Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Военно - инженерный институт
Базовая кафедра «Специальные радиотехнические системы»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ И.Н.Сушкин_____
подпись
«____» _____ 20__ г.

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»
(Радиолокационные системы и комплексы)

Тема: «Радиолокационный параметрический метод обнаружения подповерхностных объектов, типа мин»

Пояснительная записка

Научный руководитель _____ _____ Г.Я.Шайдуров
подпись, дата должность, ученая степень

Выпускник _____ А.Ш.Сат
подпись, дата

Рецензент _____ _____ О.А.Тронин
подпись, дата должность, ученая степень

Консультант по разделу:
Безопасность и экологичность _____ А.К.Дашкова
подпись, дата

Нормоконтролер _____ А.П. Романов
подпись, дата

Красноярск 2021

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Военно- инженерный институт
Базовая кафедра «Специальные радиотехнические системы»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____И. Н. Сушкин
«____»_____ 2021 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме дипломного проекта

Студенту Сат Азияна Шолбановна

фамилия, имя, отчество

Группа ВЦ15-01 РТВ Направление (специальность) 11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы

Тема выпускной квалификационной работы: Радиолокационная параметрическая система поиска подповерхностных объектов типа мина.

Утверждена приказом по университету № 15443/с от 06 октября 2020 г.

Руководитель ВКР Г.Я.Шайдуров, профессор, доктор технических наук, ВУЦ СФУ.

Исходные данные для ВКР: Обоснование сейсмических волн Релея для возбуждения объекта поиска с регистрацией отклика узкополосной РЛС автодинного типа; Использовать РЛС в СВЧ диапазоне 10-30 ГГц, обеспечивающее получение доплеровского фазового сдвига колебаний поверхности грунта; Использовать тангенс угла потерь в грунте, снизить вероятность ложных тревог.

Перечень разделов ВКР: Аналитически й обзор о состоянии техники поиска подповерхностных объектов; Теоретические основы параметрического метода поиска; Энергетические расчеты акустического и радиолокационного канала; Экспериментальные результаты и проблемы создания аппаратного комплекса.

Перечень графического материала: Способ реализации радиолокационного параметрического способа обнаружения подповерхностных объектов. Структурная схема реализации параметрического радиолокационного метода. Схема эксперимента с использованием радара. Структурная схема экспериментальной установки. Схема реализации параметрического метода с вынесенным приемником. Временная диаграмма излучения и приёма.

Руководитель ВКР _____ Г. Я. Шайдуров

подпись

Задание принял к исполнению _____ А. Ш. Сат

подпись

«___»_____20__г

РЕФЕРАТ

Дипломный проект по теме «Радиолокационная параметрическая система поиска подповерхностных объектов типа мина» содержит страницы текстового документа, иллюстраций, таблиц, формулы, использованных источников.

В соответствии с техническим заданием разработано радиолокационный параметрический метод обнаружения подповерхностных объектов, типа мин.

Проблема дистанционного обнаружения различных предметов искусственного происхождения в задачах поиска археологических ценностей, инженерных коммуникаций, миноподобных объектов в целях гуманитарного разминирования, несмотря на современное развитие техники и технологий, остается до сих пор актуальной.

В данном дипломном проекте применены методы линейного и спектрального анализа, теории радиолокации и сейсморазведки, дана оценка экспериментальных и теоретических результатов работы.

Цель исследования теоретическое и экспериментальное обоснование параметрического радиолокационного метода и возможная реализация поискового комплекса.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

1. Разработка физических основ поиска искусственных объектов на основе параметрического метода радиолокации с применением в качестве модулирующего сигнала поверхностных сейсмических волн Релея;
2. Оценка энергетических параметров поисковых установок;
3. Разработка структуры аппаратных средств. Разработать структурную схему реализации параметрического радиолокационного метода.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....6
1 Аналитический обзор о состоянии техники поиска подповерхностных объектов.....8
1.1 Основные признаки объектов поиска.....8
1.2 Характеристики укрывающих сред.....9
1.3 Классификация методов.....16
2 Теоретические основы параметрического метода поиска.....26
2.1 Поверхностные волны Релея.....26
2.2 Поверхностные волны Лява.....32
2.3 Физические основы параметрического метода.....35
3. Энергетический расчет акустического и радиолокационного канала.....41
3.1. Энергетические оценки акустического канала.....41
3.2 Энергетические оценки радиолокационного канала для подповерхностного зондирования.....46
4. Экспериментальные результаты и проблемы создания аппаратного комплекса.....57
4.1. Результаты экспериментальных работ первой очереди.....57
4.2 Опытные работы по проверке чувствительности радиолокационного метода 62
4.3 Проблема создания аппаратного комплекса.....66
5. БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ.....76
5.1 Анализ негативных воздействий опасных и вредных факторов, влияющих на обслуживающий персонал во время эксплуатации.....76
5.2 Влияние электромагнитного излучения.....76
5.3 Нормативные требования электромагнитного излучения радиочастотного диапазона.....77
5.4 Расчет интенсивности электромагнитного излучения радиочастотного диапазона.....79
5.5 Мероприятия по защите от ЭМП.....79
5.6 Противопожарная безопасность.....81
Заключение.....82
Список использованных источников.....83

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 металодетекторов (индукционного типа). Во многих случаях металодетекторы 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.

Цель и задачи дипломного проектирования: Теоретическое и экспериментальное обоснование радиолокационного параметрического метода и возможная реализация поискового комплекса.

Защищаемые положения в дипломном проекте: 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; В качестве источника сейсмических волн Релея предлагается использовать импульсный излучатель, работающий на электромагнитном принципе с периодическим повторением ударов; 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.

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).

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.).

Таблица 1.1

Характеристики основных укрывающих сред

Укрывающая среда	Электромагнитные характеристики			Плотность г/см^3
	ε	μ	σ_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

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 1.1.

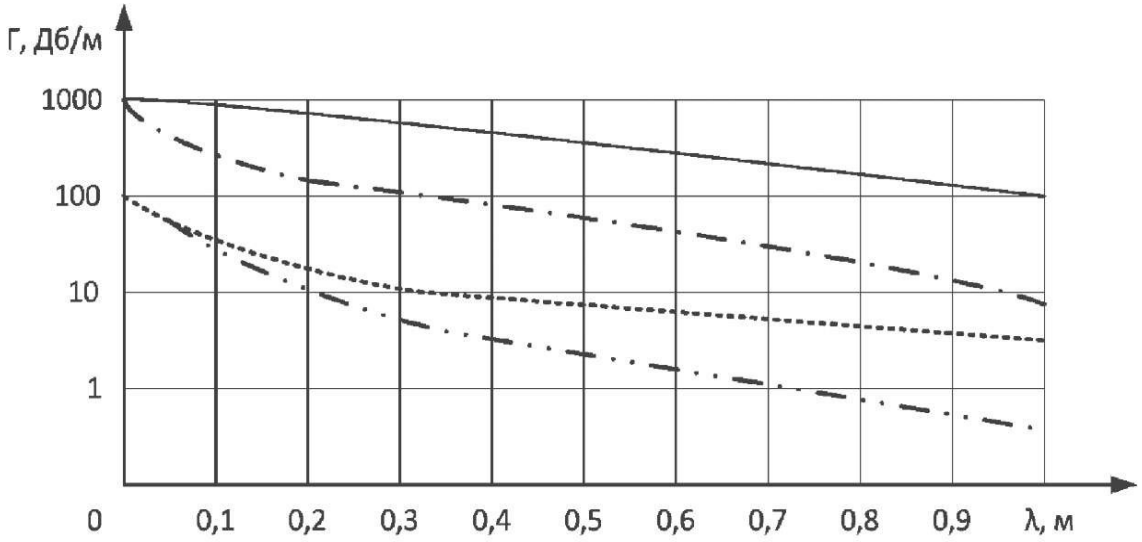


Рисунок 1.1. Зависимость удельного поглощения электромагнитной энергии вмещающей средой от длины волны λ [1, 2-6]

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]:

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

$$tg\delta = \varepsilon''/\varepsilon' = \square_n/\varpi\varepsilon_{отн}\varepsilon', \quad (1.2)$$

где λ - длина волны, м;

$\square_n$ - удельная электрическая проницаемость,

См/м;

- циклическая частота рад/с;

tg - 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 $f10^{10}$Гц обусловлен возрастанием потерь в воде вблизи частоты собственных колебаний ее молекул [4].

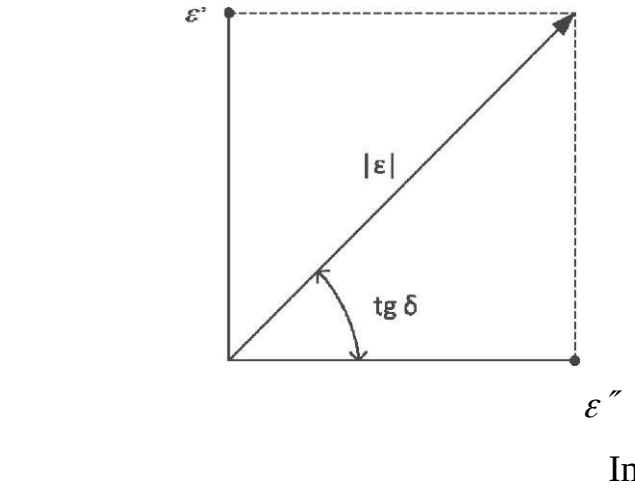


Рисунок 1.2. Графическая интерпретация электрической составляющей материальной характеристики укрывающей среды

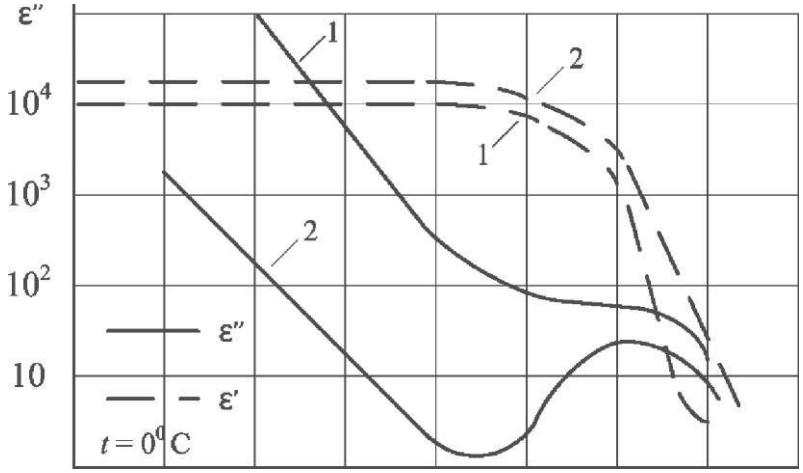


Рисунок 1.3. Частотные зависимости ε′ и ε″ для морской (1) и пресной (2) воды [4,5]

На рисунке 1.4 приведены зависимости ε' и $tg\delta$ пресного льда от частоты и температуры. При $f10^{10}$Гц скорость изменения диэлектрической проницаемости остается величиной постоянной ($\varepsilon' \approx 3,2$) 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 и ε' и $tg\delta$ для снега приведены в таблице 1.2 [3-6].

Как видно из таблицы, при $f>10^6$ Гц для свежевыпавшего 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.

