио и связь», 1984.

43. Малашин, М. С. и др. Основы проектирования лазерных локационных систем / М. С. Малашин. -М.: «Высшая школа», 1983.

44. Глудкин, О. П. Технология испытания микроэлементов радиоэлектронной аппаратуры и интегральных микросхем / О. П. Глудкин, В. Н. Черняев. -М.: «Энергия», 1980.

45. Мырова, Л. О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям / Л. О. Мырова, А. З. Чепиженко. М.: «Радио и связь», 1984.

46. Пат. US 7,173,560 B2 Date of Patent: Feb. 6, 2007

47. US Army studies complementary mine sensing. - Jane's International Defense Review, June 2002.

48. DSTO trials rapid mine clearing system. - Jane's International Defense Review, January 2003.

49. Australia integrates landmine detectors. - Jane's International Defense Review, March 2003.

50. Детков, В. А. Импульсно-фазовый метод обработки сейсмических сигналов. Часть 1. Постановка задачи / В. А. Детков, М. А. Копылов, Г. Я. Шайдуров, Р. Г. Шайдуров // Приборы и системы разведочной геофизики. -2015. - №1(51). –С. 68-71.

51. Детков, В. А. Импульсно-фазовый метод обработки сейсмических сигналов. Часть 2. Оценки разрешающей способности по дальности различных методов фазовых измерений / В. А. Детков, М. А. Копылов, Г. Я. Шайдуров, Р. Г. Шайдуров // Приборы и системы разведочной геофизики. -2015. -№3 (53). –С. 72-77.

52. Шайдуров, Р. Г. Первые результаты наблюдения сейсмоэлектрических эффектов и потенциалов вызванной поляризации на газоконденсатном месторождении в естественных шумовых полях Земли/ Р. Г. Шайдуров, Г. Я. Шайдуров, В. С. Потылицын, Д. С. Кудинов, Е. А. Кохонькова // Приборы и системы разведочной геофизики. -2016. -№1. –С. 81-88.

53. Шайдуров, Р. Г. О наблюдении сейсмоэлектрического эффекта на газоконденсатном месторождении в естественных электромагнитных сейсмических шумах Земли в диапазоне 0,1-20.0 Гц / Р. Г. Шайдуров, Г. Я. Шайдуров, В. С. Потылицын, Д. С. Кудинов // Геология и геофизика. -2018. -т. 59 №5. –С 703-708.

54. Бондарев, В. И. Сейсморазведка / В. И. Бондарев. -Екатеринбург: Изд-во УГГА, 2007. 690 с.
55. Викторов, А. И. Поверхностные волны в твердых телах / А. И. Викторов. –М.: Наука, Москва, 1981. -288 с.
56. Шайдуров Г. Я., Кудинов Д. С. Дистанционный метод поиска минно-взрывных заграждений и мин в любых корпусах на основе взаимодействия электромагнитных и акустических волн. *Специальная техника*, 2011, 4, 39-43 с.
57. Кудинов, Д. С. Радиолокационный параметрический метод поиска мин и минных полей в движении / Д. С. Кудинов, Р. Г. Шайдуров // *Успехи современной радиоэлектроники*. –2015. -№10. –С. 134-139.
58. Кудинов, Д. С. О возможности реализации экспериментального комплекса поиска мин и минных полей на основе радиолокационного параметрического метода / Д. С. Кудинов, Р. Г. Шайдуров // *Сборник материалов ВНК Военной академии ВКО. «Состояние и перспективы развития системы противовоздушной обороны государств-участников СНГ»*, Т.1. секция 7.2. -ВА ВКО. –Тверь: 2016. –С. 159-167.33.
59. Будугаева, В. А. Оптимизация декремента затухания свободных колебаний вязкоупругой слоистой сферы при ограничении на массу / В. А. Будугаева // *Прикладная механика и техническая физика*. -2000. -т. 41. -№2.
60. Общая нелинейная теория упругих оболочек/С. А. Кабриц [и др.].-СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2002.-388 с.
61. Donskoy, D. M. Resonance and nonlinear seismo-acoustic land mine detection. -Humanitarian demining. Book edited by: Maki K. Habib, pp.392, February 2008, I-tech education and publishing, Viena, Austria.
- Шайдуров, Г. Я. Радиолокационный метод обнаружения миноподобных объектов с использованием сейсмических ударов // Г. Я. Шайдуров, Д.С. Кудинов и др. // *Специальная техника*. – 2013. -№6. – С.15-19.
63. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. -М.: Изд. иностранной литературы, 1957. -726 с.

64. Детков, В. А. Импульсные электромагнитные сейсмоисточники «Енисей». Обзор моделей и опыт практического применения/ В. А. Детков // Приборы и системы разведочной геофизики. 2007. -№4. -С. 5-10.

65. Robert W. Haupt and Kenneth D. Rolt, «Standoff Acoustic Laser Technique to Locate Buried Land Mines» / Lincoln laboratory journal.-2005.- N.1.- Vol. 15.- P. 3-23.

66. Кудинов, Д. С. Возможность реализации радиолокационного параметрического канала передачи информации с подводных аппаратов/ Д. С. Кудинов, Р. Г. Шайдуров // Успехи современной радиоэлектроники. –2015. -№10. -С. 130-134.

67. Детков В. А. Повышение эффективности управления импульсными невзрывными источниками «Енисей» при сейсморазведочных работах. Диссертационная работа. Красноярск, 2009.

68. Радиотехнические системы. Под редакцией Казаринова Ю. М. Изд. «Советское радио», 1968, стр. 496.

69. Шайдуров Р. Г. Параметрическая роботизированная система поиска мин на основе взаимодействия электромагнитных и акустических волн / Р. Г. Шайдуров // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. -2018. -№11(7). -С. 755-763.

70. Устройство для поиска мин и минных полей на основе радиолокационного параметрического метода: пат. 2681271 Рос. Федерация: МПК G01V 11/00/ Шайдуров Р. Г.; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. -№2018118275; заявл. 17.05.2018; опубл. 05.03.2019, Бюл. №7.