

На правах рукописи



Шайдуров Роман Георгиевич

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

Специальность 05.11.13- Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Красноярск 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Гарин Евгений Николаевич

Официальные оппоненты:

- Спектор Александр Аншелевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра теоретических основ радиотехники, заведующий кафедрой;
- Черемисин Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, лаборатория дисперсных систем, заведующий лабораторией.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро «Геофизика», г. Красноярск.

Защита состоится 16 января 2020 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.26, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 112.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета . www.sfu-kras.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кайзер Юрий Филиппович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень ее разработки

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.

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

Традиционные используемые методы поиска основаны на применении металлодетекторов (индукционные миноискатели), саперных щупов и специально обученных служебных собак. Кроме того, применяются, либо находятся в стадии разработки, ряд методов на основе использования радиолокаторов подповерхностного зондирования, радиометрические и магнитометрические комплексы, нейтронные и гамма-датчики, тепловизоры и лазерные виброметры.

Близким к заявляемому методу является исследуемый в лаборатории Линкольна США (Haupt R. W., Rolt K. D. Standoff Acoustic Laser Technique to Locate Buried Land Mines. Lincoln laboratory journal. 2005) параметрический метод на основе использования ультразвуковых волн, излучаемых фазированной антенной решеткой (ФАР) для «подсветки» объектов поиска и считыванием колебаний поверхности с помощью лазерного виброметра.

Перспективными вариантами создания технических средств разминирования, является совмещение нескольких видов датчиков на одной платформе с целью повышения качества обнаружения целей (Щербаков Г. Н., Анцелевич М. А. Новые методы обнаружения скрытых объектов. М., 2011).

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

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

Цель и задачи исследования

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

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

Научная новизна

1. Впервые дано обоснование использования сейсмических волн Релея для возбуждения объекта поиска с регистрацией отклика узкополосной РЛС автодинного типа.
2. Для решения задачи предложено использовать РЛС в СВЧ диапазоне 10-30 ГГц, обеспечивающее получение доплеровского фазового сдвига колебаний поверхности грунта.
3. Показано, что для регистрации смещений грунта с помощью РЛС предложено использование невзрывных импульсных сейсмических излучателей электромагнитного типа.
4. Наилучшую эффективность поиска можно обеспечить считыванием четырех информационных параметров, коэффициента взаимной корреляции между заранее записанных при обучении импульсных переходных характеристик объектов поиска и сигналов отклика на выходе РЛС, относительной полосой спектра сигнала и его длительности, а также дополнительного информационного

признака- тангенса угла потерь в грунте, что позволяет снизить вероятность ложных тревог.

Теоретическая и практическая значимость

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

2. Получены энергетические зависимости для радиолокационного и акустического трактов.

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

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

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

Методология и методы исследования

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

Положения, выносимые на защиту

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

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

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

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

Достоверность результатов работы

Теоретические расчеты подтверждены результатами экспериментальных работ.

Апробация работы

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

Личный вклад автора

Основные теоретические и экспериментальные исследования проведены автором лично.

Структура и объем диссертации

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

Материалы диссертации соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий:

Пункт 1. Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Разработан и предложен новый метод поиска подповерхностных объектов, соответствующий неразрушающему контролю среды и требованиям безопасности проведения работ по гуманитарному разминированию.

Пункт 3. Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами.

Показано энергетическое преимущество применения электромагнитных сейсмических источников по сравнению с ультразвуковым методом возбуждения поверхностных сейсмических волн.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано описание проблемы и обоснована актуальность темы диссертационной работы. Поставлены цели и задачи проводимых исследований, излагается научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Глава 1. Аналитический обзор о состоянии техники поиска подповерхностных объектов

Рассматриваются характеристики объекта поиска и укрывающих сред (Щербаков Г. Н., Анцелевич М. А. Новые методы обнаружения скрытых объектов. М, 2011). Дается классификация методов поиска подповерхностных объектов и особенностей работы аппаратуры, основанной на применении различных физических принципов. На основании проведенного анализа сделаны следующие выводы:

1. Большая часть поисковой аппаратуры в России и в мире, это средства ближнего действия, до 1 м;
2. Для дальнего обнаружения используют либо радиолокационные системы со ступенчатым изменением частоты, работающие на принципах электромагнитного контраста объекта поиска и грунта, либо нелинейные,

основанные на обнаружении активных полупроводниковых элементов взрывателей;

3. Имеется необходимость привлечения новых физических принципов распознавания объектов поиска, к коим относится метод возбуждения механического резонанса под действием внешнего акустического возбуждения.

Глава 2. Теоретические основы параметрического электромагнитного метода

Даются физические принципы распространения поверхностных сейсмических волн Релея и Лява применительно к задаче возбуждения скрытых объектов в почве.

Представлена модель параметрического метода поиска (рисунок 1). 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.