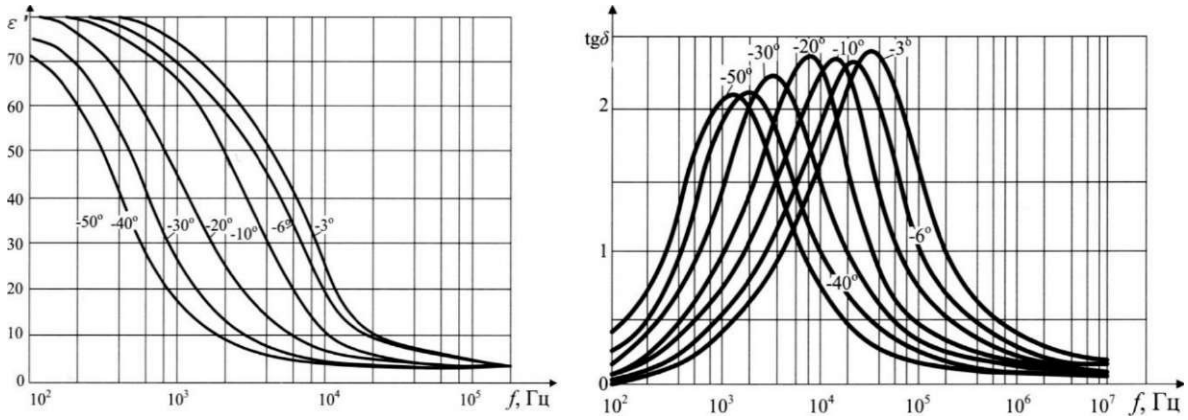


Рисунок 1.4. Частотные зависимости ε' и $tg\delta$ для пресного льда при различной температуре, полученные экспериментально [4]

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

Таблица 1.2

Характеристики снега [4]

Характер снега	f, Гц	ε	tgδ	Γ, дБ/м
Свежевыпавший снег				
t=-20^0 С	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 С	$3*10^9$	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° С	$3*10^5$	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	$7,9*10^{-5}$

Географические границы зоны сезонно мерзлых и много лет не мерзлых 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.

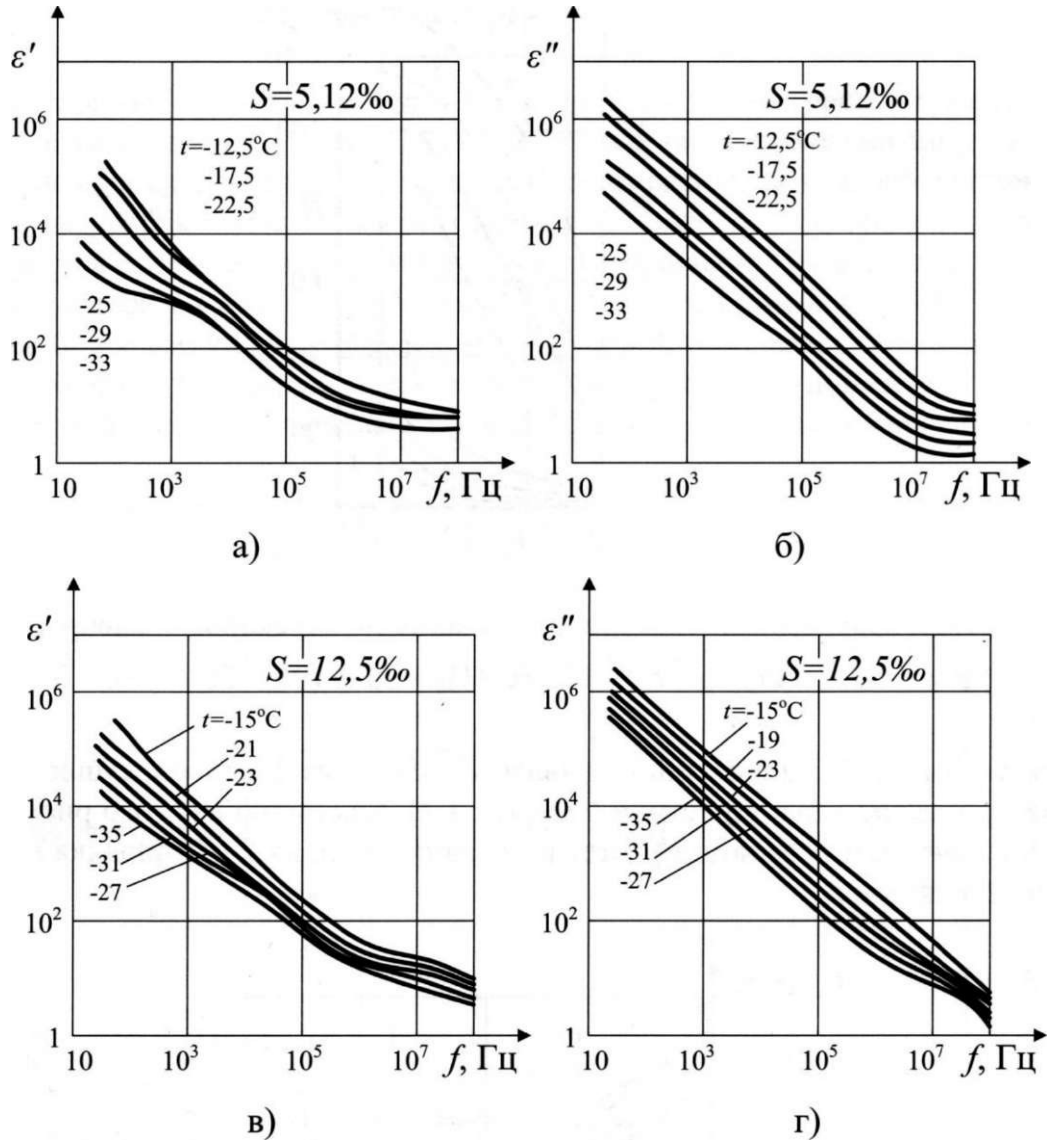


Рисунок 1.5. Электрические характеристики мерзлых почв при различных уровнях солености [2, 4]

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.

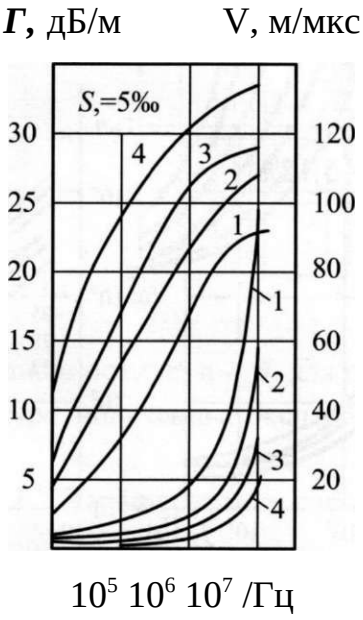


Рисунок 1.6. Частотные зависимости удельного затухания (сплошная кривая) и скорости распространения радиоволн (пунктирная) в морском льду

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.

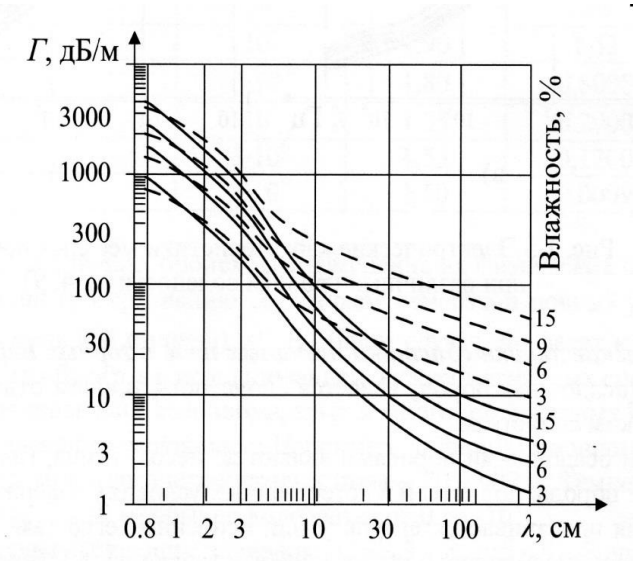


Рисунок 1.7. Зависимости удельного затухания песчаного (-) и глинистого (--) грунтов от длины волны радиосигнала для различной влажности [4, 7]

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

Изм. Лист № докум Подпись Дата
ДП – 11.05.01 - 301511347
18

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.

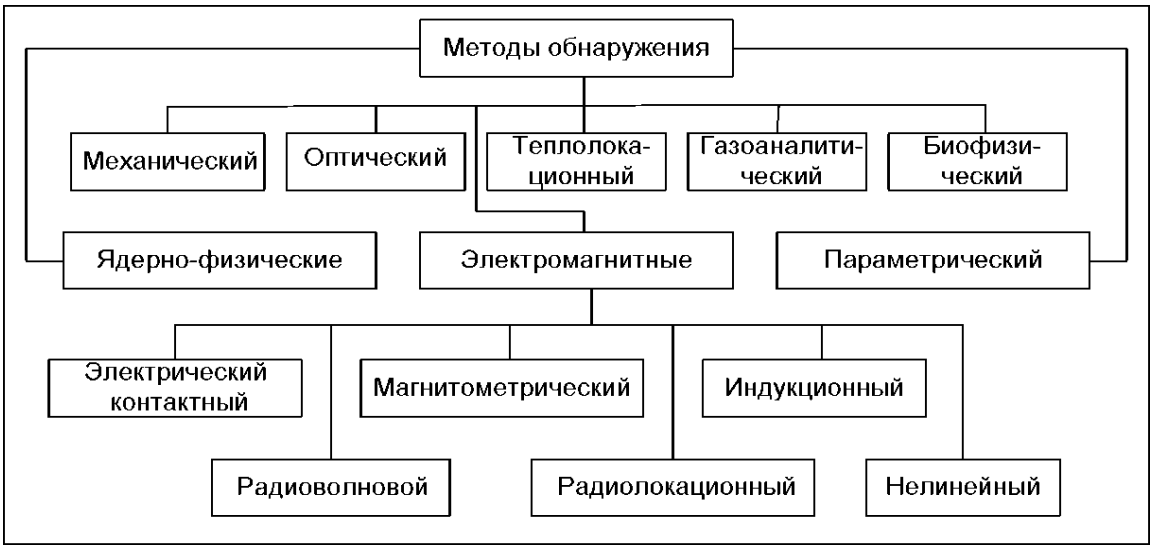


Рисунок 1.8. Основные методы поиска объектов в укрывающих средах [1]

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 метала.

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 Nordwest Laboratories (PNL) Министерства энергетики США. Система поиск 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 дипломном проекте параметрический метод основанный на возбуждении механических колебаний корпусов объектов поиска сейсмическими волнами Релея [36]. В этом случае РЛС является средством считывания информации.

. 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 производится 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 завесить, 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].

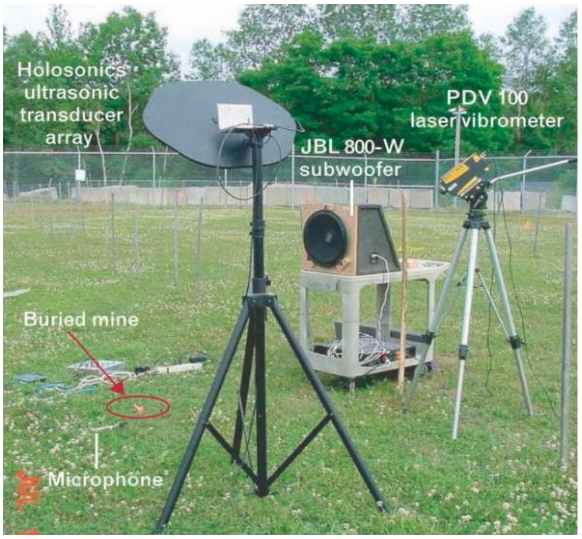


Рис. 1.10. Схема эксперимента, лаборатория Линкольна (США)

Метод основан на использование ультразвуковых волн, излучаемых фазированной антенной решеткой (ФАР) для «подсветки» объектов поиска и считыванием колебаний поверхности с помощью лазерного виброметра. 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 виброметром. Заявленные возможные дальности обнаружения мин могут составить до 30 м, что соответствует требованиям по безопасному проведению работ. Возможный концепт поискового комплекса приведен на рисунке 1.11.

