



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ И
РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ИМ. Н.В. ПУШКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**«РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ МАЛОЙ
И СВЕРХМАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ»
РМД 2024**

Тезисы XV научно-технической конференции

1 марта 2024 года

Научное электронное издание

Москва Троицк
2024

УДК 621.37
ББК 32.840
Р 24

Организатор конференции

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)

- Р24 Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности: сборник тезисов XV научно-технической конференции (Москва, Троицк 1 марта 2024 г.). Научное электронное издание. Под ред. В.И. Сахтерова, Москва: ИЗМИРАН, 2024. -148 с.
URL: <https://www.izmiran.ru/library>
ISBN 978-5-6052190-0-2

Представлены результаты исследований актуальных проблем, связанных с радиолокацией малой и сверхмалой дальности, подповерхностной георадиолокации, неразрушающего контроля в СВЧ диапазоне, радиолокационных систем безопасности, подповерхностной радиолокации и распространением радиоволн разных диапазонов в различных сферах;
Предназначен для специалистов в области радиолокации, радиофизики, геофизики и радиосвязи, а также для студентов, аспирантов и докторантов соответствующих специальностей.
Тезисы, рисунки и формулы представлены в авторской правке.

УДК 621.37
ББК 32.840

Электронное научное издание

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ МАЛОЙ И СВЕРХМАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ

Сборник тезисов XV научно-технической конференции

(Москва, Троицк 1 марта 2024 г.)

Под редакцией В.И. Сахтерова

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова.
(ИЗМИРАН) 108840 Москва Троицк Калужское шоссе 4.

ISBN 978-5-6052190-0-2

© ИЗМИРАН, 2024

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Секция 1. Неразрушающий контроль в СВЧ диапазоне

Секция 2. Радиолокационные и радиотехнические системы

Секция 3. Ионосфера и распространение радиоволн

Секция 4. Подповерхностная радиолокация

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель:

Кузнецов Владимир Дмитриевич, д-р физ.-мат. наук, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия.

Заместитель председателя:

Крашенинников Игорь Васильевич, д-р физ.-мат. наук, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия.

Ученый секретарь:

Рез Александр Иосифович, канд. физ.-мат. наук, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия.

Члены программного комитета:

1. Попов Алексей Владимирович, д.ф.-м.н., Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия.

2. Резников Александр Евгеньевич, д.ф.-м.н., профессор, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия.

3. Едемский Дмитрий Евгеньевич, к.т.н., Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия.

4. Ивашов Сергей Иванович, к.т.н., Московский государственный технический университета им. Н.Э. Баумана.

5. Андреев Степан Николаевич, д.ф.-м.н., Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет).

6. Иванов Андрей Александрович, к.г.-м.н., доцент, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе

7. Николаев Алексей Владимирович, д.т.н., доцент, Московский технический университет связи и информатики.

8. Морозов Павел Анатольевич, к.ф.-м.н., ООО "Компания ВНИИСМИ"

9. Дуйсиналиев Нурбулат Амангельдиевич, ООО «Интерраскан»

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Сахтеров В.И., к.ф.-м.н. — председатель оргкомитета.

Маркушенов А.И., зам. директора — член оргкомитета.

Члены оргкомитета

1. Осин А.И., зав. ИВЦ, к.ф.-м.н. — член оргкомитета.

2. Гулевич О.А., к.ф.-м.н. — член оргкомитета.

3. Прокопович И.В., к.ф.-м.н. — член оргкомитета.

4. Антипов В.В., вед. инженер, к.т.н. — член оргкомитета.

5. Митин О.В., сотрудник ИВЦ, — член оргкомитета.

6. Горкин Д.С., вед. инженер, — член оргкомитета.

7. Корсукова В.С., ст. инженер, — член оргкомитета.

8. Беликова Т.М. зав. канцелярией — член оргкомитета.

9. Щирый А.О., к.т.н., — член оргкомитета.

10. Бершадская И.Н., ученый секретарь ИРР, — член оргкомитета.

СОДЕРЖАНИЕ

Вступительное слово.....	6
Пленарный доклад	
Ивашов С.И. История исследований, разработки и использования подповерхностных радиолокаторов в СССР и России с 60-х годов по настоящее время.....	8
Секция «Неразрушающий контроль в СВЧ диапазоне»	
Волошин А.Ю., Николаев А.В., Фам Д. Х. Нгуен В.К. Принцип оптической селекции при радиодетектировании нелинейных объектов поиска.....	16
Ивашов С.И. Разевиг В.В., Журавлев А.В. Применение СВЧ голографии для неразрушающего контроля армированного пенополиуретана.....	20
Маханов К.М. Исследование радиопоглощающих материалов в диапазоне 80-120 ГГц.....	24
Секция «Радиолокационные и радиотехнические системы»	
Ахмад А., Хасанн Д. Повышение эффективности передачи данных в радиотехнических системах.....	28
Богати С.Р., Щербаков Г.Н., Николаев А.В., Рычков А.В., Прохоркин А.В. Электромагнитные методы поиска УТР кабеля в укрывающей среде.....	32
Горкин Д.С. Повышение динамического диапазона импульсного георадара.....	36
Нгуен В.К., Фам Д. Х., Волошин А.Ю., Николаев А.В. Оценка характеристик обнаружения НРЛС безопасной машины.....	40
Сахтеров В.И. Способы управления диаграммой направленности антенн георадара.....	44
Фам Д. Х., Нгуен В.К., Николаев А.В., Волошин А.Ю. Сравнительный анализ методов определения угловых координат для применения в безопасных машинах	48
Секция «Ионосфера и распространение радиоволн»	
Капустина О.В., Дружин Г.И. Передвижной комплекс ОНЧ-регистрации.....	54
Колесник С.А., Романов И.В., Пикалов М.В., Тужилкин Д.А. Исследовательский ионозонд «ТОМИОН».....	58
Королева К.Д. Общие сведения об отечественных моделях земной атмосферы.....	62
Лундин Б.В. Об изменении спектральной прозрачности плазменного фона в ОНЧ диапазоне частот при адгезии электронов загрязнениями.....	67
Митин О.В., Крашенинников И.В. Особенности DUC/DDC SDR в приемном тракте программно-аппаратного комплекса вертикального зондирования ионосферы в период ионосферных бурь.....	72
Носиков И.А., Клименко М.В., Падохин А.М., Носикова В.В. Применение метода обобщенной силы для решения краевой задачи о расчете лучевых траекторий радиоволн в трехмерной анизотропной ионосфере.....	78
Щирый А.О. Использование нейронных сетей для дальнейшего развития программной части аппаратно-программных комплексов радиозондирования ионосферы.....	82
Секция «Подповерхностная радиолокация»	
Аверин А.А., Варенков В.В., Горкин Д.С., Сахтеров В.И. Измерение длины электропроводящих свай бесконтактным способом при помощи георадара (стендовый).....	86
Антипов В.В., Горкин Д.С., Дуйсиналиев Н.А. Опыт применения георадиолокации для геотехнического обследования объектов ООО «ГРК Быстринское».....	90
Барков Е.В., Аверин А.А., Корсукова В.С., Шнерук С.А., Горкин Д.С., Сахтеров В.И. Эксперименты по георадиолокации с летательного аппарата.....	96

Беркут А.И., Морозов П.А., Попов А.В. Георадар для глубинных геологических исследований, наиболее часто используемые направления применения.....	100
Боярина Е.Д., Шлыков В.В., Зильберштейн А.Р., Янченко С. Г. Определение ширины зазоров с миллиметровым разрешением с использованием машинного обучения в задачах подповерхностного зондирования.....	104
Бычков Г.В., Дуйсиналиев Н.А., Горкин Д.С., Сахтеров В.И., Антипов В.В., Аверин А.А. Экспресс-изыскания георадарами наземного и воздушного базирования.....	108
Варенков В.В., Горкин Д.С., Смирнов Д.А., Сахтерова Т.В., Сахтеров В.И. Поисковый георадар «Сфера».....	112
Горкин Д.С., Антипов В.В., Аверин А.А. Георадиолокация западного берега дна озера Байкал (стендовый).....	116
Горкин Д.С. Сравнение георадаров Питон, Тритон, Грот, Лоза, Сфера.....	124
Едемский Д.Е., Тумской В.Е. Прокопович И.В. Опыт применения георадиолокации для изучения ледяных жил	129
Едемский Д.Е., Прокопович И.В. Применение георадиолокации при выявлении зон разрывных нарушений	133
Лазарев М.А., Боголюбов Л.А., Морозов П.А. Оценка диаграммы направленности георадара в археологических исследованиях на полуострове Крым.....	137
Морозов Ф.П., Морозов П.А., Попов А.В. Георадарное обследование Патомского кратера.....	141

Вступительное слово

В начале 90-х годов была полностью разрушена сложившаяся в СССР система финансирования научных исследований, а также в значительной мере пострадали научные связи и система обмена и получения научной информации. В это время каких-либо мероприятий, связанных с исследованиями и разработками в области подповерхностной радиолокации, не проводилось совсем или они носили нерегулярный характер.

В начале нулевых годов в связи с общим оживлением экономики и улучшением финансирования научных исследований возникла необходимость в появлении научного

форума посвященного георадарам и близко связанным областям коротко-импульсной радиолокации. Так сложилось, что эти исследования и разработки в основном проводились в Москве и московском регионе: МГТУ им Н.Э. Баумана, МФТИ, ИЗМИРАН, МАИ, ИРЭ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова и ЛОГИС-ГЕОТЕХ. Но и вдали от Москвы: ФГНУ НИРФИ, г. Н.-Новгород, а также в Южно-Уральском



Проф. И.Я. Иммореев
на конференции РМД 2009 г.



Академик РАН А.С. Бугаев
на конференции РДМ 2018 г.

университете и ООО «ПЛАНАР» г. Челябинск. В 2004 г. по инициативе Лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им Н.Э. Баумана и кафедры Аналоговые и цифровые радиосистемы МАИ был учреждён ежегодный семинар, первое заседание которого состоялось 24 декабря 2004 г. Надо отметить значительную роль, которую сыграл в этом заведующий этой кафедрой проф., д.т.н. Игорь Яковлевич Иммореев (1930-2012 гг.). Игорь Яковлевич был известным ученым, конструктором вооружений, лауреатом [Государственной премии СССР](#) (1980). До того, как возглавить кафедру, являлся главным инженером ВНИИ радиотехники. Уже первые заседания 2004-2007 гг. показали, что рамки семинара являются тесными, учитывая количество и географию участников. На его базе была учреждена научно-техническая конференция «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности» (РМД), которая со временем приобрела международный характер. Активное участие в работе конференции принимали ученые с Украины (ГНИЦ "АЙСБЕРГ", г. Киев; Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков; Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Научный центр Сухопутных войск Академии сухопутных войск, г. Львов), Белоруссии (Белорусский Государственный Университет, г. Минск) и Казахстана (Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева), а также дальнего зарубежья – TUBITAK, Marmara Research Center, Турция; Технологический университет Гаваны, Куба; Ramos, Чехия, и «MIRAMAP» Нидерланды. К сожалению, события 2014 г. на Украине в значительной мере подорвали сложившееся и весьма успешное международное сотрудничество.

Успех конференции был во многом обеспечен тем, что с самого начала в 2004 г. был создан её сайт <https://seminar.rslab.ru/>, на котором публиковались доклады участников, вёлся фотоотчёт и проходила регистрация участников. Эту работу обеспечивал сотрудник Лаборатории дистанционного зондирования и постоянный докладчик, к.т.н. В.В. Разевиг. Техническая поддержка конференции обеспечивала популяризацию её результатов и привлекала к её участию многих видных зарубежных и российских ученых, включая членов РАН.

Тематика конференций включала в себя, кроме традиционных георадарных приложений по зондированию грунтов, и другие области:

Инженерная геология;

Измерение толщины морского и пресноводного льда;

Неразрушающий контроль диэлектрических и композиционных материалов;

Медицинская диагностика;

Обнаружение и диагностика людей за строительными конструкциями;

Археология и обследование объектов культурного наследия;

Гуманитарное разминирование;

Свойства и области использования терагерцового диапазона

Конструирование импульсных и голографических радиолокаторов;

Криминалистика.

Это далеко неполный перечень тематики конференций РМД за 2004-2024 гг.

По взаимной договорённости с 2024 г. постоянным местом проведения конференции РМД с 2024 г. стал Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН). Это объясняется в первую очередь высоким академическим престижем института и тем вкладом, который внесли его сотрудники в развитие исследований и техники подповерхностной радиолокации.

Конференция РМД, которая была успешно проведена 1 марта 2024 г. в ИЗМИРАНе <https://rmd2024.izmiran.ru/>, подчеркнула интерес научного сообщества к данной тематике. На конференции было представлено 30 докладов, включая зарубежный и стендовые. Тезисы докладов представлены в данном сборнике.

Председатель Оргкомитета РДМ 2024
к.ф.-м.н., В.И. Сахтеров,
заведующий сектором научного
приборостроения ИЗМИРАН
<https://www.izmiran.ru/~sahterov/>

Член Программного комитета
к.т.н., С.И. Ивашов,
лауреат премии Правительства РФ,
начальник лаборатории дистанционного
зондирования МГТУ им. Баумана
sivashov@rslab.ru ; <http://www.rslab.ru>

История исследований, разработки и использования подповерхностных радиолокаторов в СССР и России с 60-х годов по настоящее время

Ивашов С.И. (Лаборатории дистанционного зондирования
МГТУ им. Н.Э. Баумана, sivashov@rslab.ru)*

Аннотация

В данной работе описана краткая история исследований и разработок в области поверхностной радиолокации, начиная с 60-х годов в СССР и заканчивая современностью в России и соседних государствах, образовавшихся после его распада. Отмечается выдающаяся роль, которую сыграли в начальный период развития этой технологии проф. М.И. Финкельштейн и его коллеги. Их исследования оказали существенное влияние на последующие события на пространстве бывшего СССР.

Ключевые слова: история GPR в СССР и России, исследования и разработки, неразрушающий контроль

Введение

В радиолокационной технике существует особое направление исследований, связанное с исследованием оптически непрозрачных диэлектрических сред, но частично проницаемых для электромагнитных волн в радио и СВЧ диапазонах на частотах от 10 МГц до 10 ГГц. К таким средам относятся почва, горные породы, пресный и морской лед, строительные конструкции и многие конструкционные материалы и композиты. В этих средах электромагнитные волны подвержены затуханию, иногда очень сильному, но при этом сохраняется возможность регистрации отраженного сигнала от неоднородностей, расположенных в обследуемой среде. Преимущество радиолокационного зондирования сред, например, перед рентгеновским, заключается в возможности исследования среды при одностороннем доступе к ней (т. е. при наблюдении только отраженного сигнала). Этот случай особенно актуален при исследовании почвогрунтов и подземных сооружений. Многие наземные здания и инженерные сооружения также не допускают двустороннего доступа с тем, чтобы регистрировать сигнал «на просвет». Это открывает возможность использовать такие радары как средства неразрушающего контроля. Радары такого типа получили в отечественной научной литературе различные названия, например, подповерхностный локатор. Стоит отметить, что в русской литературе также часто используется термин георадар. Это связано с широким применением этой технологии в геофизических исследованиях. В англоязычной литературе получила широкое распространение аббревиатура GPR от Ground-Penetrating Radar, которая обычно используется для обозначения всего класса поверхностных радиолокаторов. Часто используется также термин subsurface radar. Первый термин по смыслу гораздо уже последнего, но научная традиция исторически отдает предпочтение этому сокращению.

Начало георадарных исследований в СССР

Начало исследований в области подповерхностной радиолокации в Советском Союзе в 60-80-е годы неразрывно связано с именем выдающегося ученого, профессора Моисея Ионовича Финкельштейна (1922 – 1992 гг.), работавшего в Рижском краснознаменном институте инженеров гражданской авиации (РКИИГА) в Латвии. В то время Латвия была частью Советского Союза.

В начальный период эти исследования были связаны с необходимостью дистанционного измерения толщины морского льда с помощью бортовых приборов самолета. Задача имела первостепенное значение для Советского Союза из-за необходимости обеспечения судоходства в Арктике. Ввиду своей важности этот маршрут имел собственное название — Северный морской путь (СМП). Эти исследования были успешно завершены в 80-х годах разработкой бортового прибора «Аквamarin». Данная РЛС была успешно испытана во льдах Арктики на СМП. За её разработку и исследования в области подповерхностной радиолокации М.И. Финкельштейну в 1984 году была присуждена Государственная премия СССР, Рисунок 1. Однако из-за распада СССР это направление работ не получило дальнейшего развития и, фактически, была прекращена.



Рисунок 1: Проф. М.И. Финкельштейн (в центре) и его коллеги по РКИИГА В.Г. Глушнев и Е.И. Лазарев в 80-е годы после получения Государственной премии СССР.

М.И. Финкельштейн и его учеников оказали исключительное влияние на последующие работы в этой области в СССР, а затем и в России. Этот период ознаменовался публикацией нескольких статей и книг, которые оказали большое влияние на последующие исследования, связанные с георадарами в Советском Союзе [1]–[7].

Аналогичные усилия в РКИИГА были предприняты для разработки приборов, способных измерять толщину пресноводного льда на реках и озерах. Актуальность данных исследований была связана с необходимостью обеспечения безопасности транспортных колонн в Сибири в зимний период, где дорожная сеть крайне разрежена, а мосты и переправы через водные преграды во многих местах отсутствуют. Причем автомобильный транспорт часто передвигались по льду замерзших рек, т.к. сухопутные пути были совершенно непроходимы. Другой проект РКИИГА по геофизическим радарам для приповерхностного зондирования грунта был начат в 1972 г. В эти годы были предложены и разработаны основы построения георадаров и обработки регистрируемых сигналов. Исследования

Переход от аналоговых к цифровым устройствам

Первые разработанные георадары были крайне несовершенны и требовали длительной обработки сигналов в лаборатории. Первоначальный сигнал георадара записывался на катушечный магнитофон, затем с помощью осциллографа и коллиматора регистрировался на фото пленке, которая требовала мокрой проявки. Более того, ранние прототипы были достаточно примитивными, словно созданными радиолюбителями. Во многом это было связано с отсутствием малогабаритных средств отображения информации, способных работать в полевых условиях, и подходящих электронных компонентов. Несомненно эти обстоятельства сдерживали внедрение георадарных технологий в широкую практику. Прорывом начала 80-х годов стало появление первого промышленного подповерхностного радиолокатора YL-R2, созданного японской компанией OYO, Рисунок 2. Это устройство, хотя и будучи аналоговым, позволяло получать информацию в реальном масштабе времени непосредственно на месте проведения измерений со встроенных принтеров, а при необходимости сразу повторять измерения. Появление этого устройства на рынке оказало существенное влияние на дальнейшее развитие техники подповерхностной радиолокации не только в СССР, но и во всем мире.

В 80-е годы в СССР начала широко внедряться цифровая обработка сигналов с помощью аналого-цифровых преобразователей. Это буквально произвело революцию во всей области подповерхностной радиолокации, позволив создавать инструменты с отображением информации в реальном масштабе времени.

В то же время появились электронные компоненты, позволяющие генерировать и регистрировать все более короткие импульсы, что в свою очередь привело к уменьшению размеров антенн и улучшению пространственного разрешения в плоскости зондирования. Тогда же в СССР, как и во всем мире, возник интерес к использованию георадаров для обнаружения сухопутных мин.



Рисунок 2. Подповерхностный радиолокатор YL-R2 производства корпорации OYO, Япония.

Эксперименты по регистрации СВЧ-изображений мин

Военные конфликты во всем мире характеризуются широким применением как противопехотных, так и противотанковых мин. Начиная с 1960-х годов, значительная часть установленных мин имела пластиковые корпуса, а некоторые почти не имели металлических частей, что затрудняло их обнаружение металлодетекторами, которые были основным инструментом саперов. Основная угроза широкого распространения мин происходит не столько для воюющих сторон, которые обычно имеют средства и опыт для борьбы с ними, сколько для гражданского населения во время и главным образом после окончания конфликта. Это потребовало разработки новых эффективных средств разминирования, которые позволили бы повысить их производительность, а также снизить стоимость этих работ и потери среди саперов. Снижение стоимости разминирования особенно важно при ликвидации последствий военных конфликтов, при так называемом гуманитарном разминировании.

Основной проблемой, возникающей при разминировании, является высокий уровень ложных тревог при использовании стандартных инструментов разминирования. Одним из способов их снижения на фоне отражений от неоднородностей грунта и сторонних объектов могла стать возможность видеть форму заглубленного объекта.

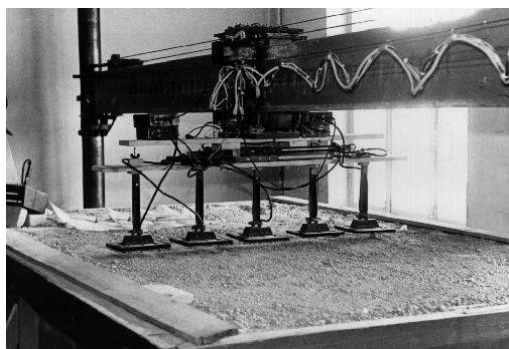


Рисунок 3. Экспериментальная установка, предназначенная для регистрации СВЧ-изображений мин.

Во второй половине 80-х годов в Лаборатории дистанционного зондирования [8] предложили использовать технологии подповерхностных радиолокаторов для получения СВЧ-изображений мин в плоскости зондирования земной поверхности. Экспериментальная установка для регистрации таких изображений, разработанная сотрудниками лаборатории, приведена на Рисунке 3. Установка представляла собой линейную решетку из нескольких датчиков с рабочей частотой 600 МГц.

В качестве объектов обнаружения использовались итальянские и советские противотанковые мины в пластиковых и металлических корпусах. Итальянская мина с пластиковым корпусом изображена на Рисунке 4. Одно из таких полученных

радиолокационных изображений показано на Рисунке 5. На нем видны СВЧ-изображения двух противотанковых мин (с металлическим и пластиковым корпусом) в центре пробного минного поля, кусок металлической трубы в слева, металлическая пластина в правом нижнем углу и кирпич в правом верхнем углу.

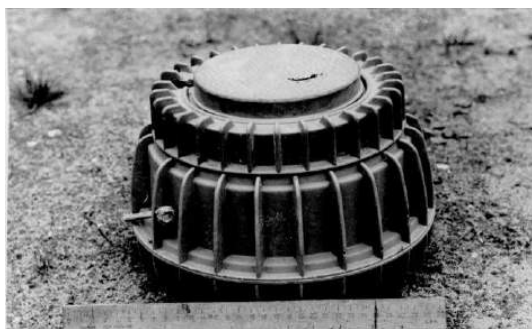


Рисунок 4. Итальянская мина ТС-6.1 с пластиковым корпусом.

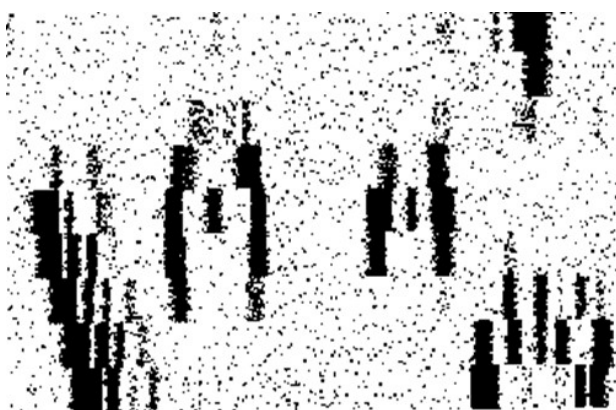


Рисунок 5. СВЧ-изображение двух мин (в центре), отрезок металлической трубы (слева), алюминиевая пластина (справа внизу) и закопанный кирпич (справа сверху).

Подобные изображения, зарегистрированные в 1990 году, были получены, по-видимому, впервые в мире. Получение необходимых разрешений для публикации этих результатов на международной конференции по гуманитарному разминированию MD'98 в Эдинбурге, Великобритания, заняло много времени. Доклад на конференции MD'98 [9] вскоре был перепечатан в журнале IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine [10].

В Советском Союзе возможности международного научного сотрудничества были строго ограничены не только по политическим соображениям, но и по причине всеобщей секретности. В современной России эти ограничения в основном сняты, а в 90-х начали публиковать почти все, что угодно. Учитывая, что задача гуманитарного разминирования носит международный характер, сотрудники Лаборатории смогли быстро установить контакты с учёными других стран и начать совместные исследования в этой области [11]–[14].

Исследование и разработка голографических подповерхностных радиолокаторов

Еще одним научным направлением, которое начало развиваться в нашей Лаборатории в середине 90-х годов, стало создание голографических подповерхностных радиолокаторов, предназначенных для исследования строительных конструкций и неразрушающего контроля композиционных материалов, которые широко используются в аэрокосмической промышленности [15]–[17]. Для этих целей был создан малогабаритный голографический подповерхностный радиолокатор РАСКАН, Рисунок 6.



Рисунок 6: Голографический подповерхностный радиолокатор РАСКАН, разработанный в Лаборатории дистанционного зондирования.

Позднее эта же технология была использована для обследования объектов культурного наследия и археологических памятников [18]–[21]. Следует отметить, что хотя эти исследования и разработки были начаты в Лаборатории, в дальнейшем они были продолжены в тесном сотрудничестве с коллегами из США, Италии, Японии и Великобритании. Важно, что такие исследования были поддержаны российскими (РФФИ и РНФ) и международными (ISTC, NATO, EU COST Action) грантами. Международное научное сотрудничество и грантовая поддержка оказали благотворное влияние на развитие направления

голографических подповерхностных радиолокаторов в России. Российские ученые принимали активное участие в международных конференциях GPR, IWAGPR и PIERS и др., выступали с докладами и входили в состав оргкомитетов этих конференций.

Одним из знаковых событий, связанных с этими исследованиями, стало участие в летней юбилейной выставке Лондонского королевского общества в 2010 году. В рамках совместного международного проекта, связанного с гуманитарным разминированием, был представлен голографический подповерхностный радиолокатор РАСКАН, разработанный в Лаборатории дистанционного зондирования. В это время участие русских вызывало на Западе неподдельный интерес. Стенд Лаборатории не только был единственной российской экспозицией на выставке, но и был включен в число пяти экспозиций для демонстрации VIPам. Стенд лаборатории посетила Ее Величество Королева Англии Елизавета II, чтобы ознакомиться с этой новой российской технологией, Рисунок 7. Не обошло вниманием нашу экспозицию и отечественное телевидение [22].

Голографические подповерхностные радиолокаторы предназначены для исследования сравнительно небольших глубин, что достаточно для многих технологических приложений в области неразрушающего контроля и испытания диэлектрических материалов и конструкций [23]. Их преимуществом является высокая разрешающая способность в плоскости зондирования, что особенно важно, например, при исследовании произведений искусства [20]. Однако с 80-х годов основным направлением развития георадаров стали считать импульсные подповерхностные радиолокаторы. Благодаря своим конструктивным особенностям они способны достичь максимальной глубины проникновения в среды с потерями [1], [24]. Далее будут



Рисунок 7. Ее Величество Королева Елизавета II знакомится с новой российской технологией.

рассмотрены основные производители серийных импульсных подповерхностных радиолокаторов в странах бывшего СССР.

Производство георадаров в России

Основным производителем импульсных подповерхностных радаров в России является группа компаний «ЛОГИС-Геотех». Еще в 1989 году ведущие конструкторы НИИ приборостроения им. В.В. Тихомирова (г. Жуковский, Московская область) в рамках конверсии ОПК были переориентированы на разработку и производство перспективного геофизического оборудования на основе накопленного научно-технического потенциала. В 1992 году руководство НИИП и его ключевые сотрудники основали компанию «ЛОГИС» (г. Раменское Московской области), которая начала серийное производство георадиолокационного и сейсмического оборудования, продолжая при этом разработку детекторов взрывчатых веществ. Несомненно, ведущую роль в организации разработок и производства георадаров сыграл Н.П. Семейкин.

Активное развитие компании «ЛОГИС» и расширение ее деятельности привели к открытию нового направления – инженерных изысканий с использованием системы геофизического оборудования. Позднее «ЛОГИС» была преобразована в Группу компаний «ГЕОТЕХ», в состав которой вошел Научно-производственный центр георадиолокационных технологий [25]. «ГЕОТЕХ» занимается не только продвижением геофизического оборудования, но также разрабатывает и применяет на практике новые методы инженерных изысканий, выполняет комплексные геофизические исследования для различных отраслей народного хозяйства.

В последние годы значение геофизических исследований в России неуклонно возрастает. На сегодняшний день приборы и услуги Группы компаний «ГЕОТЕХ» широко используются на железных и автомобильных дорогах, в нефтегазовой отрасли, строительной индустрии и во многих других отраслях отечественной и зарубежной промышленности. Одним из последних георадаров производства «ГЕОТЕХ» является прибор ОКО-3 [26]. Это портативная, легкая и недорогая система, предназначенная для неразрушающего мониторинга окружающей среды. Георадар ОКО-3 включает в себя блок управления и антенны в нескольких диапазонах частот. Все антенны взаимозаменяемы и отвечают потребностям широкого спектра применений. Главная заслуга компании «ЛОГИС-ГЕОТЕХ» состоит в том, что она удовлетворила основные потребности российского рынка в георадарах, которые по своим потребительским свойствам не уступают зарубежным аналогам, но существенно дешевле. Этим объясняется экспортный потенциал компании. При этом заметный вклад своими научными исследованиями в расширение областей применения георадаров вносят и сотрудники компании «ГЕОТЕХ» [27], [28].

Производство георадаров в Латвии

Прямым наследником научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, проводившейся в 60-80-е годы под руководством профессора М.И. Финкельштейна, стала компания Radar Systems Inc. [29], созданная в 1989 году его учениками и последователями. Эта компания создавалась на базе Проблемной лаборатории авиационной подповерхностной радиолокации Рижского авиационного университета для проведения исследований и разработок в области георадарных технологий, аппаратного и программного обеспечения для решения задач мониторинга окружающей среды, инженерно-геологических изысканий, измерения толщины морского и пресноводного льда и др. Эти исследования увенчались разработкой ряда георадаров типа ZOND, LOUCH, PROFILE и PYTHON.

Последний представляет собой наземный аналог космического гайдропного радара, который предполагалось использовать для подповерхностного зондирования Марса в печально известном проекте Марс-96, Россия, разработанный исследователями Radar Systems, Inc. в тесном сотрудничестве с коллегами из



Рисунок 8. Георадар ЗОНД-12
с антенной 300 МГц.

Национального космического агентства Франции (CNES) и Service d'Aeronomie (CNRS). В настоящее время Radar Systems Inc. серийно выпускает портативный универсальный георадар ЗОНД-12 показанный на Рисунке 8.

Производство георадаров на Украине

Transient Technologies LLC [30], г. Киев – ведущий разработчик и производитель георадарного оборудования на Украине. Инженеры компании ведут исследования и разработки в области сверхширокополосных технологий с 1998 года. Современное высокотехнологичное производство Transient Technologies LLC и огромный технический опыт ее сотрудников позволяют найти оптимальные решения для поиска подземных объектов и неразрушающего контроля материалов с учетом самых высоких требований клиентов. Более 15 стран обеспечивают дистрибуцию и полную техническую поддержку георадарной продукции Transient Technologies LLC. Инновационные технологии, используемые при создании георадиолокационного оборудования и их надежность, позволили предприятию стать лучшим украинским производителем и узнаваемым брендом среди ведущих мировых производителей георадаров, а также создавать отличные георадиолокаторы, такие как серия VIYR3, Рисунок 9.



Рисунок 9. Георадар VIY3-500.

Заключение

В данной работе автор не ставил своей целью описать полную историю развития георадарных технологий в СССР и странах, которые образовались в результате его распада. Для этого пришлось бы написать отдельную монографию. Скорее это его субъективный взгляд на события, которые повлияли на внедрение, исследования и разработки в области георадаров в наших странах.

В заключительной части работы упомянуты только те производители, которые наладили серийное производство и заняли существенную нишу не только в своих странах, но хорошо известны за рубежом. На самом деле производителей значительно больше, но были упомянуты наиболее крупные в каждой из стран.

Благодарности

Автор хотел бы поблагодарить В.П. Золотарева, Radar Systems Inc., Рига, Латвия, за помощь и ценные советы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №21-19-00043, <https://rscf.ru/project/21-19-00043/>.

Библиография

1. M.I. Finkelstein, "Subsurface Radar: Principal Problems of Development and Practical Use," Proc. IGARSS'91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management, Espoo, FI, June 3-6, 1991, pp. 2145-2147, doi: 10.1109/IGARSS.1991.575464.
2. V.N. Metelkin, and M.I. Finkelstein, "Digital Processing by Sea Ice Thickness Measuring," Proc. IGARSS'91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management, Espoo, FI, June 3-6, 1991, pp. 2481-2482, doi: 10.1109/IGARSS.1991.575548.
3. A.N. Peshkov, M.I. Finkelstein, A.I. Smutov, A.G. Vasin, and K.I. Klemiato, "Using of Radiolocation Measuring Devices of Freshwater Ice Thickness," Proc. IGARSS'91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management, Espoo, FI, June 3-6, 1991, pp. 1575-1575, doi: 10.1109/IGARSS.1991.579488.

4. М.И. Финкельштейн, В.А. Кутев, В.П. Золотарев; Под ред. М.И. Финкельштейна, Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии, М.: Недра (1986), С. 128, <https://www.geokniga.org/books/12419?ysclid=lo1nunk6qd831656065>
5. М.И. Финкельштейн, В.И. Карпухин, В.А. Кутев, В.Н. Метелкин; Под ред. М.И. Финкельштейна, Подповерхностная радиолокация, М.: Радио и связь (1994), С. 216, ISBN 5-256-01044-1, <https://www.geokniga.org/books/18923?ysclid=lo1o8r95h0212782025>
6. М.И. Финкельштейн, "Некоторые вопросы радиолокационного зондирования тонких слоистых сред", Радиотехника и электроника, 1974, Т.19, №.3. С. 528-536
7. В.И. Карпухин, А.Н. Пешков, М.И. Финкельштейн, "Зондирование сельскохозяйственных посевов радиоимпульсами наносекундной длительности," Радиотехника и электроника, 1989, Т. 34, № 3, С. 550-556
8. <https://www.rslab.ru/english/>
9. S.I. Ivashov, V.N. Sablin, I.A. Vasilyev, N.V. Nikiforov, and V.E. Minkov, "Wide-Span Systems of Mine Detection," Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines, MD'98, Edinburgh, UK, October 12-16, 1998, pp. 78-80, doi: 10.1049/cp:19980693.
10. S.I. Ivashov, V.N. Sablin, and I.A. Vasilyev, "Wide-Span Systems of Mine Detection," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 14, no. 5, pp. 6-8, May 1999, doi: 10.1109/62.765772.
11. S.I. Ivashov, V.I. Makarenkov, V.V. Razevig, V.N. Sablin, A.P. Sheyko, and I.A. Vasiliev, "Remote Control Mine Detection System with GPR and Metal Detector," Eight International Conference on Ground-Penetrating Radar, GPR'2000, University of Queensland, Gold Coast, Queensland, AU, May 23-26, 2000, pp. 36-39, doi: 10.1117/12.383598.
12. L. Capineri, S. Ivashov, T. Bechtel, A. Zhuravlev, P. Falorni, C. Windsor, G. Borgioli, I. Vasiliev, and A. Sheyko, "Comparison of GPR Sensor Types for Landmine Detection and Classification," 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, Birmingham, UK, June 16-19, 2008, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55130760>.
13. T. Bechtel, L. Capineri, P. Falorni, M. Inagaki, S. Ivashov, and C. Windsor, "Investigation of Holographic Radar Capabilities for the Detection of Shallow Buried Plastic Antipersonnel Landmines," Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2012, Kuala Lumpur, MY, March 27-30, 2012, doi: 10.13140/2.1.3784.5442.
14. T. Bechtel, L. Capineri, C. Windsor, M. Inagaki, and S. Ivashov, "Comparison of ROC Curves for Landmine Detection by Holographic Radar with ROC Data from Other Methods," 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Florence, IT, July 7-10, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/IWAGPR.2015.7292645.
15. I.A. Vasiliev, S.I. Ivashov, V.I. Makarenkov, V.N. Sablin, and A.P. Sheyko, "RF Band High Resolution Sounding of Building Structures and Works," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 14, no. 5, pp. 25-29, May 1999, doi: 10.1109/62.765776.
16. S.I. Ivashov, V.I. Makarenkov, V.V. Razevig, V.N. Sablin, A.P. Sheyko, and I.A. Vasiliev, "Concrete Floor Inspection with Help of Subsurface Radar," Eight International Conference on Ground-Penetrating Radar, GPR'2000, University of Queensland, Gold Coast, Queensland, AU, May 23-26, 2000, pp. 552-555. doi: 10.1117/12.383629.
17. Zhuravlev, V. Razevig, M. Chizh, and S. Ivashov, "Non- Destructive Testing of Foam Insulation by Holographic Subsurface Radar," 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, IWAGPR 2017, Edinburgh, UK, June 28-30, 2017, doi: 10.1109/IWAGPR.2017.7996087.
18. L. Bossi, P. Falorni, C. Windsor, F. Zandonai, F. Bizzarini, M. Delfino, L. Giusberti, T. Bechtel, M. Chizh, S. Ivashov, and L. Capineri, "The Imaging of Subsurface Crocodile Remains in a Limestone Slab Using Holographic Radar," 18th International Conference on Ground Penetrating Radar, Golden (CO), US, June 14-19, 2020, pp. 6-9, doi: 10.1190/gpr2020-003.1.
19. S. Ivashov, T. Bechtel, V. Razevig, L. Capineri, and M. Inagaki, "A Proposed Radar Method for Non-Destructive Investigation of Egyptian Pyramids," Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 63, No. 1, January 2021, pp. 12-19, doi: 10.1784/insi.2021.63.1.12.
20. S.I. Ivashov, V.V. Razevig, D.L. Sergeev, A.S. Bugaev, F. Zhou, E.I. Prokhanova, A.V. Shcherbakova, S.N. Dobrynin, and M. Vasilenkov, "An Example of Microwave Holography Investigation of an Old Orthodox Russian Icon Dated to 19th Century," Heritage, 5, No. 3, September 2022, pp. 2804-2817, doi: 10.3390/heritage5030145.
21. L. Capineri, P. Falorni, S. Ivashov, A. Zhuravlev, I. Vasiliev, V. Razevig, T. Bechtel, and G. Stankiewicz, "Combined Holographic Subsurface Radar and Infrared Thermography for Diagnosis of the Conditions of Historical Structures and Artworks," Near Surface Geophysics, Volume 8, No. 5, February 2010, pp. 355-364, doi: 10.3997/1873-0604.2010005.

22. <http://www.ltv.ru/news/techno/156903>
23. V.V. Razevig, S.I. Ivashov, I.A. Vasiliev, A.V. Zhuravlev, T. Bechtel, and L. Capineri, "Advantages and Restrictions of Holographic Subsurface Radars. Experimental Evaluation," Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar, Lecce, IT, June 21-25, 2010, pp. 657-662, doi: 10.1109/ICGPR.2010.5550241.
24. D.J. Daniels, Surface-Penetrating Radar, Institute of Electrical Engineers Radar Series; ERA Technology: London, UK, 1996; ISBN 0-85296-862.
25. <https://geotechru.com/>
26. https://www.geotech.ru/georadar_oko3/?ysclid=lsj1b1v362375076556
27. N. Pudova, A. Urusova, M. Shirobokov, and A. Marchkov, "Developing GPR Surveys, Data Processing and Interpretation Techniques for Criminal Gravesites Location," 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Hong Kong, HK, June 13-16, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICGPR.2016.7572616.
28. N. Pudova, M. Shirobokov, and A. Kuvaldin, "Application of the Attribute Analysis for Interpretation of GPR Survey Data," 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Rapperswil, CH, June 18-21, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICGPR.2018.8441609.
29. <https://www.radsys.lv/en/about-company/>
30. <https://geo-matching.com/companies/transient-technologies-llc>

*Принцип оптической селекции при радиодетектировании
нелинейных объектов поиска*

Волошин А.Ю. (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
anvo@yandex.ru),*

*д.т.н., доцент Николаев А.В. (Институт машиноведения им. А.А.
Благонравова РАН, alarmoren@yandex.ru),*

*Фам Дык Хи (Московский технический университет связи и информатики,
d.h.fam@edu.mtuci.ru),*

*Нгуен Ван Кыонг (Московский технический университет связи и информатики,
v.k.nguen@edu.mtuci.ru)*

Аннотация

Рассмотрены особенности принципа оптической селекции при радиодетектировании нелинейных объектов поиска, а также основы проектирования радиофары для безопасной машины, улавливающей сигналы от оптических датчиков замаскированных технических устройств.

Ключевые слова

Радиодетектирование, нелинейные объекты, оптическая селекция

Теория

Нелинейная радиолокация, в отличие от обычной (линейной), обладает более широкими возможностями обнаружения и распознавания объектов поиска, содержащих оптико-электронные устройства, так как в результате анализа спектра отраженного сигнала (который значительно отличается от спектра первичного сигнала) можно делать выводы о типе обнаруженного объекта.

Один из способов идентификации электронных устройств – нелинейно-параметрический метод, основанный на регистрации различий спектров излучаемого и принимаемого сигналов в случае воздействия на объект поиска одновременно зондирующим и возбуждающим полем. При наличии оптико-электронных устройств в составе изделия, предлагается использовать дополнительное облучение исследуемого пространства возбуждающим электромагнитным полем оптического диапазона для регистрации контраста между фоном и объектом поиска.

В качестве возбуждающего поля можно применять белое, а особенно красное и инфракрасное излучение (длина волны 600-900 нм) светоизлучающих диодов (LED) с плотностью потока мощности >2 Вт/м² или освещенностью рабочей плоскости ~ 200 лк (200 лм/м²). При воздействии светового излучения (вместе с основным зондирующим СВЧ-излучением) оптические компоненты меняют свои электрические характеристики, и приемное устройство поисковой системы может выявить характерные амплитудные

признаки переизлученного электромагнитного поля, сравнив их затем с эталоном, после чего осуществляется идентификация и определение направления на объект поиска по максимуму сигнала.

Фотоэлектрический преобразователь объекта поиска преобразует оптическое излучение в электрический сигнал, а входящие в состав трактов усиления и фильтрации нелинейные элементы имеют высокий коэффициент второй гармоники.

При проектировании установки по обнаружению объектов поиска с электронно-оптическими устройствами предлагается использовать компоновку передающей СВЧ-антенны (частота зондирующего сигнала 845 МГц) в виде эквиугольной конической спиральной антенны с двузаходной намоткой, диаграмма направленности которой в разных проекциях сферической системы координат (θ, ϕ) представлена на Рис. 1.

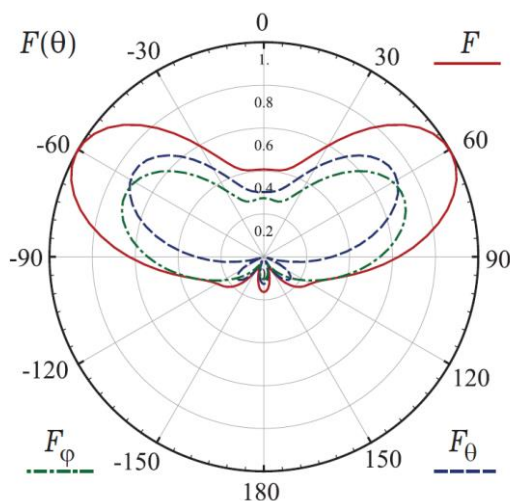


Рисунок 1. *Диаграмма направленности двузаходной эквиугольной конической спиральной антенны*

В свою очередь, компоновка оптического излучателя в виде светодиодной фары позволяет добиться компактных размеров устройства, а также аналогичной диаграммы направленности (кривой силы света – КСС) с помощью вторичной линзовой системы типа III (широкая), изображенной в проекциях 0-180° и 90-270° на Рис.2.

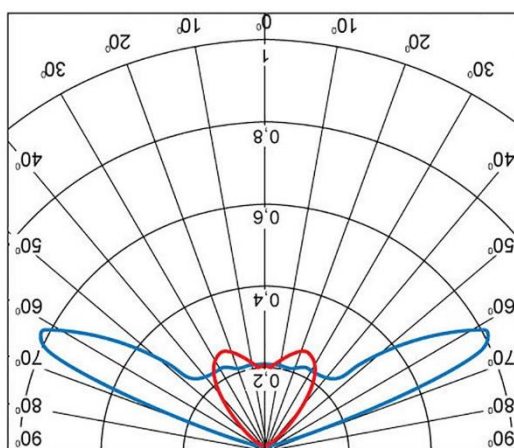


Рисунок 2. *Кривая силы света светодиодного светильника типа «III»*

Корреляция диаграмм направленности зондирующего СВЧ-излучения антенны и оптического излучения светодиодной фары позволяет скомпоновать компактную стационарную установку небольшой мощности – радиофару (Рис.3) – которая может применяться как автономно, так и устанавливаться на автомобиль попарно, обеспечивая как освещение широкой рабочей поверхности спереди, так и детектирование устройств с оптико-электронными компонентами (например, мин).



Рисунок 3. *Компоновка радиофары: 1) Нелинейная радиолокационная станция, 2) Светодиодный светильник, 3) Элемент объекта поиска с нелинейной вольтамперной характеристикой*

Выводы

1. Показана целесообразность применения метода оптической селекции при нелинейном радиодетектировании объектов поиска, имеющих в своем составе оптико-электронные устройства. Метод основан на взаимодействии возбуждающего поля с объектом поиска, выражающийся в изменении коэффициента второй гармоники электронных каскадов тракта обработки оптического сигнала.
2. Описан признак обнаружения объекта поиска – наличие в его составе электронных компонентов, нелинейные параметры которых чувствительны к оптическому излучению определенного диапазона.
3. Проработана компоновка системы обнаружения объектов поиска и показана возможно корреляции элементов системы для повышения ее эффективности.

Библиография

1. Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А. Новые методы обнаружения скрытых объектов. - М.: ООО «Эльф ИПР», 2011. - 504 с.
2. Юрцев О.А., Рунов А. В., Казарин А.Н. Спиральные антенны – Советское радио, 1974 – 223 с.
3. Неганов В.А., Табаков Д.П., Филиппов С.Б. Математическая модель двузаходной конической спиральной антенны - Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2013 – 7 с.