Объекты естественного происхождения, камни, неоднородности рельефа грунта, обычно являющиеся причинами ложных тревог, в новом методе дают существенно меньшие частоты колебаний, если вообще возбуждаются механически. Эффективная глубина прохождения сейсмической волны где сосредоточенно до 95% всей энергии (Бондарев В. И. Сейсморазведка. Екатеринбург, 2007) определяется как:

$$h_{\phi} = 0,6(1 + \sigma)\lambda_R, \quad (1)$$

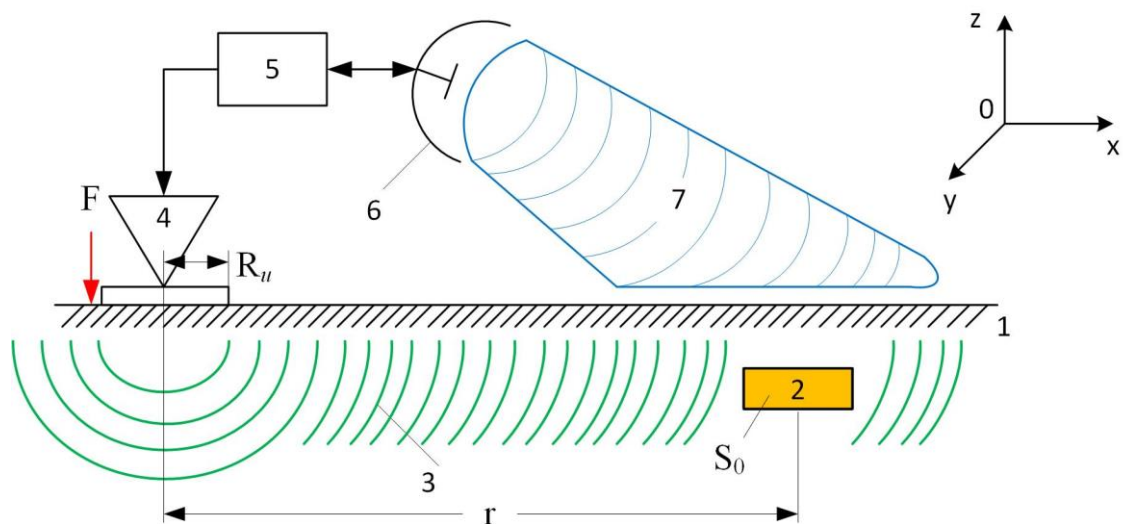


Рис. 1. Схема реализации радиолокационного параметрического способа обнаружения подповерхностных объектов

где σ - коэффициент Пуассона.

С учетом этого, в поверхностном слое плотность потока сейсмической энергии будет в $Q_c = \frac{r}{z}$ выше чем во всей полусфере площадью $2\pi r^2$. Так при $z = 2$ м и $r = 10$ м, $Q_c = 5$;

Это потенциальный запас, увеличивающий сдвиг почвы под влиянием волны Релея. Амплитуда механического смещения объекта при возбуждении сейсмической волной:

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

где F - сила удара сейсмического источника, R_u - эффективный радиус контактной поверхности излучателя сейсмоакустических волн (сигналов) с грунтом, S_0 - площадь поверхности корпуса объекта поиска, перпендикулярная действующей силе, r - расстояние до объекта поиска, Q_0 - величина добротности объекта поиска при механическом резонансе, m - масса объекта и присоединенного грунта, τ - длительность импульса производимого сейсмическим источником.

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

$$U(t) = U_m \sum_{i=1}^n \sin(\omega_i t + \frac{2\pi \Delta a_{x,z}}{\lambda_i} \sin \Omega t), \quad (3)$$

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

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

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \Delta a_{x,z}}{\lambda_i} \sin \Omega t. \quad (4)$$

Путем фазового детектирования отраженного от поверхности грунта и объекта поиска радиолокационного сигнала, выделяя коэффициент фазовой модуляции $\Delta \varphi$, можно получать информацию о смещении $\Delta a_{x,z}$, прямо пропорциональном отношению (2).

Для одинаковых по размеру объектов, величина этого смещения 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).

Задача классификации целей решается путем сравнения собственных частот колебаний (импульсных характеристик) объектов под действием сейсмической волны.

Здесь приведен расчет собственных колебаний замкнутой оболочки (железо, алюминий) с концентрическим наполнителем по формуле 5 для алюминиевой и железной оболочки.

$$\omega^2 = \frac{2E}{a^2 \rho (1-\nu)} \quad (5)$$

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

Рассмотрим необходимую энергетику радиолокационного канала применительно к задаче поиска заглубленного объекта в почве.

Общая системная формула, для случая излучения и приема сигнала с базовой машины, определяющая требуемую мощность передатчика РЛС зависит от совокупности параметров всего комплекса как:

$$P_0 = \frac{4P_N \lambda^2 R_1^4 e^{4\alpha h} q}{\Delta a_{x,z}^2 S_{\varnothing} S_{II} Q \gamma^4} \quad (6)$$

Здесь параметр сейсмического канала входит в виде амплитуды механического смещения корпуса объекта поиска $\Delta a_{x,z}$ под действием вибраций.