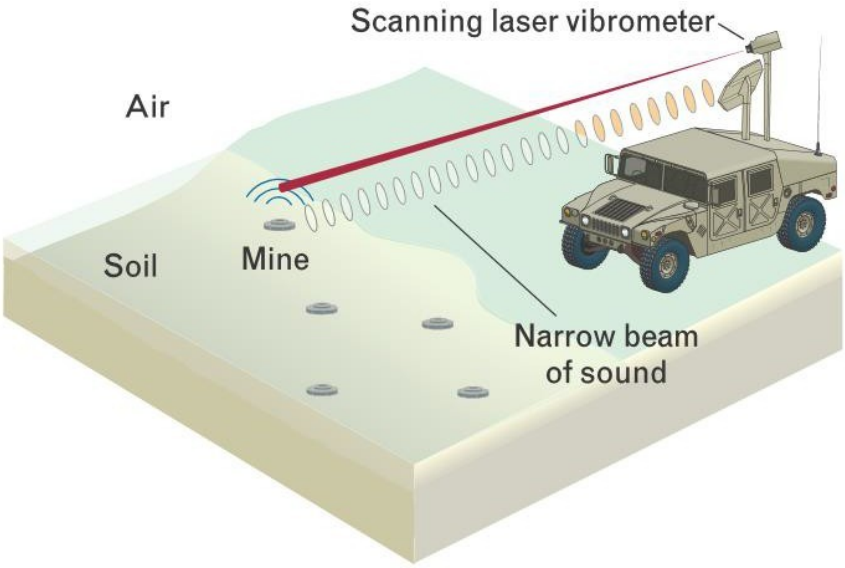


Рис. 1.11. Возможный концепт поискового комплекса. Лаборатория Линкольна (США)

Комбинированные системы обнаружения

Поскольку безопасность проведения работ накладывают требования на дистанционность обнаружения объектов, то одним из возможных способов размещения радиолокационных датчиков, могут является 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 Jaycor [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 Jayror. 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 1.12) 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. 1.12. 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 (Hiper-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. 1.13. Концепт мобильного поискового комплекса с использованием георадара, инфракрасного спектрометра и нелинейного радара (Израиль)

2 Теоретические основы параметрического 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*.

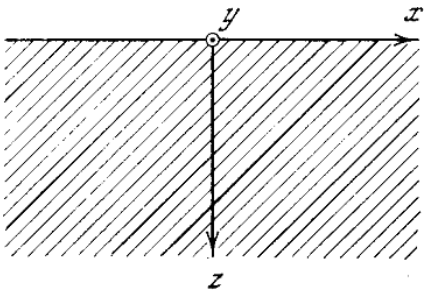


Рис. 2.1. Твердое полупространство

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

$$P\,\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2} = \mu\Delta\bar{U} + (\lambda+\mu)\,grad\,div\,\bar{U} \qquad (2.1)$$

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:

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

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

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

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

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

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

здесь опущен множитель

exp[-iw t-x/V_R*],*

где V_R- скорость волны Релея;

y- отношение скоростей поперечной и продольной волн в среде с параметрами

$$\lambda, \mu, \rho \ \left(V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}};\ V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}\right);$$

A_0- произвольная константа;

q- корень уравнения:

$$q^6 - 8q^4 + \left(24 - 16y^2\right)q^2 - 16\left(1 - y^2\right) = 0 \qquad (2.6)$$

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	0,33	0,500
$q=V_R/V_S$	0,9554	0,9194	0,8741

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

$$q = \frac{11}{8\,(34 - \ \ ^2)}. \qquad (2.7)$$

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

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

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

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:

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

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.

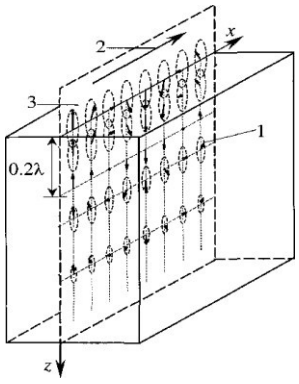


Рис.2.2. Схематическое изображение траекторий движения частиц грунта по эллиптическим орбитам на разных глубинах при прохождении в среде волны Релея: 1- графики изменения амплитуды смещения частиц; 2 – направление распространения волны Релея; 3 – вектор смещения частиц

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:

$$h_{эф}=0.6(1+\sigma)\lambda_R, \qquad (2.10)$$

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 λ_R [55].

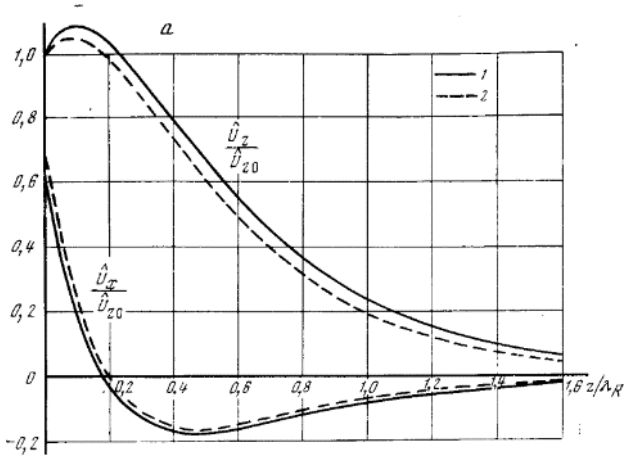


Рис. 2.3. Зависимости амплитуд смещений U_x, U_z в релеевской волне от относительной глубины z/λ_R

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÷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 σ<0,1) или сменяется максимумом (при σ>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 λ_R – 2λ_R, т.е. релеевская волна является типично поверхностной.

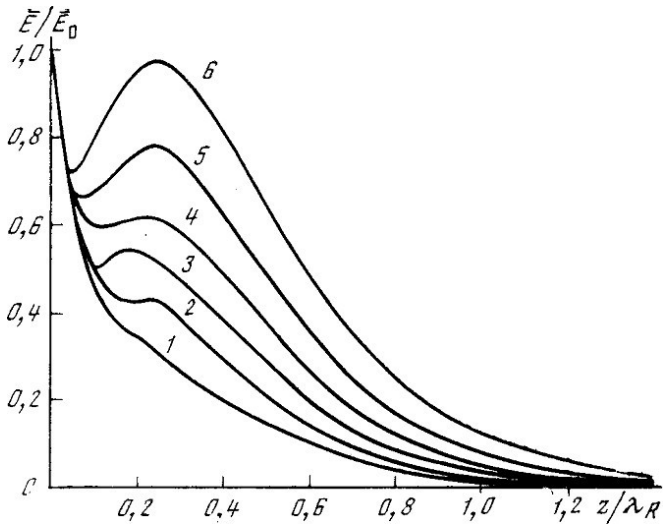


Рис. 2.4. Зависимости средней по времени плотности энергии в релеевской волне от относительной глубины

1–σ=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.

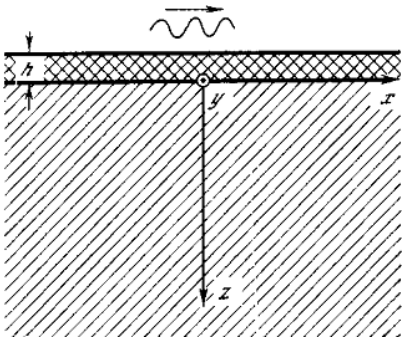


Рис. 2.5 Твердое полупространство со слоем

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

$$U_1(x, z, t) = A(z)\exp(i\omega(t - x / V_L)) \qquad (2.11)$$

В полупространстве:

$$U_2(x, z, t) = B(z)\exp(i\omega(t - x / V_L)), \qquad (2.12)$$

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

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

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{1}{V_s^2}\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \qquad (2.13)$$

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

$$V_{s1}<V_L<V_{s2} \qquad (2.14)$$

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 (2.14) компоненты смещения могут быть представлены в виде:

$$U_1^{(k)} = B_{01}\left(\frac{\cos mz}{\exp(\cos mh)} - nh\right)\exp\left[i\left(tx/V_L k\right)\right]; \qquad (2.15)$$

$$U^{(k)}(x, z, t) = B_{01}\exp(-nz)\exp\left[i\left(tx/V_L k\right)\right]. \qquad (2.16)$$

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

$$m = \sqrt{\frac{V_{S1}^2}{V_2^2} - (V_L K)^2}; \quad n = \sqrt{(V_L K)^2 - V_{S2}^2}.$$

k является решением уравнения:

$$\frac{h\omega}{V_s^1}\left(\frac{q^2-1}{q}\right)k = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg}\left(\frac{q^2-1}{q^2}\right), \qquad (2.17)$$

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 *к* - номера корня уравнения (2.17). 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 (2.17) следует, что при неограниченном увеличении частот $(\omega \to \infty)$ фазовая скорость любой гармоники волн Лява асимптотически приближается к скорости распространения поперечных волн в слое. Наоборот, при неограниченном уменьшении частоты $(\omega \to 0)$ фазовые скорости всех гармоник приближаются к значению скорости распространения поперечных волн в полупространстве рисунок 2.6.

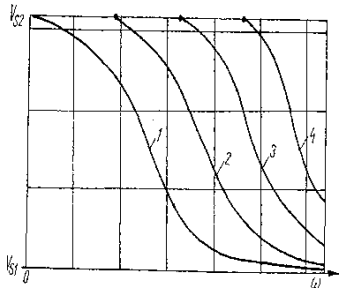


Рис. 2.6 Схематическое изображение зависимости фазовой скорости гармоник волн Лява от частоты в двухслойной среде:
1 – для основной моды; 2, 3, 4 – высших гармоник.

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

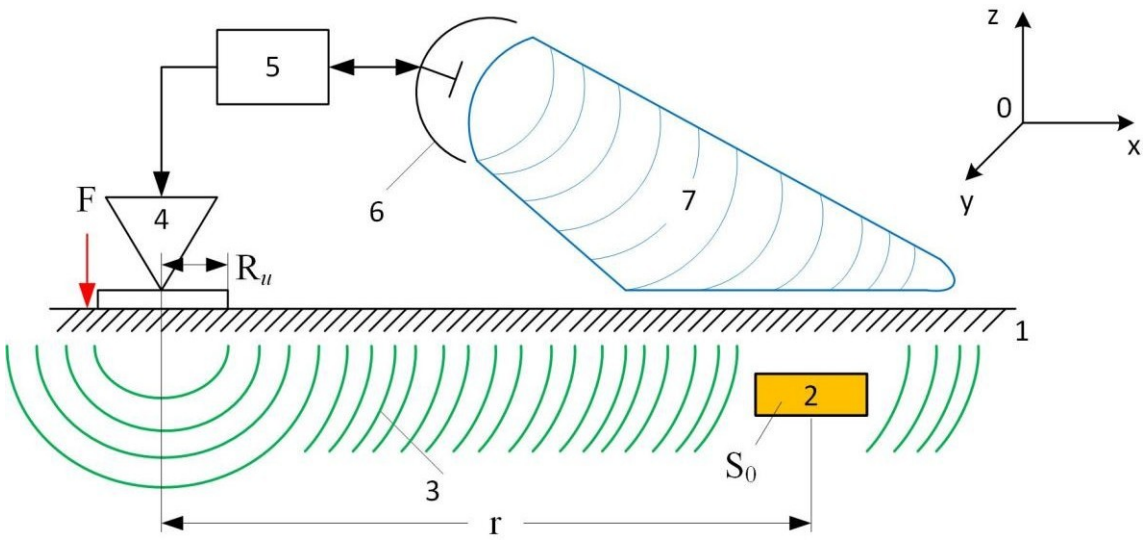


Рис. 2.7. Способ реализации радиолокационного параметрического способа обнаружения подповерхностных объектов.

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.