*Применение СВЧ голографии для неразрушающего
контроля армированного пенополиуретана*

Ивашов С.И. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, sivashov@rslab.ru)*

Разевиг В.В. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, vrazevig@rslab.ru)

Журавлев А.В. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, azhuravlev@rslab.ru)

Аннотация

Полиуретановая пена, армированная стекловолокном (АППУ), благодаря своим выдающимся свойствам нашла широкое применение, прежде всего, в аэрокосмической и строительной промышленности. В отличие от чистого неармированного пенополиуретана (ППУ), она обладает повышенными прочностными характеристиками, но при этом сохраняет уникальные тепло- и звукоизоляционные свойства. В статье рассмотрены особенности исследования армированного пенополиуретана в СВЧ-диапазоне. Показано, что существует значительная разница в записанных СВЧ-изображениях по сравнению с чистым пенополиуретаном. Это связано с тем, что армирующие волокна имеют отличную от вмещающего пенополиуретана диэлектрическую проницаемость, это приводит к рассеянию и отражению на них падающей электромагнитной волны. Экспериментальные исследования показали, что для АППУ, в отличие от ППУ, существует оптимальный диапазон длин волн, в котором контраст дефектов на фоне отражений стекловолокна имеет наибольшее значение. Для АППУ также было проведено экспериментальное сравнение двух методов исследования: при обратном и прямом рассеянии падающего излучения. Показано, что технология измерений с прямым рассеянием, если она может быть реализована, имеет определенные преимущества, поскольку позволяет повысить контраст дефектов на фоне отражений от армирующих волокон.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, СВЧ-диапазон, армированный пенополиуретан

Введение

Катастрофа космического корабля Space Shuttle Columbia в 2003 году [1, 2], повлекшая за собой гибель всего его экипажа из семи человек, произошла в результате того, что оторвавшийся кусок теплоизоляционного пенополиуретана, покрывавшего бак с жидким водородом, пробил переднюю кромку крыла корабля во время его старта. Позже, когда Columbia после завершения своей миссии на орбите возвращалась на Землю, плазма, возникшая в результате торможения воздуха в верхних слоях стратосферы, проникла в конструкцию крыла, что привело к его разрушению, а впоследствии и всего космического корабля, а также гибели экипажа. Эта катастрофа, как и авария космического корабля Challenger в 1986 году, вызванная разрывом уплотняющей прокладки в твердотопливном ускорителе, показали, что причиной катастрофы мог быть не самый сложный и технически совершенный элемент конструкции, а недостаток внимания к простым деталям и их последствиям. Эти события положили начало ряду исследований в области неразрушающего контроля диэлектрических теплоизоляционных материалов, выполненных как в миллиметровом [3, 4], так и в СВЧ-диапазонах [5, 6] электромагнитного спектра.

Материалы на основе ППУ нашли широкое применение не только в авиакосмической промышленности, но и в строительстве и многих отраслях машиностроения. Это связано с их выдающимися свойствами, такими как низкая теплопроводность, высокая звукоизоляция, низкий удельный вес и простота механической обработки [7]. К этому следует добавить сравнительно невысокую стоимость изделий из пенополиуретана. По совокупности этих свойств ППУ, несомненно, является лидером среди других конструкционных и изоляционных материалов. Те же преимущества пенополиуретана делают непригодным использование ультразвука для диагностики из-за высокого уровня затухания, а рентгена - из-за низкого уровня контрастности дефектов [8].

Основным недостатком ППУ-материалов и покрытий является их низкая прочность и несущая способность, что и привело, в частности, к катастрофе Columbia. Наиболее очевидным средством повышения прочности таких материалов является их армирование, например стекловолокном [9]. Это обстоятельство, как показали экспериментальные исследования, качественно меняет подход к выбору оптимального диапазона частот электромагнитного спектра при исследовании армированного

пенополиуретана. Чистый ППУ без наполнителей практически не поглощает электромагнитные волны [4], что позволяет использовать более высокие частоты вплоть до мм-диапазона для повышения пространственного разрешения и контрастности обнаруживаемых дефектов [10, 11]. Наличие стекловолокна делает эту зависимость нелинейной, поскольку с ростом частоты увеличивается и контраст волокон-наполнителей, что может маскировать выявляемые дефекты материала. Основной целью описываемого исследования было выяснение различий в диагностике ППУ и АППУ и связанных с ними эффектов.

Экспериментальные установки

Для проведения экспериментов по диагностике АППУ использовались два типа установок, в которых были реализованы принципы зондирования методами обратного и прямого рассеяния. В первом случае приемная и передающая антенны располагаются по одну сторону исследуемого образца, а во втором – по разные стороны, т.е. реализуется проекционная технология, обычно применяемая в рентгеновских аппаратах. Оба типа установок были спроектированы на базе векторного анализатора цепей (VNA ZVA24, Rohde&Schwarz) в качестве генератора и приёмника сигналов.

Ранее технология обратного рассеяния была использована при исследовании образцов пенополиуретановых покрытий ракетных баков, предоставленных НПО «Техномаш», Роскосмос, Россия, и Космическим центром Vikram Sarabhai Space Centre, Индия [10, 12]. Фотография данной экспериментальной установки представлена на Рисунке 1. Она состоит из анализатора цепей VNA ZVA24, который используется для генерации и приема СВЧ-сигналов в широком диапазоне частот от 6 ГГц до 24 ГГц, и трехкоординатного электромеханического сканера для перемещения тестового образца построчно под приемопередающей антенной, подключенной к порту векторного анализатора цепей гибкими бронированными фазостабильными кабелями. Такая схема позволяет избежать влияния изгиба кабеля на фазу записываемого сигнала. Съемная приемопередающая антенна установлена на штативе и расположена над зондируемым образцом. Регулировкой высоты штатива, который может перемещаться вдоль вертикальной оси, устанавливается расстояние от отверстия антенны до поверхности образца, помещенного на сканер. При зондировании образца в режиме прямого рассеяния схема сканирования та же, но используются две антенны, расположенные на противоположных сторонах исследуемого образца и ориентированные друг к другу, Рисунок 2.

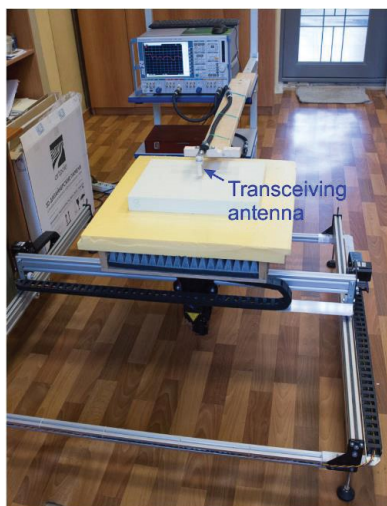


Рисунок 1. Фотография экспериментальной установки с VNA ZVA24 на заднем плане и трехкоординатным электромеханическим сканером для реализации технологии обратного рассеяния.

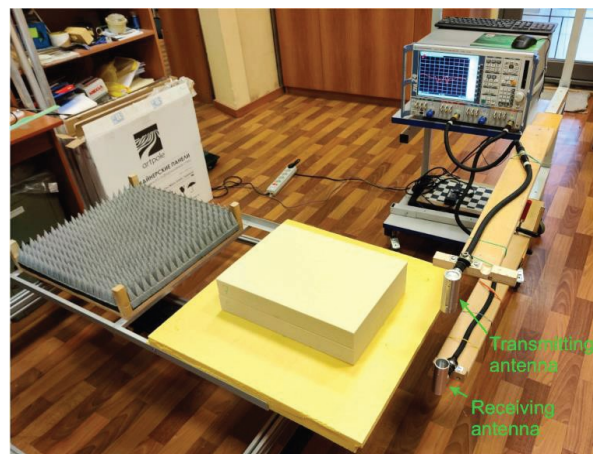


Рисунок 2. Фотография установки, в которой координатный сканер модифицирован для исследования прямого рассеяния.

В качестве исходных данных в экспериментах используются параметры рассеяния сигналов (S-параметры), регистрируемые VNA ZVA24 на равномерной сетке частот в плоскости сканирования с заданными шагами дискретизации по осям X и Y. В результате применения этого метода массив комплексных чисел записывается и задается на двумерной сетке в области пространства, занимаемой образцом.

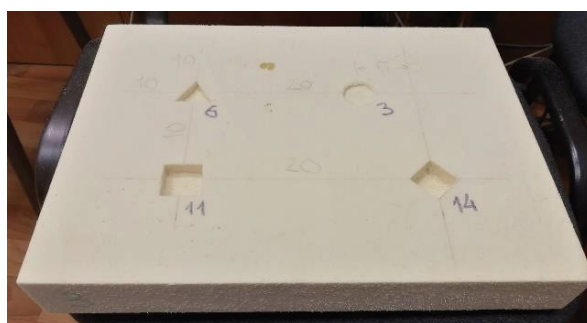
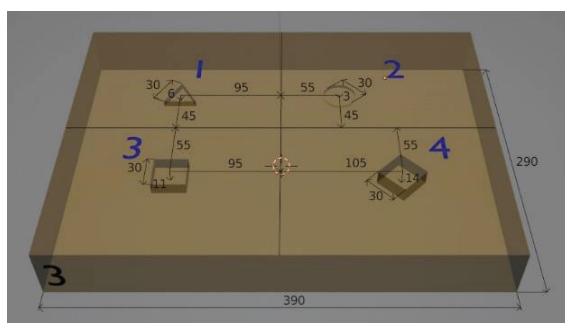
Полученный таким образом набор сигналов еще называют СВЧ-голограммой из-за прямой аналогии с оптической голографией [13, 14]. Для восстановления СВЧ-изображения по

зарегистрированной многочастотной радиолокационной голограмме используется алгоритм обратного распространения волнового фронта, подробно описанный в [15, 16]. Этот метод достаточно устойчив к незначительным отражениям от стекловолоконных нитей. Это позволяет использовать его в случае с АППУ.

Эксперименты с образцами

Для экспериментов было использовано несколько образцов пенополиуретанового покрытия, армированного стекловолокном. Все образцы имеют форму прямоугольного параллелепипеда размерами 390 ± 5 мм в длину, 290 ± 3 мм в ширину и высоту 50 мм. Образцы были предоставлены российской компанией «ТЕХНОНИКОЛЬ», производящей широкий спектр материалов для строительной отрасли [17].

В Образце 1 фрезерованием были вырезаны четыре каверны простой геометрической формы глубиной от 3 до 14 мм с характерным размером в плоскости 30 мм. Карта дефектов Образца 1 представлена на Рисунке 3 вместе с его фотографией, на которой глубина каверн отмечена маркером возле каждой из них.

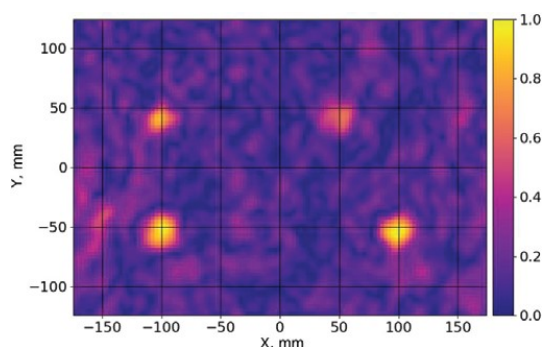


а)

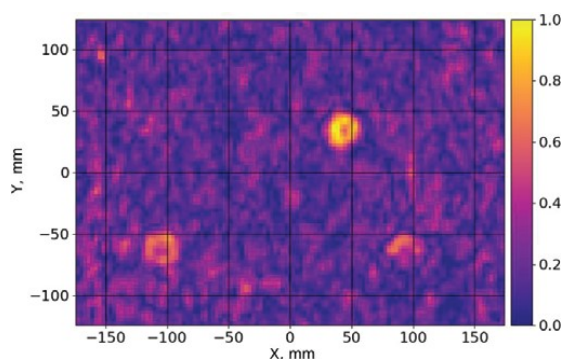
б)

Рисунок 3. Образец 1: а) Карта дефектов б) Фотография.

Данный образец исследовался на установке, представленной на Рисунке 1, в двух диапазонах частот от 6 ГГц до 12 ГГц и от 15 ГГц до 24 ГГц. В каждом диапазоне использовалась своя антенна приемопередатчика с соответствующей полосой пропускания. Полученные СВЧ-изображения дефектов Образца 1, расположенных дефектами вверх, представлены на Рисунке 4. В этих экспериментах наблюдение проводилось для отраженного сигнала, т.е. передающая и приемная антенны располагались с одной стороны образца над ним.



от 6 ГГц до 12 ГГц



15 ГГц до 24 ГГц

Рисунок 4. SVC-изображения Образца 1 в двух диапазонах частот.

Другой Образец 2 был изготовлен с использованием гравировального инструмента со сферической фрезой. Им были выполнены пять полостей с полусферической поверхностью диаметром 20, 25 и 30 мм, сжатых или растянутых в направлении, перпендикулярном поверхности. Карта дефектов Образца 2 приведена на Рисунке 5 вместе с его фотографией. Дефект № 2 в этой панели был выполнен на месте существующего производственного дефекта, продолжавшейся вглубь образца за границу искусственно созданной полусферической каверны.

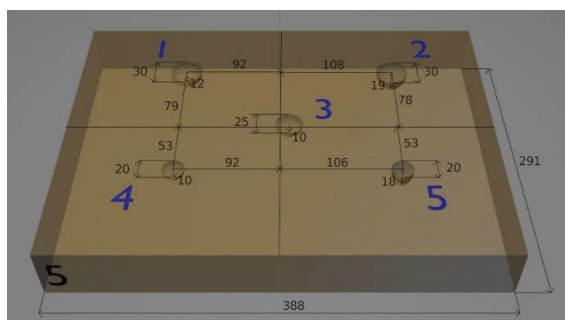


Рисунок 5. Образец 2: а) Карта дефектов б) Фотография.

Аналогичные эксперименты были проведены на Образце 2, результаты которых представлены на Рисунке 6. Эти эксперименты показывают, что добавление стекловолоконного наполнителя, имеющего диэлектрическую проницаемость, отличную от содержащего его пенополиуретана, качественно меняет ситуацию, поскольку наполнитель создает фоновые отражения, маскирующие дефекты АППУ, см. Рисунки 4 и 6. В связи с этим диапазон зондирования 6 – 12 ГГц предпочтительнее диапазона 15 – 24 ГГц, поскольку в первом случае контраст дефектов выше по отношению к фоновым отражениям от стекловолокон. Это отличается от такового для чистого ППУ, где эксперименты показали, что контраст дефектов только повышается с увеличением частоты зондирующего сигнала [10].

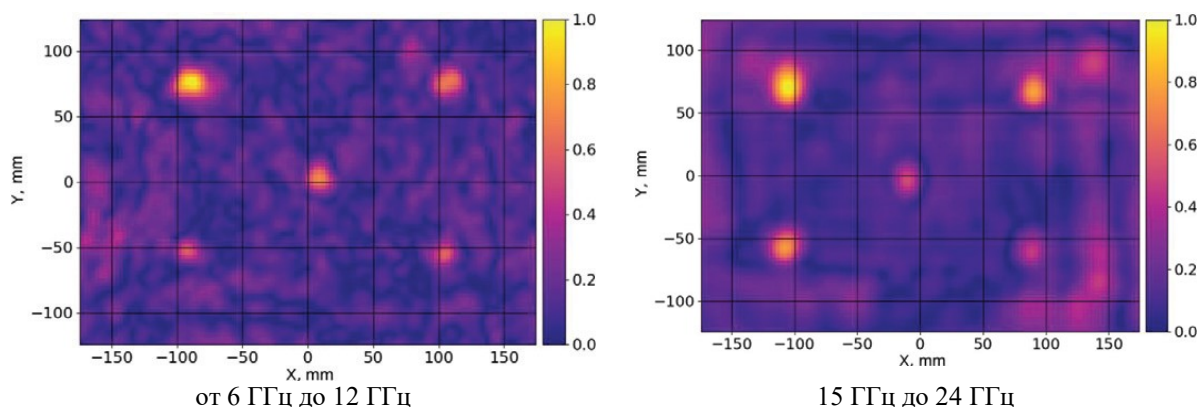


Рисунок 6. СВЧ-изображения Образца 2 в двух диапазонах частот.

Контроль теплоизоляционных покрытий в режиме обратного рассеяния имеет несомненные технологические преимущества при исследовании готовых к использованию изделий, таких как криогенные ракетные баки [3, 5]. В этом случае технология прямого рассеяния неприменима, поскольку металлическая оболочка резервуара полностью поглощает электромагнитное излучение. Но когда речь идет о технологических линиях по производству ППУ или ППУФ, появляется возможность использовать технологию прямого рассеяния. Такая возможность была реализована путем модификации экспериментальной установки с расположением передающей и приемной антенн по разные стороны исследуемого образца, Рисунок 2. Особенности регистрации и восстановления СВЧ-изображений при реализации метода прямого рассеяния, а также его сравнение с методом обратного рассеяния подробно изучалось в [18].

На Рисунке 7 сравниваются СВЧ-изображения, полученные обоими методами на Образце 2. Изображение прямого рассеяния заметно лучше, чем изображение обратного рассеяния. Возможно, это связано с суммированием сигнала от хаотично расположенных армирующих волокон наполнителя по мере его распространения по толщине исследуемого образца, что приводит к выравниванию фона. Это открывает дополнительные возможности за счет использования поляризационных свойств записываемых сигналов, полученных в скрещенных поляризациях.

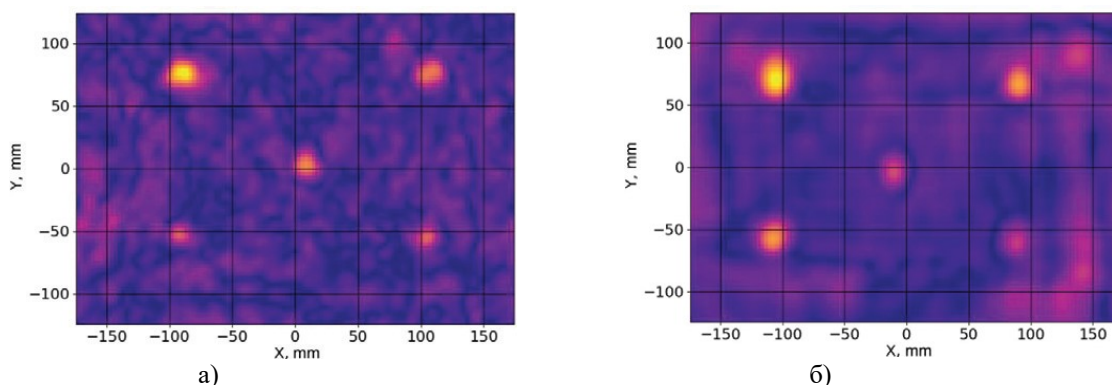


Рисунок 7. СВЧ-изображения Образца 2 в диапазоне от 6 до 12 ГГц: а) режимы обратного рассеяния и б) режимы прямого рассеяния.

СВЧ-излучение в последние годы все шире применяется в различных областях неразрушающего контроля композиционных материалов и может использоваться как самостоятельно, так и в сочетании с другими методами [8, 19, 20]. Учитывая, что АППУ благодаря улучшенным по сравнению с ППУ механическим свойствам будут находить всё более широкое применение, особенности использования микроволновой диагностики для изучения их свойств представляют интерес как для производства, так и для эксплуатации готовых изделий. В этой небольшой статье представлены предварительные результаты, которые будут уточнены в дальнейших исследованиях.

Заключение

В данной работе на образцах армированных пенополиуретановых панелей исследовано влияние частотного диапазона на качество регистрации радиолокационных изображений искусственно созданных дефектов в материале АППУ. Экспериментально показано, что увеличение частоты зондирования выше определенных значений может привести к снижению контраста дефектов за счет увеличения фоновых отражений от армирующих волокон. Данное наблюдение качественно отличается от случая неармированного пенополиуретана, где увеличение частоты во всем диапазоне СВЧ и мм волн приводит к улучшению разрешения радиолокационных изображений, поскольку в достаточной степени ППУ можно считать практически прозрачным для электромагнитных волн в этих диапазонах.

Еще одним результатом исследования стало сравнение возможностей методов обратного и прямого рассеяния. Показано, что технология измерений прямого рассеяния, в случае ее реализации по условиям производства, имеет определенные преимущества, поскольку позволяет снизить контраст фоновых отражений от армирующих волокон.

В качестве дальнейшего направления исследований следует предложить изучение поляризационных свойств сигналов, отраженных и прошедших через образец, для наиболее эффективного обнаружения и классификации дефектов и снижения контраста фоновых отражений от армирующих волокон.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда грант №21-19-00043, <https://rscf.ru/project/21-19-00043/> и РФФИ по проекту № 20-57-46004.

Библиография

1. Report of Columbia Accident Investigation Board. 2003; I. https://www.nasa.gov/columbia/home/CAIB_Vol1.html
2. Dornheim M.A. External tank makeover. Aviation Week & Space Technology. 2004; 57–61.
3. Kharkovsky S., Hepburn F., Walker J., Zoughi R. Nondestructive Testing of the Space Shuttle External Tank Foam Insulation Using Near Field and Focused Millimeter Wave Techniques. Materials Evaluation. 2005; 63.
4. Kharkovsky S., Zoughi R. Microwave and millimeter wave nondestructive testing and evaluation. IEEE Instrum Meas Mag. 2007; 10(2): 26–38.

5. Lu T., Snapp C., Chao T.H., Thakoor A., Bechtel T., Ivashov S., Vasiliev I. Evaluation of holographic subsurface radar for NDE of space shuttle thermal protection tiles. *Sensors and Systems for Space Applications*. Proceedings of SPIE 2007; 6555: OS1-8.
6. Ivashov S.I., Vasiliev I.A., Bechtel T.D., Snapp C. Comparison between Impulse and Holographic Subsurface Radar for NDT of Space Vehicle Structural Materials. *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2007)*. Beijing, China. 2007; 1816–1819.
7. Dombrow B.A. *Polyurethanes*, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1957.
8. Ivashov S.I., Razevig V.V., Zhuravlev A.V., Bechtel T., Chizh M.A. Comparison of Different NDT Methods in Diagnostics of Rocket Cryogenic Tanks Thermal Protection Coating. 2019 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS). Tel-Aviv, Israel. 2019; 1-5. doi: 10.1109/COMCAS44984.2019.89581577.
9. Siegmann A., Kenig S., Alperstein D., Narkis M. Mechanical behavior of reinforced polyurethane foams. *Polymer composites*. 1983; 2: 113-111. <https://doi.org/10.1002/pc.750040206>
10. Ivashov S., Zhuravlev A., Razevig V., Chizh M., Bechtel T., Capineri L., Thomas B. Frequency Influence in Microwave Subsurface Holography for Composite Materials Testing. *Proceedings of the 17th International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2018*, Rapperswil, Switzerland, 2018; 98-103. doi: 10.1109/ICGPR.2018.8441592
11. Case J.T., Hepburn F.L., Zoughi R. Inspection of Spray on Foam Insulation (SOFI) Using Microwave and Millimeter Wave Synthetic Aperture Focusing and Holography. 2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. 2006; 2148–2153. doi: 10.1109/IMTC.2006.328527.
12. Zhuravlev A., Razevig V., Chizh M., Ivashov S., Bugaev A. Non-destructive testing at microwaves using a vector network analyzer and a two-coordinate mechanical scanner. 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). 2016; 1–5. doi: 10.1109/ICGPR.2016.7572627.
13. Gabor D. A new microscopic principle. *Nature*. 1948 May 15;161(4098):777. doi: 10.1038/161777a0. PMID: 18860291.
14. Junkin G., Anderson A.P. Limitations in microwave holographic synthetic aperture imaging over a lossy half-space, radar, and signal processing. *IEE Proc-F*. 1988; 135(4): 321-329.
15. Sheen D.M., McMakin D.L., Hall T.E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2001; 49: 9: 1581-1592.
16. Razevig V., Ivashov S., Vasiliev I., Zhuravlev A. Comparison of Different Methods for Reconstruction of Microwave Holograms Recorded by the Subsurface Radar. In *Proceeding of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Shanghai, China. 2012; 335–339. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254884>.
17. <https://techno.nicol.com/>
18. Razevig V.V., Bugaev A.S., Ivashov S.I. Comparison of Back-Scattering and Forward-Scattering Methods in Short Range Microwave Imaging Systems. *Technical Physics*. 2022; 67: 11. doi: 10.21883/TP.2022.11.55184.173-22.
19. Moll J., Maetz T., Maelzer M. Radar-based monitoring of glass fiber reinforced composites during fatigue testing. *Struct Control Health Monit*. 2021; 28(10):e2812. <https://doi.org/10.1002/stc.2812>
20. Filinsky L.A. Solution of the Direct Problem of Electromagnetic Waves Propagation in Foams. *Proceedings of 21 International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED'16)*. Tbilisi, Georgia. 2016; 46-48. doi: 10.1109/DIPED.2016.7772208.

*Исследование радиопоглощающих материалов в
миллиметровом диапазоне*

*Маханов К.М. (Евразийский национальный университет имени
Л.Н. Гумилева, maханov@inbox.ru),*

Аннотация

В статье представлены результаты по созданию экспериментальной установки для исследования радиофизических параметров в миллиметровом диапазоне. Получены диаграммы направленности используемых рупорных антенн, рассчитаны геометрические размеры для наиболее оптимального расположения антенн и объекта исследования относительно друг друга. Представлены результаты исследования ослабления исходного электромагнитного излучения в диапазоне 78-118 ГГц.

Объекты исследования подготовлены путем смешивания частиц графита (~ 1 мм) в эпоксидной смоле. Показано, что слой эпоксидной смолы толщиной 1.7 мм с равномерно распределенными частицами графита, полностью ослабляет электромагнитное излучение 3-х миллиметрового диапазона.

Ключевые слова

Радиопоглощающие материалы, радиочастотный диапазон, графит, аттенюатор, генератор радиочастот, рупорная антенна.

Теория

Одним из основных свойств миллиметрового излучения является высокая проникающая способность. В частности, способность проникать в материалы непрозрачные для видимой части спектра. Примеры таких материалов включают ткань, бумагу, пластик, ткани человека и многие органические соединения.

Миллиметровые колебания имеют низкую энергию, не обладают ионизирующим эффектом, поэтому безопасны для человека. Излучение миллиметрового диапазона позволяет осуществлять прямой пассивный мониторинг, который широко используется в медицине, материаловедении, перерабатывающей промышленности и устройствах безопасности [1]. Все это создает необходимость создания новых материалов непрозрачных в радиочастотах и изучения радиофизических их параметров.

В статье представлены результаты исследования радиопоглощающих материалов (РПМ) полученных на основе частиц графита. Выбор частиц графита обусловлен доступностью материала и большим количеством работ, посвященных исследованию их физико-химических свойств.

Целью данной работы является исследование степени ослабления электромагнитного излучения (ЭМИ) РПМ на основе частиц графита.

Экспериментальная установка (рисунок 1) состоит из генератора сигналов (Г4-183М, диапазон частот 78 – 118 ГГц); аттенюатора АП-20; двух рупорных антенн; калориметрического измерителя мощности (СА-02) [2].

Скрепляющей матрицей для частиц графита служил слой эпоксидной смолы. Подготовка образцов осуществлялась путем смешивания частиц графита и эпоксидной

смолы в заранее подготовленной форме. Внутренние размеры формы составляют 9.5*6см.

Необходимость изготовления образцов исследования именно таких размеров обусловлена результатами, полученными при построении диаграммы направленности рупорных антенн.

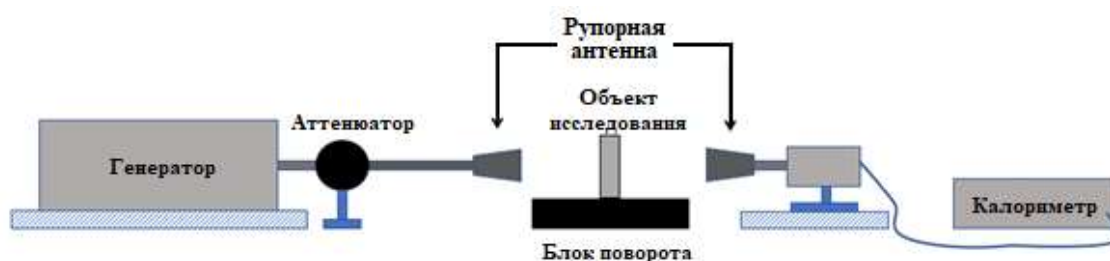


Рисунок 1. Структурная схема экспериментальной установки.

Для визуализации диаграммы направленности антенны в пространстве была построена 3D-модель в среде Ansys HFSS (рисунок 2).

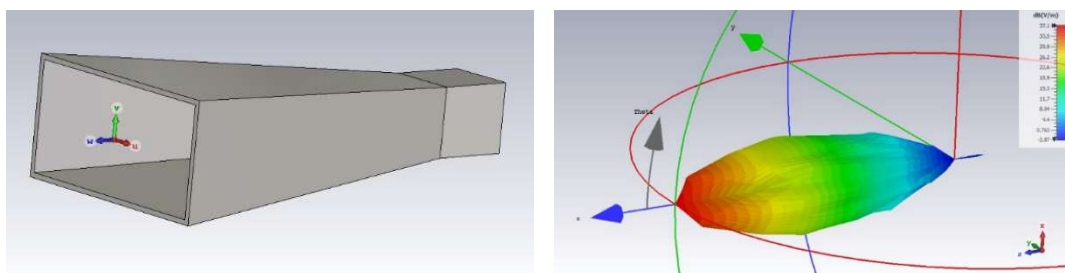


Рисунок 2. 3D модель и диаграмма направленности антенны (среда Ansys HFSS).

Построение диаграммы направленности осуществлялось на частоте 98 ГГц. Мощность сигнала исходного ЭМИ выставленная с помощью аттенюатора соответствовала 5дБ. Приемная антенна закреплялась на автоматизированной поворотной платформе (Standa), позволяющей поворачивать объект с дискретностью 3°.

Следующий этап работы был связан с необходимостью определения оптимальной толщины слоя эпоксидной смолы и определения степени ее влияния на величину ослабления исходного ЭМИ. Подготовка образцов осуществлялась путем нанесения заготовленной эпоксидной смолы различного объема (5 мл, 10 мл и 15 мл) на стеклянные подложки, прозрачные в рассматриваемом радиодиапазоне.

Толщина получаемых пленок эпоксидной смолы рассчитывалась по формуле:

$$V = abc \quad (1)$$

здесь, а – длина, b – ширина, с – толщина (h) полосы нанесенной эпоксидной смолы.

Отсюда, толщина слоя эпоксидной смолы нанесенной на поверхность стекла составит:

$$h = \frac{V}{ab}$$

(2)

Регистрация прошедшего, либо отраженного от образца ЭМИ осуществлялась на установке, внешний вид которой представлен на рисунке 3.

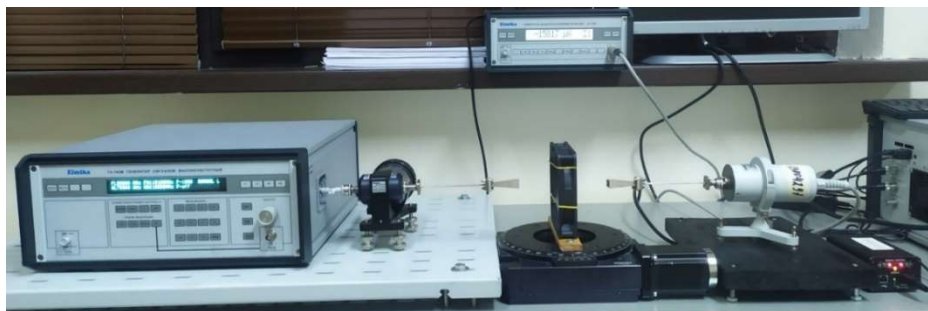


Рисунок 3. Экспериментальная установка для регистрации коэффициента ослабления ЭМИ в диапазоне частот 78 – 118 ГГц

Измерения проводились на частотах 78; 98 и 118 ГГц. Предварительно была проведена работа по определению исходной мощности ЭМИ в «пустом» пространстве. Уровень затухания сигнала исходного ЭМИ регулировали с помощью аттенюатора от 25дБ и выше с шагом 5дБ. Было установлено, что во всем диапазоне частот, аттенюатор может быть выставлен на 5дБ. При этом ослабление сигнала на выбранных частотах составляет: 78ГГц - 13,01дБм; 98ГГц - 8,15 дБм и при 118 ГГц - 12,59 дБм.

На следующем этапе экспериментальных исследований была проведена регистрация уровня ослабления сигнала ЭМИ стеклянной подложкой до (0 мм) и после нанесения различных слоев эпоксидной смолы (0.8мм; 1.7мм и 2.6 мм) соответственно. Результаты, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения ослабления ЭМИ для различных слоев эпоксидной смолы.

Частота, МГц	Данные регистрации ослабления (дБм) при различных толщинах			
	0 мм	0,8 мм	1,7 мм	2,6 мм
78000	-16,58	-16,58	-16,98	-19,59
98000	-13,19	-14,94	-12,37	-13,67
118000	-18,54	-16,98	-17,69	-18,54

По результатам, полученным при регистрации уровня регистрируемого сигнала ЭМИ в «пустом» пространстве, через стеклянную подложку без и с различными слоями эпоксидной смолы была построена диаграмма, представленная на рисунке 4 (а). Установлено, что наиболее оптимальным является слой соответствующий толщине смолы в 1.7 мм (в случае объема эпоксидной смолы равной 10 мл).

Отсюда следует, что при толщине 1.7 мм, слой эпоксидной смолы оказывает минимальный вклад в ослабление падающего на поверхность ЭМИ. В последующем, при подготовке объектов в качестве скрепляющей основы использовали 10 мл

эпоксидной смолы, в которой и размещивались частицы графита, в соотношении 1/3. На 1 мл смолы, добавляли 3 мг частиц графита.

На рисунке 4 (б) показан результат построения диаграммы распределения ослабления регистрируемого сигнала, прошедшего через образец с частицами графита, слой эпоксидной смолы в 1.7 мм и через «пустое» пространство.

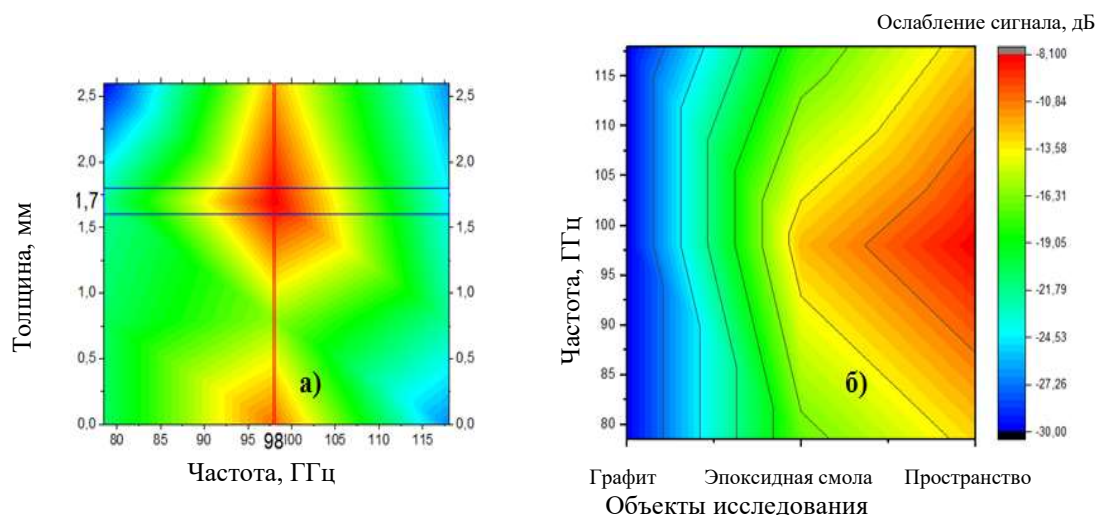


Рисунок 4. Диаграмма распределения ЭМИ от толщины эпоксидной смолы (а) и при прохождении через образец с частицами графита, эпоксидную смолу (1.7 мм) и «пустое» пространство.

Выводы

Получены результаты регистрации уровня ослабления сигнала ЭМИ падающего на слой эпоксидной смолы толщиной 1.7 мм смешанной с частицами графита размерностью. Установлено, что при соотношении 1/3, частицы графита на выбранных частотах полностью экранируют ЭМИ. При уровне исходной мощности ЭМИ в 5дБм (почти 100 % открытый аттенюатор), исследуемый образец может быть использован в качестве экранирующего материала. Возможно, ЭМИ подающее на поверхность с частицами графита полностью либо частично затухает, либо полностью отражается. Последующие исследования будут посвящены исследованию отраженного сигнала, что позволит ответить на данный вопрос.

Библиография

1. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / Под ред. А. Я. Усикова. Киев: Наукова думка, 1986. 140-158 с.
2. Сайт производителя приборов для измерения миллиметровых волн и компонентов волноводов Elmika / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://www.npp-elmika.ru/info/index.php?id=69#PageCtrl>

*Повышение эффективности передачи
телеметрических данных в ММО РЛС*

Ахмад А. (Московский технический университет связи и информатики,
dk12to34ra56@gmail.com)*

*Хасани Д. (Московский технический университет связи и информатики,
diaaahassan159@gmail.com)*

Аннотация

Использование антенных решеток в многолучевой (ММО) радиолокационной системе (РЛС) позволяет значительно повысить эффективность передачи телеметрических данных от бортовых радиопередатчиков. Используя пространственное разделение сигналов на аппаратном уровне фазированные антенные решетки позволяют создавать одновременно несколько сигнальных «пучков», которые могут быть направлены в разные стороны. Это увеличивает пропускную способность канала и снижает вероятность интерференции между различными потоками данных, но уменьшает дальность действия РЛС. Использование антенных решеток компенсирует частично компенсирует затухание сигнала, объединяя сигналы от разных антенн. Это улучшает качество передачи телеметрических данных в ММО РЛС малой дальности действия.

Ключевые слова

MIMO (Multiple Input Multiple Output) - несколько входов, несколько выходов

SVD (Singular Value Decomposition) - сингулярное разложение

SM (Spatial Multiplexing) - пространственное мультиплексирование

Методы повышения эффективности передачи телеметрических данных в многолучевой (ММО) радиолокационной системе

Алгоритмы обработки сигналов в многолучевой (ММО) радиолокационной системе играют ключевую роль в оптимизации передачи телеметрических данных. Они обеспечивают эффективное пространственное разделение потоков данных, улучшают синхронизацию и выравнивание сигналов, используют адаптивные методы настройки параметров и уменьшают межсимвольную интерференцию, способствуя повышению пропускной способности канала, улучшению качества связи и общей эффективности системы передачи данных.

Адаптивное формирование луча антенны, выбор оптимальных параметров модуляции и кодирования, а также использование адаптивных алгоритмов обратной связи позволяют системе автоматически адаптироваться к изменяющимся условиям канала, повышая устойчивость передачи данных, увеличивая пропускную способность и обеспечивая эффективную передачу телеметрических данных.

Пространственное мультиплексирование с антенными решетками

Целью использования традиционных фазированных решеток является создание острых лучей радиочастотной энергии с низкими боковыми лепестками, а для фокусировки энергии используется массив приемопередатчиков с соответствующим образом взвешенными амплитудой и фазой для создания желаемой диаграммы направленности [3].

При этом с помощью управления фазой на каждой антенне когерентно добавляются сигналы для желаемого направления приема (передачи).

Формирование диаграммы направленности на передаче (Transmit Beamforming)

Формирование диаграммы направленности может выполняться как на стороне передатчика, так и на стороне приемника. Формирование луча является широкой распространенной концепцией [4], потому что она связана с технологией управления фазами при формировании луча MIMO НКС. Эта технология предполагается для использования в миллиметровом диапазоне на основе технологии Massive MIMO, как в системах 5G [5].

В этой схеме для формирования луча используется процедура сингулярного разложения (SVD) матрицы канала MIMO.

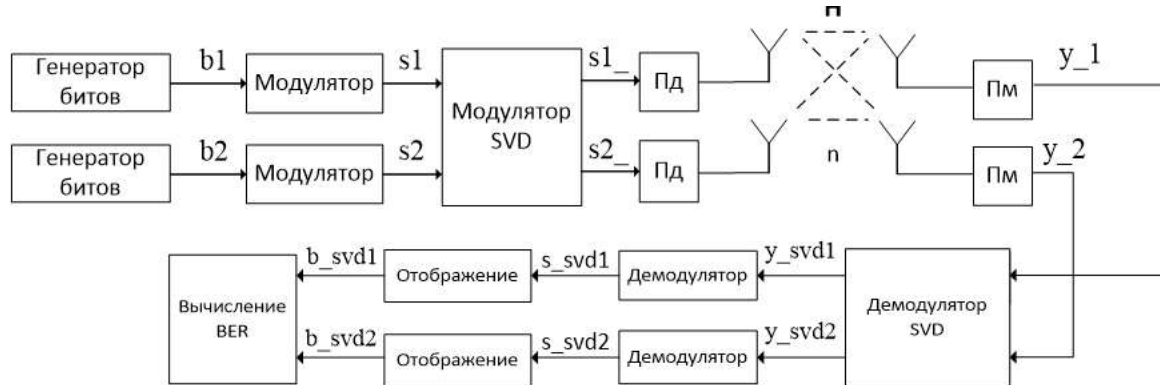


Рисунок 1. Структурная схема системы MIMO с конфигурацией 2x2 с использованием технологии Beamforming

Режим SM

Пространственное мультиплексирование или мультиплексирование с пространственным разделением (сокращенно SM или SDM) — это метод мультиплексирования в беспроводной связи MIMO, оптоволоконе и других коммуникационных технологиях, используемый для передачи независимых каналов, разделенных пространством.

Основное отличие от режима Beamforming это отсутствие блоков, связанных с преобразованием SVD и формированием лучей. Структурная схема системы MIMO в режиме SM приведена ниже. Режим SM мы рассматриваем, чтобы показать выигрыш от формирования лучей в режиме Beamforming [6].

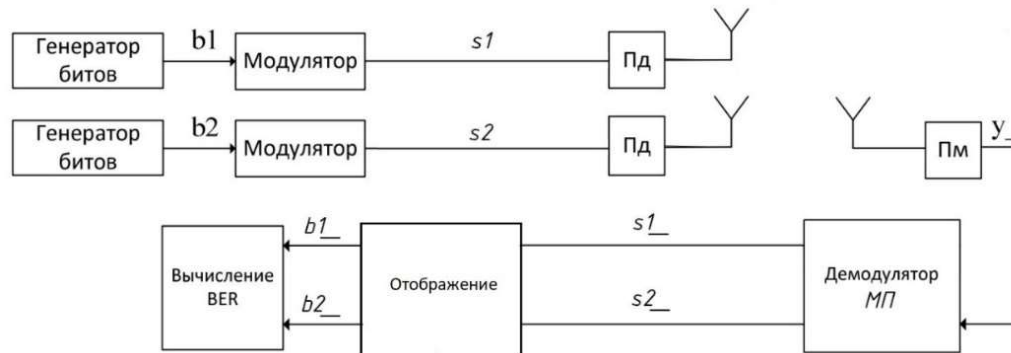


Рисунок 2. Структурная схема системы MIMO с конфигурацией 2x1 в режиме SM.

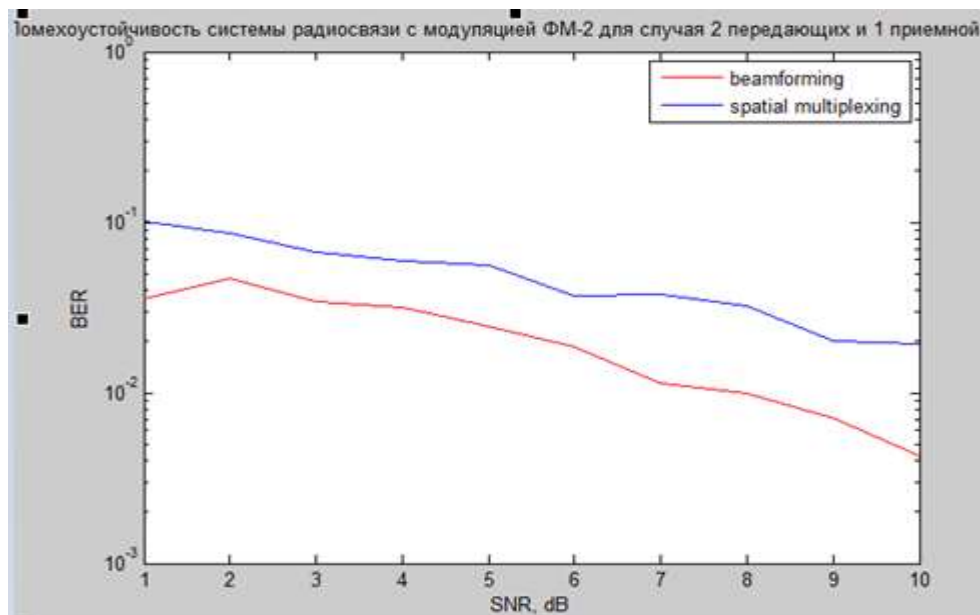


Рисунок 3. моделирования MIMO в режиме пространственного мультиплексирования (SM) и режиме Beamforming

В случае сравнения систем MIMO с использованием технологии Beamforming и SM можно сделать вывод о том, что помехоустойчивость системы MIMO в режиме Beamforming будет выше за счет формирования лучей диаграммы направленности в сторону абонента.

Использование технологий ММО в РЛС позволяет значительно повысить эффективность передачи телеметрических данных. Адаптивное формирование пучков антенн, адаптивный выбор оптимальных параметров модуляции и кодирования, а также адаптивное использование алгоритмов обратной связи существенно улучшают качество связи, увеличивают пропускную способность и повышают стабильность передачи данных. Указанные выше технологии обеспечивают более эффективное использование радиочастотного спектра, снижают вероятность ошибок и повышают производительность системы. В целом, интеграция ММО технологий в РЛС способствует совершенствованию передачи телеметрических данных и повышению эффективности работы системы в целом.

Библиография

1. Ericsson White Paper, “More than 50 billion connected devices,” Ericsson, Stockholm, Sweden, Tech. Rep. 284 23-3149 Uen, Feb. 2011.
2. Ключев Л.Л. Теория электрической связи. Минск, 2008.
3. Q. H. Spencer, C. B. Peel, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, “An introduction to the multi-user MIMO downlink,” IEEE Communications Magazine, vol. 42, no. 10, pp. 60–67, October 2004.
4. Perahia E., Stacey R. Next Generation Wireless LANs. — Cambridge University Press, 2008. — 29 с.
5. -J. Grythe and A.S. Norsonic, "Beamforming algorithms-beamformers, ". Technical Note, Norsonic AS, Norway
6. 3GPP, “NR - Physical layer measurements - Rel. 15,” TS 38.215, 2017.

Электромагнитные методы поиска УТР кабеля в укрывающей среде

Докладчик Богати С.Р. (Общевойсковая академия Вооруженных сил РФ им. М.В. Фрунзе, bogati93@gmail.com),*

д.т.н., профессор Щербаков Г.Н. (Общевойсковая академия Вооруженных сил РФ им. М.В. Фрунзе, scherbakovgn@mail.ru), д.т.н., доцент Николаев А.В. (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, alarmoren@yandex.ru), д.т.н., доцент Рычков А.В. (Общевойсковая академия Вооруженных сил РФ им. М.В. Фрунзе), д.т.н., доцент Прохоркин А.В. (Общевойсковая академия Вооруженных сил РФ им. М.В. Фрунзе)

Аннотация

В современных условиях технологического развития стран для надежного и бесперебойного электроснабжения и связи широко используют УТР-кабели в электроэнергетических и информационно-коммуникационных сетях для контроля и управления их техническим состоянием объекта информатизации. Это обстоятельство обуславливает актуальность изучения взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектом поиска, обладающего резонансными свойствами, в нашем случае УТР-кабеля. С этой целью рассмотрены электромагнитные методы, использующиеся для обнаружения объектов в укрывающей среде, и представлены теоретические и практические предпосылки создания устройства поиска УТР кабелей радиоволновым способом.