Остальные обозначения: P_N -мощность шума приемника при полосе пропускания $\Delta f = 30$ Гц, λ - длина электромагнитной волны РЛС, R_1 - расстояние от антенны РЛС до объекта поиска, h - глубина заложения, α -коэффициент затухания электромагнитных волн в земле, q - отношение сигнал/шум, $S_{\varnothing}$ - эквивалентная площадь объекта, S_{II} -площадь приемной антенны, Q -механическая добротность объекта при воздействии сейсмической волны, γ - геометрический коэффициент преломления по напряженности поля. При выносе приемника на автономный поисковый модуль в (6) зависимость от расстояния будет в виде $(R_1 h)^2$ что снижает мощность передатчика РЛС. На рисунке 2 изображены графики зависимости смещения корпуса объекта исследования, от расстояния до сейсмоисточника, при его силе удара 1000 кг, и при задании фиксированного смещения $\Delta a_z = 50$ мкм, зависимость требуемой силы удара вибратора F , от расстояния.

По данным наших экспериментов, опытная РЛС, работающая на дистанции $r = 10$ м регистрировала смещения отраженного сигнала на величину 50 мкм с отношением сигнал/шум не менее 10 Дб.

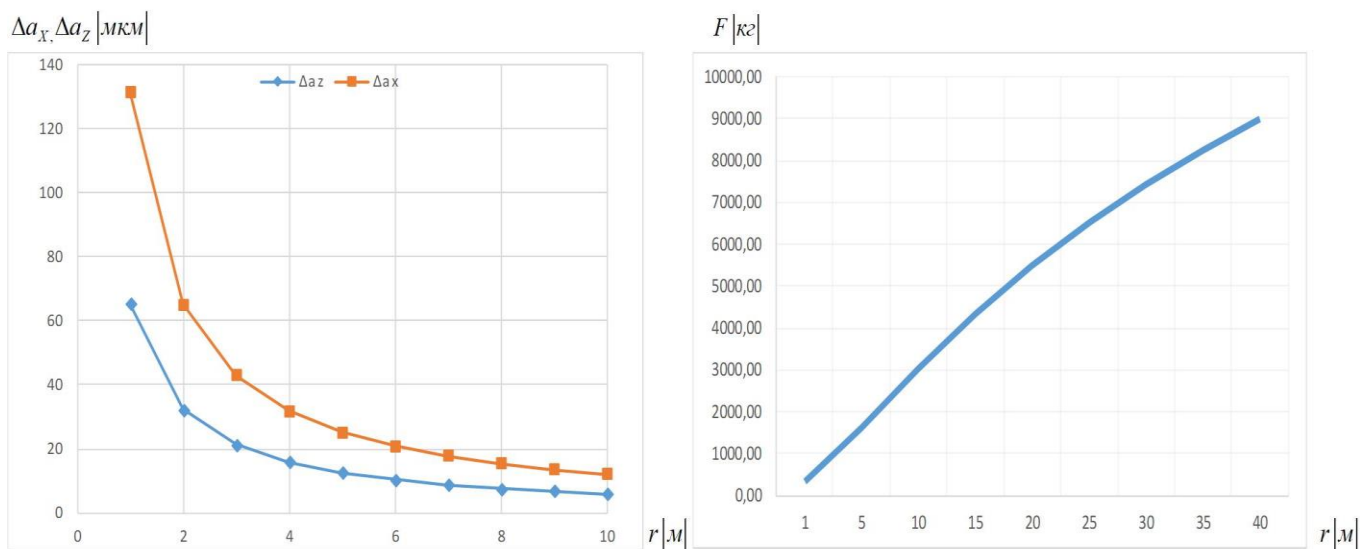


Рис. 2.

Глава 3. Возбуждение сейсмических колебаний

Даны энергетические оценки метода возбуждения сейсмической волны с помощью фазированной ультразвуковой решетки на частотах 20-30 кГц (Haupt R. W., Rolt K. D. Standoff Acoustic Laser Technique to Locate Buried Land Mines. С. 3) и с использованием электромагнитного сейсмоисточника «Енисей». По этим оценкам, использование для возбуждения акустических (сейсмических) волн сейсмического невзрывного источника, на порядок эффективнее чем применение ультразвуковых ФАР.

Принцип работы импульсного невзрывного излучателя сейсмических волн показан на рисунке 3.

Источник состоит из опорной плиты 1, стойки 2, пригруза 3, магнитопровода пригруза 4, обмотки возбуждения 5, магнитопровода якоря 6, рамы якоря 7, демферов 8. При пропускании тока через обмотку возбуждения между магнитопроводом якоря и полюсами магнитопровода индуктора пригруза представляющий собой металлический балласт, позволяющий опорной плите плотно прилегать к грунту, создается магнитный поток Φ , который приводит пригруз в движение вверх с силой $F(t)$.