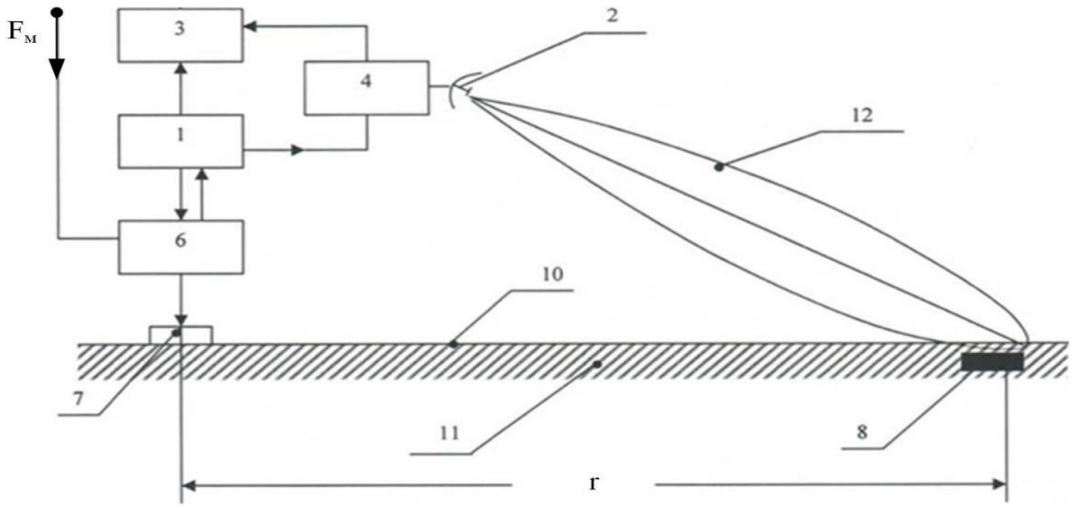


Рис. 2.8 - Структурная схема реализации параметрического радиолокационного метода.

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^{r}, 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 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:

$$P = I_1 \frac{R_u}{r} S_0 e^{\alpha_r r} \qquad (2.21)$$

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:

$$\Delta\alpha_{x,z} = \int_0^{\tau}\int_0^{t_1} \frac{PQ_0}{m} dt_1 d\tau \qquad (2.22)$$

где τ - время действия силы акустического давления.

При единичном ударе на интервале $[0,\tau]$ величина $P=const$, из выражений (2.21) и (2.22) получаем:

$$\Delta\alpha_{x,z} = \frac{F}{\pi R_u^2}\frac{R_u}{r} S_o \frac{Q_o}{m}\tau^2. \qquad (2.23)$$

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

$$U(t) = U_m \sum_{i=1}^{n} \sin\left(\omega_i t + \frac{2\pi\Delta\alpha_{x,z}}{\lambda_i} sin\Omega t\right) \qquad (2.24)$$

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:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta\alpha_{x,z}}{\lambda_i} sin\Omega t. \qquad (2.25)$$

С помощью фазового детектирования отраженного от объекта радиолокационного сигнала, выделяя коэффициент фазовой модуляции $\Delta\varphi$, получим величину смещения $\Delta\alpha_{x,z}$, которая прямо пропорционально отношению $\Delta\alpha_{x,z} = S_o \frac{Q_o}{m}$

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 (2.23) и (2.25). Пусть сила удара равна 10 т, что соответствует, его эквивалентной силе $F = 10^4 \frac{кг \cdot м}{} = 10^5 Н$.

Прочие параметры: f= 2,5 ГГц; λ_1=0,3 м; r =10 м; $R_и$=0,1 м; $S = 2 \cdot 10^{-2} м^2$; m=0,3 кг; Q= 1; $\tau = 10^{-3} c$.

Подстановка этих значений в (2.23) дает: $\Delta a_{X,Z}$=80мкм; $\Delta\varphi = 0{,}95^\circ$.

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°.

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.

3. Энергетический расчет акустического и радиолокационного канала

3.1. 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 $a = a_0 + a$, где a_0 - ускорение в момент t=0, a_m - ускорение в момент времени $t = \tau$ равный длительности сейсмического импульса.

Если предположить, что ускорение изменяется от a_0 до a_m линейно и в момент $t = \tau\ a_\tau = 0$, то среднее значение ускорения $a=a_2$

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

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

m - присоединённая масса грунта, m - масса плиты

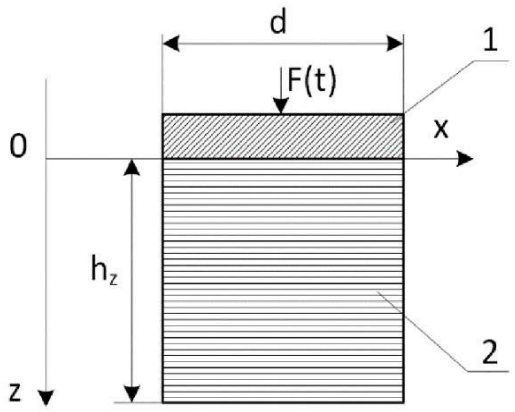


Рис. 2.9 - Расчетная модель генерации сейсмического сигнала. 1 - плита источника; 2 - присоединённый грунт; *F(t)* – ударное воздействие; d – диаметр опорной плиты

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

$$h_Z = (2 \div 2{,}5)d, \qquad (2.27)$$

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

Амплитуда смещения под действием силы F

$$\Delta a_z = \frac{a_0}{2}\int_0^{\tau} dt \int_0^{\tau} dt = \frac{a_0 \tau^2}{2} = \frac{F \tau^2 S_0}{m} \qquad (2.28)$$

Смещение грунта около источника A_0 связано со смещением плиты

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

где *к* – коэффициент, зависящий от свойств грунта (плотности, модулей упругости). Значение *к* можно оценить экспериментально.

Согласно (2.4), амплитуда смещения грунта прямо пропорциональна квадрату длительности импульса сейсмического воздействия τ, что указывает на возможность существенного улучшения чувствительности метод 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 присоединенного грунта H будет равна 2R_m, а его масса:

$$m_{2z} = \pi R_M^2 h_z p \qquad (2.29)$$

Здесь p- плотность грунта

Для боковой повреxности:

$$m_{2z} = \pi R_M^2 h_z p \qquad (2.30)$$

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]:

$$A_y = A_m[\exp\left(-\frac{w k_1}{V_s}\right)\left(\left(\frac{V_2}{V_s}\right)-2\right)+2\exp\left(-\frac{w k_1 z}{V_R}\right)]\cdot\exp\left(-iw\left(t-\frac{x}{V_R}\right)\right)$$

где:

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

V- коэффициент Пуассона;

$$k_1 = \sqrt{1}-\left(\frac{V_R}{V_p}\right);\ k_2 = \sqrt{1-\left(\frac{V_R}{V_s}\right)}$$

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{\sqrt{1-2V}}{\sqrt{2(1-V)}}$$

V_p - скорость продольной волны в среде

V_S- скорость поперечной волны,

V_R- скорость волны Релея:

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

A_m- коэффициент, зависящей 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]:

$$(k_R x)^{-\frac{1}{2}} e^{-\alpha}, \qquad (2.30)$$

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.

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

$$A = \frac{12I}{\omega\rho\sqrt{V}}, \qquad (2.31)$$

ρ - плотность среды,

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

Давление упругой волны имеет две составляющих:

$$P_x = A_x \rho \cdot V_R \cdot \omega, \quad P_z = A_z \rho V_R \cdot \omega \qquad (2.32)$$

и Скорость смещения частиц:

$$U_x = A_x \cdot \omega, \qquad U_z = A_z \cdot \omega$$

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:

$$P_{xo} = P_x(1+\gamma); \quad P_{zo} = P_z(1+\gamma); \qquad (2.34)$$

$$A_{xo} = A_x(1+\gamma), \quad A_{zo} = A_z(1+\gamma)$$

(2.35)

$$U_{xo} = U_x(1+\gamma);\ U_{zo} = U_z(1+\gamma),$$

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]:

$$P_s = \frac{}{R}(1+\gamma^2), \qquad (2.36)$$

При нормальном падении волны на объект:

$$\gamma = \frac{n-1}{n+1};\quad n = \frac{\rho_1 V_\rho}{\rho_2 V_\rho}, \qquad (2.37)$$

где ρ_1 - плотность; V_1 - скорость распространения упругой волны в 1ой среде (грунте),

ρ - плотность и V_2 - скорость распространения упругой волны во 2ой 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_x, P_z действуют на объект в течение времени τ и вынуждают его колебаться с амплитудами смещения [1]:

$$\Delta\alpha_x = \frac{P_x \cdot S_x \cdot \tau^2}{m_0 + m_{2x}}; \Delta\alpha_z = \frac{P_z \cdot S_z \cdot \tau^2}{m_0 + m_{m2z}} \quad (2.38)$$

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:

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\varphi \cdot \sin\Omega t), \quad (2.39)$$

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

Ω - частота колебаний объекта.

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

$$U(t) = U \left[\sin(\omega t) + \frac{\Delta\varphi}{} \sin(\omega + \Omega)t - \frac{\Delta\varphi}{} \sin(\omega - \Omega)t\right], \quad (2.40)$$

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

3.2 Энергетические оценки радиолокационного канала для подповерхностного зондирования

Исследуем энергетические соотношения радиолокационного канала для двух вариантов реализации комплекса с совмещенным приемопередатчиком РЛС

размещённым 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 рисуне 2.10 представлены геометрия расположения радиолокатора в точке Q_1 (для совмещенного приемопередатчика), и разнесенного варианта с размещением передатчика в точке Q_1 и приема отраженного сигнала в точке Q_2. Объект поиска расположен в точке М на наклонном расстоянии R_1 между двумя объектами.

Вначале получим основное уравнение радиолокации для совмещенного варианта.

1) Излучатель электромагнитных колебаний с КНД G мощностью создает $P0$

в воздухе над объектом плотность потока мощности (ППМ):

$$\Pi_{12} = \frac{P_0 G}{4\pi R^2}; \qquad (2.41)$$

2) ППМ, проникающая в землю:

$$\Pi_{21} = \Pi_{12} \cdot \gamma^2 = \frac{P_0 G}{4\pi R^2} \gamma^2, \qquad (2.42)$$

γ - коэффициент преломления на границе воздух-земля;

3) ППМ около объекта в земле:

$$\Pi_{2z} = \Pi_{21} \cdot e^{-2\alpha h} = \frac{P_0 G \gamma^2}{4\pi R^2} \cdot e^{-2\alpha h}, \qquad (2.43)$$

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

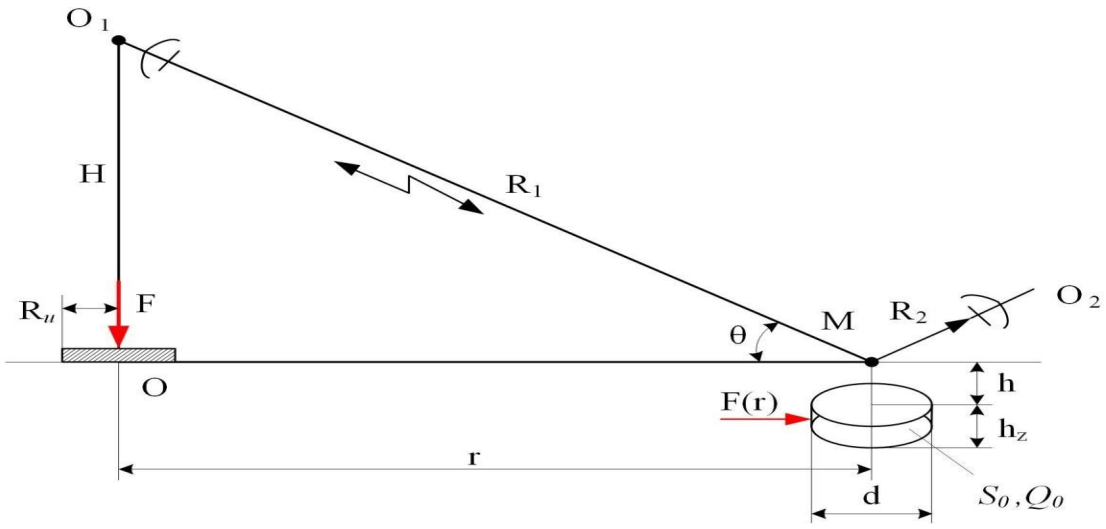


Рис. 2.10

4) ППМ электромагнитной волны рассеянная на поверхности грунта:

$$P_{20} = \frac{P_0 G y^2}{4\pi R_1^2} e^{-2ah} \cdot S_{эф} \cdot k_0^2 \qquad (2.44)$$

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

k_0 - коэффициент отражения от объекта.