Ключевые слова

Электромагнитные методы поиска, радиоволновой метод, кабельные линии, УТР кабель

Методы обнаружения объектов в укрывающей среде

На современном этапе развития непрерывно возрастают требования к надежности и бесперебойности электроснабжения и связи предприятий, учреждений, жилищных массивов, всех видов транспорта, почты и телеграфа, строительства, шахт и других объектов народного хозяйства, а также различных систем управления и контроля. Выход из строя кабельной линии приводит к большим экономическим потерям [1].

Кабельные линии – неотъемлемая часть электрических и коммуникационных сетей, используемых в современных инженерных решениях. При прокладке любых, в том числе УТР кабелей в кабель-каналах, кабельных сооружениях (кабельных туннелях, эстаках, эстакадах и т.д.), на оболочке кабеля в обязательном порядке выполняется маркировка для осуществления правильного монтажа, эксплуатации и ремонта.

К возможным методам поиска УТР-кабеля под землей относятся (рис. 1):

- магнитометрия;
- радарная томография;

- использование металлоискателей;
- индукционный метод;
- емкостной метод;
- использование электронной маркировки;
- радиоволновой метод.

При написании магистерской диссертации на тему исследования устройства поиска UTP кабелей связи в полупроводящих средах был предложен резонансный радиоволновой способ поиска UTP-кабеля, являющийся развитием радиоволнового метода. В отличие от существующих методов он является квазиконтактным, т.к. регистрация отклика от кабеля осуществляется в ближней зоне антенн. Электромагнитное поле, в значительной мере определяется электрическими свойствами среды [2]. За счет влияния диэлектрической постоянной среды и токов смещения электромагнитные поля излучающих радиоустройств характеризуются некоторыми особенностями, отличающими их от электромагнитных полей низких и звуковых частот.

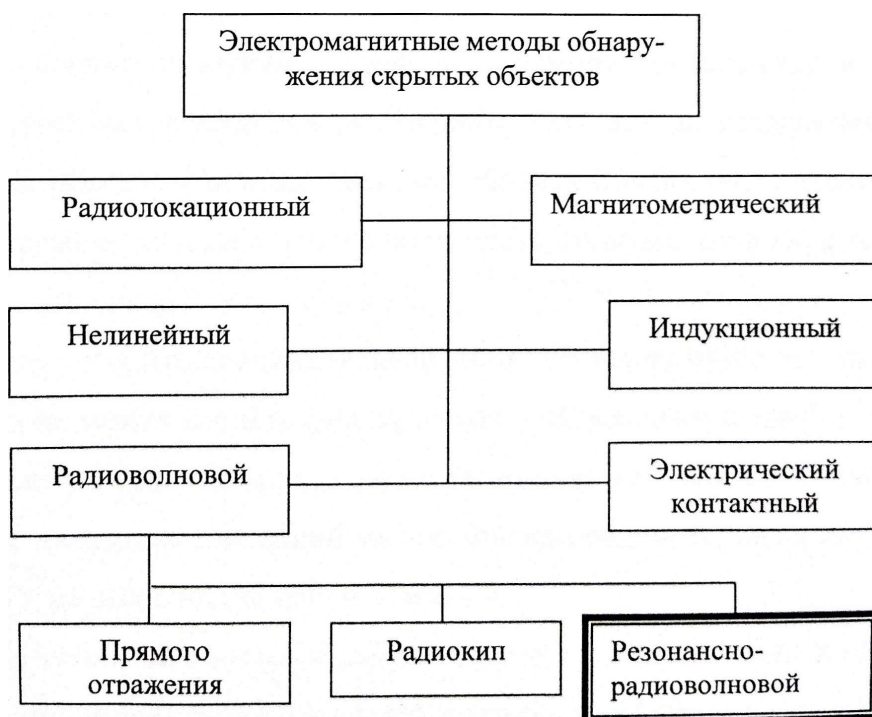


Рисунок 1. Электромагнитные методы обнаружения объектов в укрывающих средах

Результат экспериментальных исследований

Радиоволновые методы подповерхностной локации основываются на изучении процессов распространения в грунтовых и горных породах электромагнитных полей и волн и широко освещены в [3-5]. Рабочие частоты таких электромагнитных систем, как правило, изменяются от десятых долей до десятков МГц и определяются экспериментально.

В результате эксперимента, выполненного в ходе исследования над магистерской диссертацией, подтвердились предпосылки о возможности использования резонансного радиоволнового способа поиска УТР-кабеля для его обнаружения в укрывающей среде. В ходе эксперимента, было установлено, что объект поиска, в нашем случае УТР-кабель, имеет ярко выраженные резонансные свойства на частотах 62...69 МГц на фоне грунта-влажного суглинка (рис. 2), что позволяло осуществлять его обнаружение. При проведении исследовательской работы для измерения уровня сигнала, улавливающего электромагнитной системой, использовался селективный микровольтметр В6-9, а в качестве генератора сигналов прибор Г4-119А.

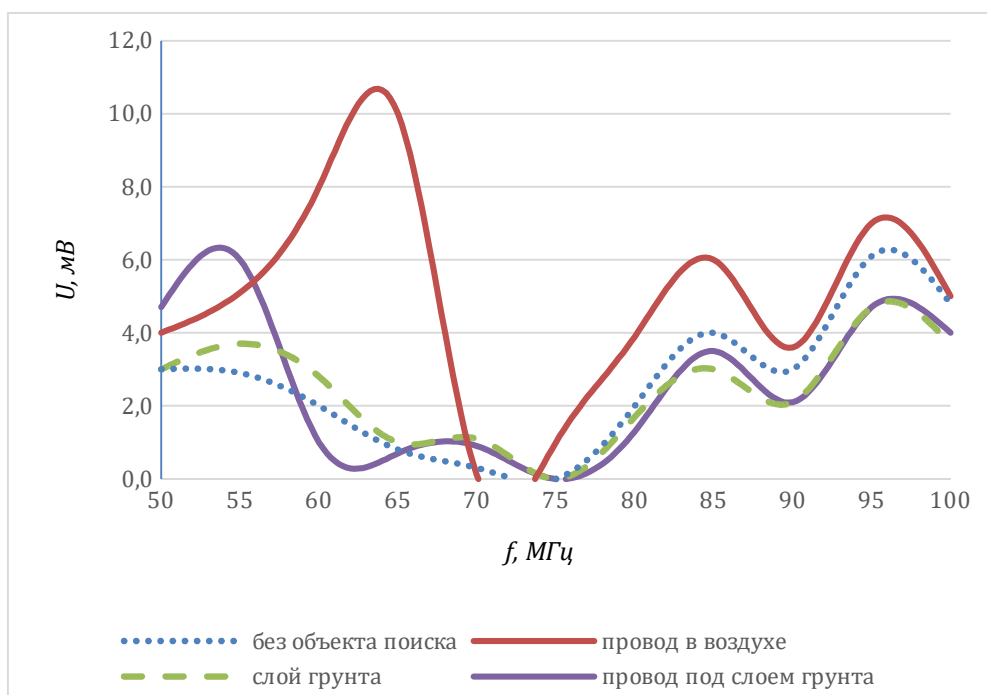


Рисунок 2. Амплитудно-частотная характеристика УТР-кабеля в различных материальных средах. Эксперимент

Выводы

В ходе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что слой грунта не оказывает существенное влияние на процесс обнаружения UTP-кабеля в диапазоне частот созданной электромагнитной системы и позволяет без особых трудностей реализовать резонансно-радиоволновой метод в поисковом средстве.

Библиография

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн, М., Издательская группа «URSS», 2022
2. Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А. Новые методы обнаружения скрытых объектов, М., Эльф-ИПР, 2011.
3. Щербаков Г.Н. Обнаружение скрытых объектов. М., Арбат-информ, 2004.
4. Щербаков Г.Н. Обнаружение объектов в укрывающих средах. М., Арбат-информ, 1998.
5. Тарасов Н.А. [Электронный ресурс]. URL: <https://stell.ru/methods/> (дата публикации: 1996 г.)

Повышение динамического диапазона импульсного георадара

*Горкин Д.С. * (ИЗМИРАН, gorkin@izmiran.ru)*

Аннотация

В настоящее время для глубинной радиолокации широко применяются импульсные георадары с резистивно-нагруженными дипольными антеннами, излучающие дельтаобразный импульс повышенной мощности. Направлений для повышения глубинности георадиолокации два, первое – повышение выходной мощности передатчика, второе – уменьшение центральной частоты зондирующего импульса, что приведет к увеличению длины антенн до сотни метров. При увеличении длины антенн глубина зондирования повышается, но при этом уменьшается пространственное разрешение. При повышении выходной мощности передатчика георадара при фиксированной длине антенн глубинность зондирования тоже повышается, но разрешение не снижается.

В данной работе рассматриваются способы увеличения динамического диапазона импульсного георадара как через увеличение излучаемой мощности, так и через повышение эффективности антенно-фидерных устройств.

Ключевые слова

Георадар, антенны, диаграмма направленности, излучаемая мощность, многовибраторные антенны.

Теория

В современной глубинной радиолокации широко применяются импульсные георадары с резистивно-нагруженными дипольными антеннами, излучающие дельтаобразный импульс повышенной мощности, что позволило достичь глубин зондирования до 200 м, а в отдельных случаях до 500 м [1,2]. Направлений для повышения динамического диапазона георадаров два, первое – повышение выходной мощности передатчика, второе – увеличение эффективности антенно-фидерных устройств, в том числе через увеличение длины антенн до сотни метров. При увеличении длины антенн глубина зондирования повышается, но при этом уменьшается пространственное разрешение и, следовательно, теряется информативность о строении исследуемой среды [2]. При повышении выходной мощности передатчика георадара при фиксированной длине антенн глубинность зондирования тоже повышается, но разрешение не снижается.

Рассмотрим способы увеличения амплитуды формируемого сверхширокополосного импульса. На рисунке 1 приведена упрощенная схема генератора с использованием газонаполненного разрядника. Высоковольтный источник напряжения V с которого через защитный резистор R_g напряжение поступают на накопительные конденсаторы C и и газонаполненный разрядник FV . Вторые выводы

конденсатора C и разрядника соединены разрядным резистором R , к выводам этого резистора подключена антенна Ant представляющая собой дипольную антенну с резистивно-нагруженными вибраторами.

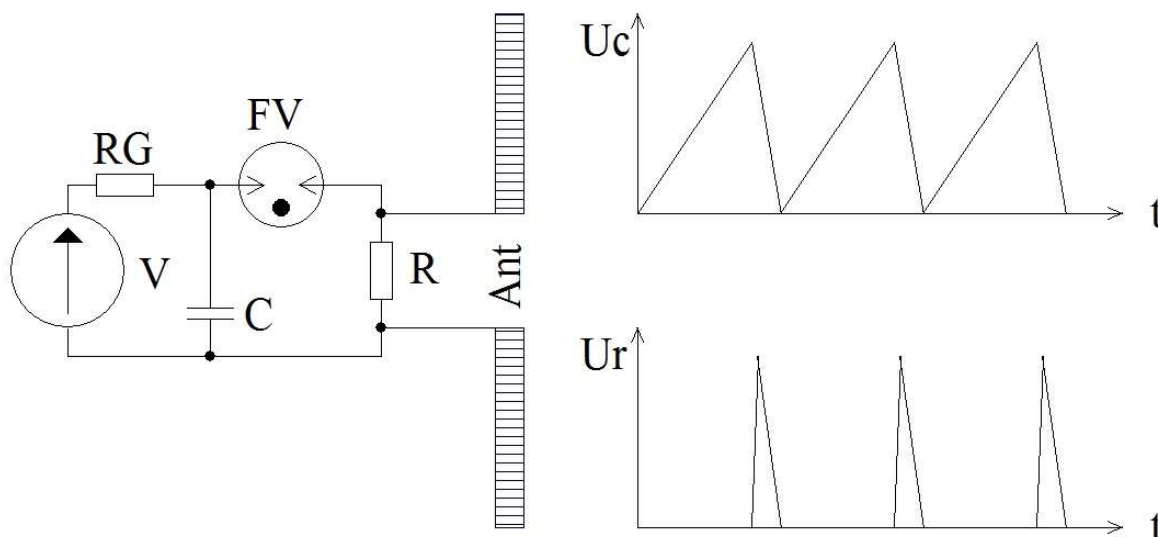


Рисунок 1. Схема передатчика с газонаполненным разрядником.

При достижении на конденсаторе напряжения пробоя разрядника FV происходит соединение цепи и протекания тока по этой цепи C, FV, R . Вследствие падения напряжения при протекании тока через резистор на нем образуется дельтаобразный сверхширокополосный (СШП) импульс. Таким образом к вибраторам поступают СШП импульс при распространение которого по дипольной антенне производит излучение электромагнитной волны в окружающую среду. Амплитуда СШП импульса равна напряжению пробоя газонаполненного разрядника, эпюры напряжений на накопительном конденсаторе C и разрядном резисторе R приведены справа рисунка 1, нужно заметить что постоянная разряда $t = R \cdot C$ не всегда равна расчетной величине, учитывая что данный генератор представляет собой передатчик ударного возбуждения спектр излучаемой электромагнитной волны формируется параметрами дипольной антенны. СШП импульс антенной может быть укорочен или наоборот растянут. Для увеличения амплитуды СШП импульса необходимо использовать газонаполненный разрядник на более высокое напряжение пробоя, но обычно стоимость таких приборов очень высокая и не всегда доступна. Для использования разрядников более низкого напряжения для создания генератора с большим выходным напряжением было предложено последовательное включение нескольких газонаполненных разрядников для генератора с симметричным выходом[3]. На рисунке 2 приведена схема включения последовательных разрядников для схемы с несимметричным выходом, справа также приведены напряжений на накопительном конденсаторе C и разрядном резисторе R . Также нужно заметить что при последовательном включении двух разрядников получается эквивалентная схема последовательно включенных конденсаторов, первым пробивается разрядник с меньшим напряжением пробоя, но он не может разрядиться т. к. второй разрядник является реактивным сопротивлением и только после пробоя второго разрядника начинается разряд конденсатора C через резистор R . Этот момент можно наблюдать на зондирующем импульсе распространяющегося воздушной волной. В результате увеличение амплитуды СШП импульса в два раза приводит увеличению динамического

диапазона на 6 дБ. У георадара «Grot-12» с передатчиком с выходной амплитудой динамический диапазон 154 дБ, с использованием передатчика 16 кВ он вырастает до 164 дБ и с удвоенным разрядником и амплитудой СШП импульса 32 кВ вырастает на 6 дБ до 170 дБ.

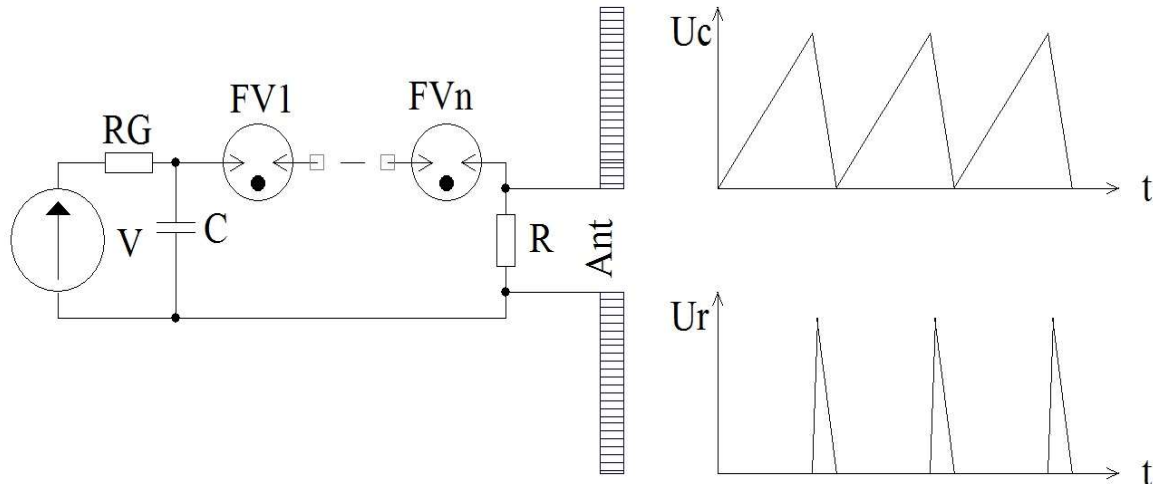


Рисунок 2. Схема передатчика с последовательно включенными газонаполненными разрядниками.

Теперь рассмотрим увеличение динамического диапазона через повышение эффективность антенно-фидерных устройств. Один из направлений увеличения для дипольной антенны увеличивает глубину зондирования, но снижает разрешение. Также есть возможность через снижение общего сопротивления вибраторов, но до некоторой величины, снижение ниже 200 Ом вызывает возникновение паразитных автоколебаний.

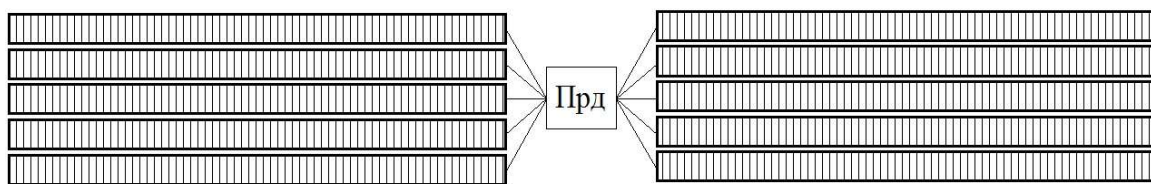


Рисунок 3. Дипольная многовибраторная антенна

Для снижения импеданса дипольной антенны было предложено параллельное включение вибраторов с минимально возможным общим сопротивлением. Для вибраторов изготовленных для этого эксперимента общее сопротивление составило 250 Ом, параллельно подключалось до пяти вибраторов. Для измерений использовались дипольные антенны различных конструкций: трубчатая антенна (диаметр трубы 12 мм) длиной 3 м, пластинчатая антенна (вибраторы шириной 25 см) длиной 3 м и плоская пятивибраторная антенна (пять трубок диаметром 12 мм, на расстоянии 5 см друг от друга) длиной 3 м. Результаты измерений показывают, что усиление плоской пятивибраторной дипольной антенны выше одиночного трубчатого диполя на 10 дБ, относительно пластинчатого диполя усиление выше на 3,3 дБ. Для измерений данного

эксперимента использовался экспериментальный приемник георадара на основе USB-осциллографа и обработка производилась полученных данных программой MATRIX [4,5].

Выводы

Предложены способы увеличения динамического диапазона импульсного георадара через повышение амплитуды СШП импульса и использование дипольной многовибраторной антенны.

Библиография

1. Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Морозов П.А., Беркут А.И. Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. №. 4. С. 28-36.
2. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Ляхов Г.А., Резников А.Е. Георадиолокация больших глубин // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 5.
3. Горкин Д.С., Сахтеров В.И. «Передатчик георадара». Патент на полезную модель № RU219610U1, зарегистрирован в Госреестре 27.07.2023г.
4. Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. «Георадар для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности». Патент на полезную модель RU218691U1, зарегистрирован в Госреестре 06.06.2023г.
5. Горкин Д.С., Варенков В.В. Программа для ЭВМ: MATRIX. Номер регистрации (свидетельства): RU2023663673 от 27.06.2023.

Оценка характеристик обнаружения НРЛС безопасной машины

Нгуен В.К. (Московский технический университет связи и информатики,
v.k.nguen@edu.mtu.ru),*

*Фам Д. Х. (Московский технический университет связи и информатики,
d.h.fam@edu.mtu.ru),*

*Волошин А.Ю. (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
anvo@yandex.ru),*

*д.т.н., доцент Николаев А.В. (Московский технический университет связи и
информатики, alarmoren@yandex.ru)*

Аннотация

В данной статье представлен сравнительный анализ характеристик обнаружения взрывоопасных предметов с использованием традиционной и нелинейной радиолокации. Отдельно рассматриваются воздействие помех от окружающих источников и анализу эффективной отражающей площади (ЭПР) на второй и третьей гармониках. В контексте традиционной РЛС обсуждаются ограничения, связанные с помехами в окружающем пространстве, которые могут затруднить эффективное обнаружение взрывоопасных объектов. В свете этого рассматривается преимущество нелинейной радиолокации, способной радиодетектировать нелинейные объекты поиска на фоне помех. Особое внимание уделяется оценке ЭПР на второй и третьей гармониках, и как это может повлиять на эффективность обеих технологий обнаружения. Обсуждаются ключевые параметры, такие как вероятность обнаружения и устойчивость к помехам в контексте обеих технологий. В заключение предоставляются выводы относительно оптимального выбора технологии обнаружения в различных условиях эксплуатации и в зависимости от требований к системе безопасности машины.

Ключевые слова

Нелинейная радиолокация, обнаружение взрывоопасных предметов, характеристики обнаружения НРЛС, вторая и третья гармоники.

Теория

Существующие методы обнаружения ВОП ориентированы на различные аспекты применения, но раннее предупреждение и точное обнаружение остаются важными задачами. Методы радиолокации, в частности, выделяются своей способностью обнаруживать ВОП под и над землей. Однако, несмотря на их эффективность, эти технологии подвержены помехам от окружающей среды.

Проблема помехоустойчивости традиционных радиолокационных систем, используемых для обнаружения ВОП, становится основной причиной ограничения их эффективности, например при разминировании дорог и местности. Электромагнитные помехи, созданные отражающими объектами, а также электрические свойства почвы ухудшают уверенный приём полезного сигнала, а следовательно и эффективного обнаружения и точной идентификации ВОП.

Поэтому совершенствование радиолокационных методов и средств, обеспечивающих высокую степень помехоустойчивости и эффективное обнаружение ВОП, является актуальным направлением исследований. Решение этой задачи имеет важное значение для обеспечения безопасности граждан в районах с неочищенными от ВОП территориями.

Как уже подчеркивалось, одним из основных ограничений в применении радиолокационного метода для поиска различных объектов под и над землей является высокий уровень помех от окружающего фона. Поскольку естественный фон, такой как грунт, вода и растительность, практически лишен нелинейных электромагнитных свойств, радиолокационные системы сталкиваются с трудностью в регистрации гармоник облучающего поля, что влияет на точность обнаружения традиционной радиолокации. Однако исследования показали, что искусственные объекты, находящиеся в зоне поиска на поверхности грунта или в его толще, могут создавать нелинейные эффекты, особенно если они содержат высокочастотные полупроводниковые радиодетали, такие как транзисторы, диоды, а также точечные прижимные стальные контакты. Наибольшими нелинейными свойствами обладают радиоуправляемые взрывные устройства, осколочные части, обломки ВОП и радиосхема. Это открывает возможности для НРЛС обнаружения таких объектов в условиях повышенной сложности окружающей среды.

В этой работе рассмотрено радиозондирование местности мощным гармоническим сигналом. Экспериментально установлено, что НЭПР большинства объектов, содержащих электронные устройства составляют $10^{-7} - 10^{-11} \text{ м}^2$ на 2-ой гармонике, $10^{-10} - 10^{-12} \text{ м}^2$ на 3-ей гармонике и величина ЭПР этих же нелинейных объектов составляли $10^{-3} - 10^{-2}$.

Для достижения цели нашего исследования, мы применили комплекс методов, направленных на детальный анализ и сравнение обнаружения взрывоопасных объектов при использовании традиционной и нелинейной радиолокации. Анализ характеристик обнаружения, с схемой статистического эксперимента:

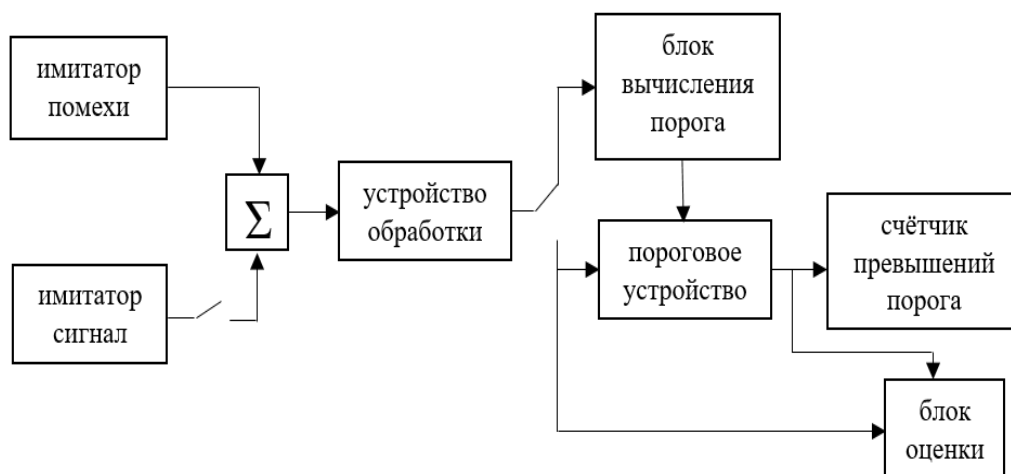


Рисунок 1. Функциональная схема статистического эксперимента

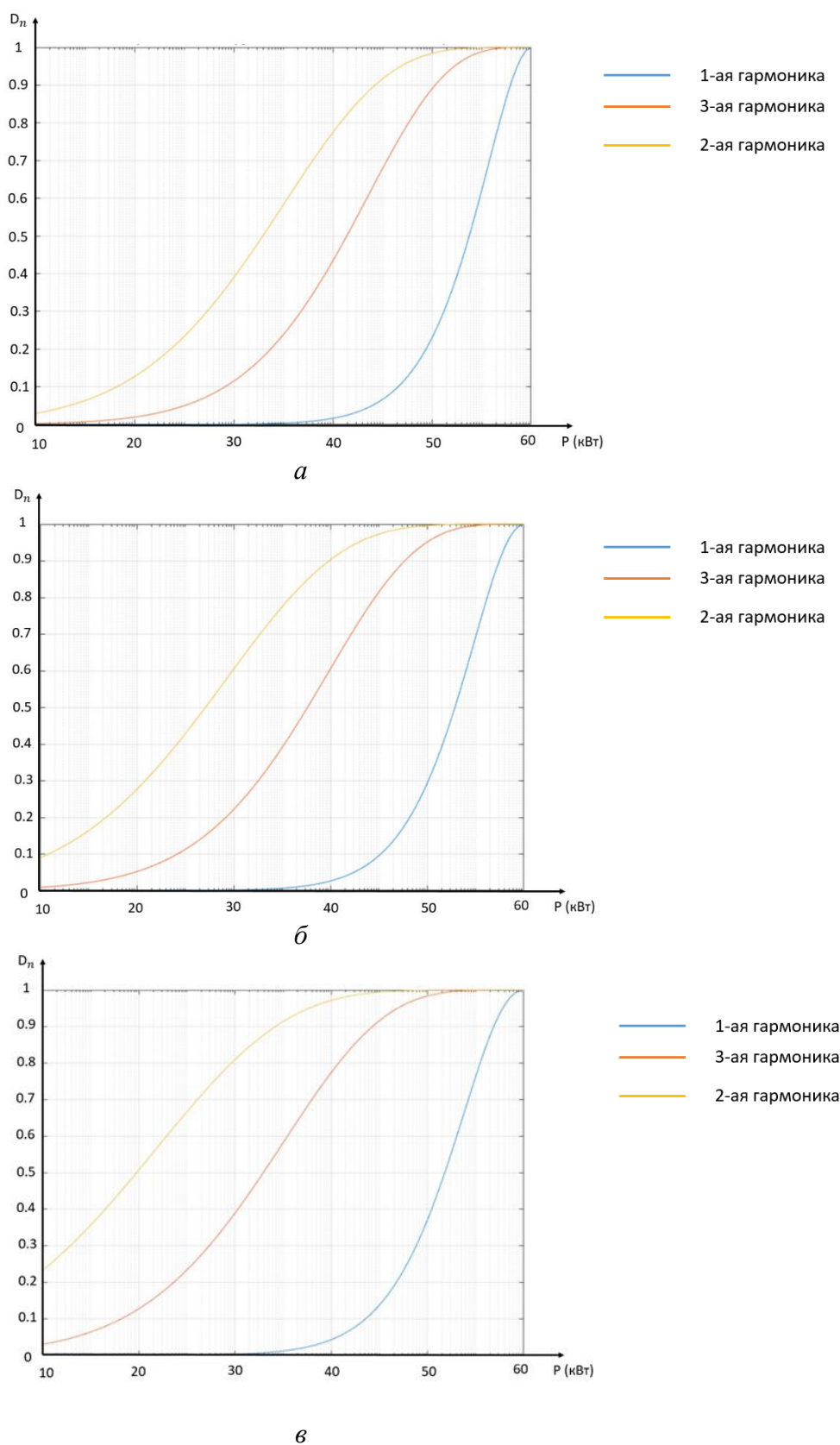


Рисунок 2. Зависимости вероятности обнаружения объекта от мощности передатчика РЛС: *а* – $F = 10^{-5}$, *б* – $F = 10^{-3}$, *в* – $F = 10^{-1}$

Выводы:

1. Показано, что в одинаковых условиях эффективность обнаружения взрывоопасных объектов при использовании нелинейной радиолокации превосходит эффективность традиционных методов.

2. Доказано, что вероятность обнаружения объекта традиционными РЛС зависит от уровня помех окружающего фона, который обычно высок.

3. Отмечено, что величина НЭПР влияет на вероятность обнаружения объекта и показана возможность распознавания нелинейных объектов по признакам 2-ой и 3-ей гармоник.

Библиография

1. Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А. Новые методы обнаружения скрытых объектов. - М.: ООО «Эльф ИПР», 2011. - 504 с.
2. Нгуен В.К., Фам Д.Хи., Николаев А.В. Радиодетектирование сигнала, рассеянного нелинейным объектом, для безопасных машин. В сборнике: XXXV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2023). Сборник трудов конференции. Москва, 2023. С. 363-370.
3. Хи Ф.Д., Кыонг Н.В., Николаев А.В. Радиоэлектронные средства военно-инженерной службы вьетнамской народной армии и перспектива их развития. Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2023. № 1. С. 74-79.

Способы управления диаграммой направленности антенн георадара

Сахтеров В.И. (ИЗМИРАН, sahterov@izmiran.ru)*

Аннотация

В настоящее время широко используются приборы подповерхностного зондирования. В основном это классические малоглубинные георадары использующие технологию стробоскопического осциллографа. Также довольно широко в своем сегменте используются глубинные импульсные георадары с сверхширокополосными сигналами повышенной амплитуды.

Все данные приборы имеют фиксированную диаграмму направленности антенно-фидерных устройств. Предложены способы управления диаграммой направленности антенны передатчика. Также рассмотрены способ управления диаграммой направленности приемной антенны. Использование предложенных способов в комплексе позволяет применить для обработки принимаемых сигналов более точные фазовые способы обработки сигналов, по сравнению с современными используемыми амплитудными способами, что повысит качество обнаружения слабоконтрастных объектов

Ключевые слова

Георадар, антенны, диаграмма направленности, фазовая обработка сигналов

Источники финансирования

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22 - 12-00083).

Теория

В используемых в настоящее время георадарах диаграмма направленности (ДН) антенн имеют фиксированное значение. Для устранения различных эффектов главный лепесток диаграммы направленности излучающей антенны направлен строго перпендикулярно относительно расположения антенны. При наличии не симметрии главного лепестка полученные данные георадиолокации могут незначительно отличаться. Измерения проведенные на стенды позволило провести сравнительный анализ распределения поля в ближней зоне [1]. В дальнейшем полученные результаты измерений позволило разработать направленную антенну подземного излучения, которая применена для каротажа [2,3]. В данной работе рассмотрена возможность изменения ДН в горизонтальной плоскости, как следствия изменяя расстояние между вибраторами и экраном. В продолжении исследований по разработке антенн подземного излучения предложен способ управления ДН дипольной антенны. Схема, диаграммы напряжений и ДН главного лепестка приведены на рис. 1.

В данной схеме используется двухполярный высоковольтный источник напряжения V с которого через защитные резисторы R_g напряжения поступают на накопительные конденсаторы C и и газонаполненный разрядник FV . Вторые выводы конденсаторов через переменные резисторы R соединяются с общей точкой источника питания и через разъем X соединяются резистивно-нагруженным вибратором, другие концы вибратором и общая точка источника питания также соединяются с экраном S . Экран S представляет собой пластину из дюралюминия толщиной 4 мм. Использование экраном из более тонких пластин приводит к возникновению паразитных автоколебаний.

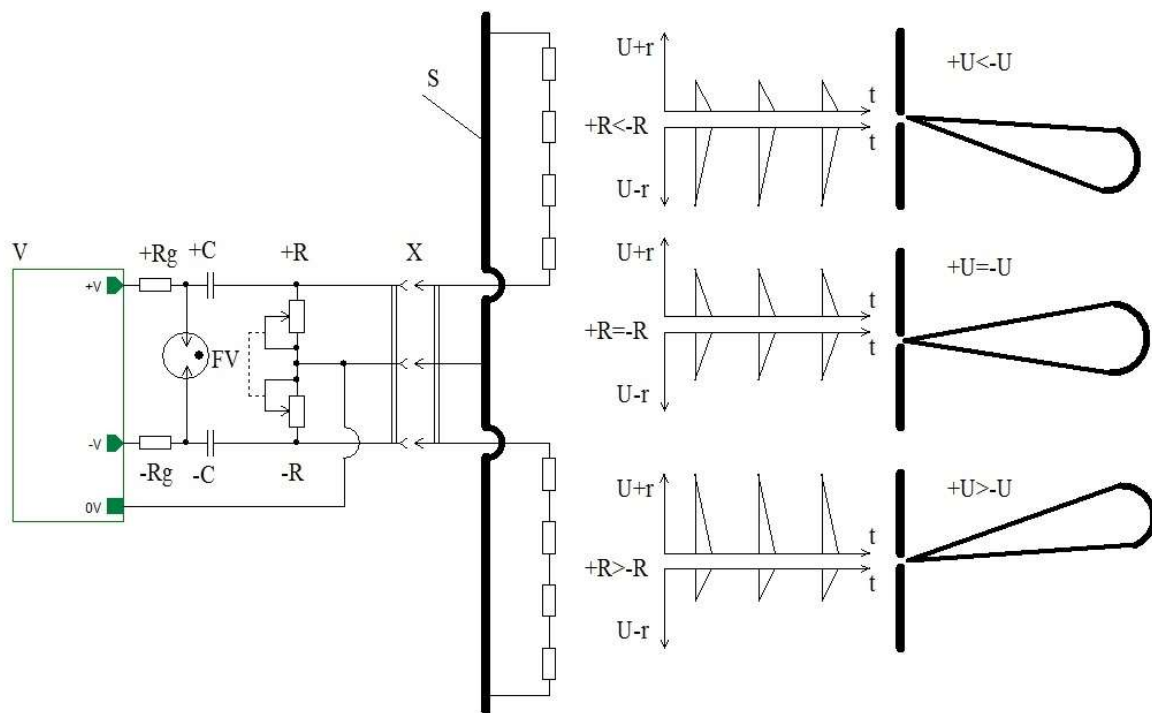


Рисунок 1. Управление диаграммной направленности в азимутальной плоскости.

При достижении на конденсаторах разнополярного напряжения уровня пробоя разрядника FV происходит соединение цепи и протекания тока по этой цепи $+C, +R, -R, -C, FV$. Переменные резисторы подключены так что при увеличения сопротивления в одном происходит снижения сопротивления у второго резистора. Вследствие падения напряжения при протекании тока образуются два разнополярных дельтаобразных импульсов разных амплитуд. Таким образом к вибраторам поступают импульсы разных амплитуд, при равных амплитудах главный лепесток ДН перпендикулярен вибраторам, при преобладании амплитуды на каком-то вибраторе главный лепесток отклоняется в сторону максимального импульса. Вследствие этого передний фронт электромагнитной волны падает на объект или поверхность под разным углом, и отраженный от объекта сигнал естественно отражается под другим углом и при приеме имеет отличную амплитуду и фазу, что нужно учитывать при обработке сигнала. Также в некоторых случаях возможно принудительное отклонение главного лепестка ДН.

Возможны различные схемы реализации для такого способа управления диаграммой направленности дипольной антенны. При использовании различных переключателей, в том числе предназначенных для дистанционного переключения, для изменения сопротивления разрядных резисторов будет происходить дискретное изменение диаграммы направленности. При использовании транзисторов возможно создание системы излучения с плавным управлением главного лепестка ДН излучающей антенны.

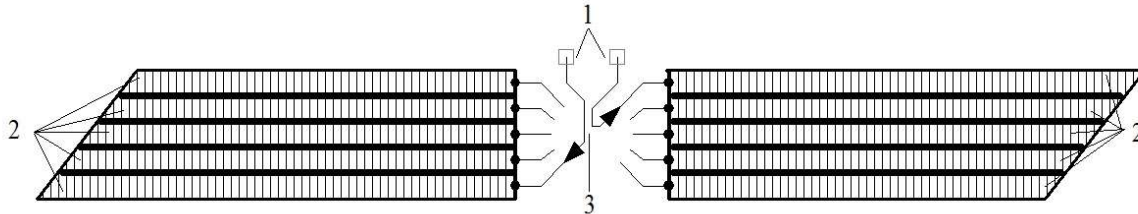


Рисунок 2. *Управление диаграммой направленности приемной антенны*

Теперь рассмотрим управление диаграммой направленности приемной антенны георадара. В антеннах используемых для радиосвязи в дипольных антеннах для изменения диаграммы направленности используют вибраторы различных длин, положение главного лепестка смещается в сторону более длинного вибратора, но в случае периодических гармонических сигналов требуются дополнительные реактивные элементы для согласования сопротивления антенны с сопротивлением используемого устройства. В случае георадиолокации при использовании резистивно-нагруженных антенн согласования антенны с устройством не требуется, практически антенны всех длин имеют изменение сопротивлений по одному закону. В этом случае для изменения ДН приемной дипольной антенны производится коммутация вибраторов разных длин. В результате в зависимости от длины вибраторов главный лепесток ДН будет направлен в сторону более длинного вибратора, при равной длине ДН будет перпендикулярно антенне.

Также необходимо отметить» вопрос синхронизации при проведении фазовых измерений, при использовании серийного георадара «Grot-12h» и экспериментального георадара на базе USB-осциллографа при первоначальных экспериментах не было отмечено изменения в радарограмме при изменении положения ДН дипольной излучающей антенны [4,5]. Проведенные эксперименты с двухканальным осциллографом при использовании одного канала в качестве синхронизации наоборот показали изменение фазы принимаемого сигнала при небольшом изменении амплитуды. Такое же решение синхронизации по воздушному сигналу было реализовано при проведении экспериментов по бесконтактному способу измерения длины электропроводящих свай, данный способ показал свою эффективность и позволил показать возможность использования стандартного импульсного георадара для выполнения данной задачи.

Выводы

Предложенный способ управления диаграммой направленности излучающей антенны георадара при разработке соответствующего программного обеспечения будет возможно применять для обнаружения слабоконтрастных объектов. Использование приемной антенны с управляемой диаграммой направленности дополнительно повысит уровень получаемой информации при зондировании в одной точке без перемещения георадара.

Библиография

1. Сахтеров В. И. Измерение характеристик антенн георадаров // Распространение радиоволн: труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции [Электронный ресурс] : научное электронное издание. — Калининград : Издательство БФУ им. И. Канта, 2021. - С.596-600
2. Сахтеров В.И. «Направленная антенна для подземного излучения» Патент на изобретение №RU2753250C1, зарегистрирован в Госреестре 15.08.2021 г.
3. Сахтеров В.И., Прокопович И.В., Попов А.В. Экранированная дипольная антенна для задач радиолокационного каротажа // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 8. С. 103-112. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202208-11>
4. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И.. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы №5 2012г., С.3-5
5. Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. «Георадар для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности». Патент на полезную модель RU218691U1, зарегистрирован в Госреестре 06.06.2023г.
6. Аверин А.А., Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. Бесконтактный способ измерения длины электропроводящих свай // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 9. С. 88–95. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202309-08>

*Сравнительный анализ методов определения угловых координат для применения в
безопасных машинах*

Фам Дык Хи (Московский технический университет связи и информатики,
d.h.fam@edu.mtu.ru),*

*Нгуен Ван Кыонг (Московский технический университет связи и информатики,
v.k.nguen@edu.mtu.ru),*

*д.т.н., доцент Николаев А.В (Московский технический университет связи и
информатики, alarmoren@yandex.ru),*

*Волошин А.Ю. (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
anvo@yandex.ru)*

Аннотация

В современном мире существует угроза террористической деятельности с применением электронных взрывных устройств. Актуальной задачей является обеспечение безопасности мирового населения от этой угрозы. Электронные взрывные устройства являются нелинейными объектами для радиолокационной техники. В данной работе представлен сравнительный анализ методов определения местоположения таких объектов по угловым координатам с помощью радиолокационной техники. Рассмотрены амплитудный и фазовый методы пеленгации, их преимущества и недостатки.

Ключевые слова

Пеленгации, амплитудный способ, пеленгационная характеристика, метод максимума, метод минимума, метод сравнения, фазовый пеленгатор, нелинейный объект, радиолокационная техника.

Теория

В современном мире определение координат электронных взрывных устройств становится все более важной задачей для радиолокационной техники. Это вызвано необходимостью борьбы с террористическими угрозами и поддержанием общественной безопасности. Нелинейные объекты, такие как взрывные устройства, представляют особый вызов из-за их способности создавать опасность без явного обнаружения. В связи с этим актуальным становится разработка и совершенствование методов радиолокационного обнаружения и определения координат таких объектов.

На сегодняшний день существует широкий спектр подходов к решению этой задачи. Среди наиболее распространенных и перспективных методов можно выделить амплитудные и фазовые методы. Использование различных методов и их комбинаций позволяет повысить эффективность обнаружения и определения координат электронных взрывных устройств, что имеет критическое значение для обеспечения безопасности общества.

Амплитудный способ пеленгации является одним из методов определения направления на источник радиоизлучения, основанный на использовании направленных свойств антенн. К ним относятся методы максимума, минимума и сравнения [1].

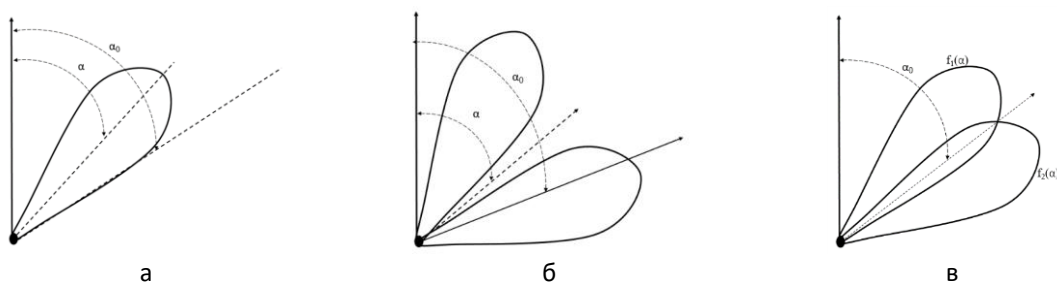


Рисунок 1. Амплитудные способы:

а) Метод максимума б) Метод сравнения в) Метод минимума

В точке приема напряженность поля обычно представляется в комплексной форме в виде: [2]

$$\dot{E}(t) = E_0 e^{i(\omega t - \varphi_0)},$$

где, φ_0 – начальная фаза.

Для оценки точности метода пеленгации используются пеленгационная (дискриминационная) характеристика $G(\theta)$ и крутизна пеленгационной характеристики $S(\theta)$. Пеленгационная характеристика $G(\theta)$ является ключевой характеристикой радиопеленгатора. Она описывает зависимость выходного напряжения пеленгатора от угла прихода радиоволн.

На рисунке 2 представлена зависимость крутизны пеленгационной характеристики $S(\theta)$ от угла положения источника радиоизлучения θ при разных ширинах диаграммы направленности по методу максимума.

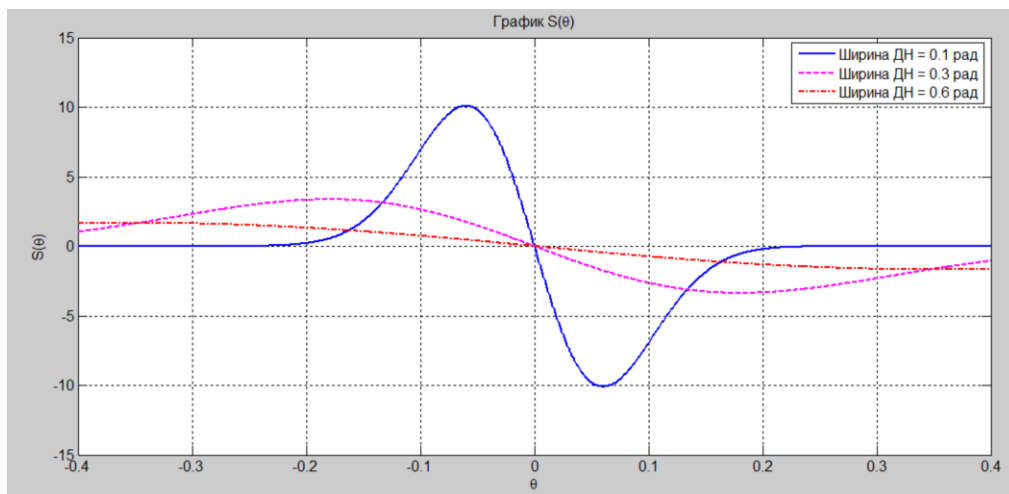


Рисунок 2. Крутизна пелегационной харктеристики при нелинейной радиолокации с различными антеннами по методу максимума

Анализируя формы пеленгационных характеристик различных антенн, можно сделать вывод о недостаточной точности метода максимума при определении радиоизлучения по угловым координатам. Это обусловлено тем, что при приближении угла положения нелинейного объекта к равносигнальному направлению, крутизна графика стремится к нулю.

При применении метода сравнения угловые координаты определяются за счет сравнения уровней принимаемых сигналов в пространственных каналах как минимум двух пересекающихся диаграмм направленности антенн. На рисунке 3 представлены дискриминационные характеристики при различных ширинах диаграммы направленности цилиндрических спиральных антенн.