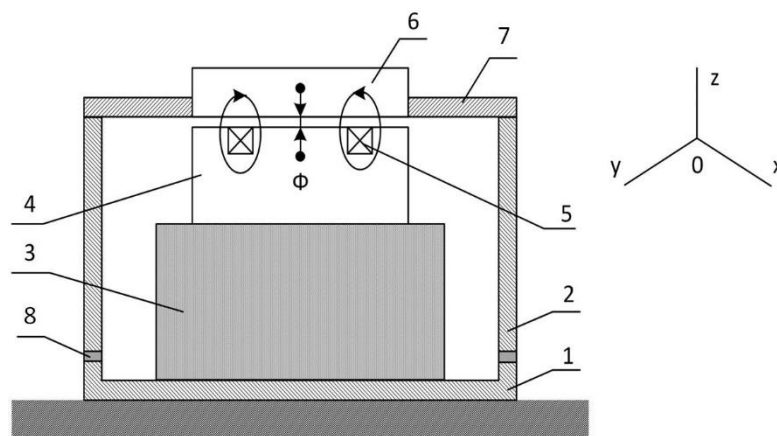


Рис. 3. Конструктивная схема невзрывного импульсного источника

В начальном положении опорная плита находится на поверхности грунта придавливая его весом пригруза, при подаче импульса тока на обмотку 4, пригруз начинает движение вверх по координате Z, освобождая центр опорной плиты от собственного веса передавая его на края последней. В следствии этого, поверхность грунта под опорной плитой образует волновую форму.

Развиваемая сила удара излучателя оценивается по формуле Максвелла

$$F(t) = \frac{B_0^2 S}{2\mu_0}, \quad (7)$$

где: $B(t)$ - индукция в зазоре электромагнита, μ_0 - магнитная постоянная воздуха, S - площадь сечения магнитопровода.

Масса такого излучателя существенно зависит от требуемой силы удара. Так при $|F(t)| = 25000$ кг, масса излучателя составит 2,5 т (источник «Енисей КЭМ-4»), а при $|F(t)| = 1500$ кг, масса экспериментального импульсного невзрывного излучателя сейсмических волн составила 100 кг. С учетом требований предложена концепция транспорта носителя с использованием источника электромагнитного типа, с описанием алгоритма проведения работ по поиску.

Так же глава 3 посвящена анализу сейсмических шумов, создаваемых при перемещении транспорта, что дает возможность их использования в качестве носителя информации в некоторых специфичных случаях, а также для оценки

помехоустойчивости параметрической системы при действии внешних шумов, создаваемых транспортными средствами.

Глава 4. Экспериментальные результаты и проблемы создания аппаратного комплекса

Была проведена серия экспериментов согласно схемы реализации метода (рисунок 1). В качестве излучателя 4 применялся электромагнитный источник сейсмических волн «Енисей 1,6», с силой удара 1500 кг, а также удары о землю кувалдой весом 10 кг. Для измерений смещений грунта и объектов использовался акселерометр, который прикреплялся к корпусу объектов поиска-2.

Данные эксперимента позволяют оценить амплитуду и скорости смещения объекта по соотношению:

$$\Delta a = \frac{U}{G} \cdot \tau^2; \quad V = \frac{U}{0.03} \cdot \frac{1}{2\pi f}, \quad (8)$$

где U - показания акселерометра, f - частота колебания объекта, G - чувствительность акселерометра, τ - длительность сейсмического импульса.

По результатам эксперимента можно так же ожидать следующие значения доплеровских смещений фазы на частоте 10 ГГц

$$\Delta\varphi_z = 2\pi \frac{\Delta a_z}{\lambda} = 6.28 \frac{2.8 \cdot 10^{-5}}{0.03} = 23,2 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 1,32^\circ \quad (9)$$

Фрагменты нормированных результатов на выходе анализатора спектра для однородной поверхности Земли, и искусственного объекта, представляющего наполненный пластиковый цилиндр 400 мм в диаметре на ее поверхности и заглубленной в землю, приведены на рисунке 5.

На первый взгляд спектры этих трех объектов трудно различить, это и понятно: радар имеет широкую диаграмму направленности, следовательно, фиксирует колебание не только предмета поиска, но и большого участка земли, содержащего посторонние предметы.