5) Коэффициент преломления по напряженности поля

$$y = \frac{2z_2 \cos\theta}{z_2 \cos\theta + z_1 \cos\varphi}, \qquad (2.45)$$

где θ - угол падения электромагнитной волны на землю,

φ - угол преломления,

$z1$ - волновое сопротивление воздуха,

$z2$ - волновое сопротивление земли.

6) волновое число грунта

$$z_2 = \frac{\sqrt[w]{\mu_2 \varepsilon_2}}{2} \sqrt{(1 + tg\delta \frac{2}{2}} \qquad (2.46)$$

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

,

μ_2, ε_2 - магнитная и диэлектрическая проницаемость земли,

$tg\delta_2 = \sigma_2$ σ_2 - проводимость земли.

$\overline{\omega\varepsilon_2}$

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

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

$$П_П = \frac{P_{02}}{4\pi R^2} \qquad (2.47)$$

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

$$P_П = П_П \cdot S_A \qquad (2.48)$$

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:

$$\Delta\varphi_Z = \frac{2\pi \Delta a_Z}{\lambda} \qquad (2.49)$$

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

$$m_\varphi \approx \Delta\varphi_Z \qquad (2.50)$$

Мощность собственного шума на входе приемника:

$$P_N = kT_k^0 \Delta f , \qquad (2.51)$$

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

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

Δf - полоса пропускания цепей приемника.

Численные оценки

Исходные данные:

$\gamma = 10Hz$;

$d = 0{,}5м$; $H = 2м$; $R_1 = 10м$; $h = 0{,}1м$; грунт-песчаник,

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

Коэффициент направленности антенны:

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

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

$$P_{OC} = \frac{(4\pi)^3 R_1^4 K_N P_N}{m_\varphi^2 G \lambda^2 \gamma^4} \qquad (2.62)$$

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

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

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

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:

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

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:

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

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

$$\Delta\varphi \approx m_\varphi = \frac{\Delta a_{Z,X}}{\lambda} \qquad (2.66)$$

$$\Delta a_Z = \frac{12 I_Z}{\omega \rho_Г \sqrt{V_a}}. \qquad (2.67)$$

Для боковой стенки по координате x,

$$\Delta a_X = \frac{12 I_X}{\omega \rho_Г \sqrt{V_a}}, \qquad (2.68)$$

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

$$I_{X,Z} = \frac{P_П r}{R_u S_0} \left| \frac{Вт}{м^2} \right|, \qquad (2.69)$$

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 сейсморазведки с источником «Енисей КЭМ-4» [64], для получения силы удара в 25 т, требуется затратить электрическую мощность в импульсе порядка P_0= 25 кВт.

Если в приемнике использовать фазовую демодуляцию радиосигнала на

частоты 10 ГГц (λ = 0,03 м), то требуемая чувствительность определяется величиной механического сдвига корпуса под действием сейсмической волны. К примеру, при Δa_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:

$$m = \frac{4\pi R_1 R_2 \sqrt{K_N P_N}}{\gamma_2 \sqrt{G\sigma S P_{ПА\,ОР}}} \qquad (2.70)$$

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 $P_{ОР}$, эффективной площади приемной антенны и КНД антенны передатчика G.

Разрешающая способность по малым целям в основном зависит от соотношения эффективных площадей рассеивания поверхности почвы $\sigma_П$ к ЭПР искомого объекта σ.

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

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]:

$$\sigma_П = 4S_0 p\,, \qquad (2.71)$$

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

$$p \approx \left|\frac{1}{\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_2}\right)^2}\right|\,, \qquad (2.72)$$

где ε_1, ε_2 соответственно диэлектрические проницаемости воздуха и

подстилающей поверхности.

Так, если ε_1=1, ε_2=10, то p =0,01. В этом случае отношение $\frac{\sigma}{\sigma_{п}} = \frac{1}{4} = 25$ т. p

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 :

$$\Delta_{a_x} = \frac{P_{\Sigma} \cdot S_{x} \cdot \tau}{m_0 + m_{2x}} \qquad \Delta_{a_z} = \frac{P_{\Sigma z} \cdot S_z \cdot \tau^2}{m_0 + m_{2z}} \tag{2.73}$$

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)

$$\Delta a_{X,Z} = A = \frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{2I}{\rho V_r}} \tag{2.74}$$

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 $P_a\left|\text{вт}\right|$ то, не используя более сложных соотношений, можно определить смещение корпуса через оценку плотности потока мощности в районе ее расположения в нижнем полупространстве:

$$I\left|\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right| = \frac{P_a e^{-\alpha r}}{2\pi r^2} \qquad (2.75)$$

Здесь коэффициент поглощения продольной волны в горных породах на частоте $f = 100гц$ оценивается как $\alpha = 10^{-2}\frac{1}{м}$ [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 $\left|\frac{кг}{м^2}\right|$.

В соответствие с формулой (2.25),

$$\Delta a_{X,Z} = \frac{F}{\pi R^2}\frac{R_u}{r}S_0\frac{Q_0}{\frac{h}{m}}\tau^2 e^{\alpha} \qquad (2.76)$$

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, сопротивляющуюся сейсмическому удару.

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

$r = 1 \div 10$ м; $V = 500\frac{м}{с}$; $\rho = 1500\frac{кг}{м^3}$; $f = 100$ Гц; $m_0 = 8$ кг; $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ с; $R_M = 0.15$ м; $S_{0Z} = \pi R_M$; $R_u = 0.2$ м; $h = 0.1$м; $Q_0 = 1$.

Таблица 2.4

Зависимости смещения корпуса объекта от расстояния до сейсмического излучателя

r | м|	1	2	3	4	5	6	7	8
Δaz 1	6,5*10-5	3,23*10-5	2,13*10-5	1,59*10-5	1,26*10-5	1,04*10-5	8,79*10-6	7,62*10-6
Δax 1	1,3*10-4	6,5*10-5	4,29*10-5	3,19*10-5	2,52*10-5	2,08*10-5	1,77*10-5	1,53*10-5

Δax 2	3,26*10 -5	1,62*10 -5	1,08*1 0-5	8,04*10 -6	6,4*10-6	5,31*1 0-6	4,53*1 0-6	3,94*10 -6

Для оценки массы присоединенного грунта по рисунку (2.11)

использовались следующие формулы:

$$m_Z = \pi R_M^2 h_Z \rho; \ \Delta h_Z = 4R_M; \qquad (2.77)$$

$$m_X = \pi R_M^2 h \rho \qquad (2.78)$$

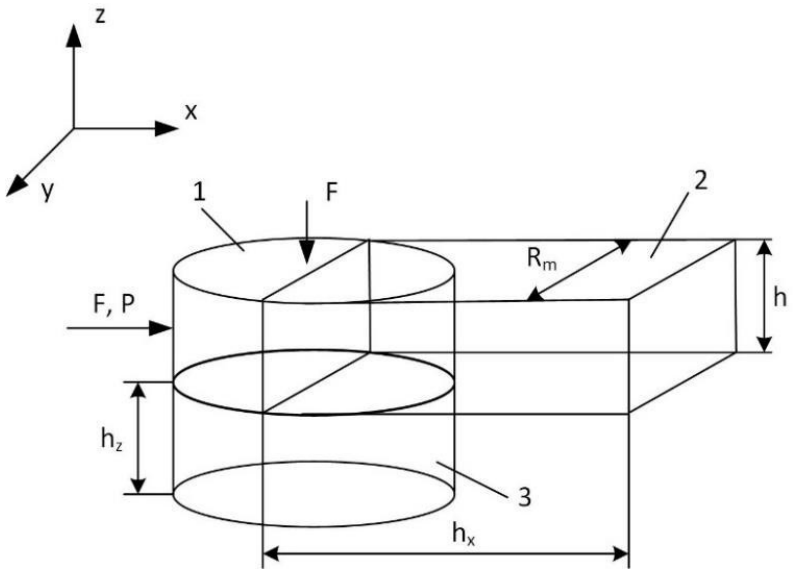


Рис. 2.11. К оценке присоединенного грунта к объекту поиска. 1- объект, 2- объем присоединённого грунта по оси x, 3- объем присоединённого грунта по оси z

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.

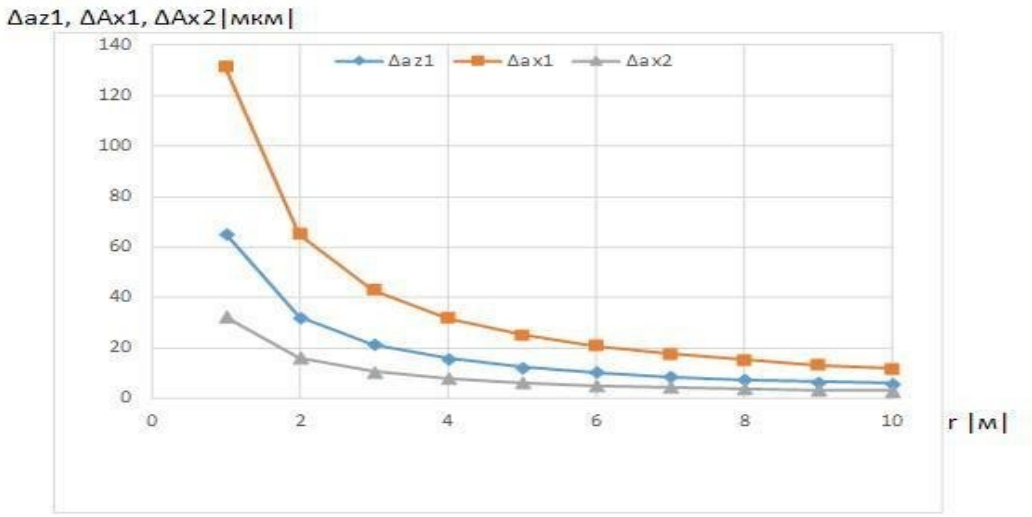


Рис. 2.12. График зависимости смещения объекта от расстояния при фиксированной мощности излучателя в 1000 Вт

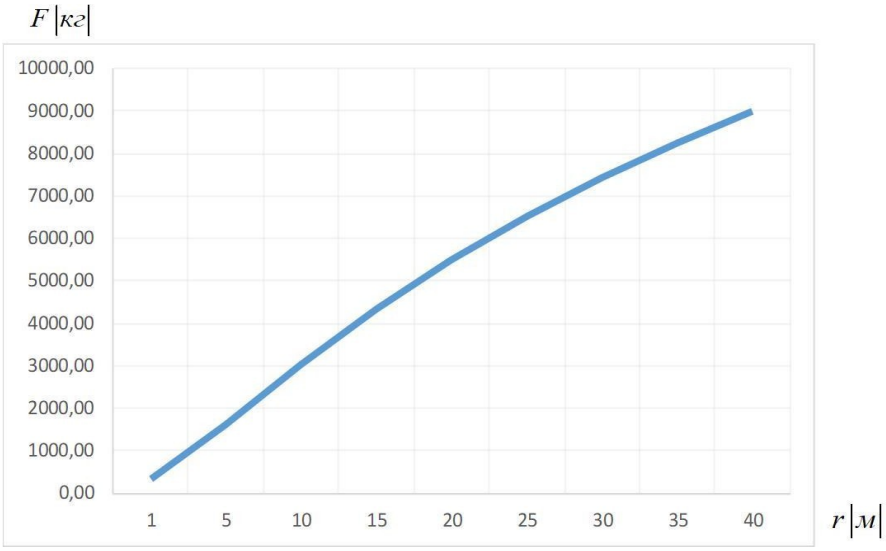


Рис. 2.13. График зависимости силы удара сейсмического источника от расстояния до объекта, при фиксированном значении его смещения

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.