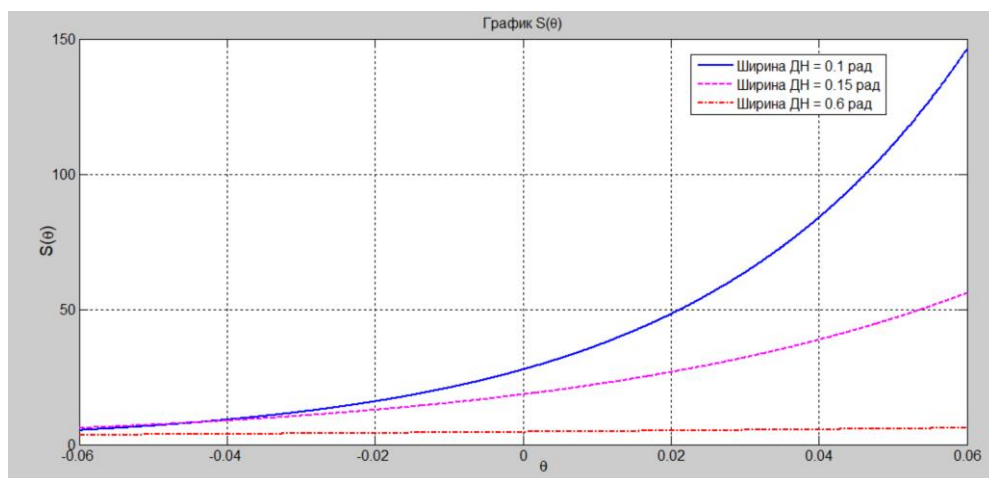


Рисунок 3. Крутизна пелегационной харктеристики метода сравнения

Из рисунка 3 следует, что чем уже ширина диаграммы направленности, тем больше крутизна пеленгационной характеристики и тем больше точность определения угловых координат источника радиоизлучения [3]. Следовательно, по сравнению с методом максимума метод сравнения имеет высокую точность определения местоположения.

Рассмотрим принцип построения простейшего фазового пеленгатора, для его использования в нелинейной радиолокации. Структурная схема фазового пеленгатора представлена на рисунке 4 [4].

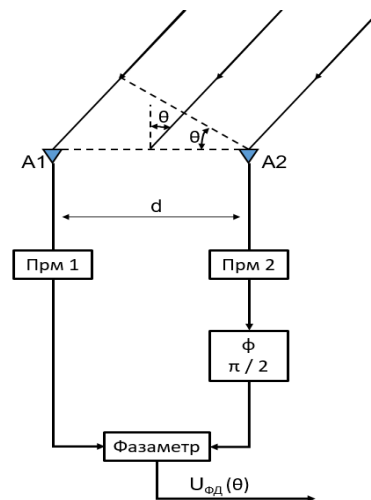


Рисунок 4. Структурная схема фазового пеленгатора

Простейший (двухканальный) фазовый пеленгатор состоит из двух одинаковых антенн, разнесенных на расстоянии d , называемом базой фазового пеленгатора. В один из каналов используется фазовращатель на $\pi/2$. Благодаря смещению фазы сигнала пеленгационная характеристика становится нечетной функцией, т.е. возможно определить объект, смещающий перпендикулярно к базе (см. рис. 5). Если объект находится на расстоянии много больше базы пеленгатор, то фронт проходящей волны считается плоским. Результат расчета крутизны пеленгационной характеристики фазового метода при различных соотношениях базы и длины волны $h = d/\lambda$ представлен на рисунке 6.

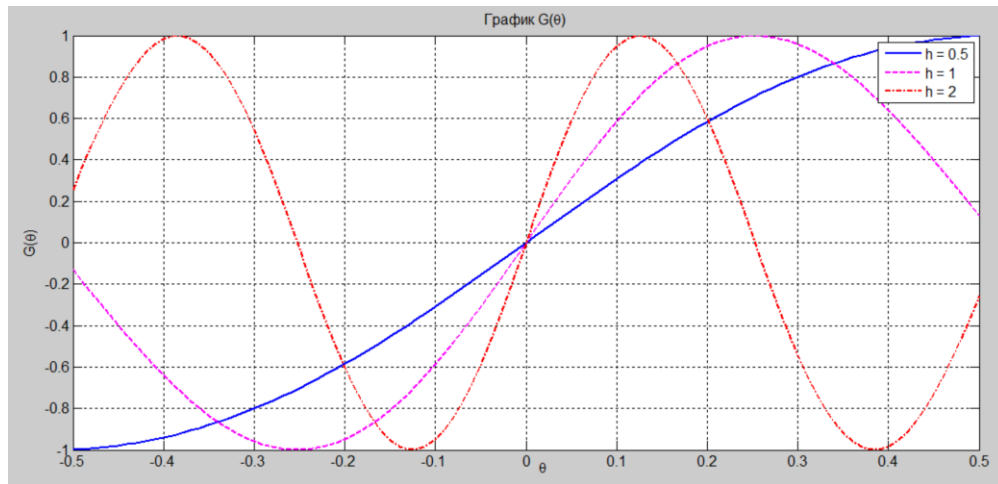


Рисунок 5. Пелегационная харктеристика фазового метода при различных соотношениях базы и длины волны h

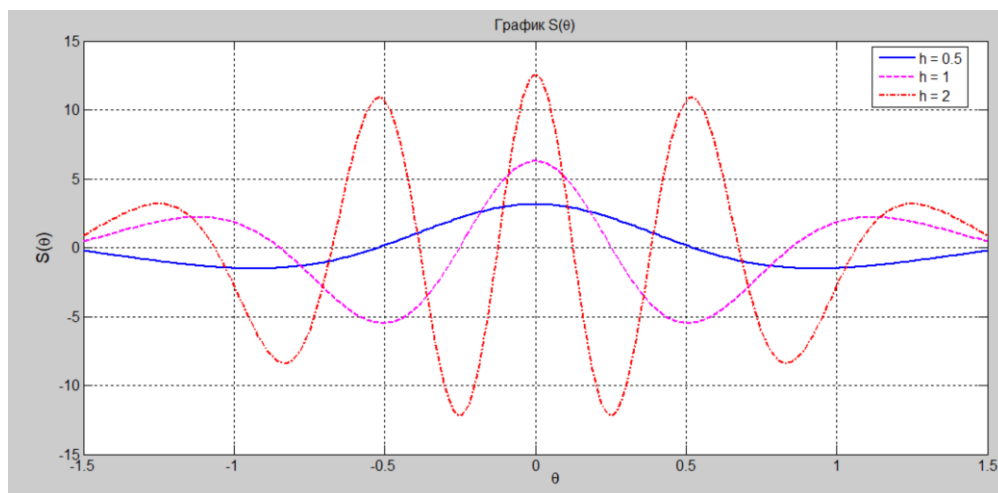


Рисунок 6. Крутизна пелегационной харктеристики фазового метода

Из рисунка 6 видно, что крутизна пелегационной харктеристики увеличивается с возрастом соотношения базы и длины волны h . Однако при этом появляется неоднозначность диапазона измерения угла $\Delta\alpha$. Для исключения неоднозначности измерения и обеспечения высокой точности необходимо применить многоканальный фазовый пеленгатор с достаточными узкими диаграммами направленности.

Выводы

1. Амплитудный и фазовый методы имеют свои преимущество и недостатки. В зависимости от требования к точности определения местоположения электронного взрывного устройства необходимо выбрать один из вышеуказанных методов или несколько методов пеленгации.

2. По результатам сравнения крутизны пеленгационной характеристики следует отметить, что:

Метод сравнения и фазовый метод обладают высокой точностью определения объектов по угловым координатам;

Указанные методы можно применить при проектировании безопасной машины, размещая излучатель на верхней балке автомобиля, а приемные цилиндрические спиральные антенны, например с эллиптическим основанием, в фарах.

Библиография

1. Нгуен, В. К. Радиодетектирование сигнала, рассеянного нелинейным объектом, для безопасных машин / В. К. Нгуен, Д. Х. Фам, А. В. Николаев // XXXV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2023) : Сборник трудов конференции, Москва, 13–14 ноября 2023 года. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2023. – С. 363-370.
2. Основы радиотехнических систем : учебное пособие / Ю.Т. Зырянов, О.А. Белоусов, П.А. Федюнин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 144 с.
3. Пеленгационные антенные системы с пространственной компенсацией помех: учеб.-метод. пособие / С. В. Козлов. – Минск : БГУИР, 2019. – 158с.
4. Золотарёв И. Д. Фазовые пеленгаторы в условиях радио-электронной борьбы / И. Д. Золотарёв, В. А. Березовский // Омский научный вестник. – 2009. – № 3 (83). – С. 264–268

Передвижной комплекс ОНЧ-регистрации
Капустина О.В. * (ИЗМИРАН, olkap@izmiran.ru),
Дружин Г.И. (ИКИР ДВО РАН, drug@ikir.ru)

Аннотация

Представлено описание передвижного наземного пункта ОНЧ-регистрации и результатов его работы

Ключевые слова

ОНЧ-КНЧ электромагнитные волны, атмосферерики, спрайты, твики.

Описание комплекса и методики его работы

По инициативе Ю.М. Михайлова ИЗМИРАН совместно с ИКИР и ИВиС ДВО РАН был организован наземный пункт регистрации (рис.1) около реки Левая Авача (54° N, 158° E) на Камчатке [Михайлов и др., 2010]. Питание комплекса осуществлялось от аккумуляторной батареи, которая, в свою очередь, подзаряжалась от солнечных батарей. Электромагнитные сигналы в широкой полосе 10 Гц-20 кГц принимались на две магнитные антенны, регистрировались приемником и, оцифрованные с шагом по времени $\Delta t=20$ мкс, записывались на NoteBook в режиме 1 минута в начале каждого часа круглосуточно. В остальное время широкополосные данные поступали на аналоговый спектроанализатор с набором узкополосных аналоговых фильтров (количество и характеристики фильтров варьировались в разных комплектах аппаратуры). На выходе каждого фильтра огибающая оцифровывалась с шагом 1 сек; отсчеты усреднялись за 1 мин, затем также записывались в файлы на диск. На пункте Левая Авача регистрация проводилась круглосуточно с августа по октябрь



2002 и с августа по начало ноября 2004

Рисунок 1. Комплекс ОНЧ-регистрации у реки Левая Авача: слева – аккумулятор и солнечные батареи, справа – антенный блок. В палатке – приемная аппаратура и ноутбук

Результаты и обсуждение

Узкополосные записи (Рис.2) были использованы в работе по исследованию атмосферных эффектов в нижней ионосфере во время тропических циклонов [Михайлови др.,2005], а также электрических и электромагнитных процессов в приземной атмосфере перед землетрясениями на Камчатке [Михайлов и др., 2006]. По широкополосным записям августа 2002 г. обнаружены атмосферерики, возможно связанные со спрайтами [Дружин и др., 2023; 2025].

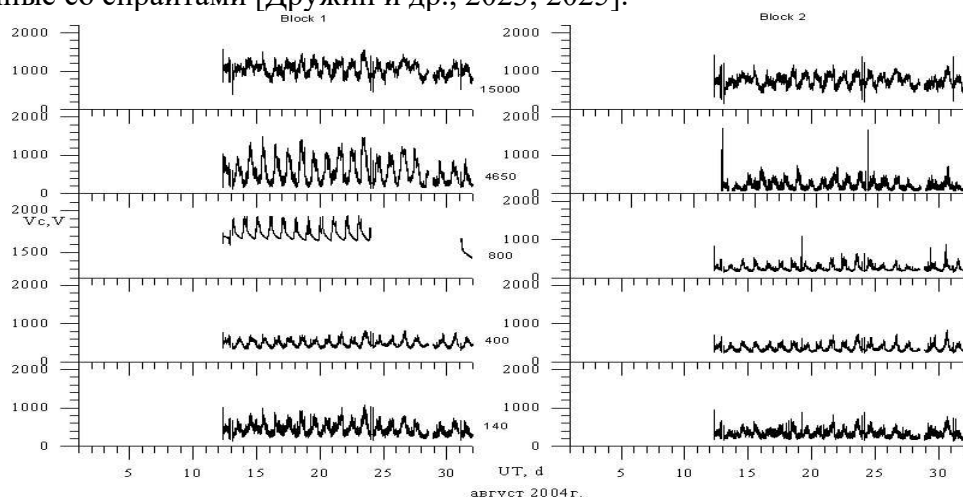
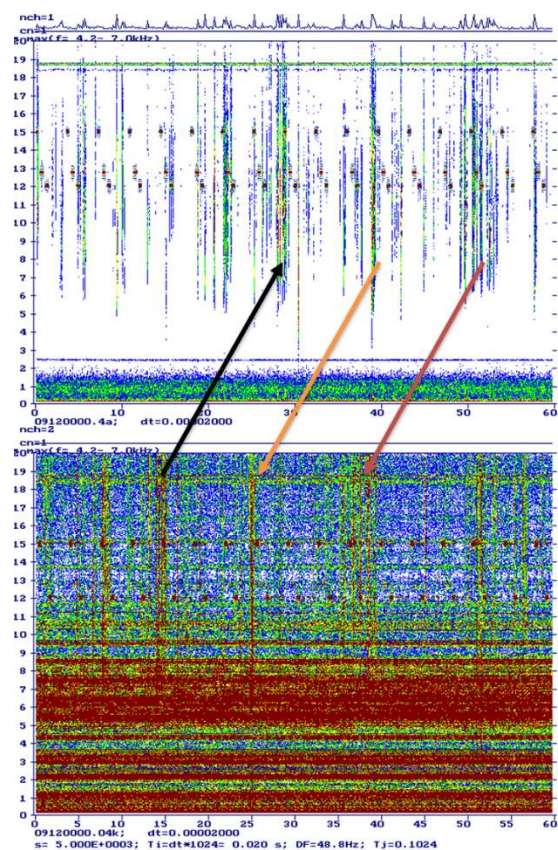


Рисунок 2. Узкополосные данные в августе 2004 г.



Несколько измененные комплекты аппаратуры работали в экспедициях: пп. Карымшина и Паратунка на Камчатке (рис.3). Модифицированный комплекс в п. Карымшина вместо магнитных датчиков работал с электрической антенной. В широкополосный канал был включен полосовой фильтр (2-10 кГц), запись велась на более современный ноутбук. Питание осуществлялось от батареи аккумуляторов с перезарядкой от дизель-генератора. Регистрация проводилась еще несколько лет.

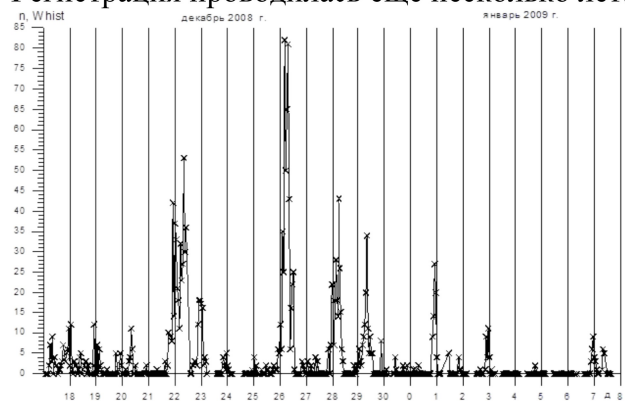


Рисунок 3. Одновременная регистрация в пунктах Левая Авача и Паратунка

Рисунок 4. Зависимость от времени количества
свистящих атмосфериков (СА) в минуту

На рисунке 4 представлен анализ данных, полученных в декабре 2008, начале января 2009 гг., иллюстрирующий повышенную активность свистов, что можно объяснить повышенной грозовой активностью в противоположном полушарии и действием тропического циклона, а также модификацией ионосферы в этот период [Михайлов и др., 2019]. На рисунке 5 представлены эхо сигналы СА, зарегистрированные в результате образования ионосферного канала, а на рис.6 - схема эксперимента в горах Вьетнама (Дьен Бьен Фу $21^{\circ}23'50''N$; $103^{\circ}0'28''E$) и сравнительное количество зарегистрированных атмосфериков на Камчатке и во Вьетнаме.

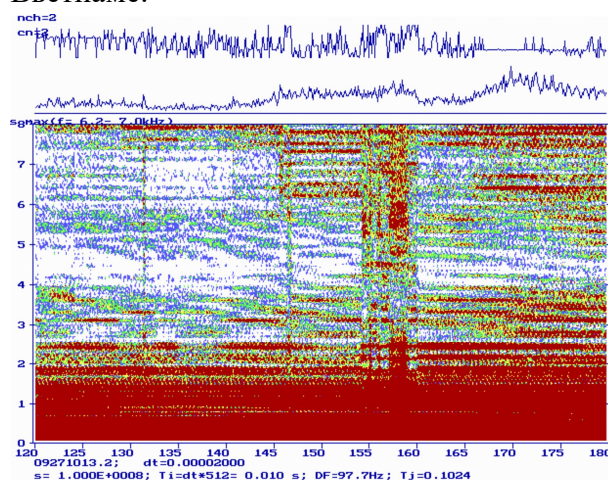


Рисунок 5.

Передвижной пункт наблюдений ОНЧ-электромагнитных сигналов (атмосфериков) был организован с помощью Института геофизики Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам в горах Северного Вьетнама (г. Дьен Бьен Фу $21^{\circ}23'50'' N$; $103^{\circ}0'28'' E$). В комплекте аппаратуры

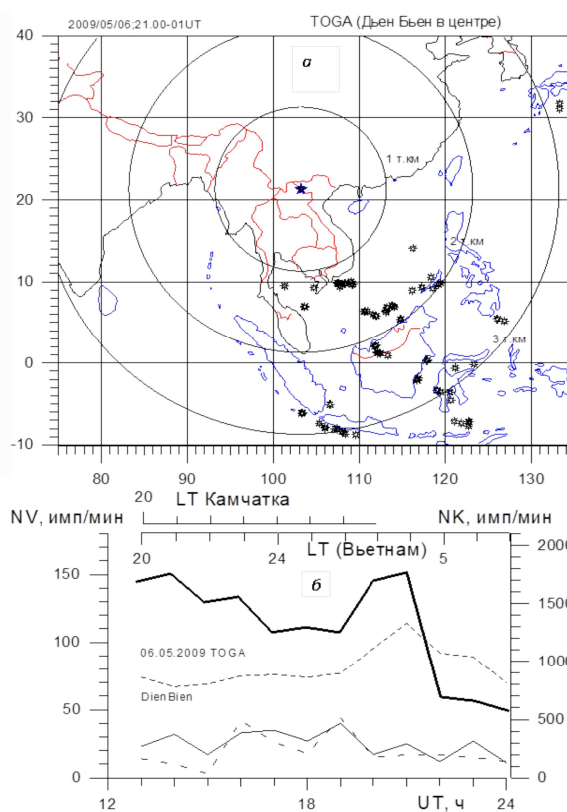


Рисунок 6.

отсутствовали солнечные батареи. Наблюдались преимущественно сигналы типа обычных атмосфериков с максимумом в спектре в диапазоне частот 4–9 кГц, иногда сопровождаемые так называемыми “хвостами” на частотах ниже 1 кГц, а также твики, но необычно малой длительности (~10 мс). По спектрально-временным характеристикам твика оценены некоторые параметры ионосферы, а также расстояние до источника атмосфериков, которое соответствует данным мировой сети локализации молний WWLLN (TOGA) [Труонг и др., 2011].

Выводы

Сравнение верхней записи, сделанной в пункте Левая Авача с нижней в Паратунке (рис.3) ярко демонстрирует преимущество положения основного пункта в том, что почти полное отсутствие окружающих промышленных и бытовых помех позволяет

выделить и проанализировать ОНЧ-КНЧ события и их связь с естественными катаклизмами: землетрясения, тропические циклоны (тайфуны) и т.д.

Анализ имеющихся данных продолжается.

Библиография

1. Дружин Г.И., Малкин Е.И., Капустина О.В., Михайлов Ю.М. КНЧ диапазон электромагнитного излучения грозового разряда как индикатор спрайта / Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений Сборник тезисов докладов XII международной конференции с. Паратунка, Камчатский край сент.–1 окт. 2021. С.22.
2. Дружин Г. И., Е. И. Малкин, О. В. Капустина. Атмосферика, связанные со спрайтами, по КНЧ/ОНЧ-наблюдениям на п-ове Камчатка // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63, № 5. С. 657-666.
3. Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Дружин Г.И. Свистовые характеристики в периоды возмущений ионосферы // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2019. Т.29. № 4. С. 173-181.
4. Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В., Дружин Г. И., Чернева Н. В. Возможные атмосферные эффекты в нижней ионосфере по наблюдениям атмосферных радиопомех на Камчатке во время тропических циклонов // Геомагнетизм и аэрономия. Т.45. №6. С.824-839. 2005.
5. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э. Электрические и электромагнитные процессы в приземной атмосфере перед землетрясениями на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т.46. № 6. С. 839–852. 2006.
6. Михайлов Ю.М., Рожков В.Б., Капустина О.В. Полевой автономный ОНЧ-приемник / V-я Международная конференция ИКИР ДВО РАН. С. Паратунка, Камчатской край, 2–7 августа. Сбор. труд. С. 150–151. 2010.
7. Труонг К. Х., Т. С. Во, Ю. М. Михайлов, А. Л. Харитонов, О. В. Капустина. ОНЧ-электромагнитный фон в сейсмоактивном регионе Северного Вьетнама // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50, № 5, с. 717–720. 2011.

Исследовательский ионозонд «ТОМИОН»

*Колесник С.А. * (Томский государственный университет, serkol@mail.tsu.ru)
Романов И.В. (Институт прикладной геофизики, drsuvor@gmail.com)
Пикалов М.В. (Томский государственный университет, pikalov@mail.tsu.ru)
Тужилкин Д.А. (Томский государственный университет, dmitry-88@mail.ru)*

Аннотация

В работе приводится краткое описание современных ионозондов и структура полностью цифрового исследовательского ионозонда «ТОМИОН».

Ключевые слова

Ионозонд, метод вертикального зондирования ионосферы

Краткое описание современных ионозондов

Все современные ионозонды вертикального радиозондирования можно разделить на три класса, это аналоговые, полу цифровые и цифровые. При этом структурная схема всех ионозондов одинакова. В их состав входят передатчик с усилителем мощности, приемник и комплексы приемно-передающих антенн. Здесь мы не рассматриваем ЛЧМ-ионозонды, а только импульсные.

В аналоговых ионозондах информация о радиозондировании (ионограмма) отображается на лучевой трубке осциллографа и, как правило регистрируется на фото пленке. Ярким примером таких ионозондов является АИС (автоматизированная ионосферная станция). Сегодня таких действующих ионозондов осталось очень мало или практически не осталось.

Наиболее распространенными являются полу цифровые ионозонды. Из отечественных ионозондов наиболее распространенным являются ионозонды «Парус» или «Парус-А», из зарубежных наиболее распространенный DPS-4, далее CADI, VIPIR и другие. Эти ионозонды управляются, как правило, персональным компьютером со своим программным обеспечением. Здесь же используются цифровые чипы для генерации излучаемого сигнала высокой частоты с своей формой модулирующего сигнала и корреляционного приема. В большинстве ионозондов используется амплитудная модуляция, кроме DPS-4, где используется фазовая модуляция. Система DPS-4, состоящая из дигизонда и четырех приемных антенн, отличается от своих аналогов тем, что имеет передатчик малой мощности (300 Вт против нескольких кВт для других систем). Это достигнуто благодаря внутриимпульсному фазовому кодированию, цифровому сжатию импульса и доплеровскому интегрированию.

Наиболее лучшим представителем этих ионозондов является ионозонд VIPIR (Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar), использующий методы Диназонда -21, позволяющие проводить трехмерную диагностику ионосферной плазмы [5, 6]. Этот факт был отмечен на РРВ-22 в п. Лоо в 2008 году во время проведения круглого стола «Современные методы вертикального радиозондирования». Приобретение в 2008 году ионозонда VIPIR в Томске явилось первой причиной к созданию отечественного

ионозонда нового поколения. Второй причиной стало появление в 2009 году на рынке высокоскоростных АЦП и ЦАП. А третьей причиной стало государственное финансирование проектов по созданию ионозонда «ТОМИОН» и разработке на нем новых методов вертикального зондирования ионосферы.

Ионозонд «ТОМИОН»

При создании отечественного ионозонда нового поколения мы придерживались очень простого принципа: сохранить все лучшее (перспективное) и заменить все неудачное исполнение в известных ионозондах. Так основным недостатком VIPIR является USB интерфейс для управления ионозондом, сбора и передачи данных. Этот интерфейс в ионозонде «ТОМИОН» был заменен на PCI Express. Так как был совершен переход на полностью цифровую систему, то цифровые чипы для генерации излучаемого сигнала высокой частоты с своей формой модулирующего сигнала и корреляционного приема стали не нужны, и они были полностью исключены. В ионозонде «ТОМИОН» зондирующий сигнал формируется в цифрах и принимаемый сигнал обрабатывается тоже в цифрах – это и является его отличительной чертой от полу цифровых ионозондов. Этот же цифровой переход позволил разработать метод ускоренного ионосферного радиозондирования, который является предметом коммерческой тайны (ноу-хау). Благодаря этому методу стало возможным получать полноценные трехмерные ионограммы за очень короткое время (до 100 мс).

После появления возможности перехода на полностью цифровую систему радиозондирования в 2010 году в Томском государственном университете был разработан и уже в 2011 году был введен в эксплуатацию в виде экспериментального образца ионозонд «ТОМИОН» (версия 1). Это была и остается до сих пор единственная в мире полностью цифровая система. В ионозонде излучаемый и принимаемый сигналы формируются в цифровом виде. Это преимущество над полу цифровыми и/или аналоговыми ионозондами позволяет:

- существенно увеличить (как минимум в 100 раз, чем у других аналогов) точность определения времени прихода отраженного от ионосферы сигнала и, как следствие, исследовать мелкомасштабные неоднородности в ионосфере, что очень важно для обнаружения так называемых плазмоидов, которые могут быть созданы врагом искусственным путем с помощью сверхмощной нагревной установки для нарушения радиосвязи (предпосылка к началу войны), это не «глушилка», а разрушение естественного ионосферного канала связи;

- существенно сократить время радиозондирования до 100 мс, что очень важно для электромагнитной совместимости и обработки информации в условиях стационарности ионосферы, а также малой вероятности обнаружения установки и не препятствовать необходимой связи;

- проводить экспериментальные (прикладные) исследования практически при любом режиме радиозондирования, используя все известные режимы работы всех ионозондов в мире и дополнительно разрабатывать свои;

- осуществлять мониторинг спектральных характеристик электромагнитного фона в полосе частот от 1 кГц до 30 МГц в пассивном режиме (определять радиосигналы повышенного уровня, пеленговать радиосигналы и т.п.).

Начиная с 2012 года ионозонд «ТОМИОН» стал выпускаться мало серийно (версия 2) [3]. В 2014 году по заказу Института прикладной геофизики (г. Москва) второй экземпляр сетевого ионозонда «ТОМИОН» был установлен на ионосферной станции Электроугли, Московская область (версия 3). Положено начало созданию единой сети мониторинга ионосферы Земли на базе ионозонда «ТОМИОН».

Ионозонд «ТОМИОН» прошел поверку и испытания в ГРЦСМИ СИ ФБУ «РОСТЕСТ-МОСКВА» и включен в государственный реестр типов средств измерения (Свидетельство RU.C.35.639.A №65065 от 14.02.2017). Также ионозонд «ТОМИОН» имеет знак качества двойного назначения, как для гражданских, так и для военных нужд (Свидетельство о присвоении Знака качества средств измерений, реестровый номер 33-021 от 17.05.2019).

В 2021 году для нужд МО РФ произведено и поставлено еще три ионозонда (версия 5). Внешний вид ионозонда «ТОМИОН» от первой до пятой версии представлен на рисунке 1.

Версия 1



Версия 5



Рисунок 1. Внешний вид ионозонда «ТОМИОН»

Основные методы и принципы работы этого ионозонда (версии 3) были представлены на РРВ-25 в Томске в 2016 году [2, 4] и на РРВ'2023 в Йошкар-Оле в 2023 году [1]. Все выпускаемые версии по возрастанию отличаются усовершенствованием как «железного» исполнения, так и программного обеспечения (ПО).

Выводы

Ионозонд «ТОМИОН» является исследовательским. Это единственный цифровой ионозонд в мире, на котором можно воспроизвести любой режим работы всех известных ионозондов, а также разрабатывать свои методы, и не только вертикального, но и наклонного, и возвратно-наклонного радиозондирования. Этот момент очень важен с точки зрения улучшения каких-либо качеств (получаемых результатов радиозондирования), например, уменьшение времени радиозондирования для исследования быстрых вариаций, или исследования мелкомасштабной структуры ионосферы, или уменьшения стоимости продукции за счет реализации в «железном» исполнении той части ПО, которое уже прошло проверку и испытания.

Благодарности

Авторы ионозонда выражают благодарности Сильвестрову С.В. и Сахтерову В.И., сотрудникам ИЗМИРАН, в разработке и конструировании усилителей мощности, Третьякову А.С., сотруднику ТГУ, в конструировании отдельных блоков в приемной части ионозонда «ТОМИОН».

Библиография

1. Колесник С.А. Современные методы вертикального радиозондирования ионосферы на ионозонде «ТОМИОН» //XXVIII Всероссийская открытая научная конференция "Распространение радиоволн", (РРВ'2023) 16 – 19 мая 2023. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. С.30-34
URL:<https://science.volgatech.net/upload/documents/science/RRW2023.pdf> ISBN 978-5-8158-2337-2.
2. Колесник С.А., Колесник Е.С. Режим пассивного радиозондирования ионосферы на ионозонде ТОМИОН //XXV Всероссийская открытая научная конференция "Распространение радиоволн", посвящённая 80-летию отечественных ионосферных исследований: РРВ-25, 4-9 июля 2016 г., Томск : труды конференции. Т. 1. Томск: Изд-во ТУСУР, 2016. С. 254-256.
3. Колесник С.А., Колмаков А.А., Сарычев В.Т., Хайтов Р.К. Сетевой ионозонд для определения пространственно- временного распределения параметров ионосферы Земли //Гелиогеофизические исследования. 2013. № 4. С. 90-100.
4. Митаев А.А., Колесник С.А., Хайтов Р.К., Романов И.В., Пикалов М.В., Колесник Е.С. Режим активного радиозондирования на ионозонде ТОМИОН //XXV Всероссийская открытая научная конференция "Распространение радиоволн", посвящённая 80-летию отечественных ионосферных исследований : РРВ-25, 4-9 июля 2016 г., Томск : труды конференции. Т. 1. Томск: Изд-во ТУСУР, 2016. С. 250-253.
5. Wright J.W., and Pitteway M.L.V., “High-resolution vector velocity determinations from the dynasonde,” J. Atmos. Terr. Phys., 56, 1994, pp. 961 – 977.
6. Zabotin, N. A., J. W. Wright, and G. A. Zhabankov, NeXtYZ: Three-dimensional electron density inversion for dynasonde ionograms, Radio Sci., 41, RS6S32, 2006, doi:10.1029/2005RS003352.

Общие сведения об отечественных моделях земной атмосферы

Королева К.Д. (АО «НПК «НИИДАР», ksenya.lobzova@gmail.com),
Николаев А.В. (Институт машиноведения им А.А. Благонравова РАН,
alarmoren@yandex.ru)*

Аннотация

Рассмотрены существующие отечественные модели земной атмосферы и проведена их классификация по признаку – способ построения. Также рассмотрены некоторые аспекты использования эмпирических моделей IRI, NeQuick и отечественных моделей SIMP-STANDARD, CHARM-DE.

Ключевые слова

Модели атмосферы, атмосфера, ионосфера

Теория

Сравнительно недавно была разработана классификация моделей ионосферы. Модели ионосферы классифицировались по нескольким признакам [1]: по методам построения; по масштабам пространства, описываемого моделью; по сезонам; по диапазону высот; по времени суток; по ионосферным параметрам, определяемым моделью; по степени возмущенности ионосферы в зависимости от широты, солнечной и магнитной активности; по форме представления ионосферных параметров. Многие перечисленные признаки взаимосвязаны. Предлагается дополнить классификацию по способу построения моделей атмосферы:

- эмпирические модели;
- численные модели;
- ассимиляционные модели;
- гибридные модели.

Наиболее часто используемыми для решения прикладных задач отечественными моделями земной атмосферы являются ассимиляционные и численные модели, которые используются в метеорологии и океанографии уже несколько десятилетий.

С 2009 г. в Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета ведется мониторинг состояния ионосферы с помощью моделирования основных физико-химических процессов, в слое от 100 км до 1000 км, при использовании ассимиляции данных о полном электронном содержании (ПЭС). Суть метода ассимиляции состоит в корректировке расчетов физической модели ионосферы по оперативно получаемым экспериментальным данным о ПЭС в ионосфере на трассах радиовизирования сигналов космических навигационных систем GPS и ГЛОНАСС с сети станций IGS (International GNSS Service) [2]. Ассимиляционные модели ионосферы существенно превосходят по

точности теоретические модели, поскольку на каждом шаге расчетов используются экспериментальные данные наблюдений.

Также к настоящему моменту большую популярность обрели глобальные численные трехмерные модели, описывающие взаимодействие нейтральных и заряженных составляющих и их перенос в атмосфере. Эти модели отличаются количеством учитываемых атмосферных компонент и процессов, некоторые из них включают в рассмотрение сотни фотохимических реакций. Рассмотрим существующую отечественную глобальную численную модель ионосферы CHARM-DE и ее развитие.

Первой отечественной трехмерной фотохимической моделью является модель CHARM, работающая при поддержке модели общей циркуляции ARM, которая «обеспечивает» фотохимическую модель полями трехмерных компонент скорости ветра и температуры, необходимыми для учета глобального переноса химически активной примеси. Модель CHARM описывает взаимодействие нейтральных компонент (озон и др.) с верхней границей до 90 км. Модель имеет разрешение по высоте 2 км по высоте, 10 градусов по широте и 10 градусов по долготе с шагом по времени 100 секунд.

Модель CHARM-I является развитием модели CHARM (в диапазоне высот 0 – 90 км), в которую дополнительно включены реакции с участием ионов (общее число фотохимических реакций – 200). В качестве ионизирующих факторов в модель были включены потоки УФ радиации на длине волны Ly- α , а также галактические космические лучи. Для расчета концентраций нейтральных составляющих использовался метод «химических семейств», а при расчете концентраций заряженных частиц – на каждом шаге интегрирования по времени накладывалось условие электронейтральности. Для описания пространственного переноса химически активной примеси в модели была использована схема Пратера. Созданная модель позволяет также учитывать воздействие солнечных вспышек и выбросов частиц на F-область [3].

Следующей модификацией модели CHARM является модель CHARM-DE. Модель CHARM-DE воспроизводит характеристики слоев атмосферы до высоты 130 км, что позволяет охватывать области D и E ионосферы при моделировании. Модель расширена за счет ионизированных составляющих. В нейтральных составляющих добавлена компонента O₂(¹ Δ g), важная для расчета ионизированных составляющих. В модели CHARM-DE учтены 194 химических реакций и 36 реакций фотодиссоциации и ионизации [4]. Несмотря на внушительное количество учитываемых в модели CHARM-DE компонент необходимо ее расширение до верхней границы ионосферы. Данная модель позволяет усваивать космическую информацию о потоках солнечной активности\радиации из открытых источников [5].

Разработка моделей земной атмосферы и ее важной части ионосферы являлась и остается важнейшим направлением ионосферных исследований. В зависимости от солнечной и магнитной активности, сезона, времени суток, геомагнитной широты создавались модели областей D, E, F1, F2, слоя Es, редко внешней ионосферы, а также различной природы ионосферных возмущений.

В настоящее время наиболее разработанной и развивающейся эмпирической моделью является модель IRI. IRI – это международный проект, спонсируемый Комитетом по космическим исследованиям (COSPAR) и Международным союзом радионауки (URSI). Основными источниками данных, которые используются в данной модели, являются: всемирная сеть ионозондов, спутниковые и ракетные измерения, а также данные радаров некогерентного рассеяния. Модель IRI позволяет вычислять профили электронной концентрации (в диапазоне высот от 50 до 2000 км), ПЭС, температуры электронов, ионов и т.д. в зависимости от времени и координат [2].

Существует еще одна постоянно развивающаяся быстродействующая трехмерная модель ионосферной электронной плотности – NeQuick, разработанная в бывшей лаборатории аэронавтики и радиораспространения Международного центра теоретической физики имени Абдуса Салама (ICTP), Триест, Италия, и в Институте геофизики, астрофизики и метеорологии (IGAM) Университета Грац, Австрия.

В модели NeQuick используются данные глобальной сети ионозондов, а также индексы солнечной активности (например, число солнечных пятен). Модель NeQuick позволяет получать профили ПЭС от 90 км до 20 000 км в зависимости от времени и географических координат [6]. Электронная концентрация, определяемая данной моделью, представляется в виде непрерывной функции и состоит из двух частей: нижней (ниже максимальной высоты слоя F2) и верхней (выше максимальной высоты слоя F2).

Близкой по способу построения к модели NeQuick является отечественная эмпирическая детерминированная медианная модель SIMP-STANDARD, разработанная совместными усилиями Института прикладной геофизики им. Е.К. Федорова Росгидромета и Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, реализована в виде набора подпрограмм на языке Фортран и файлов с коэффициентами, подгоняющих модельное ПЭС под реальное. Модель охватывает ионосферные области D, E и F в диапазоне высот от 65 до 1000 км [7].

Моделирование D, F1-областей в SIMP-STANDARD проводится на основе модели IRI, а при создании медианной модели области F2 использовался традиционный метод сферических гармоник. Моделирование солнечной составляющей сделано по аналогии с моделью NeQuick. Модель не распространяется на условия высокой магнитной активности и не учитывает спорадический слой Es [1]. Модель SIMP-STANDARD является единственной отечественной альтернативой модели IRI.

Разработанная недавно гибридная модель ионосферы CHARM-IONS представляет собой объединение фотохимической модели CHARM-DE и международной модели IRI, позволяющая построить профили электронной концентрации до высоты 1000 км с дискретностью 2 км и разрешением 1 км. При этом, профили для диапазона высот от 0 до 130 км получены с помощью модели CHARM-DE, а в диапазоне высот от 130 до 1000 км используются данные модели IRI представлены на Рис. 1. В диапазоне высот от 90 до 130 км обе модели дают одинаковую картину профилей электронной концентрации, а высота «стыка» моделей (высота 130 км отмечена точкой), является практическим потолком модели CHARM-DE [8].

Важно отметить, что с помощью гибридной модели возможно построение кривых распределения концентрации электронов с высокой детализацией всего пространства в пределах физической границы атмосферы, и получение слоисто-неоднородной модели трассы распространения радиоволны в широком диапазоне частот. Слоистое представление модели атмосферы позволяет учитывать интегральные потери сигнала на вертикальных и наклонных радиотрассах, а также оценивать преломление электромагнитной волны на границе двух слоев. Последнее важно при расчетах модифицированной дальности до космического объекта, т.е. полученной путем преобразования расчетной траектории луча с учетом коэффициента его преломления [8].

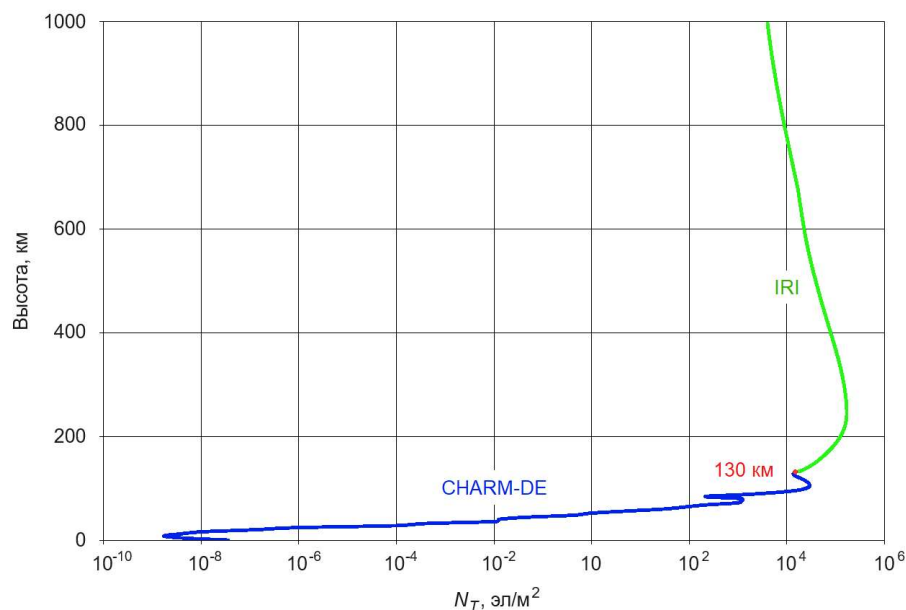


Рисунок 1. Рис. 1 – Профиль электронной концентрации 23.09.1991 (45° с.ш., 180° в.д., полдень), выполненный по расчетам с помощью гибридной модели CHARM-IONS: показаны участки профиля, полученные с помощью модели CHARM-DE (синий цвет) и с использованием модели IRI (зеленый цвет), а также точка «стыка» двух моделей на высоте 130 км

Выводы

1. Отечественные модели могут быть классифицированы по признаку: способ построения модели атмосферы (эмпирические, численные, ассимиляционные и гибридные).
2. Показано, что использование глобальной эмпирической модели IRI и модели NeQuick совместно с отечественной эмпирической моделью ионосферы SIMP-STANDARD может быть полезно при исследовании ионосферных слоев D, E и F в диапазоне высот от 65 до 1000 км.
3. Гибридная модель ионосферы CHARM-IONS представляет собой объединение отечественной фотохимической модели CHARM-DE и международной модели IRI и позволяет построить кривые распределения

концентрации электронов с высокой детализацией и спроектировать профиль космической радиолинии в диапазоне высот от 0 до 1000 км. Гибридная модель ионосферы CHARM-IONS может применяться для проектирования космических радиолиний 1-го и 2-го рода.

4. Отечественные модели SIMP STANDARD и CHARM-IONS соответствуют мировому уровню и имеют определенную перспективу при создании цифровых сервисов погоды для прогнозирования характера распространения радиоволн в широкой полосе частот, учитывающего как почасовые, так среднесуточные и сезонные колебания солнечно-земных связей

Библиография

1. Аксенов О.Ю., Козлов С.И., Ляхов А.Н., Трекин В.В., Перунов Ю.М., Якубовский С.В. Анализ влияния прикладных моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн и возможность их использования в интересах радиолокационных систем. I. Классификация прикладных моделей и основные требования, предъявляемые к ним в интересах радиолокационных средств // Солнечно-земная физика, 2020. Т. 6, № 1. С. 86-95, УДК 551.510.535, DOI: 10.12737/szf-61202008&.
2. Титов А. А., Соломенцев Д. В., Хаттатов В. У. Мониторинг состояния ионосферы в реальном времени с помощью трехмерной ассимиляционной модели // Радиоэлектроника и электроника, 2013. Том 58, № 6, с. 564–572. УДК 550.388.2.
3. Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Репнев А.И., Вьюшкова Т.Ю. Трехмерная численная глобальная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, том 55, № 4, с. 483-503, 2015.
4. Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Репнев А.И., Вьюшкова Т.Ю. Трехмерная численная глобальная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 55, № 4, 2015. С. 483-503.
5. Криволуцкий А.А., Банин М.В., Черепанова Л.А., Николаев А.В., Куколева А.А., Вьюшкова Т.Ю., Описание глобальной численной модели CHARM-DE при расчете профилей электронной концентрации в околоземном космическом пространстве. Гелиогеофизические исследования №37, 2023. С. 1-7.
6. Coïsson P., S.M. Radicella, R. Leitingner, B. Nava, Topside electron density in IRI and NeQuick: Features and limitations // Advances in Space Research. 2006. Vol. 37. P. 937–942.
7. Цыбуля К.Г. Простой алгоритм ассимиляции полного электронного содержания в ионосферную модель SIMP-STANDARD// Гелиогеофизические исследования. Выпуск 29, 50 – 56, 2021, УДК 551.510.535.
8. Николаев А.В., Старовойтов Е.И., Криволуцкий А.А., Банин М.В., Куколева А.А., Бодунов Д.М., Логунов А.А. Об учете земной атмосферы при проектировании космических радиолиний с помощью модели CHARM-IONS// Гелиофизические исследования. Выпуск 40, 93-102, 2023. УДК 53.02:087.4. ISSN 2304-7380.
9. Логунов А.А., Лобзова К.Д., Старовойтов Е.И., Николаев А.В. О влиянии атмосферы на космические радиолинии управления и навигации робототехникой.

*Об изменении спектральной прозрачности плазменного фона в ОНЧ диапазоне
частот при адгезии электронов загрязнениями*

Лундин Б.В. (ИЗМИРАН, boblundin@mail.ru)

Аннотация

Представлены новые формы классического дисперсионного уравнения для плоских электромагнитных волн в холодной магнитоактивной плазме. Такой подход позволяет в условиях приземной плазмы умеренной плотности эффективно исследовать особенности дисперсии и поляризации волн электронного свистового мода в диапазоне прозрачности от частот ионной отсечки, сравнимых с ионными гирочастотами, почти до интервала частот, где ионный вклад важен лишь для обеспечения квазинейтральности. В рамках развиваемого подхода исследовано влияние появления в плазме молекул газов и пылевых конгломератов с повышенным сродством к электронам на сужение частотных интервалов прозрачности для волн этого мода.

Вместо стандартных компонентов тензора диэлектрической проницаемости предложено использовать их специальные комбинации, характеризующие наличие резонансных углов при распространении радиоволн, эллиптичность поляризации их магнитных компонентов, содержащие возможность прямой оценки плазменной ионной частоты без использования бортовых масс-спектрометров. Это облегчает оценки прозрачности фоновой плазмы и ее экранирующих свойств в используемом интервале частот для зондирующих электромагнитных сигналов. Пример роста нижней частоты отсечки при изучении модификации спектрального диапазона прозрачности для ОНЧ волн электронного свистового мода от появления молекулярных и иных «загрязнений» с повышенным сродством к электронам (и их адгезии) в приземной плазме приведен на Рисунке 1. Эволюция «ионной частоты отсечки» изображена в виде роста отношения к частоте НГР резонанса как функции величины обратного удельного заряда частиц примеси и доли плотности заряда на отрицательно заряженных ионах (или пылевых конгломератах)- индекс D- в отношении к полной плотности положительных зарядов. В противоположность этому эффекту известно, однако, что для более высокочастотных плазменных мод область ионосферы, «обедненная» электронами, наоборот становится прозрачней для волн более низких частот. В продолжение изучения влияния на распространение радиоволн загрязнений плазмы молекулами и другими конгломератами тяжелых частиц с повышенным сродством к электронам, затронута проблема спектральных свойств почти чисто ионной плазмы. В локальных экзотических условиях уменьшения электронной плазменной частоты до значений сравнимых с ионной плазменной (из-за адгезии электронов фоновой плазмы загрязнениями) диапазон прозрачности для волн в холодной плазме сужается до малой окрестности вблизи ионной плазменной частоты. Подобные условия для образования почти чисто ионной плазмы создаются и целенаправленно в экспериментах по изучению свойств так называемой чистой pair-ion плазмы (например, для моделирования свойств электрон - позитронной плазмы) с равными удельными зарядами частиц, но противоположными знаками зарядов. Для более типичного случая фоновой плазмы, где ионная плазменная частота существенно превышает ионные гирочастоты, удалось развить методику определения гирочастот двух легчайших ионов фона по двум наибольшим из частот ионной отсечки в спектрах регистрации волн (т. е.