Суть алгоритма заключается в оценке ширины полосы частот в области максимумов спектральной характеристики отражённого радиосигнала:

$$\Delta f_{in} = F_n(f_{in}); \quad \Delta f_{ok} = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p (\Delta f_{in}), \quad (10)$$

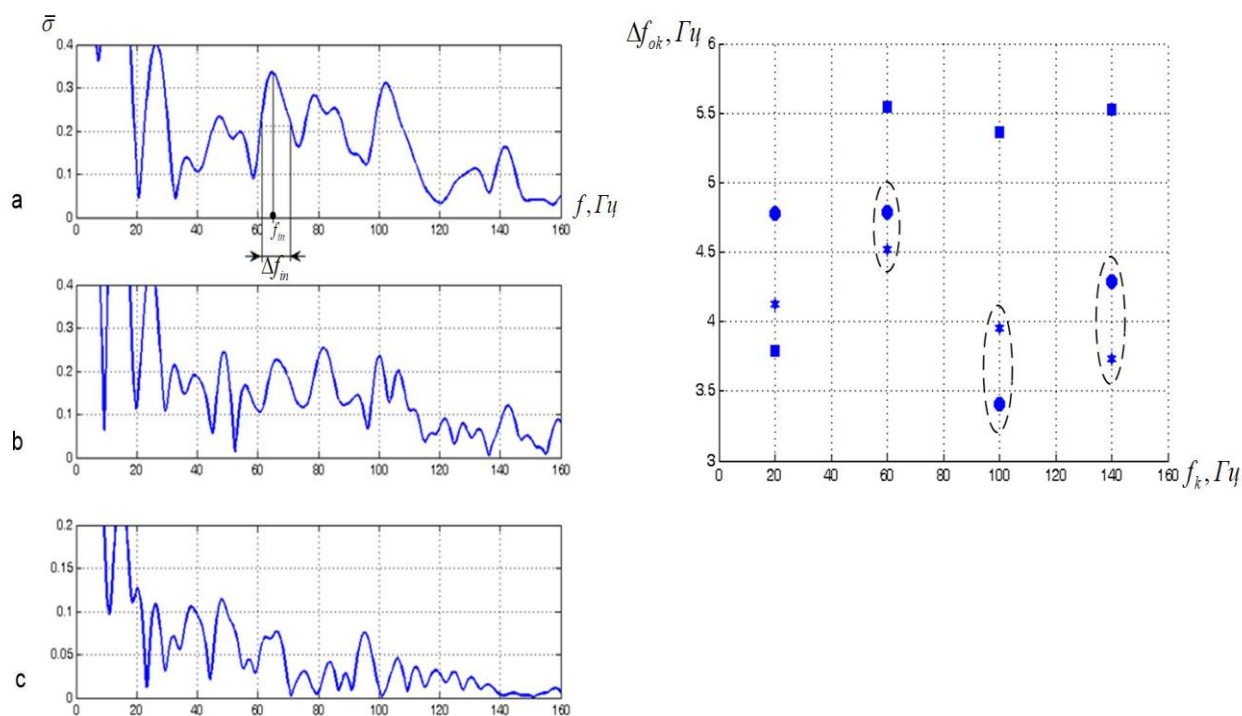


Рис. 4. Фрагменты показаний анализатора спектра для одной реализации
а – однородная поверхность земли, б – объект на поверхности земли, с – объект заглублен в землю, и результаты обработки экспериментальных спектров по алгоритму (10)

Где Δf_{in} - ширина полосы частот для разных объектов для набора частот f_{in} . 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 .

По оси ординат отложены значения Δf_{ok} , по абсциссе f_k . ■ - Δf_{ok} - соответствует однородной поверхности Земли, * - Δf_{ok} - объект на поверхности земли, • - Δf_{ok} - объект присыпан землей, (---) - области объектов поиска.

Анализ рисунка 5 показывает, что положения объекта достаточно хорошо отличаются друг от друга на частотах $f > 40$ Гц по параметру ширины полосы частот в спектральной области. Это означает, что миноподобный объект реагирует на сейсмический удар как избирательный фильтр, сужающий полосу частот механических колебаний корпуса объекта. Неопределенность в области

низкой частоты 20 Гц объясняется влиянием собственной частоты сейсмического излучателя.

Так же были получены характеристики для некоторых объектов с помощью акселерометра Zetlab-110С. На рисунке 5 показаны экспериментально снятые импульсные переходные характеристики (ИПХ) для двух объектов исследования в виде цилиндров различного диаметра, кирпича и подстилающей поверхности (песка). Необходимо отметить что миноподобные объекты имеют более протяженные по времени и сжатые по спектру частот характеристики, чем обычный металлический и неметаллический мусор.