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 (4.2a, 4.2b). На рисунках 4.2c, 4.2d 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/*g*.

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

$$\Delta\alpha = \frac{U}{0.03}\cdot\frac{1}{(2\pi f)^2}; \qquad V = \frac{U}{0.03}\cdot\frac{1}{2\pi f} \tag{4.1}$$

где *U* - показания акселерометра (рис. 4.2a), *f* - частота колебания объекта (рисунок 4.2b).

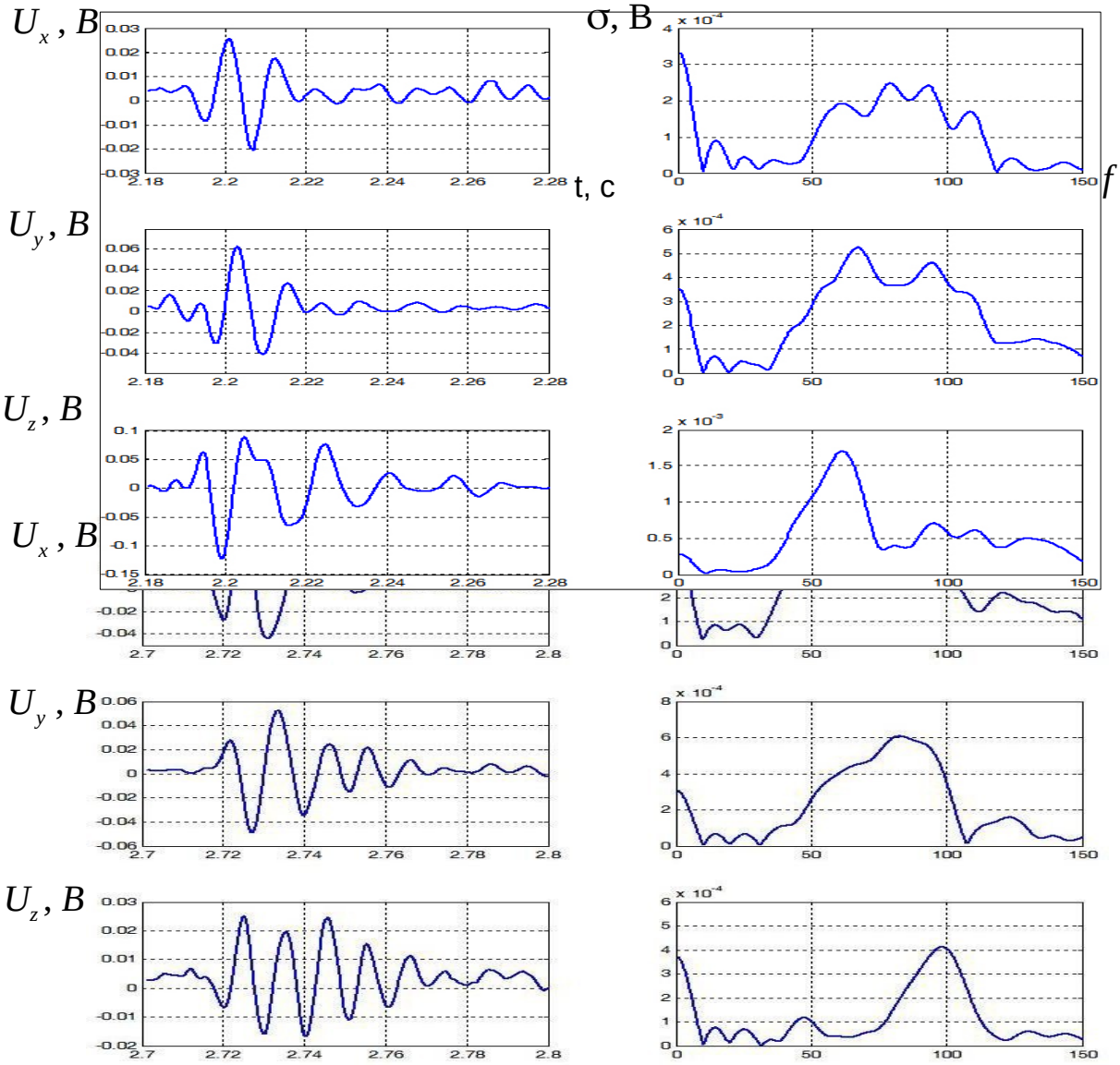
Результаты расчёта по формуле (4.1):

$$\Delta a_X = 3.3\cdot 10\text{-}6 \text{ м}, \quad \Delta a_Y = 1\cdot 10\text{-}5 \text{ м}, \quad \Delta a_Z = 2.8\cdot 10^{-5} \text{ м}$$

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

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

0.084 .



c d

Рис. 4.2. Результаты эксперимента по показаниям акселерометра

a- временные зависимости для трех координат (x, y, z) колебания объекта исследования, b- спектральные плотности реакции объекта для соответствующих координат (x, y, z), c- временные зависимости для трех координат (x, y, z) колебания объекта АФ, d- 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.

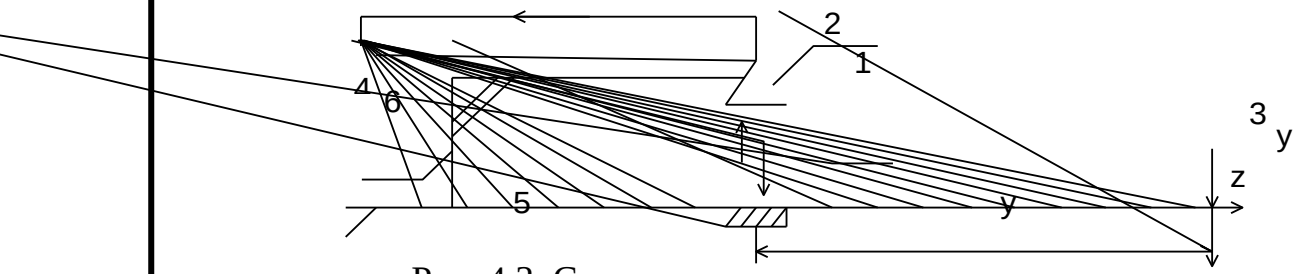


Рис. 4.3. Схема эксперимента с использованием радара

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, визуально 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:

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

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.

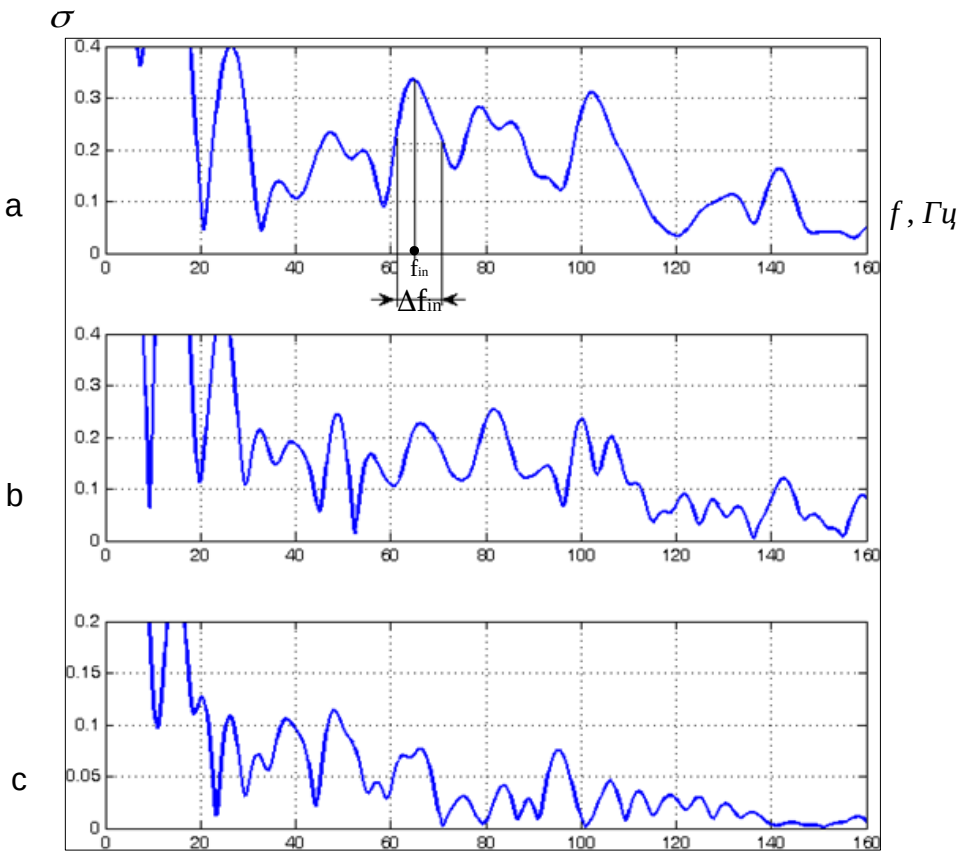


Рис. 4.4. Фрагменты показаний анализатора спектра для одной реализации a – однородная поверхность земли, b – объект исследования на поверхности Земли, c – объект исследования заглублен в землю

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.

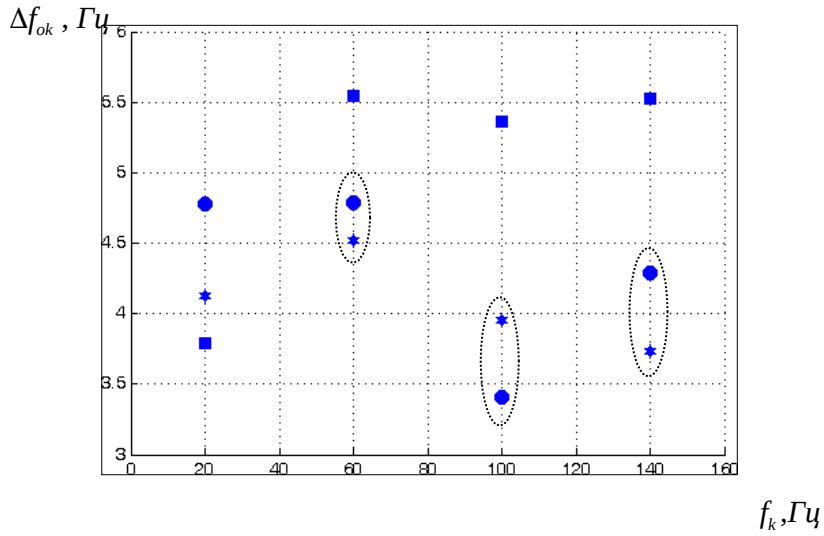


Рис. 4.5. Результаты обработки экспериментальных спектров по алгоритму (4.2)

■ - Δf_{ok} - соответствует однородной поверхности Земли;

* - Δf_{ok} – объект исследования на поверхности земли;

• - Δf_{ok} - 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 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.

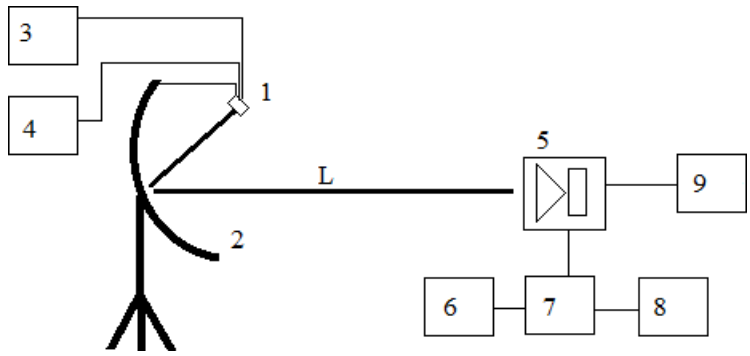


Рис. 4.10. Структурная схема экспериментальной установки

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 9м.