без масс-спектрометров). Следует отметить, что при удельных зарядах основных ионов фоновой плазмы существенно превышающих удельные отрицательные заряды частиц

«загрязнений», значение ионной плазменной частоты «загрязненной плазмы» почти не будет отличаться от исходного.

Ключевые слова

радиоволны, диапазон прозрачности, экранировка, приземная плазма

Теория

COLD PLASMA $N^2(\omega, \vartheta)$
New set $\{\cos^2 \vartheta_R, \chi, \eta\}$ Conventional set $\{\varepsilon, g, \eta\}$

$$\cos^2 \vartheta \left(1 - \frac{\chi}{N^2}\right) = \left(1 - \frac{\eta}{N^2}\right) \left[\cos^2 \vartheta_R \left(1 - \frac{\eta}{N^2}\right) - \frac{\chi}{N^2}\right]$$

$$\cos^2 \vartheta_R \equiv \frac{\varepsilon}{\varepsilon - \eta}, \quad \chi \equiv \varepsilon - \frac{g^2}{\varepsilon - \eta}, \quad \eta$$

High frequencies, $\omega \gg \omega_{pi}$ (only electrons contribute into $\{\varepsilon, g, \eta\}$)

:

$$\cos^2 \vartheta_R = \frac{\omega^2}{\Omega_c^2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{pe}^2 + \omega_c^2}\right), \quad \chi = 1, \quad \eta = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$$

$$\Omega_c^2 \equiv \frac{\omega_c^2}{(1 + \mu)}, \quad \Omega_{pe}^2 \equiv \frac{\omega_{pe}^2}{(1 + \mu)}, \quad \mu \equiv \frac{\omega_c^2}{\omega_{pe}^2}$$

Electron whistler dispersion law at high frequencies (without ions and without parallel to $\vec{B}_0$ displacement current $\omega_{pi} \ll \omega \ll \omega_{pe}$, $\cos^2 \vartheta_R = \omega^2 / \Omega_c^2$, $\chi = 1$, $1 - \eta / N^2 \simeq 1 + \omega_{pe}^2 / k^2 c^2$)

$$\omega^2 = \frac{\Omega_c^2 \cos^2 \vartheta}{(1 + \kappa)(1 + \tilde{\kappa}) + \mu \tilde{\kappa} \cos^2 \vartheta},$$

$$\kappa = \omega_{pe}^2 / k^2 c^2, \quad \tilde{\kappa} = \Omega_{pe}^2 / k^2 c^2, \quad \kappa = (1 + \mu) \tilde{\kappa}, \quad \mu \equiv \omega_c^2 / \omega_{pe}^2$$

COLD PLASMA $N^2(\omega, \vartheta)$
Ion cut-off frequency set $\{F, \epsilon, \eta\}$ Old set $\{\cos^2 \vartheta_R, \chi, \eta\}$

$$F(\omega_{\text{cut}}) = 0, \text{ where } N^2(\omega_{\text{cut}}) = 0$$

$$\eta \cos^2 \vartheta_R + F \sin^2 \vartheta_R = -\chi, \cos^2 \vartheta_R \equiv \epsilon / (\epsilon - \eta)$$

The "cut-off" form of cold plasma dispersion equation

$$0 = K[F(K + \sin^2 \vartheta) + \epsilon(1 + \cos^2 \vartheta)] + \epsilon - (\epsilon - \eta) \cos^2 \vartheta,$$

$$F \equiv \frac{(\epsilon^2 - g^2)}{\eta}, \quad K \equiv -\frac{\eta}{N^2}, \quad (\simeq \frac{\omega_{pe}^2}{k^2 c^2} \equiv \frac{\omega_p^2}{k^2 c^2} \frac{n_e}{n} \equiv \kappa,)$$

If $n_e/n \ll 1$, so that $\omega_{pe}^2/\omega_c^2 \ll 1$, the highest cut-off frequency tends to $\omega_{LHR} \approx \omega_{pi}$, then $F(\omega) = 0$ looks like

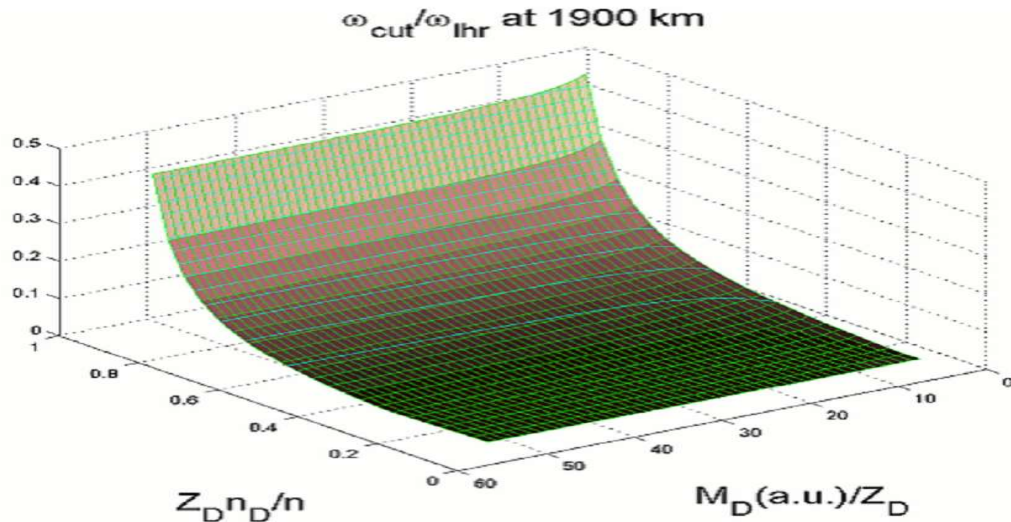
$$F(\omega) = \frac{n}{n_e} \left[\frac{\omega_p^2}{\omega_c^2} F_m F_p + \frac{\omega}{\omega_c} (F_p - F_m) - \frac{\omega^2}{\omega_p^2} \right] = 0.$$

$$\epsilon - g - 1 \propto F \quad m(\omega) = \sum_{\alpha} \nu_{\alpha} \frac{\omega}{\omega + \omega_{\alpha}} - \sum_{\beta} \nu_{\beta} \frac{\omega}{\omega - \omega_{\beta}} - \nu_e \frac{\omega}{\omega - \omega_c} = 0,$$

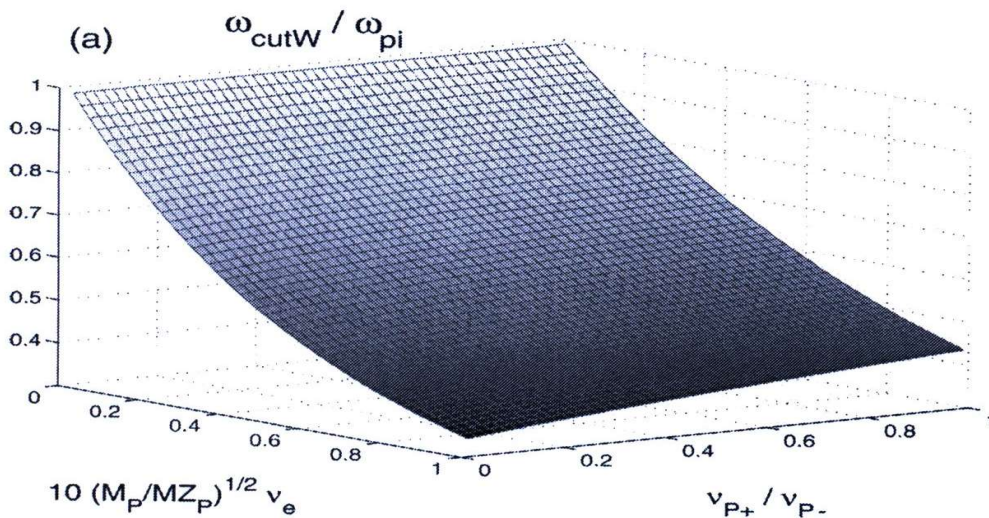
$$\epsilon + g - 1 \propto F \quad p(\omega) = \sum_{\alpha} \nu_{\alpha} \frac{\omega}{\omega - \omega_{\alpha}} - \sum_{\beta} \nu_{\beta} \frac{\omega}{\omega + \omega_{\beta}} - \nu_e \frac{\omega}{\omega + \omega_c} = 0.$$

$$j_x \pm i j_y \equiv \frac{\omega}{4\pi i} (E_x \pm i E_y) (\epsilon \pm g - 1).$$

Здесь и ниже приведены схемы преобразований классического дисперсионного уравнения для показателя преломления волн в холодной магнитоактивной плазме. Для волн электронного свистового мода полезно иметь также упрощенные уравнения для высоких частот, где ионы лишь обеспечивают квазинейтральность фоновой плазмы. Вместе с тем в отличие от наиболее часто обсуждаемого для условий приземной плазмы случая т. н. плотной плазмы, где гирочастота электронов существенно меньше электронной плазменной частоты, дополнительно необходим и произведен далее учет вклада поперечных токов смещения в дисперсию волн. Диапазон более низких частот включает ионную плазменную частоту и более низкую частоту нижнегибридного резонанса (НГР). Для изучения же нижней частотной границы диапазона прозрачности проведена еще одна нетривиальная модификация полного дисперсионного уравнения.



1. Эволюция отношения частоты ионной отсечки к НГР частоте свистовых волн при изменении доли зарядовой (-отрицательной) плотности примесей к полной плотности положительных зарядов и обратной удельной зарядовой плотности примесных частиц.



Дополнительные усложнения вносит переход к почти чисто ионной плазме с большим избытком примесных молекул газов и пылевых конгломератов проявляющих высокое сродство к электронам. Однако, в этом случае удалось выявить закон подобия для экспериментов моделирующих раir-ион плазму и показать, что одинаковая «чистота экспериментов» требует гораздо меньшей доли остаточных свободных электронов для раir-ион плазмы на базе фуллеренов, чем на базе атомов йода или водорода. Выше - рассчитан ход сближения ионной частоты отсечки диапазона прозрачности для свистовых волн с плазменной ионной частотой в почти раir-ион плазме для трех вариантов основных ионов: заряженных фуллеренов, йода и водорода. Все три поверхности совпадают в выбранных координатах, что и доказывает последнее утверждение.

Выводы

Теоретически найдены новые результаты для плазмы с примесями молекул и конгломератов частиц с невысокой подвижностью, но обладающих повышенным сродством к электронам, в части диапазонов прозрачности, экранирования при радиолокации в плазме как среде распространения зондирующих радиосигналов.

Библиография

1. Лундин Б., К. Краффт. О минимальном наборе плазменных параметров для определения закона дисперсии электронных свистовых волн. //Физика плазмы, Т. 35, N 6, 2009, С. 551-558.
2. Lundin B.V., C. Krafft. Modified electron whistler dispersion law. //J. Plasma Phys., V. 67(2-3), 2002, pp.149-161.
3. Lundin B., C. Krafft. On the dispersion law of low frequency electron whistler waves in a multi-ions plasma. // Ann. Geophys., V. 26, 2008, pp.1606-1615.
4. Lundin B.V., Krafft C. On the electron whistler dispersion law in a cold plasma with light ions and heavy charged particulates. //Phys. Plasmas 2009. V. 16. P. 052104.
5. Lundin B.V., Krafft C. On the dispersion features of whistler waves in almost pure ion plasmas. // Phys. Plasmas 2011. V. 18. P. 102114.

*Особенности DUC/DDC SDR в приемном тракте программно-аппаратного
комплекса вертикального зондирования ионосферы в период ионосферных бурь*

Митин О.В. (аспирант кафедры МуКМ ЮУрГУ, ИЗМИРАН,
mitin@izmiran.ru), Крашенинников И.В. (ИЗМИРАН, krash@izmiran.ru)*

Аннотация

В работе обсуждается использование современных подходов цифровой обработки сигналов (DSP, Digital Signal Processing) и Software Defined Radio, в частности, архитектуры Digital Down Conversion / Digital Up Conversion применительно к задаче конструирования архитектуры программно-аппаратных комплексов автоматизированного зондирования ионосферы (ионозонд, Ionosphere Sounding), а также представлены результаты практической апробации обсуждаемых подходов к анализу состояния ионосферы в период вспышечной активности Солнца на примере сильной ионосферной бури 5-6 Ноября 2023 года.

Ключевые слова

Software Defined Radio (SDR), DUC/DDC, ионосфера, вертикальное зондирование, цифровой ионозонд.

Введение

Системы автоматизированного зондирования параметров состояния ионосферы являются неотъемлемой частью как фундаментальных научных исследований физической природы околоземного пространства, так и атрибутом многих прикладных направлений человеческой деятельности — конечным пользователям необходим прогноз распространения радиоволн, а для построения прогноза распространения необходим ионозонд. В самом общем понимании современный ионозонд представляет собой специализированный прецизионный приемо-передатчик тестового радиосигнала, систематический анализ показаний которого позволяет получить детальные представления о состоянии и динамике ионосферы как среды передачи данных. В мире современных цифровых технологий тенденция использования обширного накопленного опыта цифровой обработки сигналов, в частности — технологии Software defined radio (программно-конфигурируемое радио) при проектировании систем зондирования параметров ионосферы является логичным следствием картины современного развития радиоэлектроники в целом и индустрии цифрового радиоприема в частности — история систем цифровой обработки высокочастотных радиосигналов, уже давно ставшей стандартом де-факто в области мобильной и профессиональной радиосвязи насчитывает никак не менее половины столетия. Индустрия цифровой радиосвязи, в свою очередь, привела к развитию отрасли, разрабатывающей цифровую контрольно-измерительную аппаратуру весьма высокого класса точности, и появлению и закреплению стандартов и технических требований к контрольно-измерительным приборам подобного класса [2].

В открытых источниках доступно описание реализаций построения систем ионосферного зондирования, опирающихся на готовые коммерческие образцы SDR-приемников общего назначения (4), а также на системы, построенные на основе «классической» профессиональной связной приемопередающей аппаратуры (1, 6, 7). Описанные подходы, безусловно, имеют свои предпочтения на этапе исследований и прототипирования, существенно экономя время разработки в пользу времени на научный анализ, и один из описываемых подходов использовался на начальном этапе прототипирования, однако, представляется, что в конечном итоге специализированная архитектура, целенаправленно спроектированная в соответствии с требованиями исходной задачи, представляет наиболее рациональный подход. Среди технических требований к приемному тракту, определяющих задачу ионосферного зондирования, наиболее существенными являются такие, как чувствительность, динамический диапазон и уровень собственного шума приемного тракта. Важно отметить, что измерительный приемный тракт ионозонда предъявляет к этим трем критериям более высокие требования по сравнению с аналогичными стандартами проектирования промышленной связной аппаратуры — большая часть сигналов, которая в профессиональной радиосвязи считается шумами и помехами, в ионосферном зондировании является полезной информацией.

Архитектура программно-реконфигурируемых радиосистем отличается от традиционных подходов к конструированию приемно-передающей радиоаппаратуры, прежде всего, тем, что существенная часть процесса обработки сигнала переносится на сторону вычислительной системы и реализуется в виде математических алгоритмов. Эволюция подходов к проектированию и реализации SDR-приемников привела к появлению концепции Digital Down Conversion SDR - архитектуре, в которой высокочастотный сигнал приемной антенны с минимальной аналоговой коррекцией поступает непосредственно на вход аналого-цифрового преобразователя, работающего на частоте дискретизации, вдвое превышающей частоту верхней границы полосы пропускания приемного тракта (рисунок 1). Подобная архитектура позволяет осуществлять прямую оцифровку спектра сигналов, лежащих в полосе от 0 Hz до частоты Найквиста.

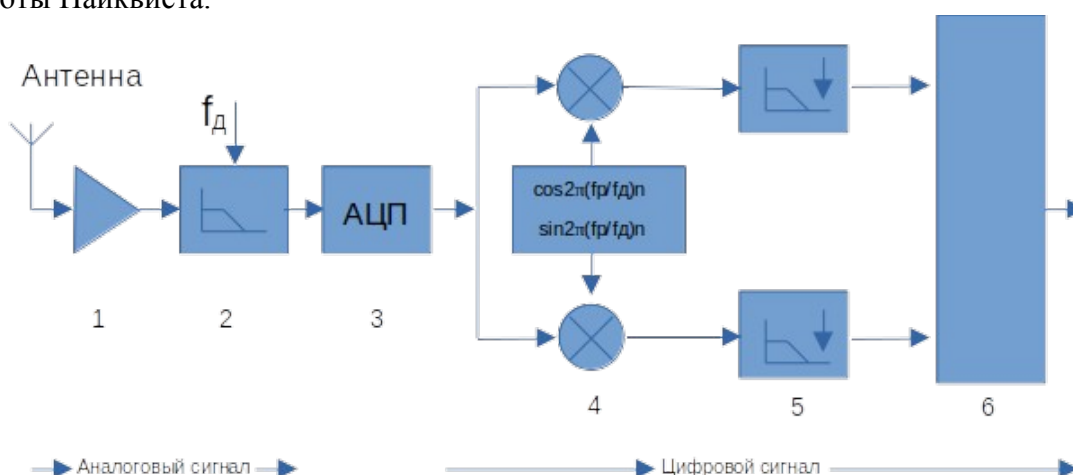


Рисунок 1. Структурная схема DDC SDR приемного тракта. Цифрами обозначены: 1 — ШПУ, 2 — антиалиазинговый фильтр, 3 — АЦП, 4 — квадратурный смеситель, 5 — децимирующий (FIR, CIC) фильтр, 6 - ЦОС

На этапе предварительного прототипирования алгоритмов приемного тракта использовался бюджетный SDR-приемник HackRF one, имеющий всего лишь восьмибитный АЦП в приемном тракте. Тем не менее, опытная эксплуатация этого приемника в режиме 24 x 8 в течение четырех месяцев показала его пригодность для регистрации даже не самых крупных событий солнечной активности.

В качестве источника опорного сигнала (далее «радиомаяк») использовались синхронизированные с атомным эталоном времени ВНИИФТРН радиосигналы передатчика эталонного времени группы «Москва» (подводимая мощность 8 кВт), осуществляющего круглосуточную радиопередачу в диапазоне коротких волн (4,996 MHz) под радиопозывным RWM. В ходе непрерывного радионаблюдения 24 раза в сутки (ежечасно) фиксировалось состояние радиоэфира в период молчания передатчика радиомаяка, и в период передачи немодулированной несущей частоты (NON).

Программный комплекс приема и обработки результатов радионаблюдений был реализован в виде свободно-распространяемого пакета HDSDR, осуществляющего взаимодействие с аппаратной частью комплекса посредством драйвера ExtIO, а также пакет специализированных программ обработки и анализа данных, реализованных на ЯП Perl и Python. Радиоприем осуществлялся на несимметричный полуволновой диполь, настроенный на резонансную частоту 4,996 Mhz. Расстояние между станцией приема ИЗМИРАН (Москва) и передачи (Талдом, Московская область) составляло 140 км (рисунок 2), что позволило предполагать, что эксперимент осуществлялся в условиях NVIS (Near Vertical Incidence Skywave) распространения радиоволн, что максимально близко к вертикальному (зенитному) излучению ионозонда.

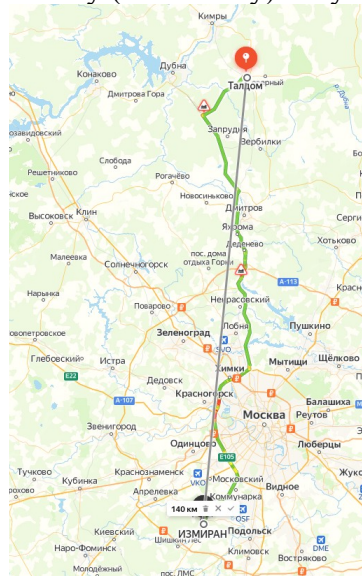


Рисунок 2. Радиотрасса «Талдом — ИЗМИРАН (Москва)» экспериментального исследования (протяженность трассы 140 км).

Принимаемые радиосигналы сохранялись в виде несжатых аудиофайлов, по два на каждое наблюдение (файл собственного шума радиоэфира и файл сигнала радиомаяка) и обрабатывались в последующем для получения временного ряда (набор экспериментальных значений соотношения «сигнал/шум»).

Практические результаты работы приемного SDR тракта в составе программно-аппаратного комплекса непрерывного мониторинга состояния радиопрохождения в декаметровом (коротковолновом) радиодиапазоне продемонстрированы на примере анализа специфики распространения радиосигнала и вариаций собственного шума радиоэфира на частоте 4996 MHz в момент развития сильной ионосферной бури 5-6 Ноября 2023 года.

Ионосферная буря, которой был присвоен класс G3, сопровождалась миграцией границы аврорального овала (вплоть до широты Москвы), что, в свою очередь, привело к существенному изменению закономерностей поведения среднеширотной ионосферы в виде проявлений авроральной специфики в виде высыпаний частиц, являющихся результатом вспышечной активности Солнца и наблюдению полярных сияний в большей части восточного полушария (рисунок 3).

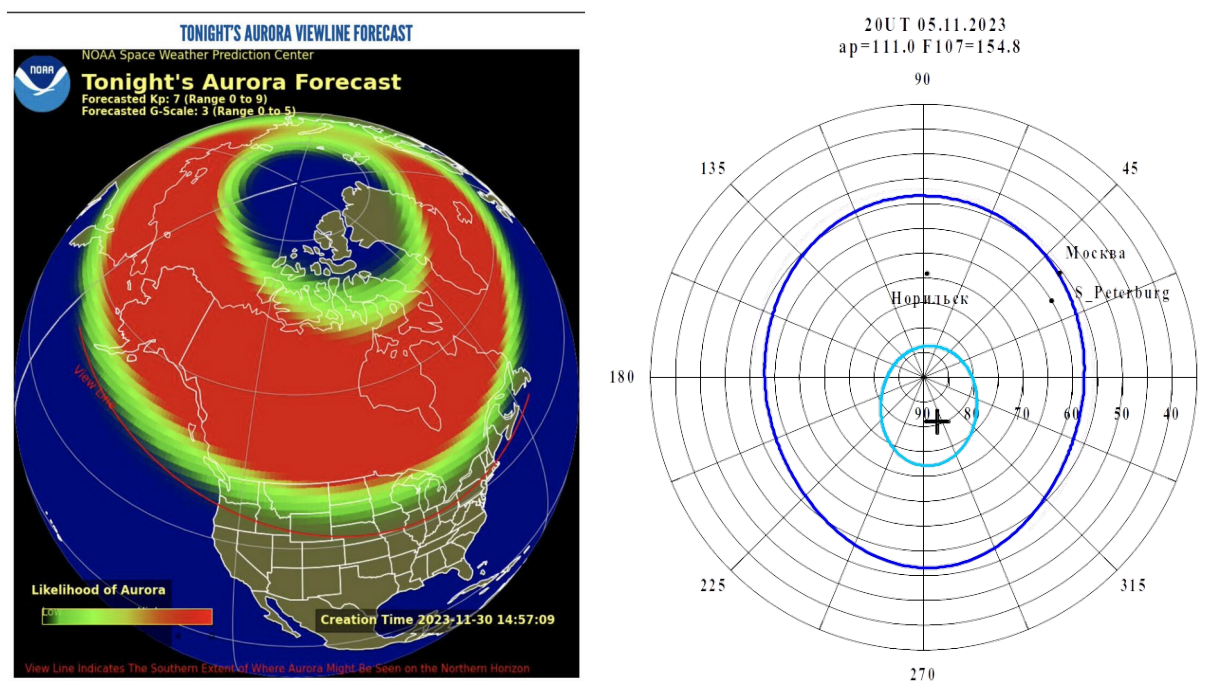


Рисунок 3. Пример аномальной динамики экваториальной границы аврорального овала по данным NOAA (левая панель) и положение этой границы по данным модели ИЗМИРАН по состоянию на 20:00 UT 05/11/2023. Положение минимума главного ионосферного провала (ГИП) – линия фиолетового цвета, экваториальная граница овала полярных сияний (аврорального овала) – линия синего цвета, полярная граница овала полярных сияний (аврорального овала) – линия голубого цвета.

Между положением минимума ГИП и экваториальной границей аврорального овала обычно существует большой градиент электронной концентрации. Экваториальная граница аврорального овала совпадает с границей диффузных высыпаний заряженных частиц.

Анализ уровня собственного шума эфира на частоте 4996 МГц в окрестности момента времени 20:00 UT позволил идентифицировать увеличение интенсивности электромагнитного шума в период подхода экваториальной границы полярного овала (разница амплитуд составила ~ 1.5 дБ), что дает основания предполагать, что в этот момент времени ст. Москва (ИЗМИРАН) находилась на границе области полярного овала (рисунки 4, 5).

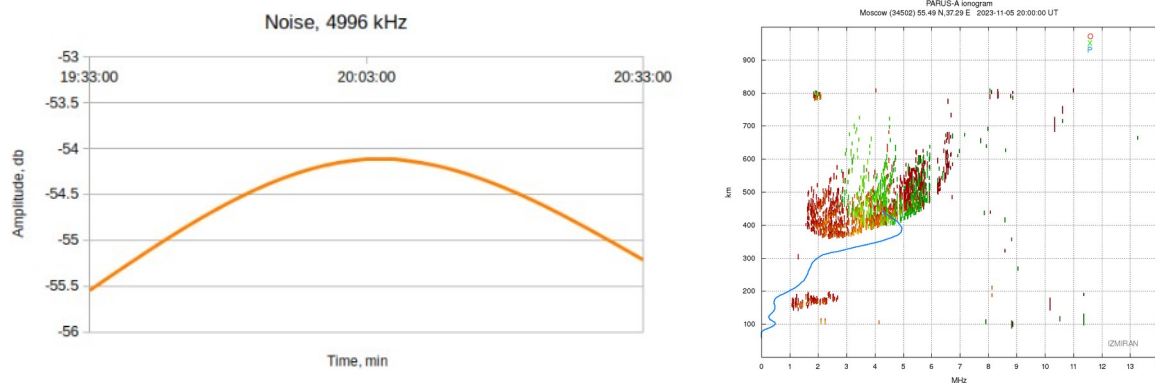


Рисунок 4. Уровень фонового электромагнитного шума во время сильной ионосферной бури 05/11/2023 (левая панель) и ионограмма ВЗ на ст. Москва (ИЗМИРАН) в 20:00 UT.

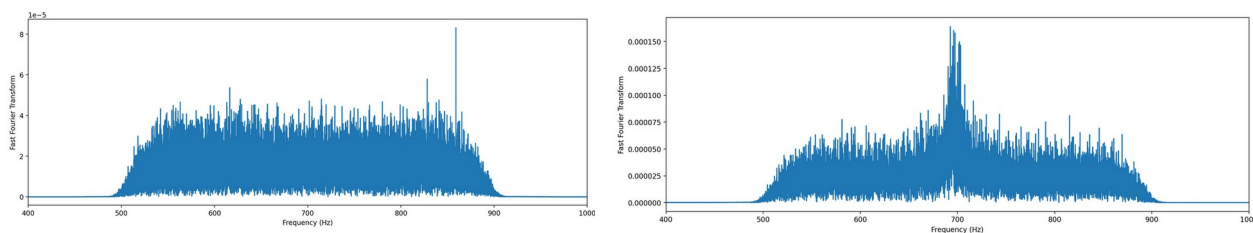


Рисунок 5. Спектр фонового электромагнитного шума в полосе 500Hz на ст. Москва (ИЗМИРАН) в 20:00 UT 03/11/2023 (спокойная ионосфера, левая панель) и во время сильной ионосферной бури 05/11/2023 (правая панель). При

Библиография

1. Зыков Е.Ю., Шерстюков О.Н., Акчурина А.Д. Исследовательский ионозонд "Циклон" Казанского университета и программное обеспечение автоматической обработки ионограмм // Гелиогеофизические исследования, Выпуск 4, С.39–46, 2013.
2. Контрольно-измерительные решения для программно-определяемых радиосистем (SDR). Указания по применению. Rhode & Schwarz, 2012
3. Митин О.В., Сагадеева М.А., Загребина С.А. Исследование возможности уточнения результатов эмпирических моделей ионосферы локальными данными, получаемыми в режиме реального времени. В книге: Управление в морских системах (УМС-2022). 15-я Мультиконференция по проблемам управления. Материалы конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 11-19.
4. Моисеев С.П., Шиндин А.В., Грехнева К.К., Павлова В.А., Тимукин Н.С. Результаты первого месяца непрерывной эксплуатации прототипа быстрого ионозонда вертикального зондирования ИОН-ФАСТ НИРФИ // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. 2022. №1. <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-pervogo-mesyatsa-nepreryvnoy-ekspluatatsii-prototipa-bystrogo-ionozonda-vertikalnogo-zondirovaniya-ion-fast-nirfi>
5. Мухин А.Е., Уланов П.Н. Применение FPGA для обработки сигналов в DDC SDR-приемнике II. // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2020. Том 4. №1. С. 46-50. 28.
6. Koloskov, Oleksandr & Kashcheyev, Anton & Zalizovski, A. & Bogomaz, Oleksandr. (2022). Low-cost SDR-based ionosondes as a tool for geospace research. 10.13140/RG.2.2.33428.17288.
7. Koloskov, O.; Kashcheyev, A.; Bogomaz, O.; Sopin, A.; Gavrylyuk, B.; Zalizovski, A. Performance Analysis of a Portable Low-Cost SDR-Based Ionosonde. Atmosphere 2023, 14, 159. <https://doi.org/10.3390/atmos14010159>
8. Nakata, H., Nozaki, K., Oki, Y. et al. Software-defined radio-based HF doppler receiving system. Earth Planets Space 73, 209 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01547-5>
9. Mitin O.V. Analysis of the Empirical Median Ionosphere Model Constructed Using IRI Local Passive Radiosonde Data. Journal of Computational and Engineering Mathematics. 2023. Vol. 10, no. 2, pp. 52-62. DOI: 10.14529/jcem230205
10. Sagadeeva M.A., Mitin O.V. Construction of observations based on data distorted by interference of various types. Journal of Computational and Engineering Mathematics. 2021. Vol. 8, no. 4, pp. 9-16. DOI: 10.14529/jcem210402

*Применение метода обобщенной силы
для решения краевой задачи о расчете лучевых траекторий
радиоволн в трехмерной анизотропной ионосфере*

Носиков И. А. (КФ ИЗМИРАН, ianosikov@wdizmiran.ru),
Клименко М. В. (КФ ИЗМИРАН, mvklimenko@wdizmiran.ru),
Падохин А. М. (ИЗМИРАН, padokhin@physics.msu.ru),
Носикова В. В. (КФ ИЗМИРАН, vnosikova@yandex.ru)*

Аннотация

В работе представлена анизотропная реализация метода обобщенной силы, наилучшим образом подходящая для расчета радиолучей в неоднородной ионосфере с заданными положениями передатчика и приёмника. Отметим, что вне зависимости от выбранной модовой конфигурации, задача оптимизации сводится к определению совокупности экстремумов целевой функции: минимумов для верхних лучей и седловых точек для нижних лучей.

Метод обобщенной силы, реализованный в виде программной модели, апробирован и применен для решения задач наклонного зондирования в условиях реалистичной ионосферы, задачей с использованием моделей NeQuick2 и IGRF13. Результаты расчетов ионограмм показали принципиальную применимость метода для решения рутинных вычислительных задач, а также продемонстрировали значительный потенциал в решении обратных задач и задач коррекции параметров среды.

Ключевые слова

Радиоволны, ионосфера, геомагнитное поле, численная модель, принцип Ферма.

Источники финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-77-10004).

Введение

Моделирование распространения радиоволн — это область исследований, которая фокусируется на расчетах характеристик радиоволн при их распространении через атмосферу. Это важный аспект систем спутниковой навигации и беспроводной связи, включая сотовые сети, спутниковую связь и радиовещание. Процесс моделирования включает использование математических и вычислительных методов для описания поведения радиоволн в различных геофизических средах. Современные программные комплексы, основанные на геометрикооптическом приближении, позволяют осуществлять краткосрочные и среднесрочные прогнозы оптимальных характеристик высокочастотного радиоканала в различных геомагнитных условиях [3, 7].

При решении прикладных задач радиосвязи отдельный интерес представляет расчет лучей между двумя заданными положениями передатчика и приемника. Математически данная задача формулируется как краевая и стандартным подходом к ее решению является метод пристрелки. Другим подходом для решения двухточечной задачи является прямой вариационный метод, позволяющий определять искомые траектории в соответствии с принципом Ферма. Весомый вклад в развитие вариационного подхода в задачах расчет радиотрасс представлен в работе [2]. Дальнейшее развитие прямого вариационного метода было основано на методе обобщенной силы [5], позволяющим последовательно определять все радиолучи в неоднородной изотропной среде. В данной работе метод обобщенной силы дополнен и усовершенствован для расчета радиолучей в анизотропной ионосфере.

Метод обобщенной силы

Запишем принцип Ферма для фазового пути луча в анизотропной ионосфере:

$$\delta S[\gamma] = \delta \int_A^B n(\vec{r}, \vec{u}) \vec{u} d\vec{l} = \delta \int_A^B n(\vec{r}, \vec{u}) \cos \alpha dl = 0, \quad (1)$$

где $\vec{r}$ – вектор, задающий положение луча в пространстве, $\vec{u}$ – единичный вектор импульса, задающий направление волнового фронта радиоволны, $d\vec{l}$ – лучевой вектор, задающий направление луча в пространстве, $n(\vec{r})$ – показатель преломления в точке $\vec{r}$, α – угол между единичным вектором импульса и лучевым вектором, так что $\vec{u} d\vec{l} = \cos \alpha dl$.

Используя метод прямоугольников, запишем выражение для интеграла (1):

$$S[\gamma] \approx \sum_{i=0}^P n_i \vec{u}_i \cdot (\vec{r}_{i+1} - \vec{r}_i), \quad (2)$$

где $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ задает положение каждого i -го узла траектории, $\vec{u}_i$ – единичный вектор импульса, заданный на интервале между i и $i+1$ узлами, $n_i = n(\vec{r}_i)$, $\vec{r}_0 = \vec{r}_A$, $\vec{r}_{P+1} = \vec{r}_B$. Здесь кривая γ аппроксимируется кусочно-линейной кривой с числом узлов $P+2$, где граничные точки зафиксированы в соответствии с граничными условиями, а P промежуточных узлов требуется привести к оптимальному положению в соответствии с принципом Ферма.

Верхние лучи могут быть получены прямой минимизацией функционала (2). Многие численные методы поиска минимума основаны на вычислении первой производной функционала. Первая производная функционала определяется в соответствии с выражением:

$$\frac{dS}{d\vec{r}_i} = \frac{\partial S}{\partial \vec{r}_i} + \sum_{k=1}^P \frac{d\vec{\xi}_k}{d\vec{r}_i} \frac{\partial S}{\partial \vec{\xi}_k}, \quad (3)$$

где $\vec{\xi}_k$ – единичный вектор, перпендикулярный к вектору $\vec{u}_k$, $\frac{\partial}{\partial \vec{\xi}_k}$ – оператор вращения на сфере единичного радиуса: $\frac{\partial}{\partial \vec{\xi}_k} \equiv \frac{\partial}{\partial \vec{u}_k} \Big|_{\perp} = \frac{\partial}{\partial \vec{u}_k} - \vec{u}_k \left(\vec{u}_k \frac{\partial}{\partial \vec{u}_k} \right)$.

Поиск нижних лучей связан с особенностью определения седловых точек функционала. Как было ранее показано, определение седла возможно на основе сведения задачи к поиску минимума методом минимальной моды [5]. Для реализации метода необходимо рассчитать гессиан функционала в анизотропной ионосфере:

$$H_{ij} = \frac{\partial^2 S}{\partial \vec{r}_i \partial \vec{r}_j} + \sum_{k=1}^P \left[\frac{d\vec{\xi}_k}{d\vec{r}_j} \frac{\partial^2 S}{\partial \vec{\xi}_k \partial \vec{r}_i} \right]. \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что особенность расчета гессиана в анизотропной ионосфере заключается в наличии дополнительного слагаемого, отражающего взаимосвязь координат и импульсов лучевой траектории.

Результаты моделирования

В данном разделе метод обобщенной силы применяется для расчета лучевых траекторий радиоволн в анизотропной плазме с использованием моделей ионосферы NeQuick2 [4] и магнитного поля IGRF13 [1]. Расчеты выполняются в трехмерной анизотропной среде с учетом горизонтального и вертикального градиента электронной плазмы.

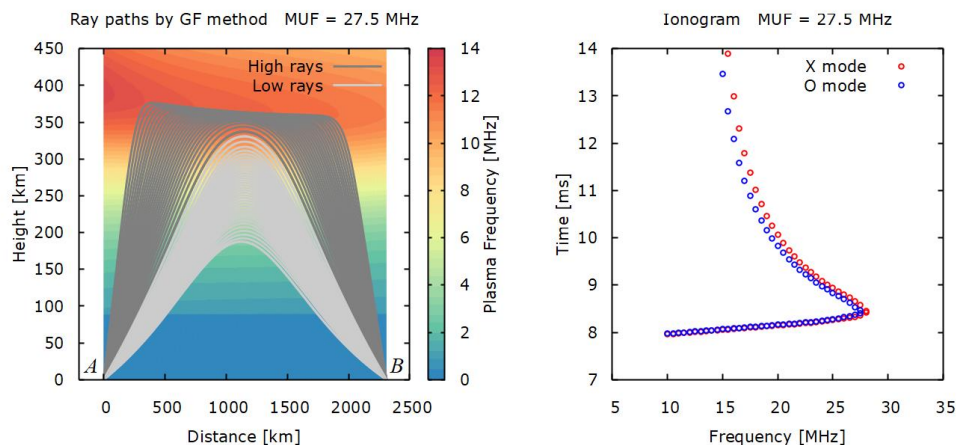


Рисунок 1. На левом рисунке представлены лучевые траектории, рассчитанные методом обобщенной силы, для радиотрассы Кипр – ИЗМИРАН (16 UT 03.03.2023). Рабочие частоты 10 - 27.5 МГц. Ионосфера задана моделью NeQuick2. Геомагнитное поле задано моделью IGRF13. Значение потока радиоизлучения $F10.7 = 260$ Характеристика времени группового запаздывания от рабочей частоты представлена на правом рисунке.

Рассмотрим среднеширотную радиотрассу Кипр (34.96 с. ш., 34.08 в. д.) – ИЗМИРАН (55.38 с. ш., 37.32 в. д.). Результаты расчетов лучевых траекторий в диапазоне рабочих частот 10.0 – 27.5 МГц для 16 UT 03.03.2023 и величины потока радиоизлучения $F_{10.7} = 260$ представлены на рис. 1. Для рассматриваемой радиотрассы в результате последовательного определения всех лучей от наименьшей применимой частоты (НПЧ) до максимально применимой частоты (МПЧ) построена характеристика времени группового запаздывания от рабочей частоты (см. рис. 1). Расчеты выполнялись для обыкновенной и необыкновенной моды соответственно. Верификация полученных результатов осуществлялась с использованием традиционного метода характеристик, дополненного современным алгоритмом пристрелки [6].

Выводы

В работе представлено дальнейшее развитие прямого вариационного метода для расчета лучевых траекторий радиоволн в реалистичной модели ионосферы с учетом магнитно-ионных эффектов. Программная реализация метода позволяет засчитывать все лучи с заданными граничными условиями для обыкновенной и необыкновенной мод. Серии модельных расчетов, выполненных с использованием трехмерных моделей NeQuick2 и IGRF13, продемонстрировали полное согласие с традиционным методом пристрелки.

Библиография

1. Alken P. et al. International geomagnetic reference field: the thirteenth generation //Earth, Planets and Space. – 2021. – Т. 73. – №. 1. – С. 1-25.
2. Coleman, C. J. (2011). Point-to-point ionospheric ray tracing by a direct variational method. Radio Science, 46(05), 1-7.
3. Krashennnikov, I. V., Shubin, V. N. (2023). Features of Forecasting the Operation of Ionospheric Radio Lines in Upper Rays Modes. Geomagnetism and Aeronomy, 63(4), 426-433.
4. Nava B., Coisson P., Radicella S. M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model //Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics. – 2008. – Т. 70. – №. 15. – С. 1856-1862.
5. Nosikov, I. A., Klimenko, M. V., Bessarab, P. F., Zhbankov, G. A. (2017). Application of the nudged elastic band method to the point-to-point radio wave ray tracing in IRI modeled ionosphere. Advances in Space Research, 60(2), 491-497.
6. Padokhin, A. M., Andreeva, E. S., Nazarenko, M. O., Annenkov, M. A., Tereshin, N. A. (2019). Modeling the HF ray trajectories and vertical and oblique ionograms in the artificially disturbed ionosphere based on radiotomographic data. Moscow University Physics Bulletin, 74, 282-290.
7. Pietrella, M., Pezzopane, M., Pignatelli, A., Pignalberi, A., Settini, A. (2023). An Updating of the IONORT Tool to Perform a High-Frequency Ionospheric Ray Tracing. Remote Sensing, 15(21), 5111.

*Использование нейронных сетей для дальнейшего развития программной части
аппаратно-программных комплексов радиозондирования ионосферы
Щирый А.О.* (ИЗМИРАН, andreyschiriy@gmail.com)*

Аннотация

Представлены основные идеи предлагаемого метода использования нейронных сетей для выделения треков мод радиосигнала на ионограммах, учитывающего специфику ионограмм. Для полноценной апробации и оценки эффективности метода требуется построение больших выборок размеченных ионограмм.

Ключевые слова

Наклонное зондирование ионосферы, ионограмма, выделение сигнала.

Введение

Работа радиотехнических систем (РТС) декаметрового (ДКМ) диапазона, таких как системы коротковолновой (КВ) радиосвязи и загоризонтной (ЗГ) радиолокации, основана на способности КВ многократно отражаться от ионосферы и земной поверхности. Важнейшей задачей для обеспечения корректного функционирования таких РТС является адаптация к ионосферным условиям, для чего в составе этих РТС содержится РТС частотного обеспечения, включающая аппаратуру радиозондирования ионосферы и анализатор загруженности радиоканала. При этом возможна адаптация РТС ДКМ диапазона по рабочей частоте, мощности излучения, скорости передачи информации. Аппаратура радиозондирования ионосферы, как правило, обеспечивает диагностику в режимах наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) и вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ). В случае ЗГ радиолокационных станций (РЛС) обязателен также режим возвратно-наклонного зондирования [1].

Адаптация РТС требует автоматической обработки данных радиозондирования. При этом важнейшей задачей при такой автоматической обработке является автоматическое выделение треков мод радиосигнала на ионограмме [2-5].

При НЗИ линейно-частотно модулированными сигналами (ЛЧМ) передатчик излучает непрерывный ЛЧМ сигнал (т.е. как следствие частота линейно зависит от времени) во всем коротковолновом КВ диапазоне. Сигнал распространяется в ионосфере и через приемную антенну поступает на вход приемника. При наклонном зондировании расстояние между преемником и передатчиком обычно составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч километров, поэтому время распространения меняется от единиц до десятков миллисекунд. Корреляционная обработка принятого сигнала методом сжатия в частотной области состоит в умножении его на сигнал гетеродина приемника, комплексно-сопряженный излучаемому сигналу; после чего происходит прохождение сигнала через фильтр нижних частот, оцифровка сигнала и спектральный анализ. Из-за частотной дисперсии среды волны разной частоты после прохождения через ионосферу имеют разные коэффициенты отражения (амплитуды) и время фазового (группового) запаздывания. Результатом работы наклонного ионозонда является ионограмма, характеризующая зависимость времени группового запаздывания и амплитуды каждой моды распространения радиосигнала от частоты излучения.

Ионограмма ВЗИ представляет собой зависимость амплитуды принятого сигнала от частоты и действующей высоты отражения, по трекам мод на ионограмме ВЗИ определяют действующие высоты ионосферных слоёв.

Хотя интерпретация результатов НЗИ и ВЗИ существенно отличается, проблематика выделения треков мод сигнала на ионограммах подобна для обоих видов зондирования, с тем уточнением, что в случае НЗИ картина модовой структуры на ионограмме намного сложнее и богаче, поэтому далее речь пойдет в основном о выделении треков мод именно на ионограммах НЗИ, как более общем случае.

Невысокое качество алгоритмов автоматического выделения даже для более простых ионограмм ВЗИ отмечается многими авторами, например [6]: "Существующие на данный момент алгоритмы имеют значительно меньшую эффективность, например, точность автоматической обработки, применяемой дигизондом Рейниша (DPS-4) в летний период не превышает 70%, а в зимний 50%".

Ввиду недостатков автоматических способов выделения треков (особенно для ионограмм НЗИ), приходилось применять полуавтоматический способ выделения сигнала на ионограмме [2], заключающийся в том, что на ионограмме вручную оператор выделялись прямоугольные области, содержащие следы треков мод полезного сигнала, далее в выбранных областях спектральные отсчеты, превышающие заданный порог, относились к сигналу, далее находились аппроксимирующие полиномы 2-3 порядка для получения следов треков мод.

Делаются попытки применения методов теории обучения машин, а конкретно – нейронных сетей, для решения задач выделения треков на ионограммах, правда, в основном ВЗИ, и с неясной эффективностью [6-10]; при этом используются подходы и архитектуры, созданные для обработки изображений, и не учитывающие специфику ионограмм. В данной работе предлагается метод использования нейронных сетей для выделения треков мод радиосигнала на ионограмме, в котором предпринята попытка устранения указанных недостатков.

Метод использования нейронных сетей для выделения треков мод

Суть предлагаемого метода заключается в следующем. Для выделения треков мод радиосигнала на ионограмме обучают статистическую модель (глубокую нейронную сеть), далее обученную модель многократно применяют для выделения треков мод радиосигнала на ионограммах, перед обучением модели производится построение обучающей выборки размеченных ионограмм.

В отличие от существующих работ [6-10], при построении обучающей выборки размеченных ионограмм, отбирают ионограммы радиозондирования ионосферы для нормальных условий распространения радиоволн в ионосфере (отсутствие солнечных и геомагнитных возмущений) и при разметке помечают их бинарным признаком «не-аномальна», дополнительно отбирают и добавляют в выборку ионограммы для аномальных условий распространения и на этапе разметки помечают их бинарным признаком «аномальна», а на стадии обучения модели в качестве признаков используют не только битовые маски выделенных треков, но и метаданные ионограмм (дату-время зондирования, координаты передающего и приемного пунктов).

Для практической реализации предлагаемого метода необходимо разметить (вручную выделить треки) весьма большие массивы ионограмм (десятки тысяч). Требование больших объемов обучающих выборок вызвано большим числом внутренних параметров моделей глубокого обучения (а объектов для обучения должно

быть гораздо больше, чем число параметров модели, иначе модель просто «переобучится» под конкретные данные).

Произведена предварительная апробация выделения треков радиосигнала на ионограмме НЗИ посредством сверточных нейронных сетей (CNN) – пока неглубоких, поскольку еще не размечены необходимые для глубоких сетей большие обучающие выборки; архитектура неглубокой сети: 5 сверточных слоев с функциями активации ReLU между ними и с сигмной после последнего слоя. Пример предварительных результатов показан на Рис.1 (исходное изображение ионограммы, контуры автоматически выделенных треков мод, карта вероятностей выделения сигнальных компонент полученная с последнего слоя нейронной сети до функции активации; надписи по осям в условных единицах – номера пикселей).