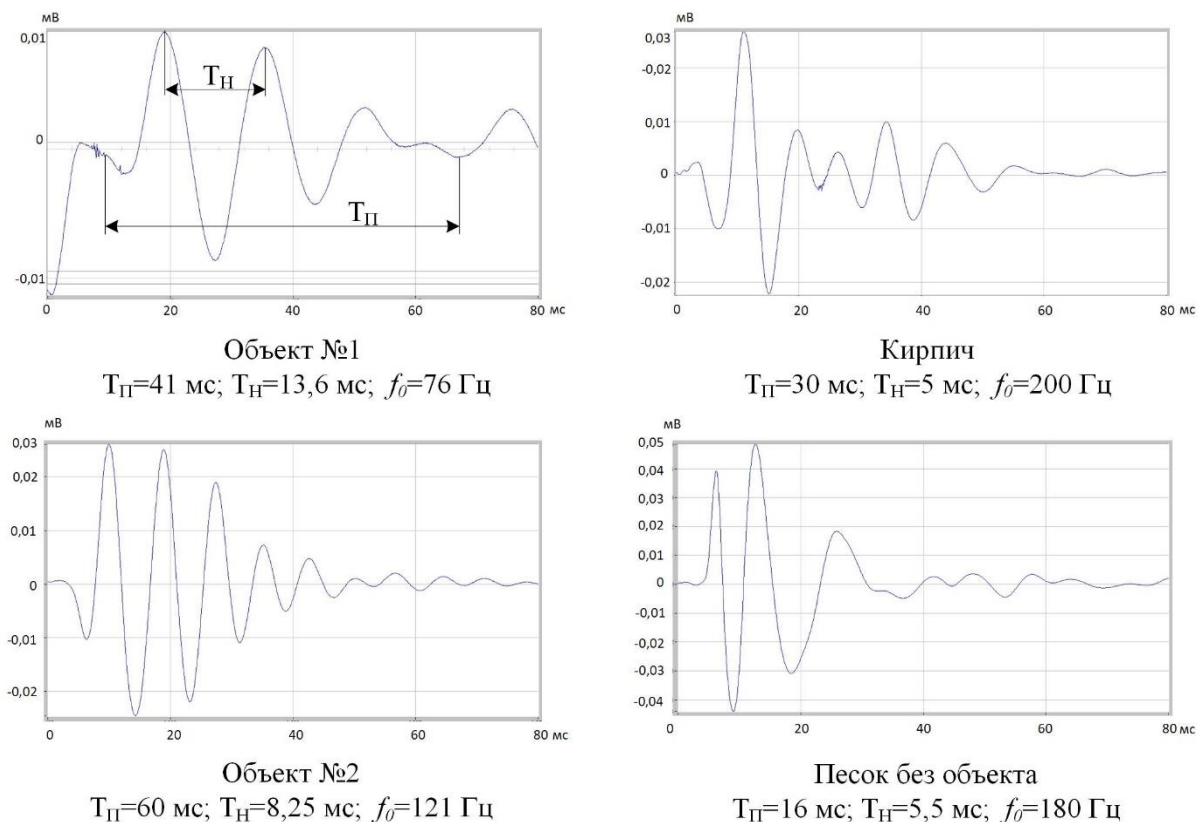


Рис. 5. Импульсные переходные характеристики объектов полученные с выхода акселерометра

Полученные ИПХ были обработаны с помощью взаимно корреляционной функции ВКФ (11)

$$R(\tau) = \int_0^{\tau} u_1(t)u_2(t-\tau)dt \quad (11)$$

На основании полученных коэффициентов взаимной корреляции (КВК), можно сделать вывод, что каждый из исследуемых объектов имеет свой индивидуальный акустический портрет. К примеру, различие коэффициента ВКФ между объектом поиска №1 и остальными составляет до трех раз.

Так же с помощью автодинного радиолокатора были получены ИПХ объектов (рисунок 7). Как видно из графиков, радиоволновую реакцию полупространства характеризуют три параметра- f частота, Δf полоса частот и длительность реализации T_{Π} , которые для разных объектов отличаются, однако необходимо сузить зону (ЭПР) приема радиосигнала до размера объекта поиска.