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, Uшум=0.35 В

Амплитуда напряжения Um, 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	<<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 А с частотой F и амплитудой напряжения Um подаваемого на АИ сигнала.

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

где *A*- в мм, *Um*- 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, Uшум=0.35 В

Амплитуда напряжения Um, В	Амплитуда смещение А, мм	Напряжение на выходе ДЛ, В	Отношение с/ш дБ
6	2	0.45	≤0

Таблица 4.5

Измерение при f=32Гц, L=9м, ДЛ-10, Uшум=0.6В

Амплитуда напряжения Um, В	Амплитуда смещение А, 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, Uшум=0.6 В

Амплитуда напряжения Um, В	Амплитуда смещение А, 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*

Таблица 4.7

Измерение при f=128 Гц, L=9 м, ДЛ-10, Uшум=0.65 В

Амплитуда напряжения Um, В	Амплитуда смещение А, мм	Напряжение на выходе ДЛ, В	Отношение с/ш дБ
6	1	4	>>16*
0.6	0.1	2	≥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.

4.3 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].

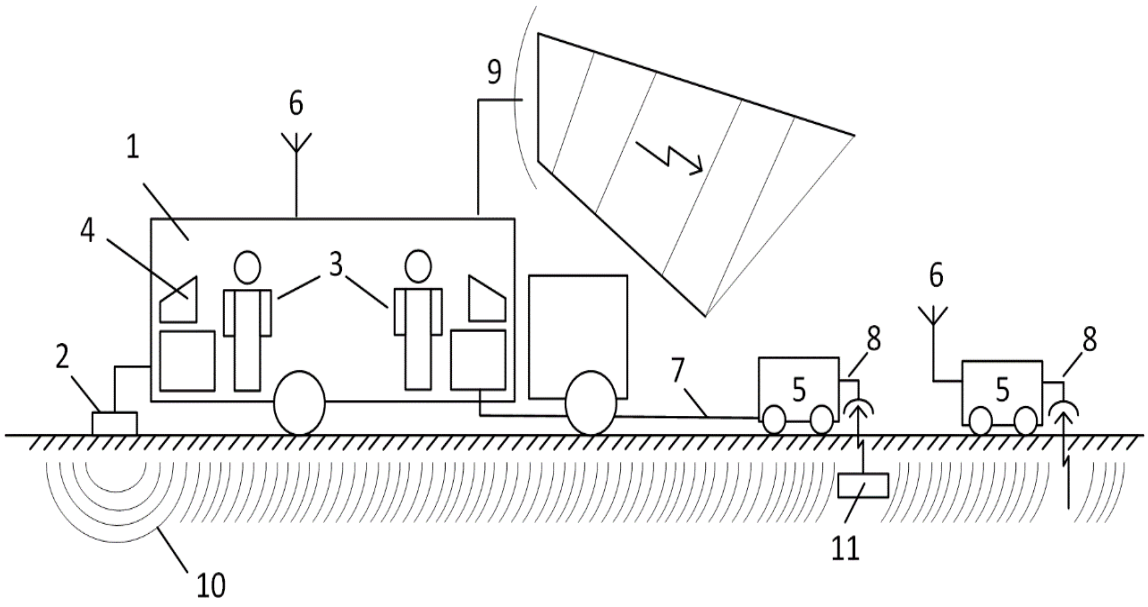


Рис.4.21. Возможный вариант робототехнического комплекса

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.

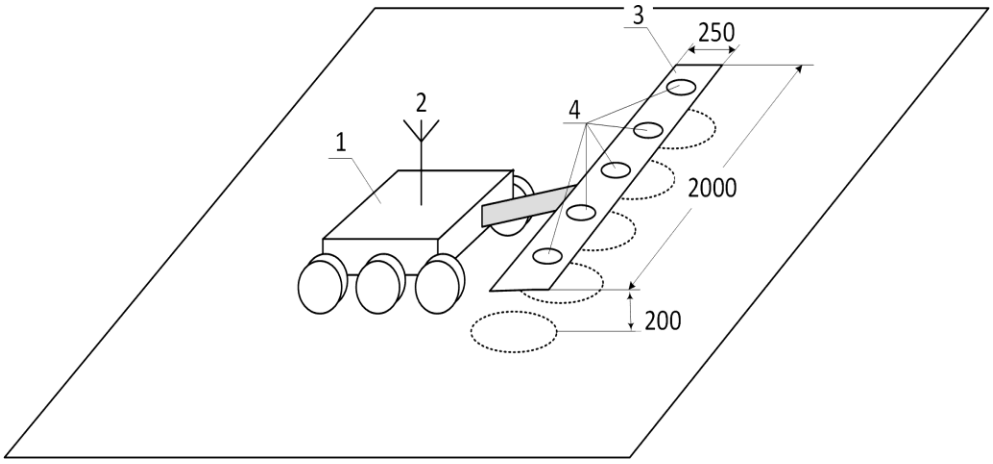


Рис. 4.19. Конструкция блока-робота

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.

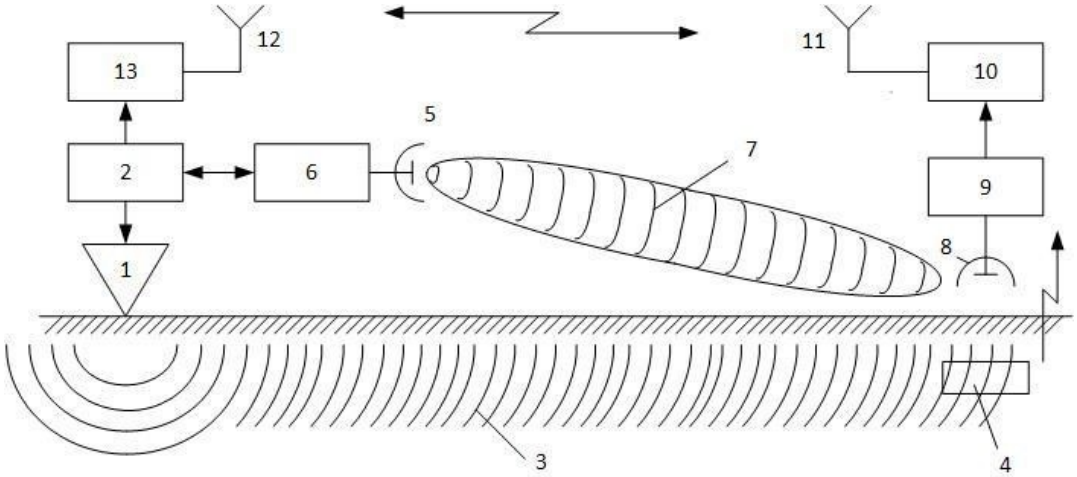


Рис. 4.20. Схема реализации параметрического метода с вынесенным приемником

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 υ_a. Через некоторое время $t_\alpha = \frac{r}{V_\alpha}$, 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.

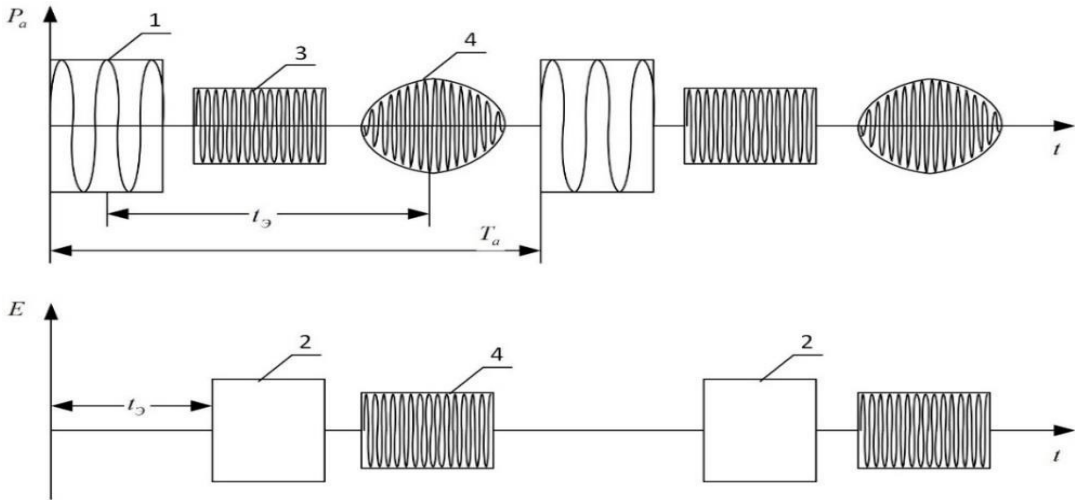


Рис. 4.21. Временная диаграмма излучения и приёма

Импульсы излучения вибратора-1 повторяются с периодом T определяемым видом подстилающего грунта и возможно устанавливаются заранее при работе, например, с песчаным покрытием. Через время задержки t 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 $tg\varphi=\omega\varepsilon$ 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 сейсмических волн для различных видов почв [30].

Как видим, наименьшую скорость распространения сейсмических волн имеет песок V_α до 100м/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 =100 м, время запаздывания сейсмической волны составит t =0,2 с. Откуда период повторения сейсмического сигнала должен быть не менее чем $T \geq 1$ с. Поскольку на расстоянии r =100 м время запаздывания ЭМ сигнала незначительно, то радиопередатчик- 6 может излучать с запаздыванием во времени относительно сейсмического импульса на время T = 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 (Н) можно оценить как:

$$\Delta a_X \approx \frac{P_a}{4\pi R_a^2} \bullet \frac{R_a}{r_a} S \frac{Q}{m} \tau^2, \qquad (4.8)$$

где R - радиус излучающей плиты сейсмоисточника, $S(м^2)$ - площадь боковой поверхности объекта, $m(кг)$ - ее масса, $\tau(c)$ - длительность полупериода возбуждающего сейсмического удара, $P(Н)$ - 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 отношени я *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:

$$\Delta\varphi = \frac{\omega \Delta a_z}{v_a}, \qquad (4.9)$$

где ω - рабочая частота ЭМ сигнала, Δa_Z - вертикальное смещение поверхности почвы, $\upsilon_э = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}$ - 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 $h \approx 0{,}3м$ рабочая длина ЭМ волны должна быть этого же порядка. Поэтому целесообразной рабочей частотой, разрешённой к применению для этих целей регламентом радиосвязи может быть $f \approx 2{,}5ГГц$.

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

$$\Delta\varphi = 2\pi f_э \frac{\Delta a_Z}{\upsilon_э} = 2\pi f_э \frac{\Delta a_Z \sqrt{\varepsilon}}{c} \approx 0,01 \text{ град}$$

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

$$\delta_E = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta\varphi}{18 0^0} \approx 1 \cdot 10^{-4}$$

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

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; $R = 0{,}1 м^2$; $r = 100$ м; m=10 кг; $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ с. В этом случае:

$P = 500$ 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.

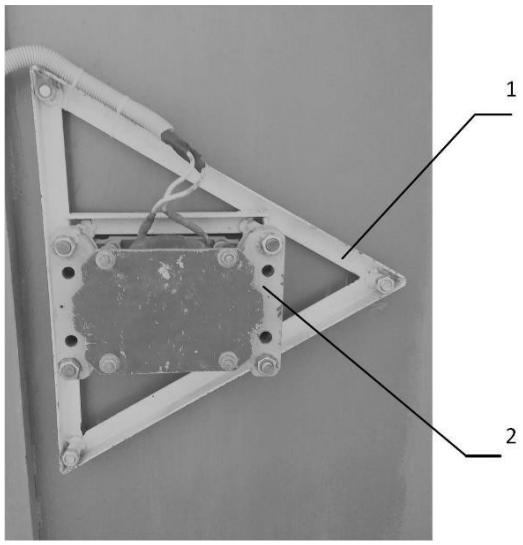


Рис. 4.22. Экспериментальный сейсмический вибратор с силой удара 500 Н

1- Электромагнитный вибратор, 2- рама крепления вибратора

Потенциальным резервом для увеличения смещения $\Delta a_{Z,X}$, кроме как длительность полупериода удара $\tau 2$, является также в целом длительность виброимпульса τ .