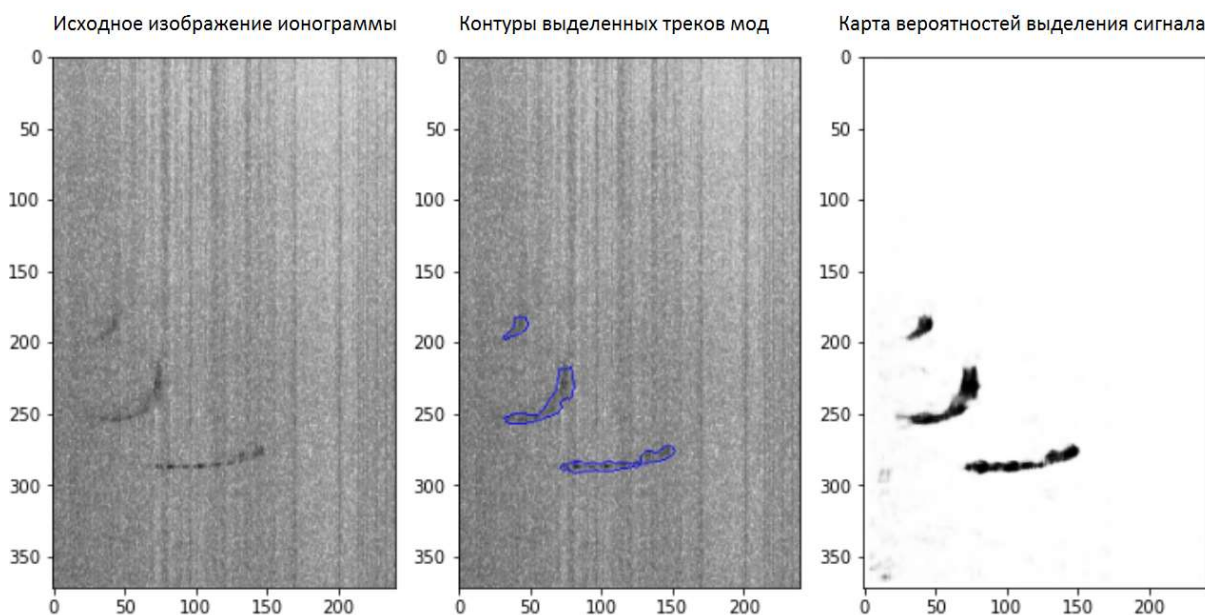


Рисунок 1. Предварительные результаты применения метода выделения сигнала

Для более эффективной разметки, нами разрабатывается специализированное программное обеспечение выделения различных объектов на ионограммах. Отличие такого специализированного средства разметки от существующих программ разметки изображений (а ионограмму можно представлять как изображение, более того именно так она чаще и представлена) в том что должны быть реализованы средства не только выделения границ треков мод радиосигнала, но и возможность разметки всей той информации, которую «видит» человек (эксперт) по ионограмме: верхние и нижние лучи, магнитоионные расщепления, области повышенной диффузности, сосредоточенные (станционные) помехи, фоновые помехи. и др. Треки могут сопровождаться дополнительными атрибутами разметки: верхний луч, магнитоионное расщепление, область диффузности, «Е или Es», спорный слабый сигнал, сбой аппаратуры. Кроме треков сигнала могут быть выделены и шумовые объекты с соответствующей разметкой: станционный шум и фоновый шум; причем для станционных помех реализован еще один способ выделения – целыми вертикальными линиями. Также будет реализована функция загрузки разметки ионограммы соседнего по времени (но уже размеченного) сеанса, с тем чтобы начинать разметку не «с чистого листа», а редактировать загруженную разметку (в спокойных геофизических условиях соседние ионограммы одной радиотрассы могут слабо отличаться).

Заключение

Представлены основные идеи предлагаемого метода использования нейронных сетей для выделения треков мод радиосигнала на ионограммах, учитывающего специфику ионограмм. Для полноценной апробации и оценки эффективности метода требуется построение больших выборок размеченных ионограмм, на что будет нацелена дальнейшая работа. Также дальнейшее развитие описанного средства разметки будет заключаться в добавлении функционала разметки следов ионосферных неоднородностей, а также перекрестного контроля за результатами сторонних разметчиков (поскольку задача разметки большого объема данных приводит к необходимости привлечения большого числа разметчиков, качество работы которых может сильно отличаться и требует контроля).

Библиография

1. Fabrizio G. A. High frequency over-the-horizon radar: fundamental principles, signal processing, and practical applications. McGraw-Hill Education, 2013.
2. Щирий А.О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: Спец. 05.12.04; Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. СПб., 2007. 19 с.
3. Щирий А.О. Развитие средств автоматизации наземного радиозондирования ионосферы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т.14. №5. – с.170-173.
4. Щирий А.О. Архитектура программной части аппаратно-программного комплекса дистанционного наземного радиозондирования ионосферы // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2015. – №18. – с.144-152.
5. Щирий А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолний. Журнал радиоэлектроники. – 2022. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>
6. Долгачева С. А., Макарова Л. Н., Николаев А. В. Обработка ионограмм высокоширотных станций вертикального зондирования с использованием нейронных сетей: ЕС и Ф2 слои // Physics of Auroral Phenomena. 2020. Т.43. № 1. – С. 105-108.
7. Guo L., Xiong J. Multi-Scale Attention-Enhanced Deep Learning Model for Ionogram Automatic Scaling // Radio Science. 2023. vol.58. №3. p.e2022RS007566. <https://doi.org/10.1029/2022RS007566>
8. Lu Z., Hua C., Wei N., Feng J., Lou P., Liu W. Research on classification of vertical ionogram based on deep convolution neural network // Progress in Geophysics. 2022. vol.37. №5. pp.1834-1839. doi: 10.6038/pg2022GG0073
9. Xiao Z., Wang J., Li J., Zhao B., Hu L., Liu L. Deep-learning for ionogram automatic scaling // Advances in Space Research. 2020. vol.66. №4. pp.942-950. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.009>
10. De la Jara C., Olivares C. Ionospheric echo detection in digital ionograms using convolutional neural networks // Radio Science. 2021. vol.56. №8. pp.1-15.

*Измерение длины электропроводящих свай
бесконтактным способом при помощи георадара*

*Аверин А.А. * (ИЗМИРАН, averin@izmiran.ru),
Варенков В.В. (ИЗМИРАН, varenkov@mail.ru),
Горкин Д.С. (ИЗМИРАН, gorkin@izmiran.ru),
Сахтеров В.И. (ИЗМИРАН, sakhterov@mail.ru)*

Аннотация

Предложен способ бесконтактного измерения длины электропроводящих свай и других протяженных металлических объектов с использованием импульсного георадара.

Данный способ позволяет проводить измерение по принципу рефлектометров, измеряющих длину кабеля и его неоднородностей на основе отраженной электромагнитной волны. При обработке наблюдаются похожие S-образные сигналы

Ключевые слова

Георадар, электропроводящая свая, рефлектометр, неразрушающий контроль

Теория

При разработке нового бесконтактного способа измерения длины электропроводящих свай и других протяженных металлических объектов применялся модернизированный георадар «Grot-12h» [1]. Для проведения измерений была доработана передающая антенна. В процессе экспериментов было выяснено, что полностью приложенная к исследуемому объекту резистивно-нагруженная антенна передатчика [2] слабо возбуждает электромагнитный импульс в арматуре, т.е. происходит замыкание наводимого от излучающей антенны электромагнитного импульса в арматуре без дальнейшего его распространения в остальной части электропроводящей сваи.

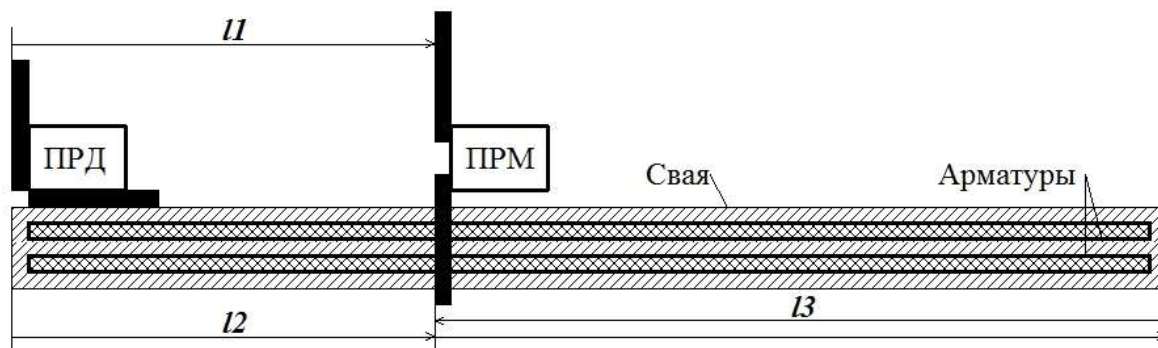


Рисунок 1. Схема измерений длины электропроводящей сваи бесконтактным способом

При использовании только половины диполя ток в арматуре наводится, но максимальный принимаемый сигнал получается при использовании второй половины диполя в качестве воздушного излучателя сигнала. Так как нужно было расположить антенну как можно ближе к краю исследуемого объекта, которым может быть свая под зданием, то оптимальным решением стала Г-образная антенна. При возбуждении таким образом наводимых в свае токов измеряемый объект становится продолжением антенны (т.е. половиной диполя), которая без резистивной нагрузки имеет склонность к паразитным колебаниям. Данный способ позволяет выполнять работу при минимальных перемещениях приемника, а в некоторых случаях при решении однотипных задач возможно проведение измерений без перемещений.

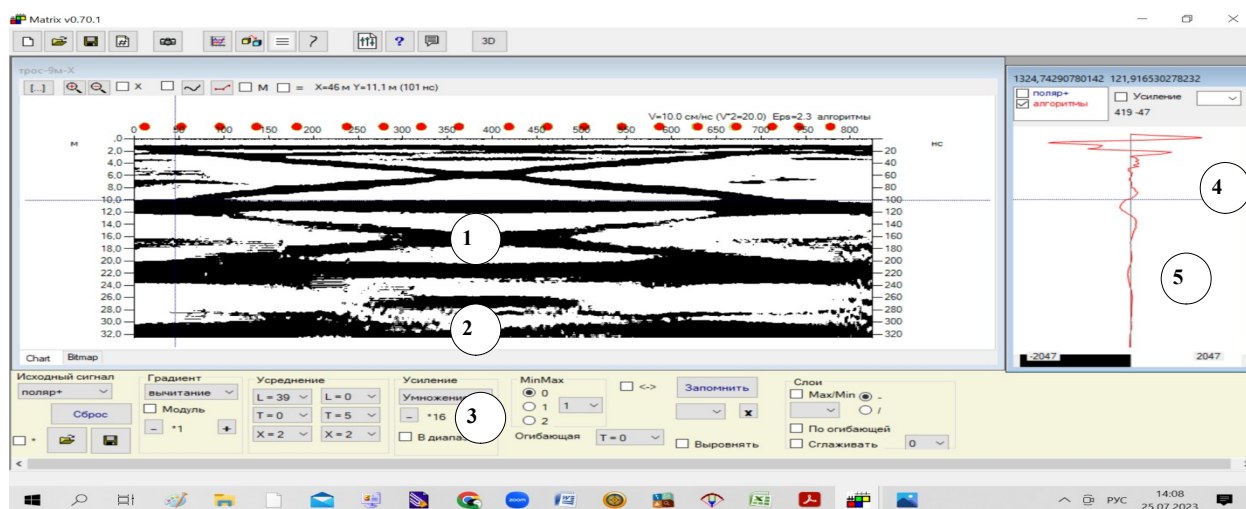


Рисунок 2. Измерения с перемещением по всей длине изолированного проводника 9 метров георадаром с разносом передатчик на отметке 0 метра, приемник перемещается по всей длине проводника. Обозначения: 1-зона измерения 0-100нс. 2,3-зона кратных сигналов 100-320нс. 4-зондирующий сигнал. 5-«маркерный сигнал» граница кратного сигнала зондирующего импульса которая совпадает с отраженным импульсом от конца проводника.

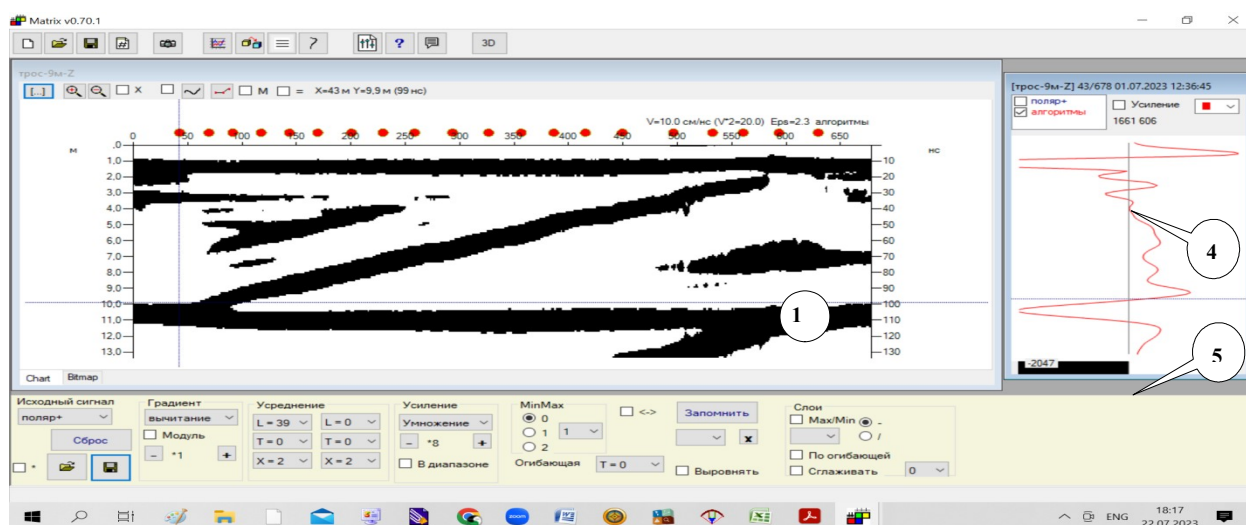


Рисунок. 3. Измерения с перемещением по всей длине изолированного проводника 9метра

георадаром с разносом передатчик на отметке 0 метра, приемник перемещается по всей длине проводника. Обозначения: 1-зона измерения 0-100нс. 4-зондирующий сигнал. 5-«маркерный сигнал» граница кратного сигнала зондирующего импульса которая совпадает с отраженным импульсом от конца проводника.

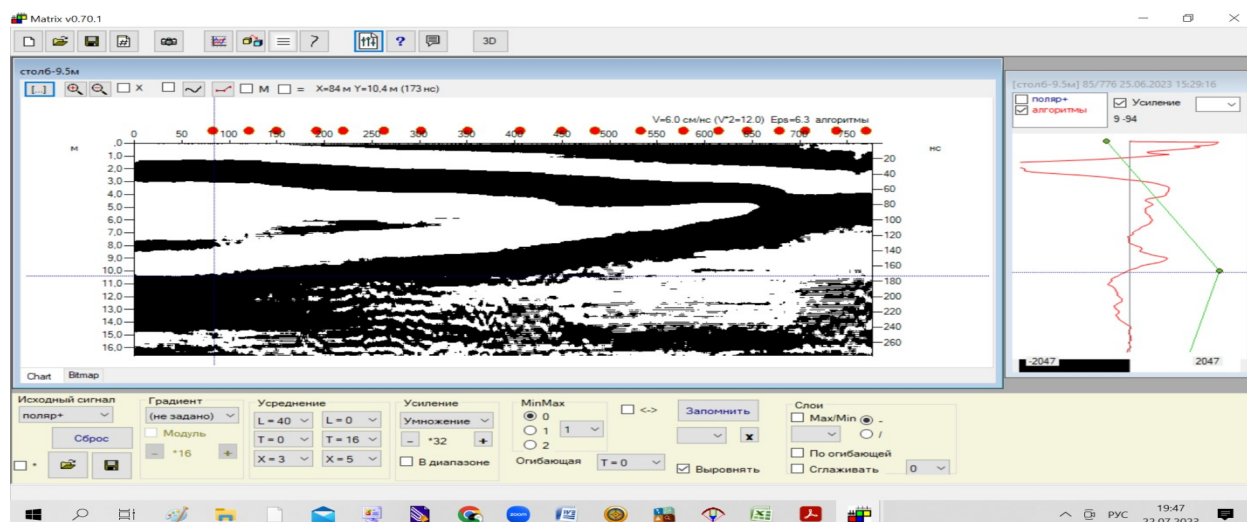


Рисунок 4. Столб железобетонный осветительный армированный 4 вертикальными арматурами длина 9.5м. лежащий горизонтально на земле.

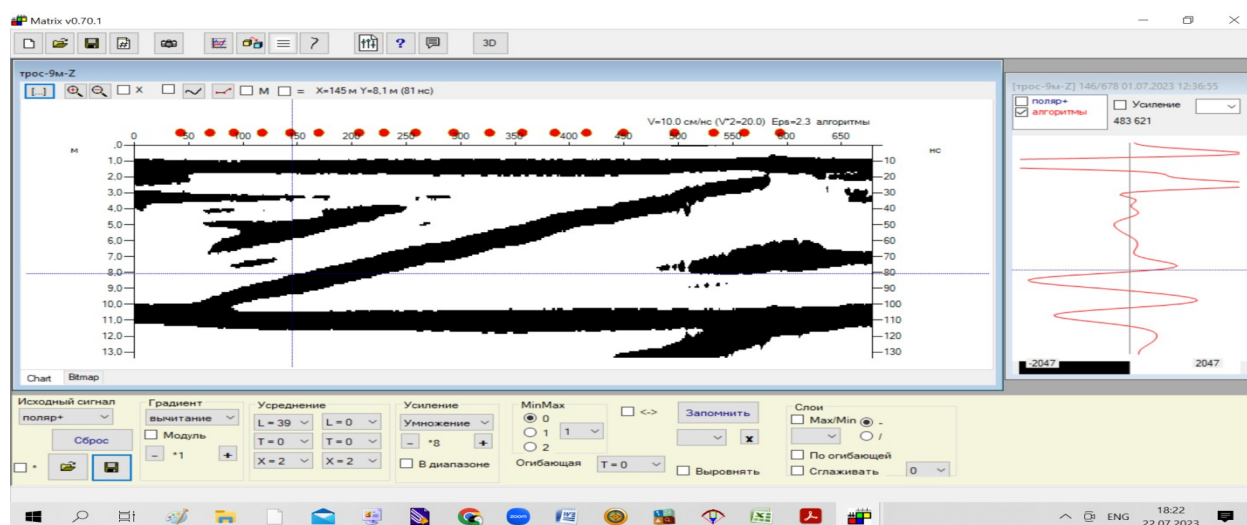


Рисунок 5. Длина проводника 9м. Сигнал от конца проводника на отметке 2м от начала. Разница 7м

В предлагаемом бесконтактном способе измерения длины электропроводящих свай и других протяженных металлических линий фиксируются прямые сигналы от передатчика по воздуху и объекту, а также отраженный сигнал от конца измеряемого объекта, на основе которых затем вычисляется длина объекта. Наблюдаемые в проведенном эксперименте сигналы имеют характерную форму и повторяемость. При фильтрации и усилении сигналы имеют достаточную амплитуду, что позволяет выделить их на фоне посторонних сигналов. В результате исследования была установлена взаимосвязь диэлектрической проницаемости

материала электропроводящих свай, скорости распространения сигналов в объекте и коэффициента укорочения[3]. Данный способ был представлен на Арктическом технологическом конкурсе 2023 года АРКТЕК и удостоен второй премии [4].

Библиография

1. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И.. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы №5 2012г., С.3-5
2. Wu T.T., King R.W.P. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading // IEEE Trans. Antennas Propag. 1965. V. 13. № 3. P. 369–373.
3. Аверин А.А., Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. Бесконтактный способ измерения длины электропроводящих свай // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 9. С. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202309-08>
4. Диплом второй степени Арктического технологического конкурса 2023 года АРКТЕК.

*Опыт применения георадиолокации для
геотехнического обследования объектов ООО «ГРК Быстринское»*

Антипов В.В. (ИЗМИРАН, ООО «ИНТЕРРАСКАН»,
vadim.antipov@interrascan.ru)
Горкин Д.С. (ИЗМИРАН, ООО «ИНТЕРРАСКАН», gorkin@izmiran.ru),
Дуйсиналиев Н.А. (ООО «ИНТЕРРАСКАН», nurbulat.duisinaliev@interrascan.ru)*

Аннотация

Георадиолокация сочетает экологическую нейтральность неразрушающего способа исследований с его высокой информативностью за счет физических свойств электромагнитных волн, что позволяет определять строение грунтов и горных пород на глубинах до 400 м с повышенным разрешением в верхней части разреза на глубинах до 30 м с шагом измерений по георадарному профилю от 0,1 м и строить на основании получаемых данных 2D и 3D цифровые модели подповерхностного пространства.

Специалисты ООО «ИНТЕРРАСКАН» совместно со специалистами ИЗМИРАН выполнили ряд пилотов по применению георадиолокации для геотехнического обследования инженерных сооружений ООО «ГРК Быстринское», Забайкальский край. Все выполненные пилоты показали положительный результат, полученные данные при сопоставлении совпали с имевшимися данными инженерных изысканий.

Ключевые слова

Георадар, георадиолокация, геотехнический мониторинг, обследование инженерных сооружений

Теория

Электромагнитные волны, в отличие от упругих (акустических) волн, хорошо различают границы талый/мерзлый; обводненный/сухой; углеводороды/вода – из-за разности диэлектрической проницаемости пород (скорости) прохождения и отражения волн, а также разного удельного электрического сопротивления пород, дают информацию об их пространственном расположении, электромагнитный сигнал также содержит качественную информацию о плотности пород и степени влагонасыщения [1, 2]. Всё это при использовании георадиолокации для геотехнического и экологического мониторинга позволяет получать более точную и детальную информацию о состоянии геологических сред на больших глубинах, позволяет создать систему мониторинга динамики развития опасных геологических процессов.

Решаемые задачи инженерной геологии, геотехники, геомеханики [1, 2]:

- Построения детальных разрезов на глубины до 30-50 м с повышенным разрешением;
- Определение мощности грунтовых слоев, границ коренных пород под рыхлыми отложениями, локализации оползневых тел, границ мерзлых пород, глубины и площадей сезонной оттайки [3, 4];

- Детальная локализация аномалий геологического пространства: зоны трещиноватости, плоскости скольжения, солифлюкации, деградации мерзлых грунтов, таликовых зон, подземных полостей и пустот, зон разуплотнения, морозного пучения, термокарстов и других аномалий;
- Мониторинг состояния грунтовых оснований под фундаментами зданий и сооружений [1];
- Определение фактических глубин залегания фундаментов, свай, дренажных систем, мостовых опор, трубопроводов, в том числе подводных [5];
- Картирование инженерных коммуникаций, локализация протечек;
- Определение уровня грунтовых вод, зон повышенного увлажнения грунтов, палеорусел и т.п.;
- Картирование опасных подповерхностных загрязнений;
- Мониторинг состояния дорожного полотна, железнодорожных насыпей, взлетно-посадочных полос и т.д.

Основные достоинства технологии георадиолокации как бесконтактной электроразведки по сравнению с другими традиционными контактными методами электроразведки [6, 7]:

- Может работать с любых поверхностей в любой сезон, нет ограничений к заземлению, как в классической электроразведке; может работать в стесненных условиях городской застройки, внутри помещений;
- Область применения: песок, лед, вода, болота, курумники, увлажненные грунты, растепленные мерзлые породы;
- Скорость и объём исследований, без использования тяжелой техники: одна бригада выполняет до 10 пог. км профилей в день;
- Непрерывная съёмка подповерхностных структур при площадной съёмке;
- За счет неразрушающей технологии выполнение работ не требует дополнительных разрешений в отличие от полевых изыскательских работ традиционными методами;
- Экономическая эффективность: снижение количества заверочных скважин за счет укрупнения сетки бурения, увеличения межскважинного расстояния, оптимизация их расположения, повышение детализации исходных данных по сравнению с традиционной контактной электроразведкой вертикальным электрическим зондированием (ВЭЗ) и электротомографией (ЭТ).

Специалисты ООО «ИНТЕРРАСКАН» совместно со специалистами ИЗМИРАН выполнили ряд пилотов по применению георадиолокации для геотехнического обследования инженерных сооружений ООО «ГРК Быстринское», Забайкальский край.

1. Обследование бортов двух карьеров

Цель: Определение пространственного положения границ аномалий: тектонических разрывных нарушений, карстовых пустот, выявление водонасыщенных горных пород на глубинах до 70 м по бортам карьеров.

Метод: георадиолокация методом профилирования, георадар «ИНТЕРРАСКАН», антенны длиной 2 и 4 м, режим непрерывной съемки с шагом между физическими точками не более 0,5 м.

Результаты

Карьер 1. Выявлены протяженные зоны повышенной проводимости – вероятно повышенной влажности на глубинах от 8 до 25 м. Обнаружены участки, характерные для зон трещиноватости (Рисунок 1).

Карьер 2. Выделена плоскость разлома 20-30° (Рисунок 2). Исследования совпадают с данными, предоставленными Заказчиком. Дополнительно параллельно отмеченному разлому выявлены места развивающихся трещин, не отмеченных ранее заказчиком.

Ценность. Оперативное получение информации о состоянии бортов карьеров: наличие влагонасыщенных участков, мест карстообразования, зон трещиноватости, разрывных нарушений; Полевые работы: 2 дн; Камеральная обработка: 3 дн. На карьере 2 удалось проследить истинное пространственное расположение основного разлома и смежных с ним разрывных нарушений на глубины до 50 м, что является новым, важным, уточняющим признаком для оценки состояния безопасности участка борта.

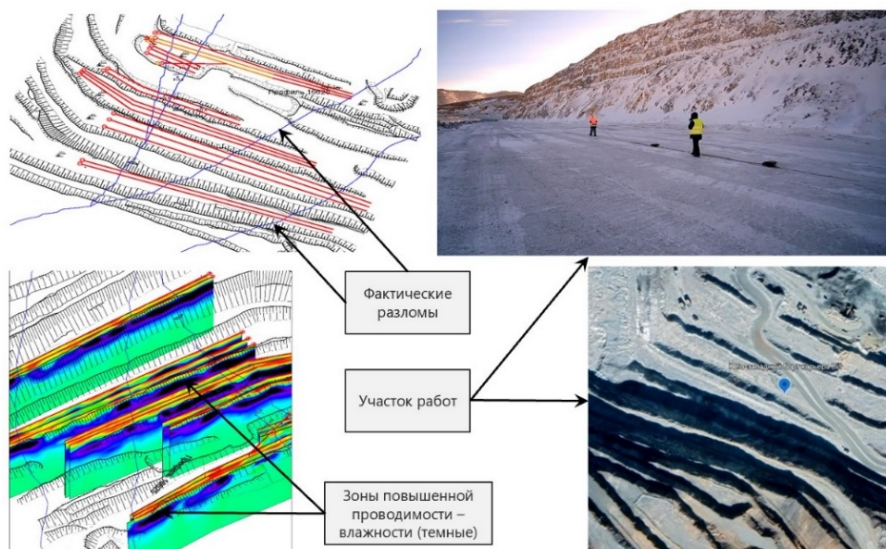


Рисунок 1. Обследование бортов двух карьеров, ч.

1

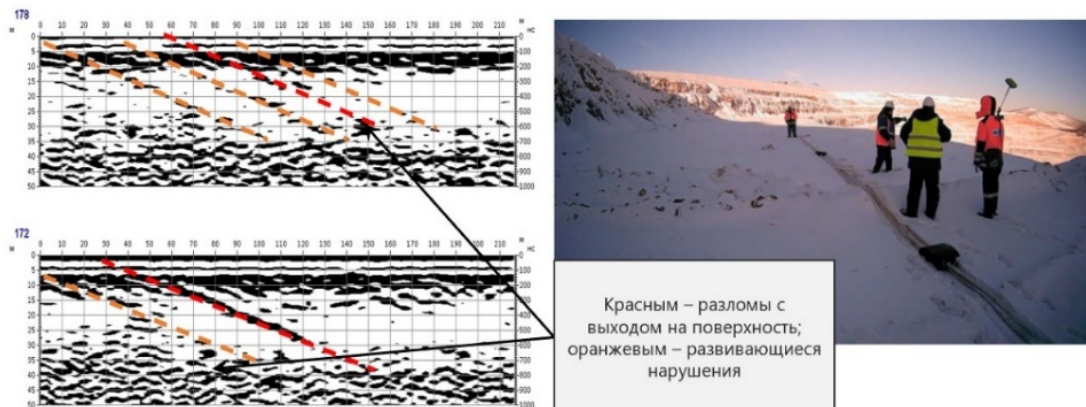


Рисунок 2. Обследование бортов двух карьеров, ч. 2

2. Обследование склада окисленной руды

Цель: Выявление структурных особенностей распространения трещин в изотропном массиве отвала окисленной руды.

Метод: георадиолокация методом профилирования, георадар «ИНТЕРРАСКАН», антенны длиной 4 м, режим непрерывной съемки с шагом между физическими точками не более 0,5 м.

Результаты. Выявлена плоскость трещины, зафиксированной на поверхности (плоскость скольжения). Прослеживается граница более плотного основания насыпи с глубин 25-32 м, совпадающая с проектной границей (Рисунок 3). Полученные результаты подтверждают правильность принятых ранее решений, по оценке состояния безопасности рабочей площадки склада.

Ценность: Оперативное выявление плоскостей скольжения, гидрогеологических условий и выявление аномалий разреза; Полевые работы: 1 дн; Камеральная обработка: 1 дн.

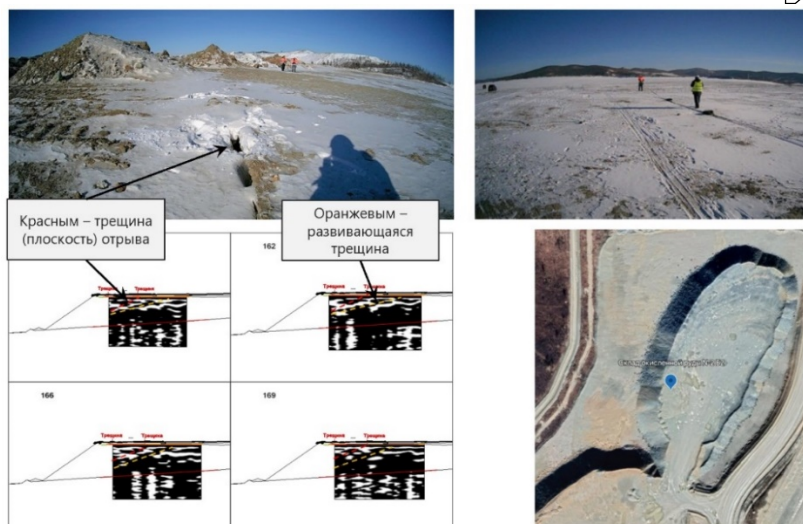


Рисунок 3. Обследование склада окисленной руды

3. Обследование АБК

Цель: Обследование части корпуса АБК с чрезмерными осадками на наличие карстов, суффозий, обводнений.

Метод: георадиолокация методом профилирования, георадар «ИНТЕРРАСКАН», антенны длиной 4 м, режим непрерывной съемки с шагом между физическими точками не более 0,5 м.

Результаты. Обводненность и суффозийность наблюдаются в южной части корпуса до глубины 6-8 м (Рисунок 4). Может влиять на неравномерные осадки фундамента. Полученные результаты обследования, подтвердили результаты инженерно-геологических изысканий других исполнителей, что является важным, уточняющим признаком для оценки состояния безопасности левого крыла здания АБК.

Ценность: Оперативное выявление, гидрогеологических условий и выявление аномалий разреза; Полевые работы: 1 дн; Камеральная обработка: 1 дн.

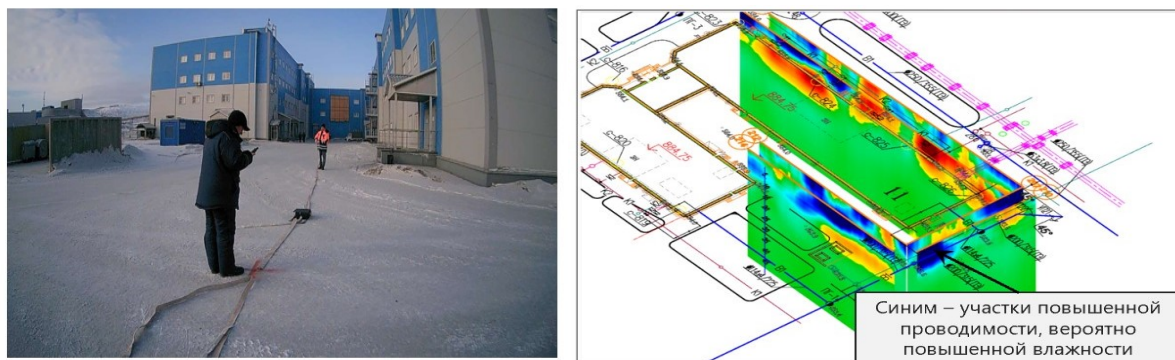


Рисунок 4. Обследование одного из корпусов АБК

Все выполненные пилоты показали положительный результат, полученные данные при сопоставлении совпали с имевшимися данными изысканий. ООО «ГРК Быстринское» рекомендует данную технологию для дальнейшего применения на промышленных объектах горнодобывающих компаний, в частности в карьерах при выполнении геомеханических работ в качестве инструмента оперативного уточнения и прогнозирования пространственного положения опасных грунтовых аномалий, карстовых провалов, тектонических и деформационных разрывных нарушений в массиве, на глубину до 3-х рабочих уступов (25–30 м). Это позволит расширить возможности предотвращения несчастных случаев, связанных с указанными деформационными и геологическими проявлениями, что улучшит управляемость безопасностью при ведении горных работ в карьерах и эксплуатации гидротехнический сооружений.

Библиография

1. Алексеев А.Г., Дуйсиналиев Н.А., Антипов В.В., Горкин Д.С., Сахтеров В.И. Мониторинг динамики деградации мерзлоты с помощью глубинной высокоразрешающей импульсной электроразведки // Нефть. Газ. Новации. 2023 № 4 (269), С.60-63.
2. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Ляхов Г.А., Резников А.Е. Георадиолокация больших глубин // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 5.
3. Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. «Георадар для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности». Патент на полезную модель RU218691U1, зарегистрирован в Госреестре 06.06.2023г.
4. Горкин Д.С., Сахтеров В.И. «Передачик георадара». Патент на полезную модель № RU219610U1, зарегистрирован в Госреестре 27.07.2023г.
5. Дуйсиналиев Н.А., Бычков Г.В., Антипов В.В. Способ зондирования подповерхностного пространства с помощью сигналов волновой природы (варианты). Патент на изобретение № 2811040, зарегистрирован в Госреестре 10.01.2024г.
6. Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Морозов П.А., Беркут А.И. Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. №. 4. С. 28-36.
7. Хоробров Д., Гильфанов М., Поплавский С., Дуйсиналиев Н.А. Применение глубинной высокоразрешающей импульсной электроразведки на объектах ООО «ГРК Быстринское». // Журнал «ГЛОБУС, геология и бизнес» №4 (78) октябрь 2023 г. (www.vnedra.ru), стр. 142-145.

Эксперименты по георадиолокации с летательного аппарата

Барков Е.В. (ИЗМИРАН, barkov00@gmail.com),
Аверин А.А. (ИЗМИРАН, averin@izmiran.ru),
Корсукова В.С. (ИЗМИРАН, valerikors@gmail.com),
Шнерук С.А. (ПАО «Россети», shnieruk@mail.ru),
Горкин Д.С. (ИЗМИРАН, gorkin@izmiran.ru),
Сахтеров В.И. (ИЗМИРАН, sakhterov@mail.ru)*

Аннотация

Представлены некоторые результаты экспериментов с антеннами для георадара воздушного базирования. Проведенные эксперименты показали работоспособность георадаров и необходимость дальнейшего развития специализированных направленных антенн воздушного базирования для использования с различными летательными аппаратами (ЛА), в частности квадрокоптерами для высот от 5 до 50 метров.

Ключевые слова

Авиагеорадар; квадрокоптер; направленные антенны

Теория

В Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В.Пушкова продолжительное время проводятся эксперименты и практические работы по подповерхностному зондированию природных сред с применением передатчиков повышенной мощности. В основном это были работы с поверхности земли [1,2], начали появляться публикации о использовании георадаров с воздушного носителя [Едемский и др., 2021]. Обычный резистивно-нагруженный диполь применяемый в подповерхностным зондировании, обеспечивает круговое излучение в однородном пространстве, что означает энергетические потери при использовании его с воздушного носителя, используемый [3,4] V-образная антенна имеет более направленную диаграмму направленности главного лепестка. Это позволило им получить результаты при зондировании с вертолета. Но есть некоторые ограничения у применяемой ими аппаратуры. Георадар «Лоза» работает в двух режимах приема сигнала, в бинарном и волновой форме, и при георадиолокации с воздушного носителя запись волновой формы затруднена, т. к. необходимо некоторое время для проведения 512 измерений, что по длительности измерения 0,5с поэтому применен георадар «Грот12» [5], позволяющий произвести запись кадра за 2 мкс. В связи необходимостью оперативной георадиолокации в сложных географических и природных условиях естественно возник интерес к георадарам воздушного базирования. И хотя основные исследования проводятся в Арктике и прибрежных арктических зонах, есть интерес и от других заказчиков народного хозяйства, то как обследование нефти и газопроводов. И большой сегмент применения в экологических исследованиях. К сожалению в данный момент времени есть

проблемы с использованием квадрокоптеров, то начальные эксперименты по исследования антенн и самого авиагеорадара проводились на стационарных стендах или с использованием сотрудников для имитации ЛА.



Рисунок 1. *Имитация летательного аппарата.*

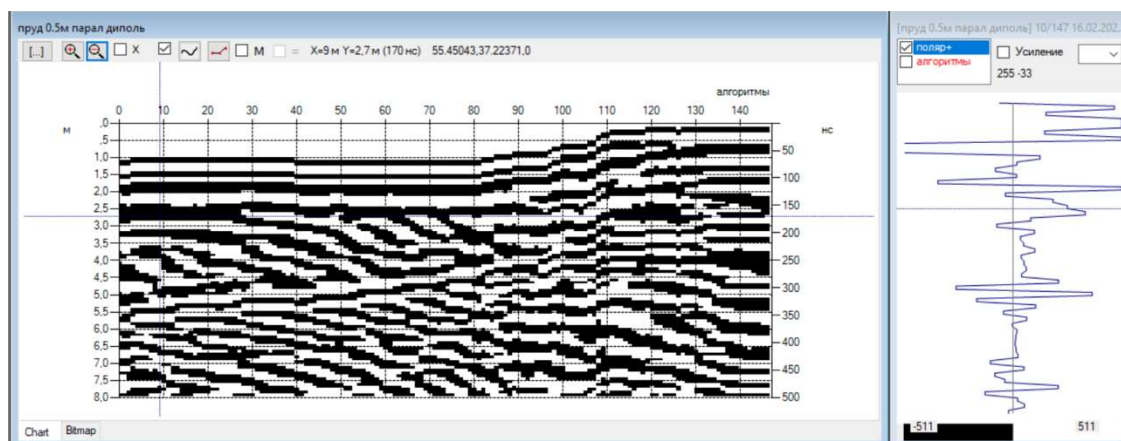


Рисунок 2. *Радарограмма 2023 года с использованием дипольных антенн и дискретизация 5 нс.*

На рис.2 показаны исходные радарограмм с антенной типа резистивно-нагруженный диполь в правой части волновая форма одного измерения. Как видно из необработанной радарограммы довольно четко отслеживается толщина льда, глубина пруда и последующие слои. Далее в режиме слоев была составлена геолого-геофизической модели разреза озера по разным скоростным и диэлектрическим характеристикам слоев на глубину до 8 метров. На рис.3 и рис.4 показаны обработанная радарограмма с антенной типа резистивно-нагруженный диполь и V-образной резистивно-нагруженной антенной, в левой части измеренный профиль, в правой волновая форма одного измерения. Эксперименты 2024 года проводились с экспериментальным георадаром «Сфера» с частотой дискретизации 1 нс.

Как видно из необработанной радарограммы довольно четко отслеживается толщина льда, глубина пруда и последующие слои. Далее в режиме слоев была составлены геолого-геофизической модели разреза озера по разным скоростным и диэлектрическим характеристикам слоев на глубину до 8 метров, приведены на рис.3 и рис. 4, слева радарограмма профиля, справа волновая форма сигнала единичного кадра.

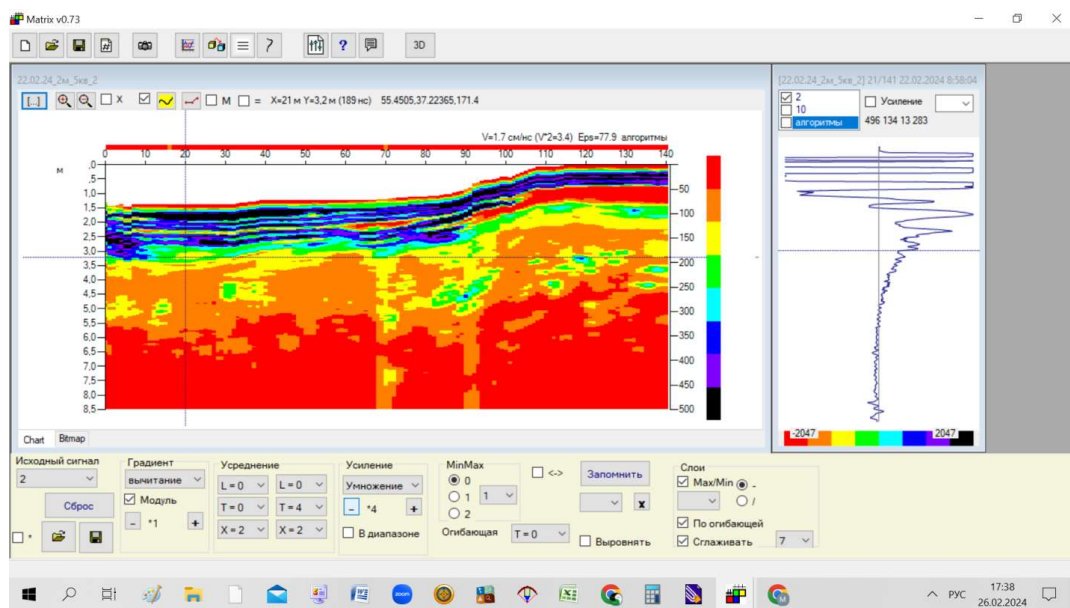


Рисунок 3. Радарограмма 2024 года с использованием V-образной антенн, дискретизация 1 нс, использован модельный фильтр зависимости от фазовой скорости сигнала.

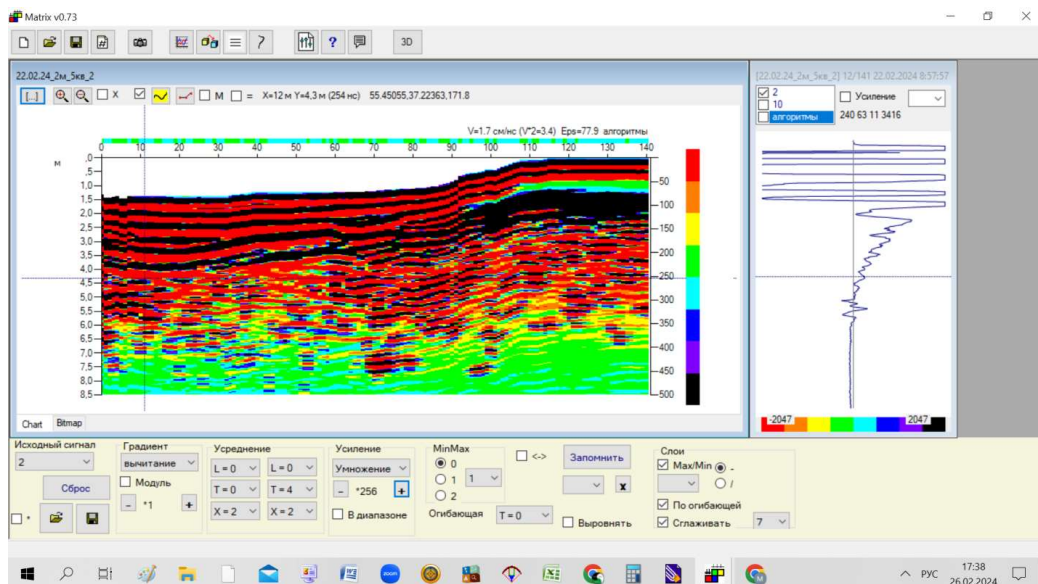


Рисунок 4. Радарограмма 2024 года с использованием V-образной антенн и дискретизация 1 нс, использован структурный фазовый фильтр.

Выводы

Проведенные эксперименты показали возможность реализации авиагеорадара на БПЛА для измерений на высотах от 5 до 50 метров. Результаты измерений в процессе экспериментов позволило наметить направления дальнейших исследований антенно- фидерных устройств для ЛА малой авиации и БПЛА.

Благодарности

Благодарим ООО «Интерраскан» за предоставленный БПЛА.

Библиография

1. Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Морозов П.А., Беркут А.И., Меркулов С.В. Глубинный георадар: принципы и применение. // Электромагнитные волны и электронные системы, 2018 т. 23, № 4 С. 28-36
2. Гулевич О.А. Георадиолокация больших глубин. Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. // Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75. Т.2. Под ред. В.Д. Кузнецова. М.: ИЗМИРАН, 2018. С. 120-133.
3. Едемский Д. Е., Гарбацевич В. А., Попов А. В., Прокопович И. В. Опыт георадарного зондирования с воздушного носителя // Распространение радиоволн: труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции [Электронный ресурс] : научное электронное издание. — Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта, 2021. - С.797-803
4. Edemsky D., Popov A., Prokopovich I., Garbatsevich V. Airborne Ground Penetrating Radar, Field Test // Remote Sensing. – 2021. – V. 13, N. 4. – P. 667.
5. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга. // Экологические системы и приборы №5 2012г., С.3-5

*Георадар для глубинных геологических исследований,
наиболее часто используемые направления применения.*

*Беркут А.И. (ВНИИСМИ, lozaberk@yandex.ru),
*Морозов П.А. (ВНИИСМИ, ИЗМИРАН, pmoroz5@yandex.ru),
Попов А.В. (ИЗМИРАН, popov@izmiran.ru).*

Аннотация.

Глубинный георадар позволяет оперативно, ненарушающим способом, исследовать диапазон глубин характерный для развития последствий опасных геологических процессов. Глубинный георадар дает возможность получать непрерывную информацию о состоянии геологической среды – с шагом от десятков см и на глубину до нескольких сотен метров.