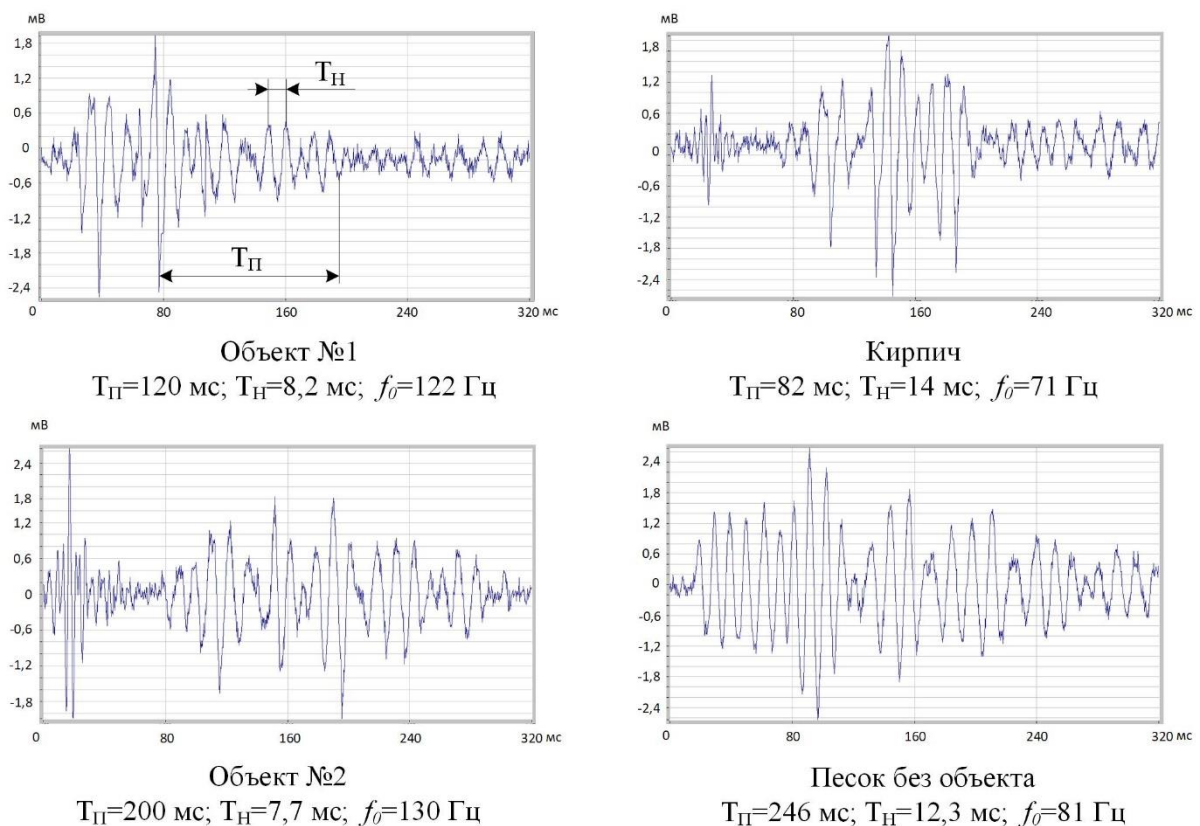


Рис. 7. Импульсные переходные характеристики объектов полученные с помощью радиолокатора

На рисунке 7 приведены вероятностные характеристики обнаружения при учете трех информационных параметров, КВК (R_0), $\frac{\Delta f}{f}$, $\bar{n} = \frac{T_{\Pi}}{T_H}$, при отношении сигнал/шум в 3 Дб по каждому параметру. В случае нормального закона

распределения шума вероятности ложной тревоги $P_{\text{ЛТ}} = 10^{-2}$, и правильного обнаружения по критериям Неймана-Пирсона составляет $P_{\text{ОБН}} = 0,97$

В этом случае отношение сигнал/шум оценивался как сумма квадратов этих нормированных параметров (12).

$$c / ш = \sqrt{R_0^2 + \Delta f^2 + n^2} \quad (12)$$

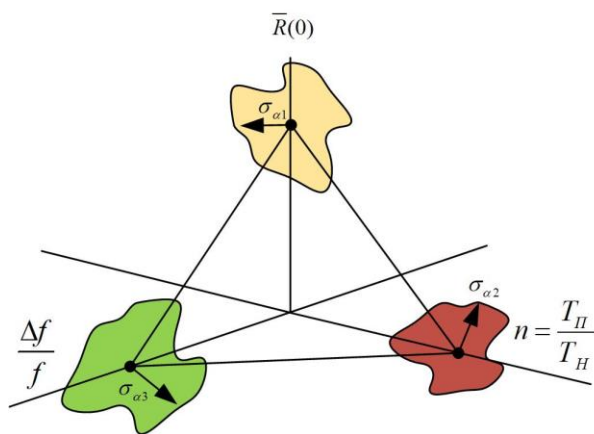
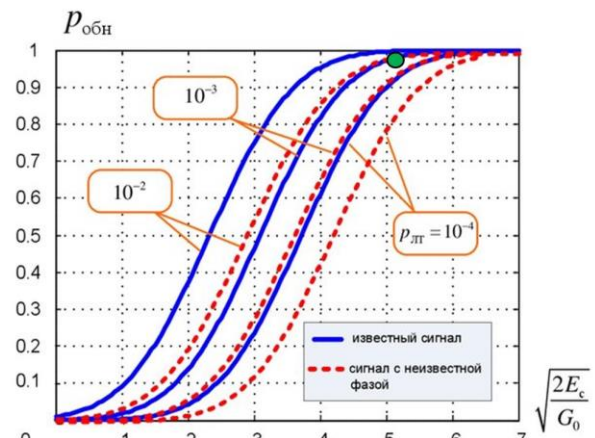


Диаграмма обнаружения объекта по трем наблюдаемым параметрам



Характеристики (кривые) обнаружения по критерию Неймана-Пирсона

Рис. 7. Диаграмма обнаружения объекта по трем наблюдаемым параметрам и характеристики обнаружения по критерию Неймана-Пирсона

При проведении опытных работ также была дана оценка чувствительности радиолокационного метода. В эксперименте использовались макеты радиолокаторов автодинного типа собственной разработки на рабочие частоты 2,5 и 10 ГГц с мощностью излучения около 1 мВт. Для оценки их чувствительности в качестве мишени объекта применялся акустический излучатель (АИ), амплитуда вибрации которого предварительно измерялась микрометром. На частоте 32 ГГц ДЛ-2,5 обеспечивал чувствительность 1,1 мм при отношении с/ш=6 дБ. Соответственно ДЛ-10 показал чувствительность 0,1 мм при отношении с/ш=12-15 дБ. Лучший результат показал ДЛ-10 с чувствительностью 0,05 мм при отношении с/ш=6 дБ;

В процессе обработки результатов эксперимента получена эмпирическая формула, связывающая амплитуду смещения с частотой и напряжением

подаваемом на АИ. Подготовлены рекомендации по доработкам доплер-локатора для улучшения точности регистрации амплитуды вибрации смещения.