При средней частоте механического резонанса $F_M \approx 20 Гц$ [45] и длительности виброимпульсного воздействия $\tau \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 =80 Дб.

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

В этом случае мощность теплового шума на входе приёмника составит:

$$P_{Ш} = \kappa T^{0}_{K} \Delta F_{M} q_{Ш} \qquad (4.10)$$

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

$q = 50$ дБ - коэффициент шума; ΔF_M - полоса пропускания приемника.

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

$$P_{ПР} = P_{Ш} \cdot 10^5$$

В итоге имеем при $\Delta F_{м}$ =1000 Гц, $_q$ =50 дБ

$$P_{ПР} = \kappa T_{К} 0\ \Delta F_{М\ Ш}\ q \cdot 105 = 4{,}14 \cdot 10\text{-}6 \text{ Вт}$$

Требуемую мощность передатчика $_P$ РЛС получим через известное уравнение:

$$P_{П} = \frac{4\pi P_{ПР\ 1} R^2}{Q_{П} S_{ПР}}. \qquad (4.11)$$

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

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

При длине волны соответствующей рабочей частоте РЛС 2,5 *ГГц*, λ =0,12 м, эффективной площади передающей антенны РЛС $S_{П}$ =0,1 м^2, и КПД антенны $\eta = 0{,}5$, на максимальном расстоянии до объекта *r*=100 м, требуемая мощность передатчика $P_{П}$ РЛС составит 3,3 Вт.

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 операторе. Представляет интерес конструкция периферийных управляемых роботов-носителей оснащенными датчиками различного типа. Это могут быть высокопроходимые самодвижущееся 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.

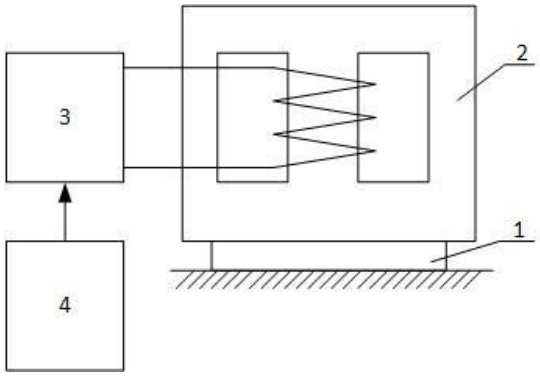


Рис. 4.23. Схема электромеханического вибратора

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 передаётся 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 производится винфракрасном диапазоне с длиной волны $\lambda = 3мкм$, то чувствительность одного поискового элемента будет существенно выше, чем при облучении радиоволнами. Полученная информация должна передаваться по радиоканалу на базовую машину.

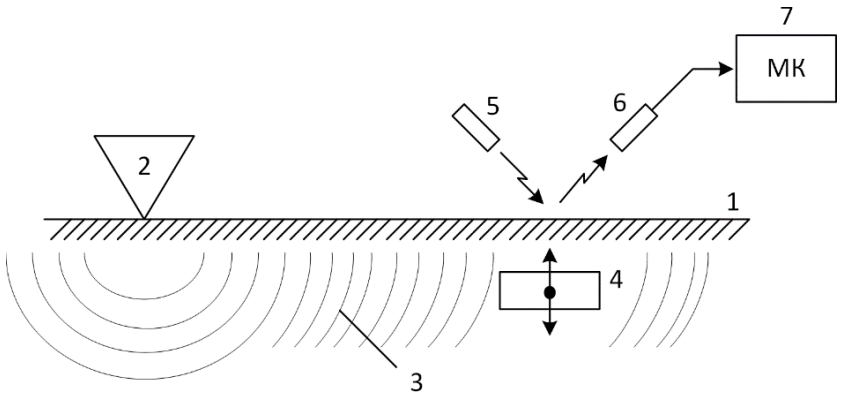


Рис. 4.27. Схема поискового фотопараметрического элемента

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.

5. БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ

5.1 Анализ негативных воздействий опасных и вредных факторов, влияющих на обслуживающий персонал во время эксплуатации

В процессе производства радиостанции можно выделить следующие вредные и опасные производственные факторы:

- опасность электромагнитного излучения;
- опасность поражения электрическим током;
- противопожарная безопасность.

5.2 Влияние электромагнитного излучения

Электромагнитные поля человек не видит и не чувствует и именно поэтому не всегда предостерегается от опасного воздействия этих полей.

1. Электромагнитные излучения оказывают вредное воздействие на организм человека. В крови, являющейся электролитом, под влиянием электромагнитных излучений возникают ионные токи, вызывающие нагрев тканей. При определённой интенсивности излучения, называемой тепловым порогом, организм может не справиться с образующимся теплом.

2. Нагрев особенно опасен для органов со слаборазвитой сосудистой системой с неинтенсивным кровообращением (глаза, мозг, желудок и др.). При

облучении глаз в течение нескольких дней возможно помутнение хрусталика, что может вызвать катаракту.

3. Кроме теплового воздействия электромагнитные излучения оказывают неблагоприятное влияние на нервную систему, вызывают нарушение функций сердечно-сосудистой системы, обмена веществ.

Длительное воздействие электромагнитного поля на человека вызывает повышенную утомляемость, приводит к снижению качества выполнения рабочих операций, сильным болям в области сердца, изменению кровяного давления и пульса. Головной и спинной мозг чувствительны к изменениям давления, и поэтому повышение температуры в результате облучения головы может иметь серьезные последствия. Повышение температуры мозга происходит наиболее быстро, когда голова облучается сверху или когда облучается грудная клетка, так как нагретая кровь из грудной клетки непосредственно направляется к мозгу. Облучение головы вызывает состояние сонливости с последующим переходом к бессознательному состоянию. При длительном облучении появляются судороги, переходящие затем в паралич. При облучении головы неизбежно наступает смерть, если температура мозга повышается на 6 °С.

5.3 Нормативные требования электромагнитного излучения радиочастотного диапазона

1. Электростатические поля.

ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. "Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля для электростатических полей" .

Предельно допустимый уровень напряженности электростатических полей составляет 60 кВ/м в теч.1ч;

Предельно допустимая напряженность электростатического поля при другом временном воздействии определяется по формуле:

$$E = 60/t,$$

где t – время воздействия электростатического поля.

2. ЭМП промышленной частоты.

СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях.

ГОСТ 12.1.002-84. ССБТ. Электромагнитные поля токов промышленной частоты. Общие требования.

Для промышленной частоты (50 Гц) критерием является напряженность электрического поля (ЭП). Нормируется время пребывания человека в зависимости от напряженности электрического поля:

- предельно допустимый уровень (ПДУ) напряженности ЭМП устанавливается равным 25 кВ/м;
- пребывание в ЭМП напряженностью более 25 кВ/м без применения средств защиты не допускается;
- пребывание в ЭМП до 5 кВ/м допускается в течение всего рабочего дня;
- пребывание в ЭМП от 20 до 25 кВ/м допускается не более 10 мин;
- пребывание в ЭМП от 5 до 20 кВ/м допускается в течение времени (ч):

T=50/E

3. ЭМИ радиочастотного диапазона.

СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона.

Для оценки неблагоприятных воздействий электромагнитных волн приняты допустимые энергетические характеристики электромагнитного поля для различного диапазона частот:

ЭМП в диапазоне частот 60 кГц…300 МГц оценивают по электрической Е и магнитной Н напряженности (допустимые значения Е и Н регламентируются СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 ЭМИ РЧ);

ЭМИ в диапазоне 300 МГц…30ГГц – оценивают по поверхностной плотности потока энергии (ППЭ) и создаваемой им энергетической нагрузки (ЭН).

5.4 Расчет интенсивности электромагнитного излучения радиочастотного диапазона

Таблица 3 – ПДУ воздействия периодического магнитного поля частотой 50 Гц

Время пребывания (час)	Допустимые уровни МП, Н [А/м] / В [мкТл] при воздействии	
	общем	локальном
≤ 1	1600 / 2000	6400 / 8000
2	800 / 1000	3200 / 4000
4	400 / 500	1600 / 2000
8	80 / 100	800 / 1000

Допустимые значения ППЭпду, Вт/м2, рассчитывают исходя из нормативных значений ЭНпду за рабочий день по формуле:

$$ППЭпду = ЭНпду / T$$

ЭМП излучаемое системой АПС не превышает 5 кВ/м, следовательно, допускается работа в течение всего рабочего дня без применения средств индивидуальной защиты.

Для уменьшения прохождения электромагнитной энергии через вентиляционные люки, оконные проемы и т.п. их экранируют металлической сеткой, имеющей электрический контакт в узлах, с величиной ячейки (L, м), удовлетворяющей условию:

$$L < 0.01 \, xcx \, t_{фр},$$

где c – скорость света (3 х 108 м/с); $t_{фр}$ – длительность фронта ИЭМП, с.

5.5 Мероприятия по защите от ЭМП

Основная защита, применяемая на самолетах от излучения – экранирование. В производстве защитных экранов используются разнообразные материалы. Средством экранирования могут служить листовая медь, алюминий, сталь или

фольга, а также современные специализированные ткани и сетки. Чем выше удельная проводимость материала экрана, тем эффективнее экранирование. Конкретное значение защитных способностей экрана зависит от конфигурации и объема кабины пилотов.

Для электромагнитного экранирования входящих/выходящих электромагнитных линий от помех извне и паразитных токов в систему интегрируются специальные фильтры.

Сырьем для изготовления экранирующих конструкций и приспособлений служат:

- стальные и медные пластины – для сооружения корпусов, камер, внутренней облицовки;
- тонкая фольга из мягкомагнитных сплавов – защита аппаратуры;
- металлические ленты и оплетки – экранирование кабелей;
- металлизированные шланги – защита кабельных жгутов;
- металлические соты – для организации экранов с воздухопроницаемыми свойствами;
- тонкая проволочная сетка – экранирование проемов.

Надежное и качественное экранирование помещений и оборудования невозможно обеспечить без тщательного уплотнения. В этих целях используются специальные материалы, которые в достаточной степени обладают такими качествами, как:

- проводимость;
- формуемость;
- устойчивость к ЭМП разной интенсивности;
- низкий уровень контактного сопротивления.

Данным требованиям соответствуют уплотнители, выполненные на основе силиконового каучука. Используются в экранах виде трубок, пластинок, кольцевидных шнуров.

5.6 Противопожарная безопасность

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 дипломном проекте

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

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-

Список использованных источников

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. 4. Финкельштейн, М. И. Радиолокация слоистых земных покровов / М. И. Финкельштейн, В. Л. Мендельсон. - М.: Сов. радио, 1977. -174 с.
5. 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.
6. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А. Ю. Гринева. - М.: Радиотехника, 2005. -416с.
7. Radar Upgrades Handheld Mine Detectors. - Jane's International Defense Review. February 1997.
8. Арбузов, С. О. Магниточувствительные поисковые приборы/ С. О. Арбузов // Специальная техника. -2000. - №6.
9. Щербаков, Г.Н. Обнаружение объектов в укрывающих средах. Для криминалистики, археологии, строительства и борьбы с терроризмом / Г. Н. Щербаков. -М.: Арбат-Информ, 1998.
10. 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.
11. 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.

12. 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.
13. 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.
14. Щербаков, Г. Н. Параметрическая локация - новый метод обнаружения скрытых объектов / Г. Н. Щербаков // Специальная техника. 2000. -№4.
15. 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.
16. Пат. US 7,173,560 B2 Date of Patent: Feb. 6, 2007
17. 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.
18. 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.
19. 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.