Радиофизиками и инженерами ИЗМИРАН и ВНИИСМИ накоплен большой опыт георадарных исследований для нужд геологоразведки и инженерной геологии. В докладе приводятся наиболее востребованные направления применения глубинного георадара на основании 25-ти летнего опыта геофизических изысканий. Приведены основы интерпретации экспериментальных данных: обнаружение характерных геологических структур и оценка параметров среды на основе теоретических модельных расчетов.

Ключевые слова.

Глубинный георадар, импульсное электромагнитное зондирование, обратная задача, рудоконтролирующие структуры.

Источники финансирования.

Георадарные исследования выполнены ООО «Компания ВНИИСМИ». Теоретические исследования проводились в ИЗМИРАН при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00083 «Глубинный георадар: теория, методы, эксперимент».

Введение.

Глубинное георадарное зондирование – новое, развивающееся направление геофизических исследований. Георадар «Лоза» – это импульсный электромагнитный радиолокатор подповерхностного зондирования. С его помощью можно ненарушающим способом исследовать геологическую структуру земной поверхности на глубины десятков и сотен метров. В георадарах «Лоза» реализован ряд конструктивных и методических принципов, которые делают возможным зондирование на рекордные глубины - в том числе в низкоомных средах, сильно поглощающих электромагнитные волны [1, 2]:

1. Георадар «Лоза» оснащен передатчиками, основанных на высоковольтных разрядниках. Георадар комплектуется передатчиками импульсным напряжением 5, 10, 21 кВ.

2. Для получения апериодического (нерезонансного) импульса георадар оборудован низкочастотными резистивно-нагруженными антеннами (10-15-25-50 МГц). В передающую и приемную антенну включена распределенная резистивная нагрузка.

3. Использован аппаратно-программный алгоритм, реализующий функцию оцифровки регистрируемого сигнала с динамическим диапазоном до 120 дБ.

4. Для достижения больших глубин зондирования в георадарах «Лоза» максимум энергии зондирующего сигнала сдвинут на более низкие частоты в пределах полосы

частот приемника: 1-50 МГц. Георадары «Лоза» серийно комплектуются антеннами длиной 3, 6, 10 и 15 метров.

5. Для достижения рекордных результатов по глубине зондирования используется физический эффект фокусировки излучения в сторону более «диэлектрически плотной» среды. При размещении антенн георадара на поверхности земли – границе раздела двух сред формируется диаграмма направленности излучения, ориентированная в сторону среды с большей диэлектрической проницаемостью [1].

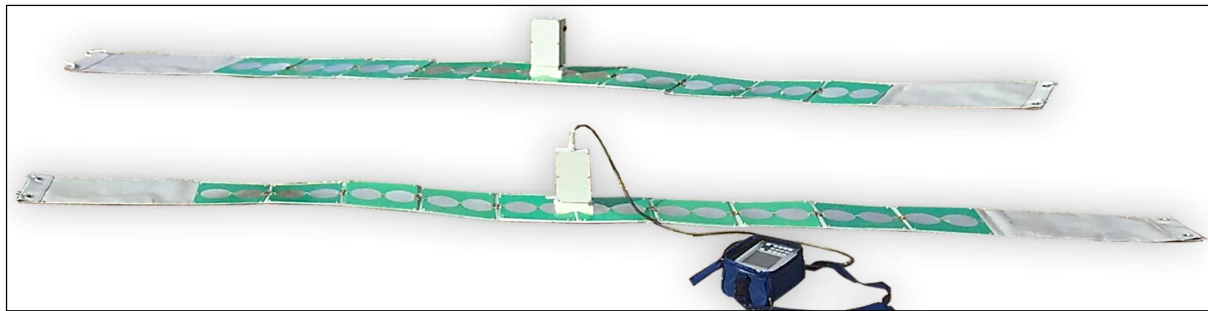


Рисунок 1. Георадар «Лоза-Н» (передаточная и приемная антенна с блоком регистрации).

Глубинные георадары «Лоза» прошли национальную сертификацию и сертификацию на соответствие:

- требованиям технических регламентов ЕАЭС,
- директивам по электромагнитной совместимости и безопасности ЕС/EU.

Методы анализа и интерпретации.

Принципы георадиолокации не позволяют определить тип конкретного полезного ископаемого или горной породы, но георадарное обследование позволяет получить не менее важную информацию – это границы и структуры горных пород.

Основной методический принцип интерпретации георадарных данных основан на выделении характерных структур в исследуемой геологической среде:

- применение георадара в **геологоразведке** базируется на анализе рудоконтролирующих структур, характерных для определенного вида полезных ископаемых. Наиболее известные рудоконтролирующие структуры: грабены, горсты, тектонические разломы, дайки, кварцевые жилы, кимберлитовые трубки, элементы палеорельефа (палеодолины и палеоруслы) и т.п.

- применение георадара в **инженерной геологии** базируется на анализе специфических структур и образований: провалы, подземные пустоты, зоны разуплотнения и обводнения, карсты, суффозионные воронки, структуры оползневых процессов (оползневые блоки, плоскости скольжения, зоны отрыва, заколы).

Дополнительную информацию для уточнения интерпретации результатам георадарного зондирования удастся получить с помощью приближенных методов решения обратной задачи для оценки параметров среды.

Комплексное применение эвристического подхода в анализе радиообразов геологических структур, приближенных методов решения обратной задачи и заверочного бурения обеспечивает достоверную интерпретацию георадарных данных.

Направления применения глубинного георадара.

Опыт 25-ти летнего применения георадара для геофизических исследований позволяет выделить направления, в которых преимущества подповерхностного

зондирования наиболее востребованы. В первую очередь, это высокая информативность, автономность, глубинность и ненарушающий принцип исследования [1,2].

Геологоразведка. Последние 10 лет отмечается повышение интереса предприятий, занимающихся добычей полезных ископаемых, к использованию георадара для разведки новых месторождений. Применение георадара позволяет существенно снизить объемы разведочного бурения и использовать его только для заверки георадарных результатов и определения содержания полезного ископаемого. Приведем несколько примеров:

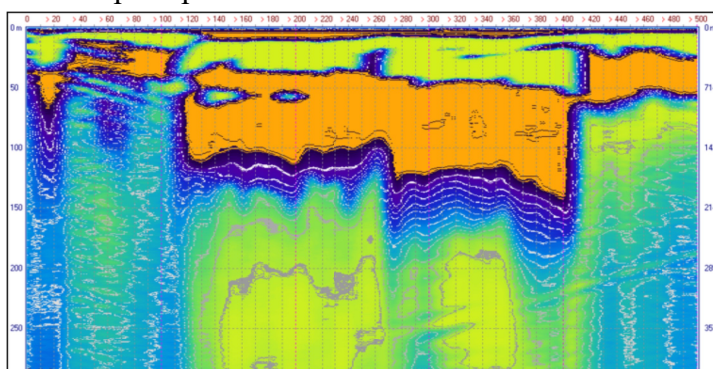


Рисунок 2. Тектонический блоковый провал, грабен, (Иран). Разведываемое полезное ископаемое приурочено к зонам тектонических разломов.

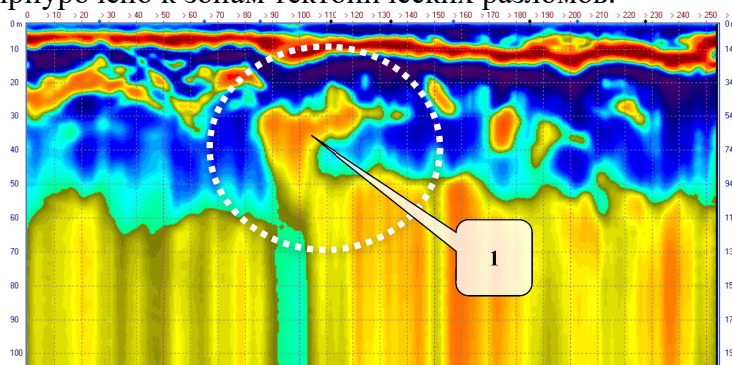


Рисунок 3. Интрузивное рудное тело (1) (Индия). Полезное ископаемое (марганец), приурочено к зонам интрузии.

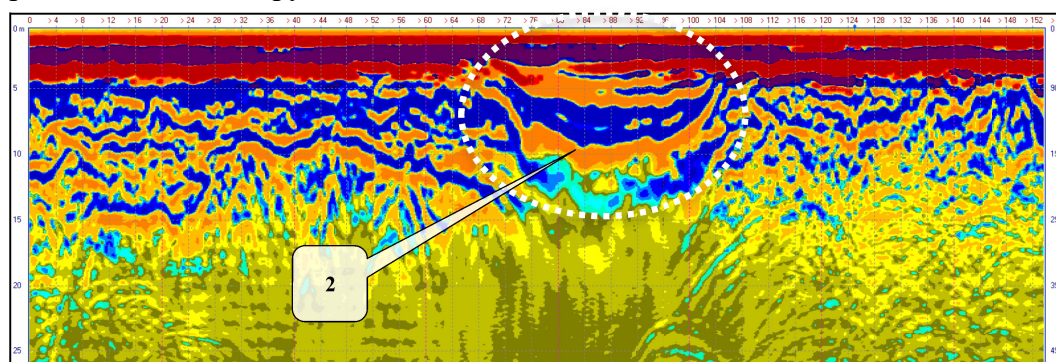


Рисунок 4. Погребенное палеорусло (2). К таким структурам могут быть приурочены аллювиальные месторождения золота, алмазов, янтаря.

Инженерная геология. Георадарное зондирование востребовано в области обследования опасных геологических структур: тектонических нарушений, разломов, просадок, провалов, оползней, карстов [3,4].

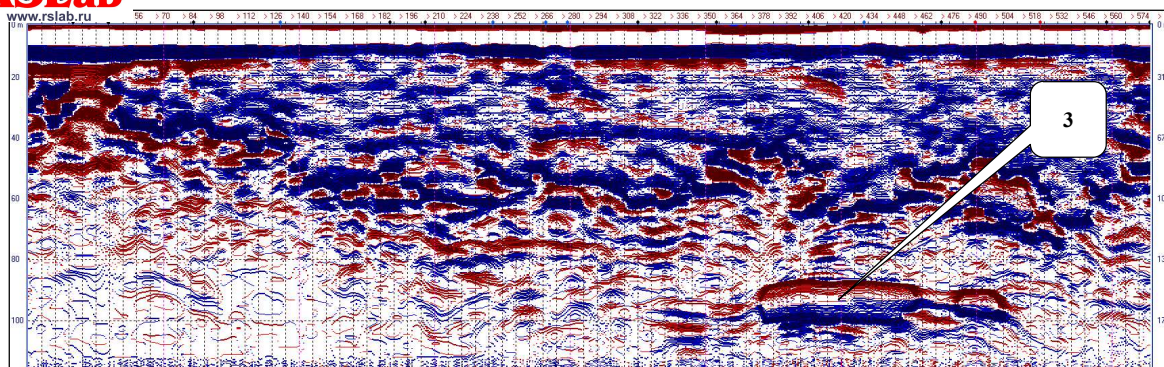


Рисунок 4. Горная выработка на глубине 90 м. (верх) [3]. (Карьер Аристон, Греция).

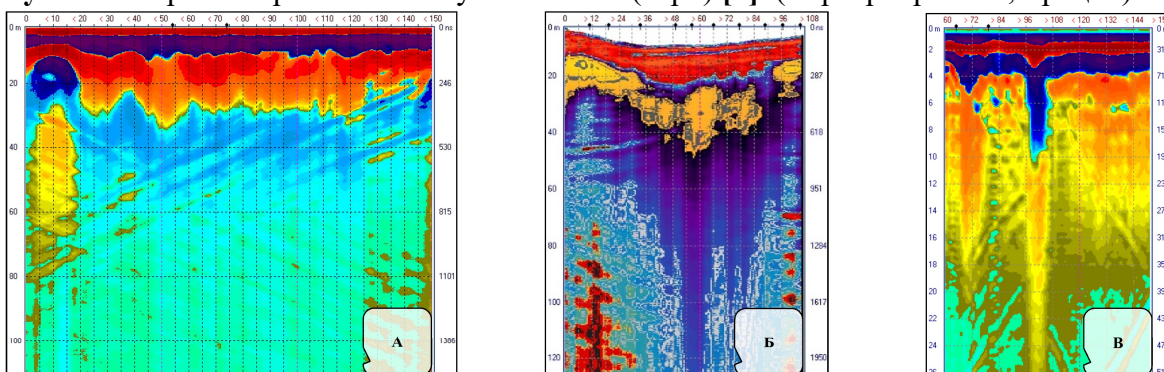


Рисунок 5. Старая выработка [А], карст в Тульской области [Б], карст в Башкирии [В].

Глубинное георадарное зондирование все чаще применяется на стадии предпроектных изысканий при строительстве зданий и сооружений, оснований авто/железных дорог, при прокладке трубопроводов методом ГНБ и при мониторинге гидротехнических сооружений.

Выводы

Уточнение методов интерпретации и численного моделирования позволит еще больше расширить сферу применения глубинного георадара для решения задач разведки полезных ископаемых, строительства и мониторинга опасных геологических процессов.

Библиография

1. Berkut, A.I., Edemsky, D.E., Kopeikin, V.V., Morozov, P.A.; Prokopovich, I.V., Popov, A.V. Deep penetration subsurface radar: Hardware, results, interpretation. In Proceedings of the 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2017), pp. 1–6, Edinburgh, UK, 2017,
2. Morozov P., Morozov F., Lazarev M. Bogolyubov L., Popov A. Characterization of antenna radiation pattern and penetration depth in ground penetrating radar field missions // Remote Sensing, 2023, V. 15, N 23 P. 5452. <http://dx.doi.org/10.3390/rs15235452>.
3. П.А. Морозов, В.А. Волков, В.В. Копейкин, «Перспективы применения георадаров для исследования процессов карстообразования и оползней», «Разведка и охрана недр», 7/2012, Москва.
4. «Эффективность применения георадарной съемки для поисков и изучения строения карстовых структур», Беркут А.И., Морозов П.А., Ульяновцев Н.А., Козаченко И.В., Морозов Ф.П., Горно-геологический форум «МИНГЕО СИБИРЬ 2022», СФУ (Сибирский федеральный университет), доклад, Красноярск, 25-26 мая 2022 года.

Определение ширины зазоров с миллиметровым разрешением с использованием машинного обучения в задачах подповерхностного зондирования

Боярина Е.Д. (МФТИ, boiarina.ed@phystech.edu), Шлыков В.В. (МФТИ, shlykov.vv@mipt.ru),
Зильберштейн А. Р. (МФТИ, zilbershtein.ar@phystech.edu), Янченко С. Г. (МФТИ, yanchenko.sg@mipt.ru)*

Аннотация

Исследована задача определения ширины полости в образце, состоящем из двух диэлектриков, расположенных с зазором от 0 до 10 мм, относящаяся к задачам подповерхностного зондирования в ближнем поле с миллиметровой точностью. Разработан метод определения ширины этого зазора при помощи анализа зависимости от частоты излучения коэффициента отражения от образца в диапазоне 1.6 – 11.6 ГГц. Приводятся результаты использования машинного обучения для достижения точности не хуже 0.5 мм при определении ширины полости.

Ключевые слова

Подповерхностное зондирование, ближняя поле, машинное обучение.

Источники финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы стратегического академического лидерства. "Приоритет-2030" Соглашение № 075-15-2024-200 от 06.02.2024.

Введение

Работа по детектированию миллиметровых зазоров имеет высокую актуальность и может быть применена, например, в строительной отрасли при инспекции крыш зданий для обнаружения потенциальных дефектов, таких как трещины или зазоры. На данный момент широко распространен тепловизионный метод обследования кровли [1], но для эффективной работы тепловизионной камеры требуется наличие теплового контраста между дефектом и окружающей средой. В случае незначительных различий в температуре тепловизионный метод может быть менее эффективным чем метод, описанный в данной работе.

Другим потенциальным применением подповерхностного зондирования ближнего поля может быть медицинская визуализация и диагностика, где сканирование с высоким разрешением позволяет обнаруживать аномалии в тканях. Подобные методы, использующие радиовидение в ближнем поле и направленную антенну Вивальди для достижения миллиметрового разрешения, разрабатывались для поиска опухолей мозга [2], [3].

Методика и результаты экспериментов

Экспериментальная установка состоит из векторного анализатора Rohde&Schwarz ZVL Network Analyzer, работающего в диапазоне 9 КГц – 13,6 ГГц, и широкополосной антенны Вивальди, установленной вплотную к двум вертикально расположенным деревянным плитам (рис. 1). Между этими плитами создается зазор фиксированной ширины от 1 до 10 мм с помощью пластиковых уголков фиксированной ширины и быстрозажимных струбцин.



Рисунок 1. Фотографии экспериментального макета.

Для определения ширины зазора в данной работе сначала проводились измерения показателя S_{11} при отсутствии образца (далее будем называть их *open_air*), а затем при разных значениях ширины зазора. Параметр S_{11} определяется как отношение комплексной амплитуды отраженной волны к комплексной амплитуде излученной волны и характеризует коэффициент отражения СВЧ-излучения от исследуемого объекта в заданном диапазоне частот. Характерные графики зависимости модуля S_{11} от частоты представлены на рисунке 2.

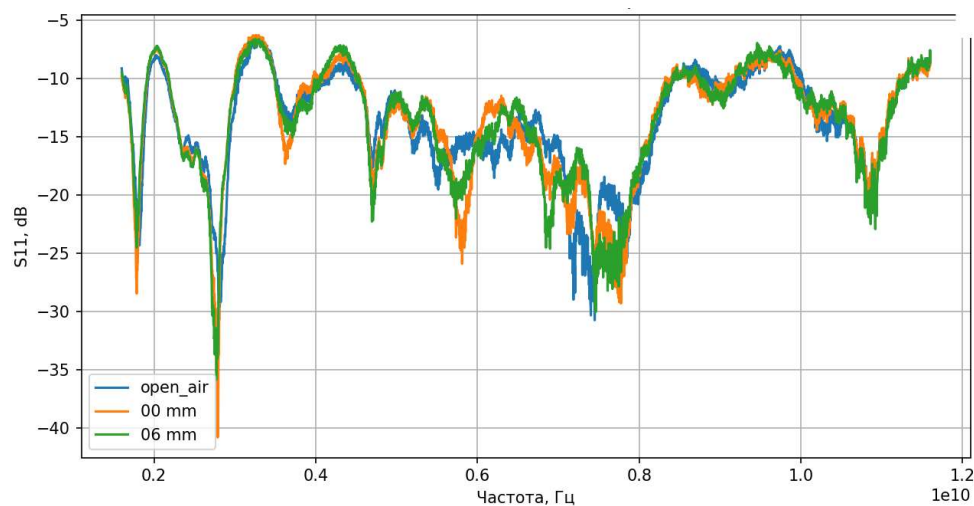


Рисунок 2. Зависимость модуля S_{11} от частоты для измерения *open_air* и двух разных ширин зазора.

Важно отметить, что, хотя длина волны излучения в процессе измерений находится в диапазоне от 2,6 см до 18,7 см (в воздухе), существенная разница между кривыми возникает при изменении ширины зазора всего на 1 мм, что позволяет говорить о детектировании и измерении ширины зазоров в миллиметровом разрешении.

Для определения ширины зазора будем использовать параметр RS11 (reduced S11 – приведенный S11), который определяется как квадрат разности комплексных параметров $S11_{\text{exp}}$ и $S11_{\text{open_air}}$, то есть S11, измеренный в эксперименте с образцами и измеренный в эксперименте open_air соответственно, тогда:

$$(S11_{\text{exp}} - S11_{\text{open_air}})^2 = \left(\frac{Z_1 - Z_{OA}}{Z_0} \right)^2 = \left(\frac{Z_{\text{образца}}}{Z_0} \right)^2 \quad (1)$$

По определению: $S11_{\text{exp}} = \frac{Z_1}{Z_0}$, $S11_{\text{open_air}} = \frac{Z_{OA}}{Z_0}$, где Z_0 – комплексная амплитуда излученной волны, Z_1 и Z_{OA} – комплексные амплитуды отраженной волны в экспериментах с образцом и без образца (open_air) соответственно. $Z_{\text{образца}}$ – комплексная амплитуда отраженной от образца волны без учета составляющих, отраженных от внешней среды. Именно по спектру RS11 определяется толщина зазора. Характерные графики зависимости RS11 от частоты представлены на рисунке 3. Фактически использование показателя RS11 вместо S11 повышает «контрастность» анализируемых кривых.

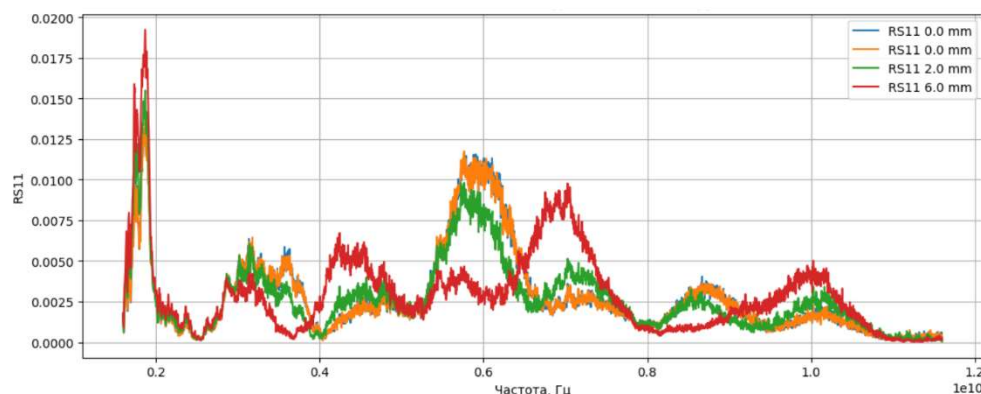


Рисунок 3. Зависимость RS11 от частоты для различных ширин зазора

После получения значений RS11 для множества измерений различной толщины (всего около 500 измерений) проводилась подготовка данных для машинного обучения. Далее сформировалось признаковое пространство и целевых переменных для обучения модели. Каждому массиву RS11 подставлялась в соответствие метка, равная толщине зазора в мм, каждый массив RS11 преобразуется в признаки путем разбиения этого массива на логарифмические/линейные интервалы и вычисления среднего и стандартного отклонения на этих интервалах. Таким образом, для каждого элемента данных сформировался набор признаков, состоящий из N средних и N стандартных отклонений (всего 2N штук для каждого элемента), где N=20 – количество интервалов.

Для обучения модели был выбран алгоритм случайного леса [4] – ансамблевый метод машинного обучения, основанный на агрегировании результатов множества деревьев решений. Этот алгоритм создает “лес” из многих деревьев решений. Затем для

предсказания значения алгоритм усредняет ответы всех деревьев.

Модель случайного леса обучалась на тренировочном наборе данных с использованием подобранных оптимальных гиперпараметров. В процессе обучения модель настраивала свои внутренние параметры, чтобы наилучшим образом соответствовать данным и предсказывать целевую переменную.

Действие модели было проверено на отдельной тестовой выборке из 100 экспериментов, таблица сравнения средней ошибки модели и предсказанных значений с истинным значением метки (ширины) приведена в таблице 1:

Метка	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
Среднее предсказание	0.114	0.880	1.953	3.022	3.946	4.996	5.965	6.992	7.997	9.008	9.971
Средняя ошибка	0.114	0.141	0.072	0.023	0.055	0.010	0.058	0.014	0.003	0.011	0.029

Таблица 1. Таблица результатов проверки модели на тестовой выборке.

Заключение

На экспериментальном макете было продемонстрировано, что, анализируя зависимость параметра S11 от частоты излучения в диапазоне 1,6 – 11,6 ГГц, можно с помощью методов машинного обучения определить ширину зазора между плитами с точностью не хуже 0.5 мм. В дальнейшем планируется более подробное исследование границ применимости данного метода: предельная точность определения ширины, необходимая точность измерения кривой S11, необходимая точность установки антенны по отношению к поверхности и т.д.

Библиография

1. Михайлова Н.Л. и др. "Проведение тепловизионного контроля строительных сооружений" Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук, №1-2, 2016, стр. 105-108.
2. Oliveira A.M.D. et al., "A Fern Antipodal Vivaldi Antenna for Near-Field Microwave Imaging Medical Applications", in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 69, no. 12, pp. 8816-8829, Dec. 2021.
3. Oliveira A.M.D. et al., "A high directive Koch fractal Vivaldi antenna design for medical near-field microwave imaging applications", Microw. Opt. Technol. Lett., vol. 59, no. 2, pp. 337-346, Feb. 2017.
4. Breiman, L., "Random Forests", Machine Learning, vol. 45, no. 1, pp. 5-32, 2001.

Экспресс-изыскания георадарами наземного и воздушного базирования

*Аверин А.А. (ИЗМИРАН, averin@izmiran.ru),
Антипов В.В. (ООО «ИНТЕРРАСКАН» vadim.antipov@interrascan.ru),
Бычков Г.В. (ООО «ИНТЕРРАСКАН» georgy.bychkov@interrascan.ru),
Горкин Д.С. (ИЗМИРАН, gorkin@izmiran.ru),
Дуйсиналиев Н.А. (ООО «ИНТЕРРАСКАН» nurbulat.duisinaliev@interrascan.ru),
Сахтеров В.И. (ИЗМИРАН, sakhterov@mail.ru)*

Аннотация

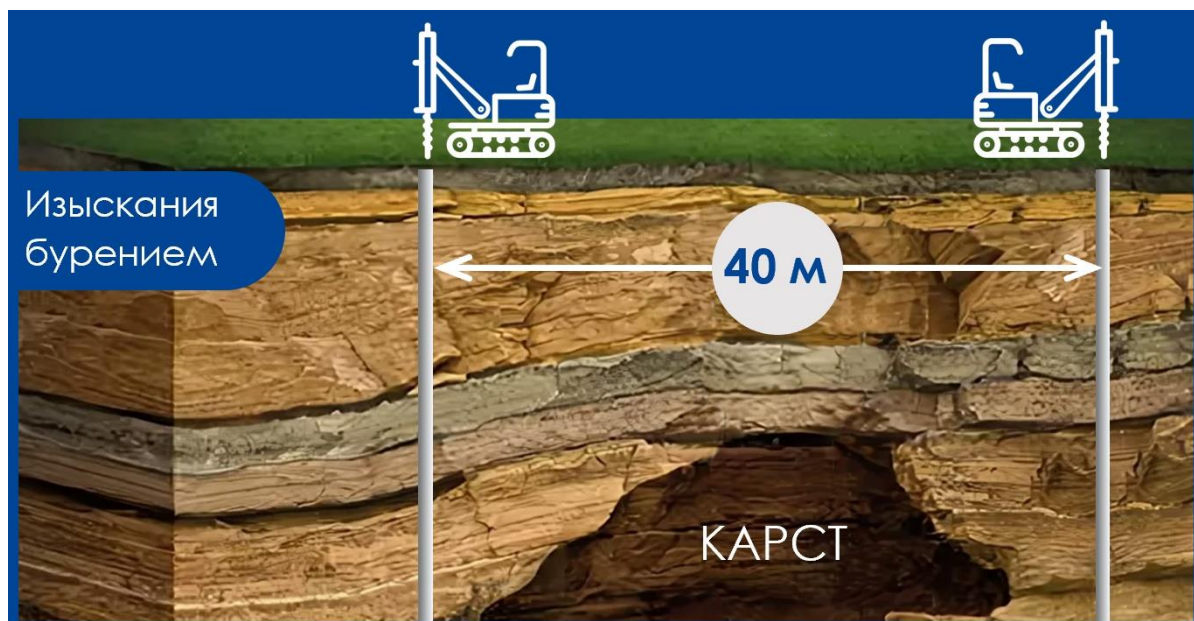
ООО «ИНТЕРРАСКАН» осуществляет системное внедрение георадаров наземного и воздушного базирования в практику предпроектных изысканий, геотехнического и экологического мониторинга, геологоразведки. Экспресс-изыскания с применением георадаров могут выполняться в любой сезон, с высокой точностью, без предварительной подготовки обследуемой площадки, без необходимости мобилизации и разворачивания сложного оборудования.

Ключевые слова

Георадар, предпроектные изыскания, инженерная геология, геотехнический мониторинг, экологический мониторинг.

Предпосылки

Базовой технологией исследования подповерхностного пространства является изыскательское бурение. При бурении по сетке скважин нередко пропускаются серьезные аномалии. Между скважинами может быть пропущены опасные объекты, которые серьезно влияют на несущую способность грунтов.



Многолетнемерзлые грунты занимают около 70% территории РФ. Развитие подповерхностных аномалий вечной мерзлоты ведет к серьезному ущербу, который, по оценкам Минприроды, составит для Российской экономики к 2035 году 5 триллионов рублей.



Проблемой является разрушение объектов, вызванное ослаблением несущих грунтов из-за подповерхностных аномалий. Причинами этой проблемы является пропуск аномалий при изысканиях, развитие аномалий в грунтах под основаниями эксплуатируемых сооружений.

Совокупность указанных проблем определяет потребности, заключающиеся в необходимости повышения информативности изысканий и внедрения в практику мониторинга несущих оснований неразрушающих грунт оперативных методов.

К таким методом относятся геофизические технологии. Однако, подавляющее большинство из них имеет серьезные недостатки, заключающиеся в сложности проведения полевых работ, низкой достоверности полученных результатов, высокой стоимости и ограничении сезонности работ только летним периодом.

Базовые технологии

Георадар наземного базирования

Георадиолокационные технологии имеют ряд существенных преимуществ. Мобильный, легкий георадар перемещается по непрерывному профилю и зондирует подповерхностное пространство мощными электромагнитными импульсами. Точность изысканий – 90%. Не требуется разворачивать сложное оборудование и готовить площадку: главное требование – возможность прохода по ней оператора с георадаром. В результате георадиолокационных изысканий формируется цифровой след объекта, исключающий произвольное толкование результатов.

Георадар воздушного базирования



Инновационная разработка – Георадар на беспилотном летальном аппарате является ответом на вызовы, с которыми компания столкнулась в работе. Это прежде всего необходимость проведения изысканий на труднодоступных площадях, где пеший оператор просто не может пройти с георадаром. Изыскания с воздуха позволят такжекратноувеличить скорость выполнения полевых работ.

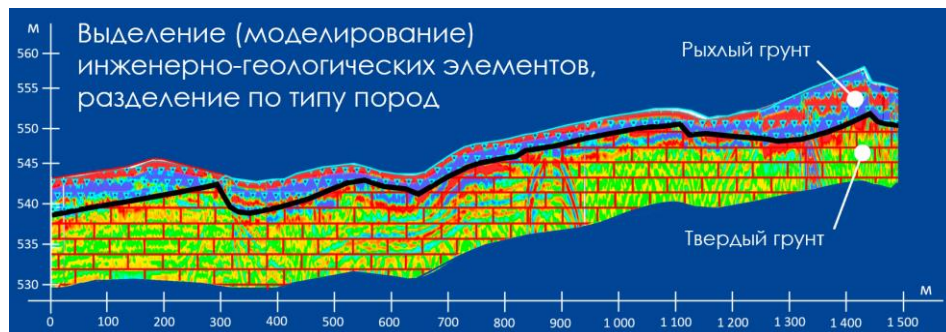
ООО «ИНТЕРРАСКАН» построен прототип Георадара на БПЛА, с оригинальными направленными антеннами, выполнен НИКОР, подтвердивший расчеты и гипотезы о возможности применения георадара с воздуха.

Проект был представлен на конкурсах и получил награды от авторитетных жюри: Конкурс «Новатор Москвы», 2023 (2-е место); Международный конкурс освоения Арктики, 2023 (2-е место)

Опыт компании

За неполные три года своего существования ООО «ИНТЕРРАСКАН» было выполнено более 20 серьезных изысканий для крупных промышленных заказчиков таких как: ПАО «Русгидро», ПАО «ГМК Норникель», ПАО «Северсталь», ОАО «УГМК» и других компаний. Признание отрасли отмечено наградой престижного горного конкурса «Майн Экселенс-23». Компания тесно сотрудничает с авторитетными научными центрами, такими как ИЗМИРАН, МФТИ, МГРИ, НИЦ «Строительство».

Пример работы компании в предпроектных изысканиях: обследование трассы проектируемого нефтепровода с применением георадара наземного базирования.

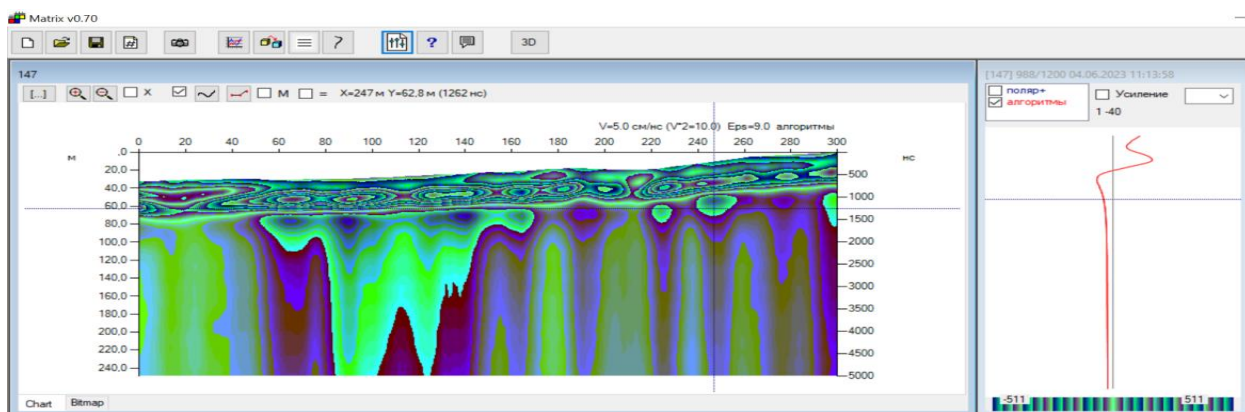


Поставленная цель изысканий оптимизировать последующее изыскательское бурение. В результате выполненного исследования заказчик принял решение о сокращении объема буровых работ более чем в три раза.

Пример работы компании в геологоразведке: обследование золоторудного месторождения. Цель изысканий: локализация зон рудопроявления на глубину до 250 м, выявление зон обводнения, тектонических разломов, карстов.



Полевые работы были завершены за 2 дня, камеральная обработка потребовала 10 дней. В результате локализация зон рудопроявления совпала с результатами буровых геологоразведочных работ. Георадарные изыскания позволяют исключить неперспективные участки и сократить время и затраты на дальнейшие геологоразведочные работы.



Ценностное предложение ООО «ИНТЕРРАСКАН»

	СЕРВИС по оперативным исследованиям аномалий подповерхностного пространства георадарами наземного и воздушного базирования	 СНИЖЕНИЕ ИЗДЕРЖЕК от 50% Сокращение количества скважин – по опыту клиентов
	ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ - Предпроектные изыскания - Геотехнический мониторинг - Экологический мониторинг - Геологозащадка	 ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ > 400% Детальность исследований по сравнению с бурением
	 ИСКЛЮЧЕНИЕ РИСКОВ АВАРИЙ 1 : 20 000 Соотношение стоимости услуг к размеру ущерба *	

* Расчет по публичным данным штрафов ПАО «ГМК «НОРНИКЕЛЬ»

Экспериментальный георадар «Сфера»

Варенков В.В. (ИЗМИРАН, varenkov@mail.ru), Горкин Д.С. (ИЗМИРАН, gorkin@izmiran.ru), Смирнов Д.А. (ИЗМИРАН, diman.smirny@yandex.ru), Сахтерова Т.В., (ИЗМИРАН), Сахтеров В.И. (ИЗМИРАН, sakhterov@mail.ru)*

Аннотация

Представлен экспериментальный георадар подповерхностного зондирования «Сфера», разрабатываемый сотрудниками ИЗМИРАН при научно-техническом сотрудничестве с другими организациями.

Приведены технические характеристики и результаты первых научных экспериментов на озере Байкал.

Ключевые слова

Георадар, подповерхностное зондирование, антенны

Теория

На рынке геофизических приборов широко представлены приборы подповерхностного зондирования различных производителей, выполняющие широкий спектр задач. Есть классические малоглубинные георадары на основе стробоскопического осциллографа типа «Око», присутствуют импульсные глубинные георадары типа «Грот» и «Лоза» [1,2]. При всех достоинствах упомянутые приборы имеют высокую стоимость, что ограничивает их использование в малобюджетных сферах. Потребность в недорогих приборах есть, например, в учебных организациях при обучении специалистов для различных областей геофизики и инженерной геологии. Есть спрос на доступные и простые в управлении устройства у поисковиков различной направленности. Малые организации также заинтересованы в приобретении более бюджетного оборудования.

Разрабатывается экспериментальный поисковый георадар, предназначенный для использования при выполнении ряда инженерных, поисковых и других работ в благоприятное время года, обладающий характеристиками ранее названных профессиональных георадаров, кроме стоимости, надежности и всепогодного применения. Он уступает в надежности и в широте применения ввиду погодных условий, но имеет преимущество из-за более низкой стоимости. В настоящее время проводятся эксперименты на 3-х экземплярах, устранение выявляемых технических недостатков и усовершенствование программного обеспечения.

Георадар «Сфера» реализован на базе высокочастотного 4 канального USB осциллографа с частотой дискретизации 1 нс [3]. Структурная схема приведена на рисунке 1. Используются в основном один или два канала, в зависимости от выполняемой задачи: для инженерных работ используется 1 канал с частотой

дискретизации 1 нс, для геологических - подключаются 2 канала с разными усилениями и частотой дискретизации 2 нс или ниже. При этом возможно программное управление длиной буфера до 64 тысяч отсчетов.



Рисунок 1. Структурная схема георадара «Сфера», а — передатчик, б - приемник

Внешний вид георадара «Сфера» приведен на рисунке 2. Показано стандартное расположение на рамке, позволяющей изменять расстояние от 0,6 до 2 метров между передатчиком и приемником. На рисунке 2 видим справа передатчик с выходной амплитудой сверхширокополосного сигнала 16 кВ [4], длительность излучаемого импульса формируется длиной антенны, слева находится приемник. К приемнику и передатчику подключены экспериментальные многовибраторные антенны, предложенные научным сотрудником ИЗМИРАН Горкиным Д.С. Данные многовибраторные антенны обладают большим усилением: проведенные измерения показали, что усиление пятивибраторных диполей выше усиления стандартных антенн на 10 дБ [5].



Рисунок 2. Внешний вид георадара «Сфера»

Управление георадаром «Сфера» производится дистанционно по сети WiFi с ноутбука, разрабатывается программа для смартфона. Установка параметров приемника, управление процессом георадиолокации и сохранение полученных данных производится через программу управления «Пилигрим», интерфейс которой представлен на рисунке 3.

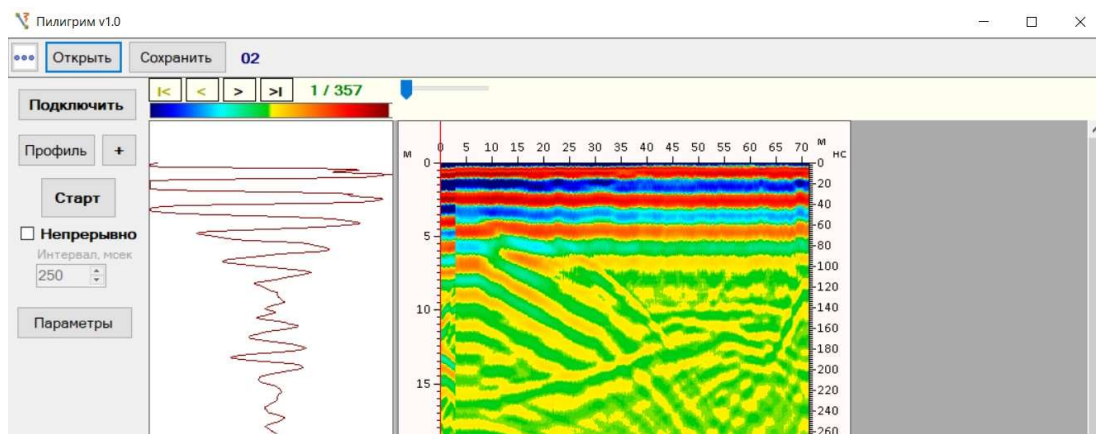


Рисунок 3. Интерфейс программы управления «Пилигрим»

На рисунке 4 приведена одна радарограмма подповерхностной георадиолокации дна озера Байкал со льда возле пос. Листвянка в феврале 2024 года. В ходе работ проверялись георадары различных типов, в том числе георадар «Сфера» с передатчиками с амплитудой подводимого к антенне импульса от 16 до 100 кВ. Проведенные экспериментальные работы были признаны удовлетворительными. Непосредственно от берега дно понижалось полого. Затем произошло резкое увеличение глубины в прибрежной части водоема, что обусловило образование критического угла радиолокации, при котором излучаемый сигнал уже не отражался в сторону приемника. После глубины 14 метров вообще нет отраженных сигналов, независимо от амплитуды излученного сигнала. Планируются дальнейшие работы в других местах Байкала и на других водохранилищах России.

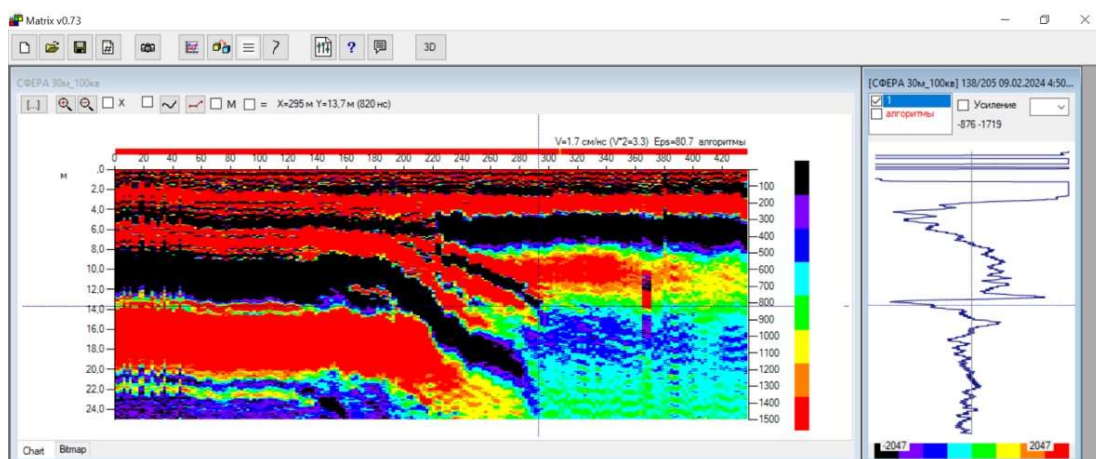


Рисунок 4. Результат обработки данных георадара «Сфера» в программе MATRIX. Приведена радарограмма зондирования берега Байкала около устья Ангары.

Выводы

Представлен экспериментальный георадар «Сфера» для широкого использования студентами, поисковиками и специалистами в области подповерхностной георадиолокации.

Благодарности

Выражаем благодарность ООО «Интерраскан» и лично Нурбулату Амангельдиевичу Дуйсиналиеву за помощь в проведении экспедиции на озеро Байкал.

Библиография

1. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И.. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы №5 2012г., С.3-5
2. Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Морозов П.А., Беркут А.И. Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы Т. 23 № 4 С. 28-36. 2018.
3. Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. «Георадар для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности». Патент на полезную модель RU218691U1, зарегистрирован в Госреестре 06.06.2023г.
4. Горкин Д.С., Сахтеров В.И. «Передатчик георадара». Патент на полезную модель № RU219610U1, зарегистрирован в Госреестре 27.07.2023г.
5. Сахтеров В. И. Измерение характеристик антенн георадаров // Распространение радиоволн: труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции [Электронный ресурс]: научное электронное издание. — Калининград : Издательство БФУ им. И. Канта, 2021. - С.596-600
6. Горкин Д.С., Варенков В.В. Программа для ЭВМ: MATRIX. Номер регистрации (свидетельства): RU2023663673 от 27.06.2023.

Георадиолокация западного берега дна озера Байкал.

Горкин Д.С. (ИЗМИРАН, ООО «ИНТЕРРАСКАН», gorkin@izmiran.ru)
Антипов В.В. (ИЗМИРАН, ООО «ИНТЕРРАСКАН», vadim.antipov@interrascan.ru),
Аверин А.А. (ИЗМИРАН, averin@izmiran.ru)*

Аннотация

В работе представлены результаты профилирования дна озера Байкала в прибрежной зоне пос. Листвянка, Иркутская обл., с использованием разных георадаров: Питон, Лоза, ГРОТ, СФЕРА. Целью исследований было измерение реального потенциала глубинности георадаров, измеряя плавную границу дна озера, исходя из идеи, предложенной Копейкиным В.В.

Ключевые слова

Георадар, Питон, Лоза, ГРОТ, СФЕРА

Цель

Цель исследований: измерение реального потенциала глубинности георадаров, измеряя плавную границу дна озера, исходя из идеи, предложенной Копейкиным В.В. [2].

Исследования выполнялись на оз. Байкал в прибрежной зоне пос. Листвянка, Иркутская обл. 5-9 февраля 2024 г. с глубиной дна 0-50 м (Рисунок 1). Для исследований использовались георадары Питон, Лоза, ГРОТ, СФЕРА в комбинации с антеннами 2, 3, 30 м, передатчиками 0,6, 5, 16, 50, 100 кВ. Полевая съемка велась методом профилирования по геометрической расстановке приемника и передатчика линия за линией со льда озера (Рисунок 2). Фактическая толщина льда 40-50 см.

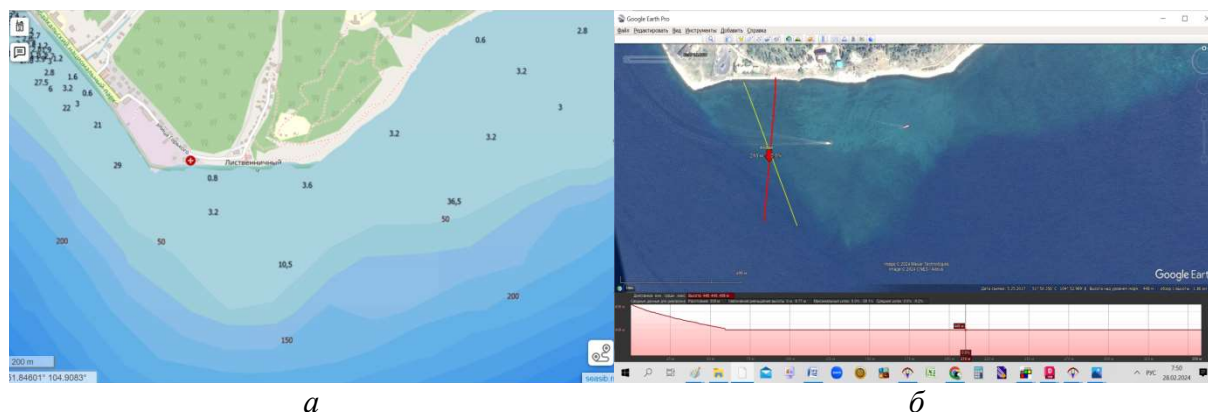


Рисунок 1. Карта глубин оз. Байкал, пос. Листвянка (а) и схема профилирования (б): красным – основной профиль для всех типов георадаров длиной 200-500 м, движение от берега, желтым – контрольный профиль длиной 320 м

Для оценки глубинности георадаров применены следующие способы:

1. По формуле (1) [1, 2 ф. (4.55) с. 170], при условии, что среда, в которой распространяется электромагнитная волна, однородна, изотухание в ней постоянно, а соотношение сигнал / шум на входе приемника равно 1:

$$H_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_{pd} G^2 \lambda^2 \sigma_u}{(4\pi)^3 P_{ш}}} e^{-0,115 \cdot \Gamma \cdot H_{max}}, \text{ м} \quad (1)$$

где $P_{pd} = (U_{pd})^2 / R_a$ – импульсная мощность, подводимая к передающей антенне, Вт;
 U_{pd} – амплитуда импульса возбуждения передающей антенны, В;
 R_a – сопротивление приемной и передающей антенн, Ом;
 G – коэффициент усиления приемной и передающей антенн;
 λ – длина волны, м;
 σ_u – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) – площадь отражения, м²;
 $P_{ш} = (U_{ш})^2 / R_a$ – мощность шумов на входе приемника, Вт;
 $U_{ш}$ – чувствительность, приведенная ко входу приемника, В
 Γ – затухание сигнала, дБ/км

Уравнение (1) трансцендентное, решается графически или итерационным подбором с любой требуемой точностью с помощью современных вычислительных средств.