В Главе 4 изложены материалы по разработке экспериментального комплекса, его состава, структурной схемы и технических требований к аппаратуре.

Предложен роботизированный комплекс, включающий базовую машину с командой операторов и несколько управляемых на расстоянии подвижных блоков-роботов (БР) с навесными сенсорами различных классов (изображен на рисунке 8). На данный комплекс автором был получен патент РФ.

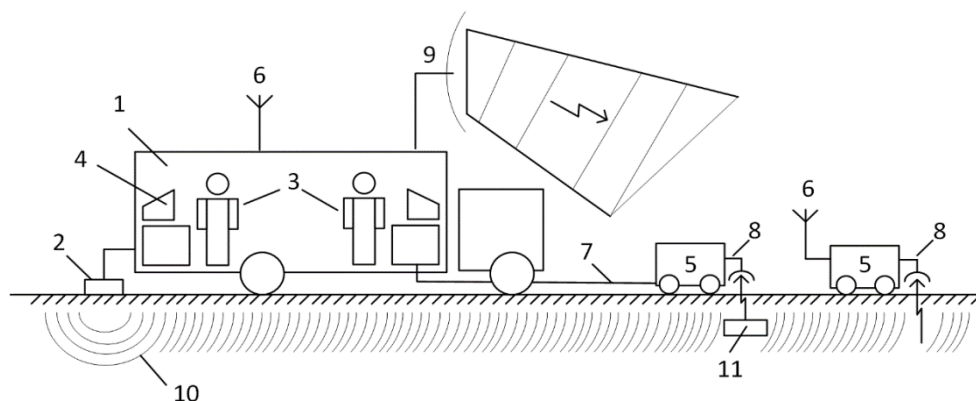


Рис. 8. Возможный вариант робототехнического комплекса

Здесь: 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 миноискатель; 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 механического резонанса оболочки объекта поиска -20- 500 Гц.

Поисковыми элементами на борту БР являются линейки 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. Параметрическая система дополняется датчиком тангенса угла потерь в грунте что позволяет улучшить вероятностные характеристики обнаружения объектов.

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

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

Выводы по диссертации

1. Впервые разработаны научно-технические основы параметрического метода поиска на основе взаимодействия сейсмических волн релеевского типа и электромагнитных излучателей радиолокатора (РЛС) в диапазоне частот в пределах 2,5-10 ГГц.

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

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

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

5. Экспериментально выявлены различия между шириной спектра отражённого РЛС сигнала от одновременной вибрирующей поверхности земли и с заглубленной в нее объектом искусственного происхождения. Заглубленный объект поиска отличается более узким спектром вибраций, что может использоваться для его идентификации.

6. Разработана структурная схема параметрического поискового прибора в комбинации с радиоволновым искателем, а также предложен состав устройства.

Рекомендации

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

2. Для считывания информационного сигнала целесообразно использование автодинных узкополосных РЛС в диапазоне частот 10-30 ГГц, позволяющие регистрировать поверхностное смещение грунта с выделением в приемнике собственных колебаний частот.

Перспективы дальнейшего развития работы

В направлении дальнейших работ необходимо создать подвижный стенд, исследовать характеристики наблюдаемых радиолокационных сигналов от искусственных объектов в различных условиях подстилающей поверхности. Разработать проект технического задания на опытный образец поискового комплекса.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

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

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

3. Кудинов, Д. С. Возможность реализации радиолокационного параметрического канала передачи информации с подводных аппаратов/ Д. С.

Кудинов, Р. Г. Шайдуров // Успехи современной радиоэлектроники. –2015. - №10. -С. 130-134.

4. Кудинов, Д. С. Радиолокационный параметрический метод поиска мин и минных полей в движении / Д. С. Кудинов, Р. Г. Шайдуров // Успехи современной радиоэлектроники. –2015. -№10. –С. 134-139.

5. Кудинов, Д. С. О возможности реализации экспериментального комплекса поиска мин и минных полей на основе радиолокационного параметрического метода / Д. С. Кудинов, Р. Г. Шайдуров // Сборник материалов ВНК Военной академии ВКО. «Состояние и перспективы развития системы противовоздушной обороны государств-участников СНГ», Т.1. секция 7.2. -ВА ВКО. –Тверь: 2016. –С. 159-167.

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

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

8. 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.

9. 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.