2. По формуле (2) [3]:

$$H_{max} = 0,5 \frac{U_{np}}{\Gamma}, \text{ м} \quad (2)$$

где $U_{np} = 20 \lg (U_1 / U_2)$ – энергетический потенциал георадара, дБ;
 U_1 – пиковое напряжение передатчика, В;
 U_2 – чувствительность приемника, В;
 Γ – затухание сигнала, дБ/м;
0,5 – учет фактора, что зондирующий сигнал проходит двойной путь от приемника до отражающей границы и обратно

Ожидаемые оценочные глубины по формуле (2) должны были составить не менее:

1. Питон – 30м;
2. Грот, Лоза – 70м;
3. СФЕРА – 180м

Результаты

Данные с георадаров обрабатывались в ПО «MATRIX» [4]. Результаты обработки данных по основному профилю движения приведены на Рисунках 3-9.

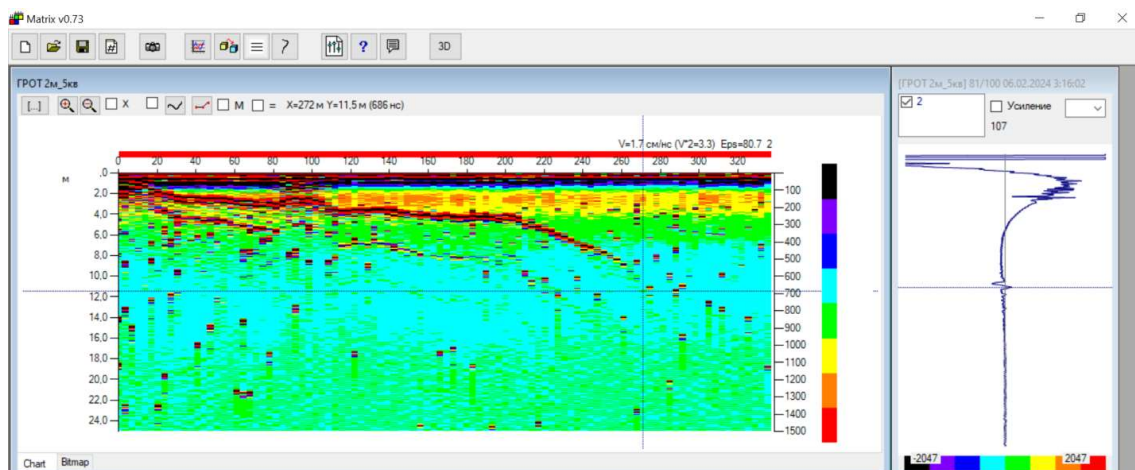


Рисунок 2. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар ГРОТ, антенны 2 м, передатчик 5 кВ

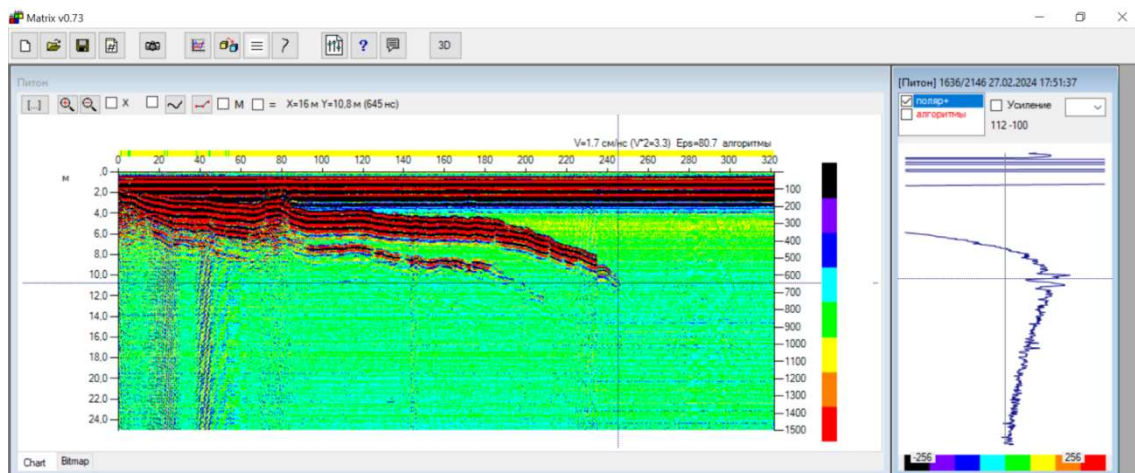


Рисунок 3. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар Питон, антенны 3 м, передатчик 0,6кВ

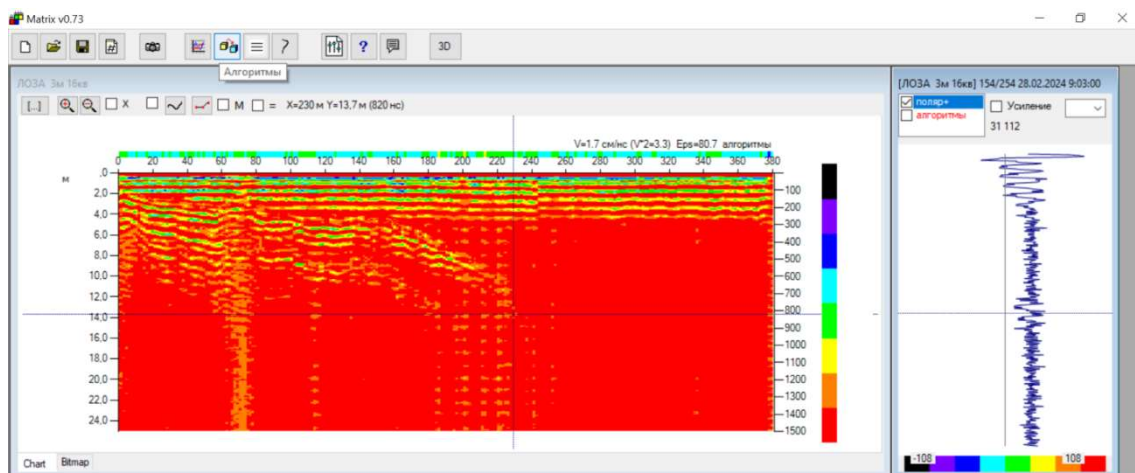


Рисунок 4. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар Лоза, антенны 3 м, передатчик 16кВ

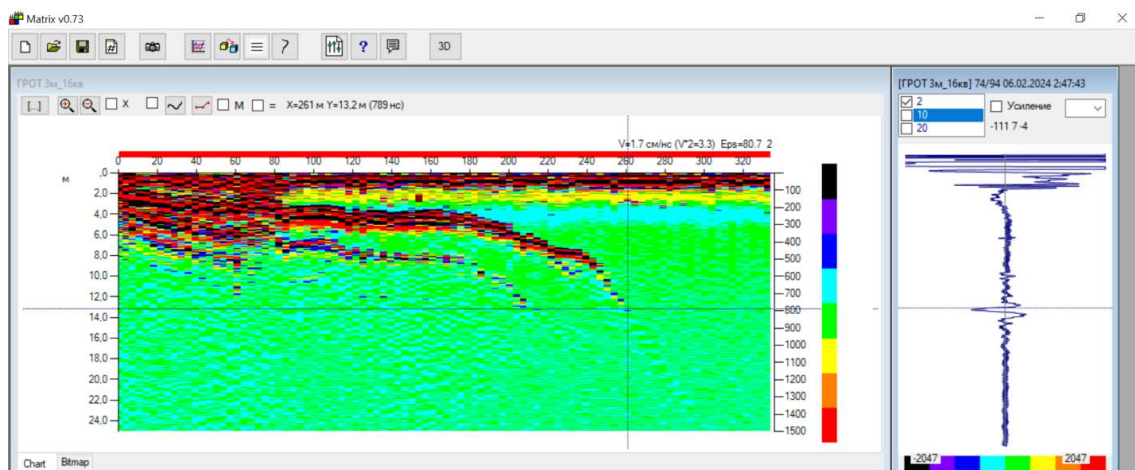


Рисунок 5. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар ГРОТ, антенны 3 м, передатчик 16кВ

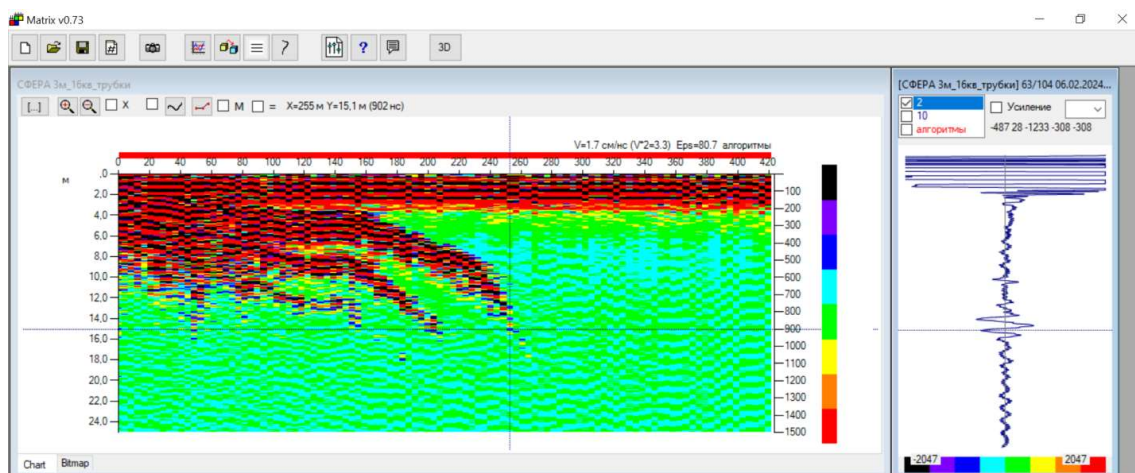


Рисунок 6. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар СФЕРА, антенны 3 м, передатчик 16кВ. [5]

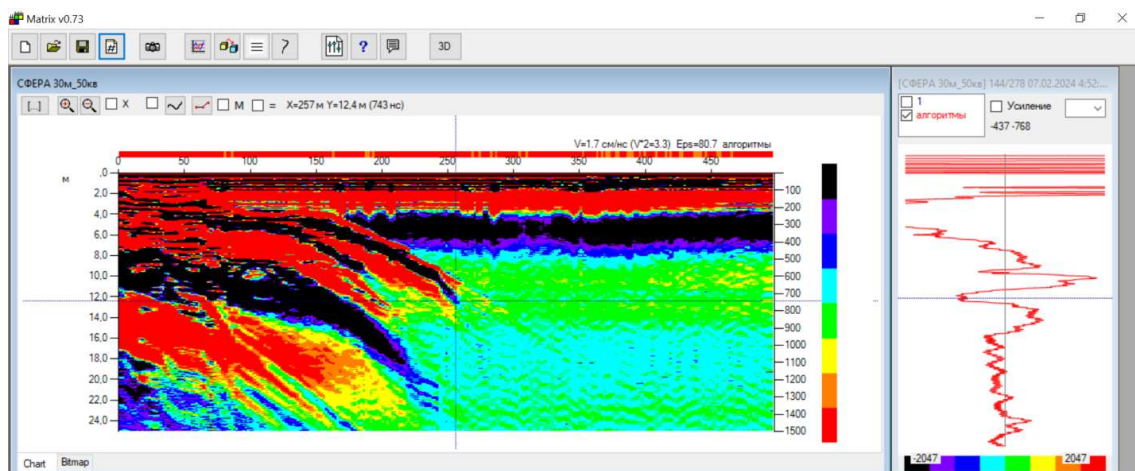


Рисунок 7. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар СФЕРА, антенны 30 м, передатчик 50кВ

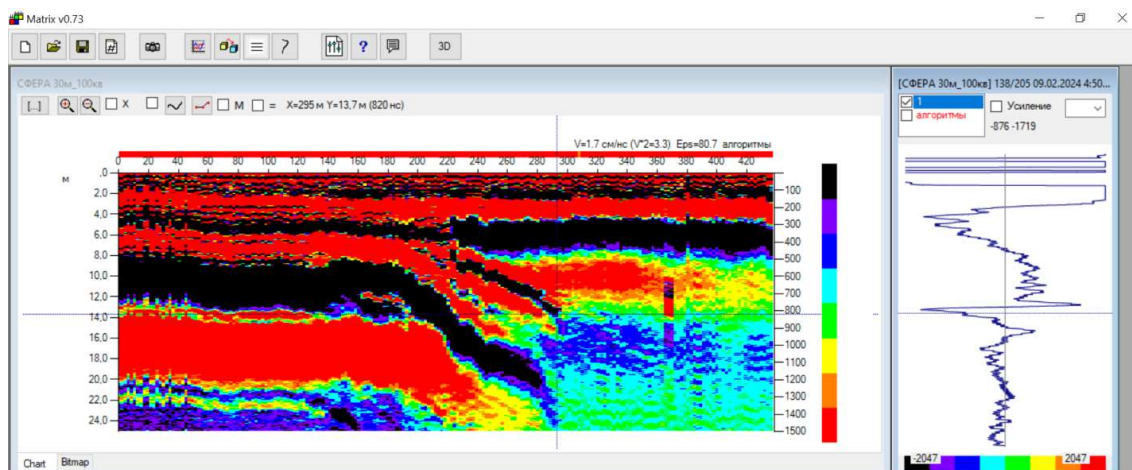


Рисунок 8. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар СФЕРА, антенны 30 м, передатчик 100кВ

При всех измерениях с разной длиной антенн и разной мощностью передатчика фактическая глубина в среднем составила 12-14 м, что намного меньше ожидаемых глубин, оцененных по формуле (2), даже при том, что пресная вода была слабо минерализована (Рисунок 9), т.е. фактически вода была с низким уровнем затухания ЭМ волн.



Рисунок 9. TDS метр Digital COM-100, минерализация воды, 1 ppm = 1 мг/л

Прохождение по контрольному профилю (Рисунки 10, 11) подтвердило данный результат. Сделан вывод, что в месте резкого падения границы дна малая площадь отражения сигнала, не позволяющая зарегистрировать отраженный сигнал.

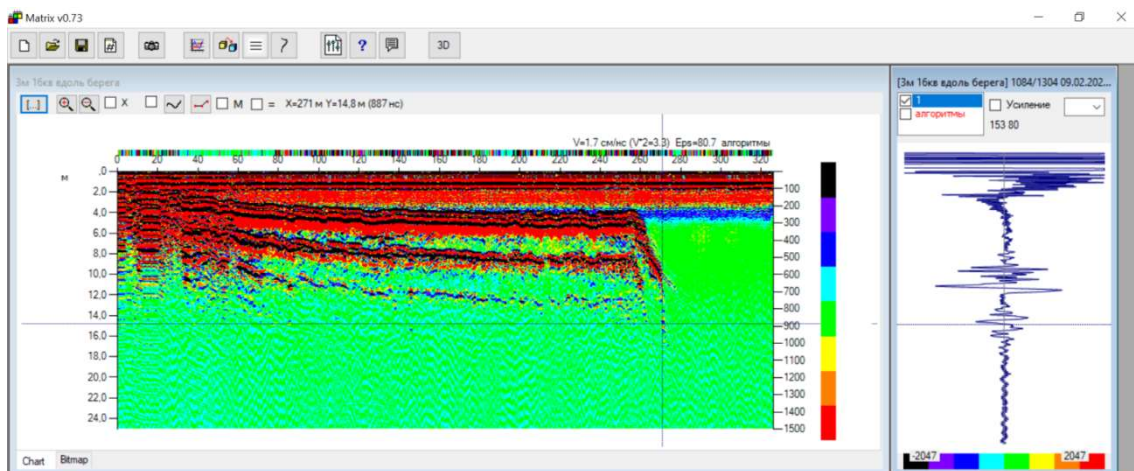


Рисунок 10. Радарограмма с функцией сигнала по контрольному профилю, георадар ГРОТ, антенны 3 м, передатчик 16кВ

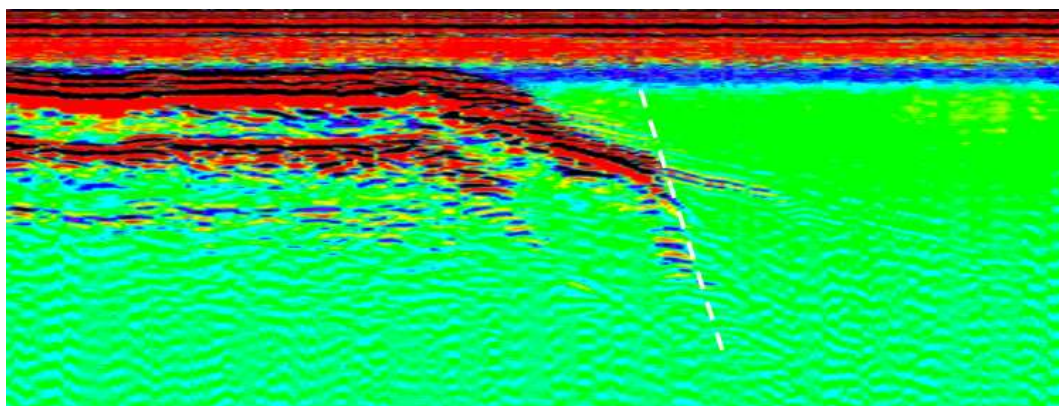


Рисунок 11. Радарограмма по контрольному профилю в увеличенном масштабе, георадар ГРОТ, антенны 3 м, передатчик 16кВ, угол падения границы дна 75°

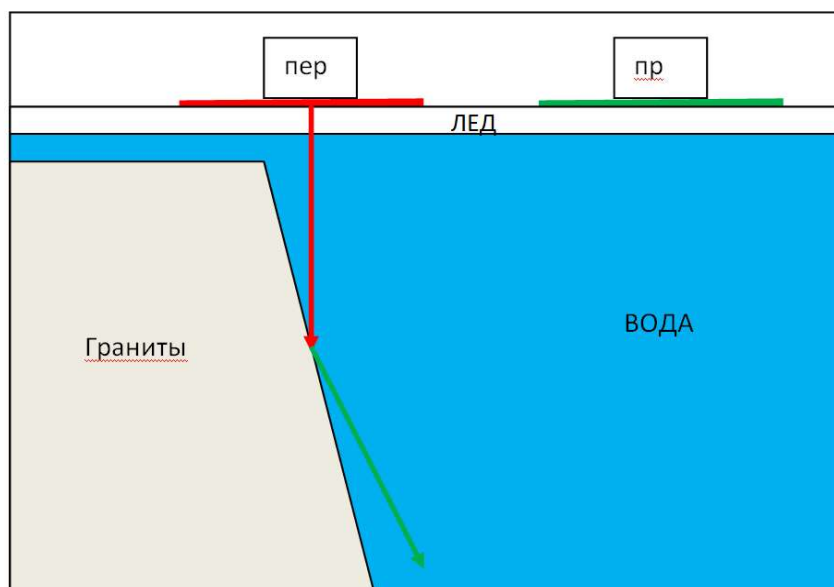


Рисунок 12. Модель радиолокационного зондирования круто падающего дна. Геометрия падения и отражения электромагнитной волны в лучевом векторном отображении

Выводы

При геометрической расстановке линия за линией, угол отражения сигнала от падающей стенки берега будет уходить в сторону, а не на приемную антенну.

При большом угле отражения эффективная площадь отражения она могла составить минимальную площадь, много менее 1 м^2 .

На глубину реальных измерений сильно влияет эффективная площадь обратного отражения. Если она стремится к нулю, глубина будет минимальной, если площадь увеличивается то и глубина увеличивается.

В реальных полупроводящих средах горных пород и грунтов такого эффекта наблюдаться не будет, так как ниже лежащие слои будут менять коэффициенты отражения и преломления и фронт падающей и отраженной волны будет условно плоским и будет использоваться максимальная площадь отражения.

Исключения могут составлять окварцованные или брекчированные субвертикальные контакты пластов и жил.

Библиография

1. Влияние излучаемой мощности на глубину зондирования в георадиолокации // Разведка и охрана недр. 2008. №1. Дудник А.В. Стр. 38-40.
2. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. М.: Сов. Радио, 1964. 731 с.
3. Глубинный георадар. Исследования геологической структуры подстилающей поверхности. Экспериментальные данные и численное моделирование. А.И. Беркут, В.В. Копейкин, П.А. Морозов и др. <https://www.geo-radar.ru/publish/pub8.php#1>
4. Горкин Д.С., Варенков В.В. Программа для ЭВМ: MATRIX. Номер регистрации (свидетельства): RU2023663673 от 27.06.2023.
5. Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. «Георадар для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности». Патент на полезную модель RU218691U1, зарегистрирован в Госреестре 06.06.2023 г.

Сравнение георадаров Питон, Тритон, Грот, Лоза, Сфера.

Горкин Д.С.* (ИЗМИРАН, ООО «ИНТЕРРАСКАН», gorkin@izmiran.ru)

Аннотация

В работе представлены результаты профилирования борта известкового карьера близ города Домодедово, Московской области, с использованием разных георадаров: Питон, Тритон Лоза, ГРОТ, СФЕРА. Целью исследований было измерение реального потенциала глубинности георадаров.

Ключевые слова

Георадар, Питон, Тритон, Лоза, ГРОТ, СФЕРА

Цель

Цель исследований: измерение реального потенциала глубинности георадаров. Исследования выполнялись В работе представлены результаты профилирования борта известкового карьера близ города Домодедово, Московской области, летом 2023 года (Рисунок 1). Для исследований использовались георадары Питон, Тритон, Лоза, ГРОТ, СФЕРА в комбинации с антеннами 3м-4м, передатчиками 600В, 16кВ, 48 кВ. Полевая съемка велась методом профилирования по геометрической расстановке приемника и передатчика линия за линией (Рисунок 1).

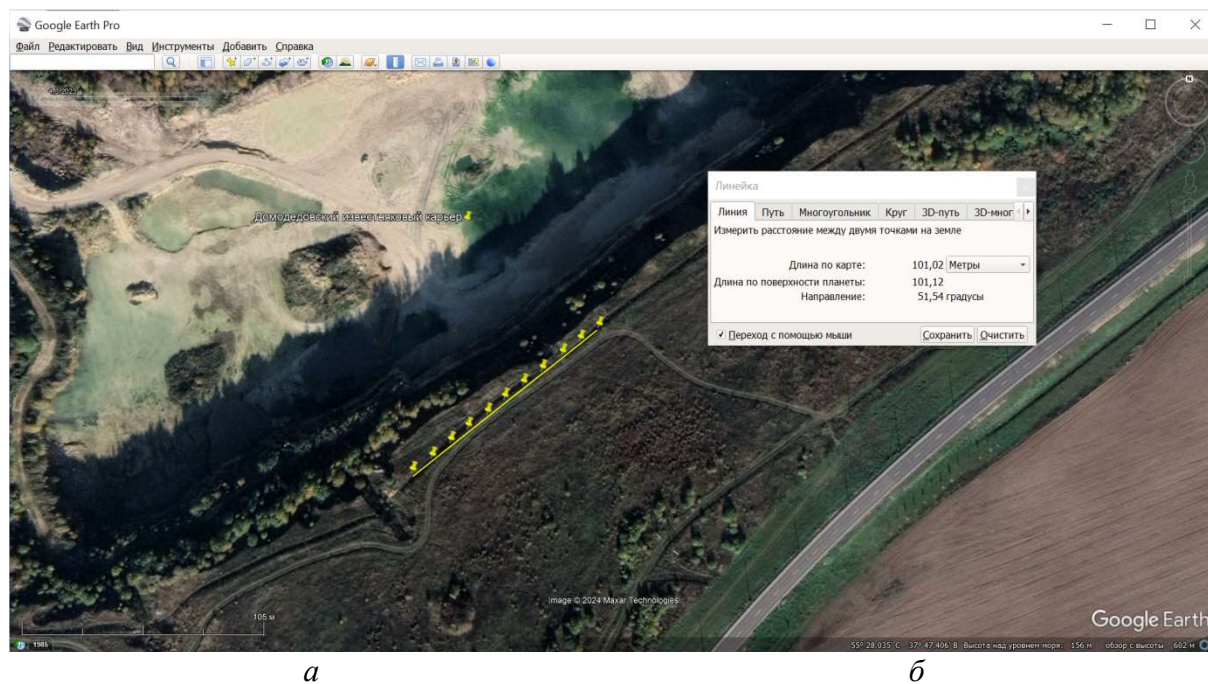


Рисунок 1. Карта схема. Профиль длина 100м.

Для оценки глубинности георадаров применены следующий способ

По формуле (1) [1]:

$$H_{\max} = 0,5 \frac{U_{np}}{\Gamma}, \text{ м(1)}$$

где $U_{np} = 20 \lg (U_1 / U_2)$ – энергетический потенциал георадара, дБ;

U_1 – пиковое напряжение передатчика, В;

U_2 – чувствительность приемника, В;

Γ – затухание сигнала, дБ/м;

0,5 – учет фактора, что зондирующий сигнал проходит двойной путь от приемника до отражающей границы и обратно

Ожидаемые оценочные глубины по формуле (1) при затухании 8дБ/м, должны были составить не менее:

Марка георадара	Длина антенн, м	Частота, МГц	U приемника, мкВ	U передатчика, В	Динамический диапазон расчетный, Дб	Ожидаемая глубина, м	Реальная глубина, м
Питон	4	38	100	600	135	8	7
Тритон	3	50	100	1200	141	9	7
Лоза В	3	50	100	16000	164	10	10
Грот 12	3	50	100	16000	164	10	13
Сфера [3]	3	50	100	48000	173	11	19

Результаты

Данные с георадаров обрабатывались в ПО «MATRIX» [2]. Результаты обработки данных по основному профилю движения приведены на Рисунках 2-6.

Оценка глубины производилась по полному затуханию функции сигнала.

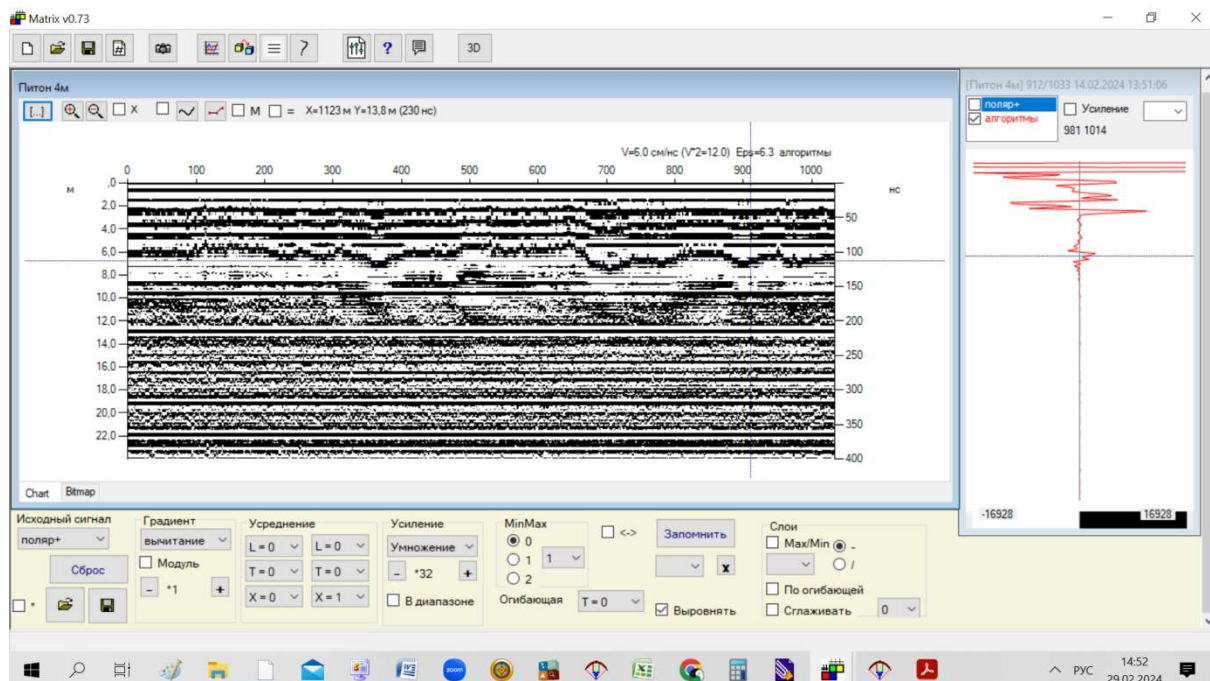


Рисунок 2. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар Питон, антенны 4 м, передатчик 600В

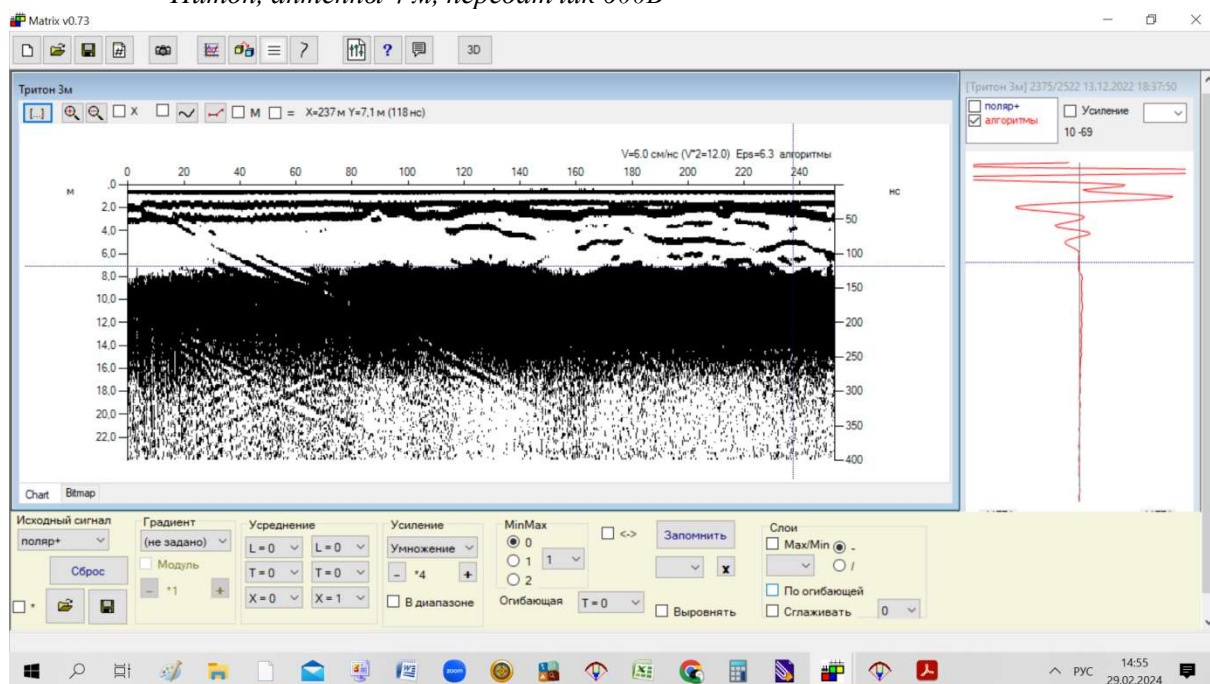


Рисунок 3. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар Тритон, антенны 3 м, передатчик 1200 В

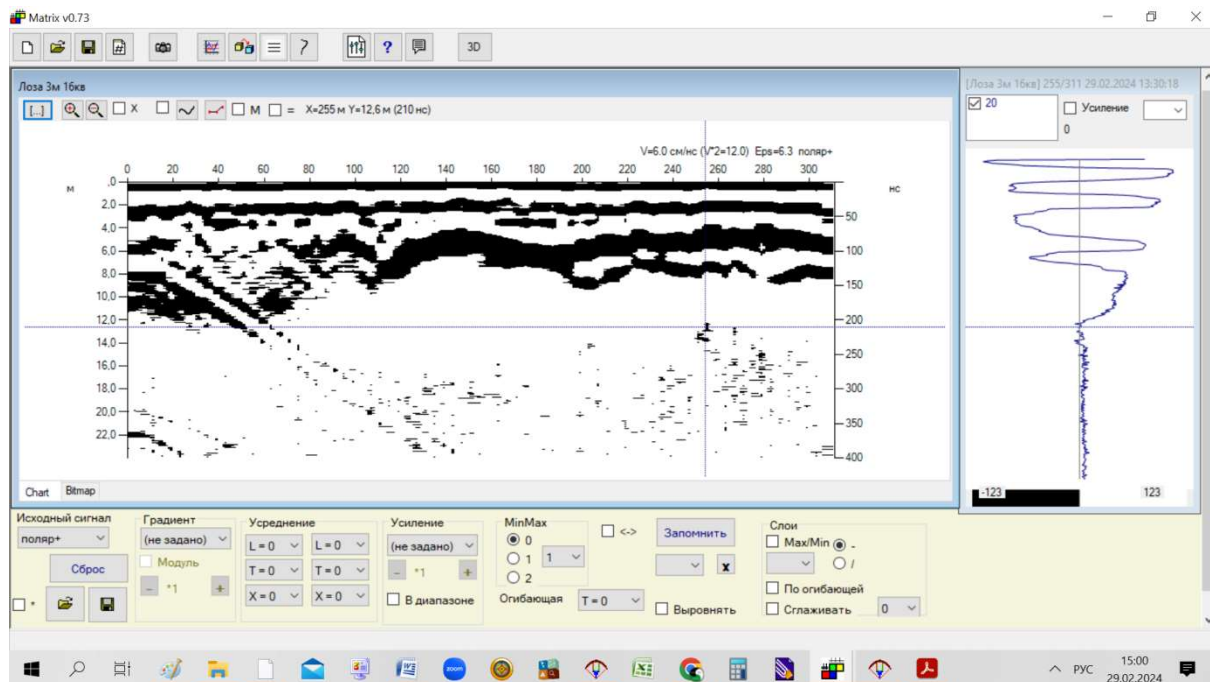


Рисунок 4. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар Лоза, антенны 3 м, передатчик 16кВ

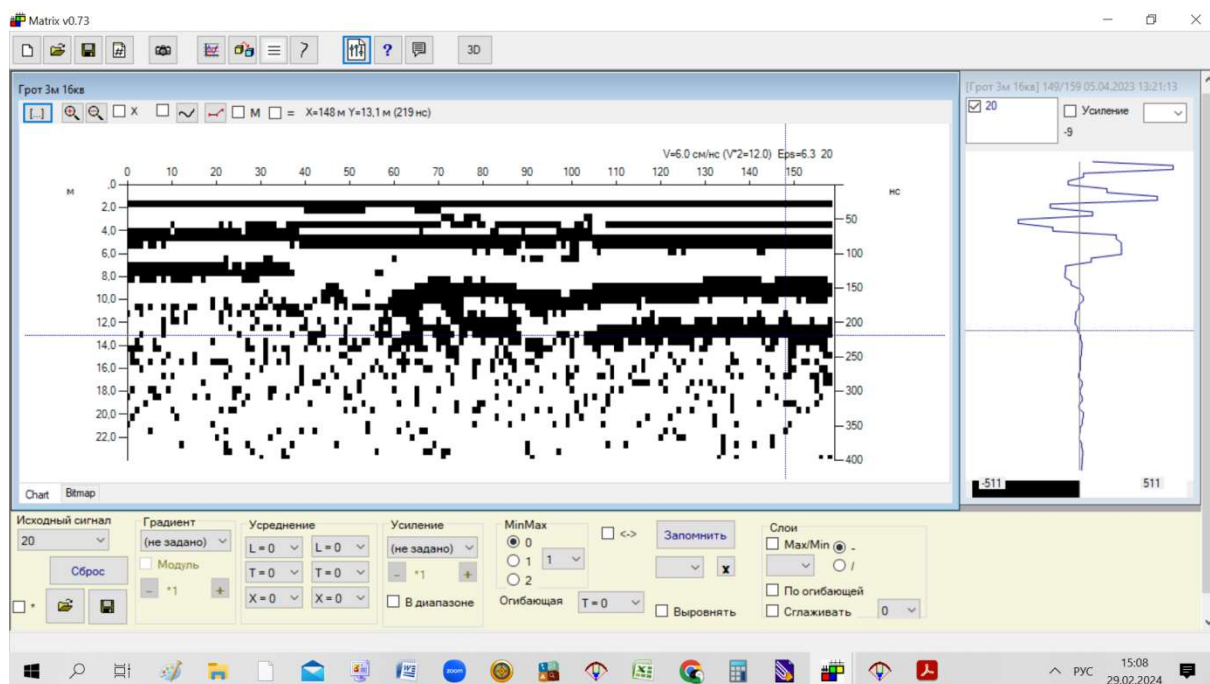


Рисунок 5. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар ГРОТ, антенны 3 м, передатчик 16кВ

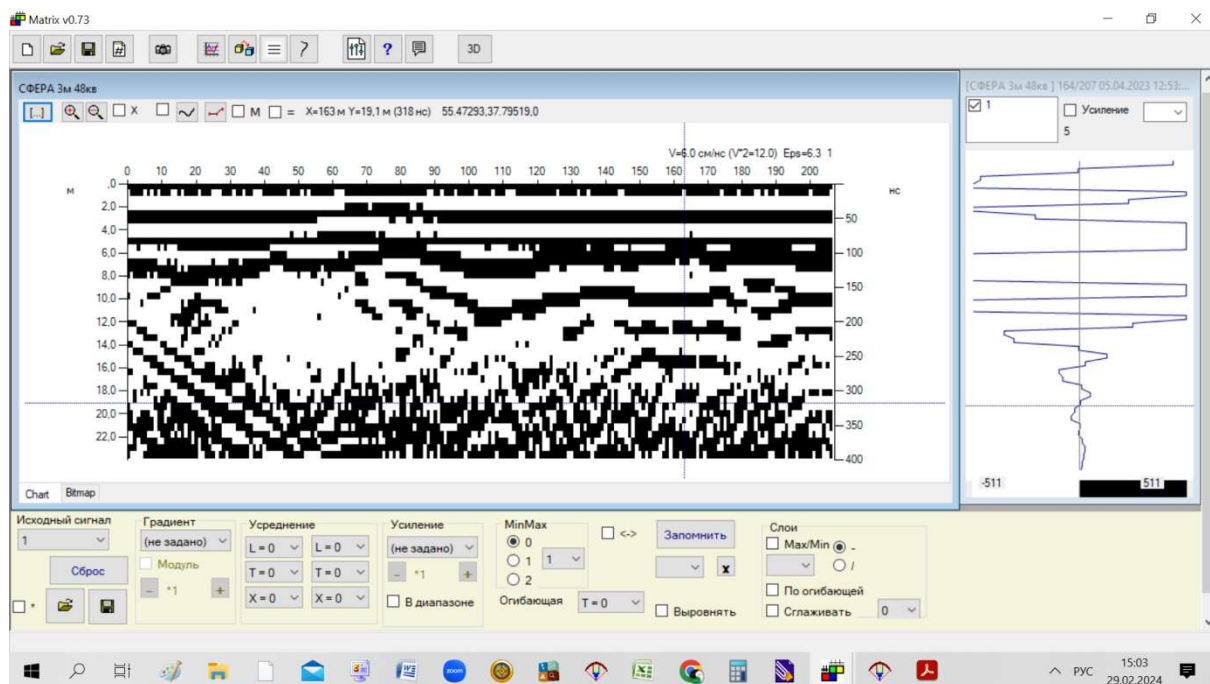


Рисунок 6. Радарограмма с функцией сигнала по основному профилю, георадар СФЕРА, антенны 3 м, передатчик 16кВ. [5]

Выводы

1. Расчетные глубины по динамическому диапазону георадаров имеют хорошую сходимость в 1.3 раза до 10 метров глубины и для напряжений передатчиков до 16кВ.
2. Расчет глубины по динамическому диапазону свыше 10 метров и напряжений передатчика свыше 16кВ имеет расхождение в 1.7 раза и не отображает реальной глубины. Вернее всего это связано с большой эффективной площадью отражения и следует вести расчет по классической формуле радиолокации. Где есть этот множитель.

Библиография

1. Глубинный георадар. Исследования геологической структуры подстилающей поверхности. Экспериментальные данные и численное моделирование. А.И. Беркут, В.В. Копейкин, П.А. Морозов и др. <https://www.geo-radar.ru/publish/pub8.php#1>
2. Горкин Д.С., Варенков В.В. Программа для ЭВМ: MATRIX. Номер регистрации (свидетельства): RU2023663673 от 27.06.2023.
3. Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. «Георадар для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности». Патент на полезную модель RU218691U1, зарегистрирован в Госреестре 06.06.2023 г.

*Едемский Д.Е. (ИЗМИРАН, deedemsky@gmail.com),
Тумской В.Е. (ИМЗ СО РАН, vtumskoy@gmail.com),
Прокопович И.В. * (ИЗМИРАН, prokop@izmiran.ru)*

Аннотация

Представлены результаты георадиолокационного изучения повторно-жильных льдов в высокольдистых отложениях ледового комплекса в низовьях реки Индигирки. Проведена площадная съемка участка на поверхности едомной возвышенности, после чего построена его 3D-модель. Интерпретация результатов георадиолокационного зондирования позволила установить пространственное положение повторно-жильных льдов и отложений. Показана возможность использования спектра волновых форм для интерпретации результатов.

Ключевые слова

Повторно-жильный лед; ледовый комплекс; спектральный анализ, Индигирка, георадар

Источники финансирования

Георадарные исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-12-00083, криолитологические и криостратиграфические исследования при поддержке гранта РНФ № 22-17-00176.

Введение

Значительная часть территории России расположена в криолитозоне, в пределах которой, особенно на Северо-Востоке, широко распространены отложения ледового комплекса (ЛК) с мощными повторно-жильными льдами. В настоящее время они образуют хорошо выраженные в рельефе едомные возвышенности с относительными высотами до 10-50 м. Ледяные жилы шириной 2-6 м формируют замкнутую решетку, в ячейках которой заключены грунтовые столбы поперечным размером 10-20 м (рис. 1б). С поверхности отложения грунтовых столбов и ледяные жилы перекрыты льдистой толщей так называемого покровного слоя мощностью 0,5-2 м. Далеко не везде можно установить без бурения, что расположено под покровным слоем в конкретном месте – ледяная жила или грунтовый столб.

Поэтому главной задачей георадиолокации было выяснение возможности установления границ между ледяными жилами и грунтовыми столбами с поверхности через покровный слой. Работы проводились на едомной возвышенности на берегу р. Берелех, левого притока р. Индигирки в ее нижнем течении (рис. 1а). Высота едомы здесь составляет около 20 м над рекой. На поверхности просматриваются незначительные понижения над ледяными жилами, что частично позволяло верифицировать результаты георадарных исследований.

При проведении полевых работ использовался георадар «Лоза-В» с антенными системами, центральная частота которых составляла 150 МГц.



Рисунок 1. а – район исследований (показан красной точкой); б – строение отложений ледового комплекса; в – процесс георадарной съемки, р. Бёрёлёх.

При георадиолокационных исследованиях съемка выполнялась профилями с шагом 0,1 м с привязкой к местности с помощью GPS-приемника. Аэрофотосъемка и дальнейшее построение ЦМР проводилась с использованием квадрокоптера DJI Mavic 3. Обработка георадарных данных включала усиление сигнала, применение полосовой фильтрации сигнала и функций усреднения, а также отображение результатов в виде функции амплитуды или производной волновой формы принятого сигнала. Учитывая, что спектр временной формы принятого сигнала представляет собой произведение спектра исходного зондирующего сигнала и частотной характеристики среды и отражающих объектов (Арманд и др., 2003) нами при анализе полевых данных был применен спектральный анализ результатов измерений. Для учета глубины залегания подошвы сезонно-талого слоя (СТС) проводилось ее измерение с помощью мерзлотного щупа.

Результаты

На предварительном этапе работ на поверхности едомной возвышенности был проложен ряд профилей, на которых использовались разные антенные системы 50, 150 и 250 МГц. В результате анализа полученных данных принято решение о применении антенной системы с центральной частотой 150 МГц и разверткой 512 нс как наиболее информативной. Мощность СТС на площадке составляет 0,5-0,6 м, скорость распространения сигнала $V=6,4-9,0$ см/нс, соответствующая диэлектрической проницаемости $\epsilon=11-22$. Усредненная скорость по разрезу в мерзлой толще принята $V=13$ см/нс.

На рис. 2а представлен георадарный разрез по профилю, пройденному с юга на север. На профиле, на отметке ~25 нс, четко прослеживается подошва СТС (1), показанная синим пунктиром. Хорошо читаются на георадарном разрезе отдельные зоны, отличающиеся между собой как по амплитуде, так и по характеру волновой текстуры отражений. Зоны (2) представляют собой области с высоким уровнем сигнала с отражениями от предполагаемых отдельных геологических границ, которые выделены на рисунке красными пунктирными линиями. Выделена зона (3) с низким уровнем сигнала, что может быть объяснено высоким затуханием сигнала в приповерхностных слоях за счет нарушения субгоризонтальной слоистости отложений и высокой влажности в пределах СТС (Schennen и др., 2016; Едемский и др., 2021;

Едемский и др., 2024). Ниже отметки 250 нс, в зоне (4), сигналы не регистрируются, что говорит об относительно однородной структуре и отсутствии высококонтрастных границ.

Белым пунктиром на рис. 2а выделена субгоризонтальная слоистость, которую можно интерпретировать как горизонт с иной структурой, чем вышележащие слои. Описанная структура разреза хорошо подтверждается на рис. 2б распределением основных спектральных составляющих сигнала в диапазоне частот 30-60 МГц для отражений с высоким уровнем сигнала, и на рис. 2в соответствующим распределением максимумов спектральных амплитуд.

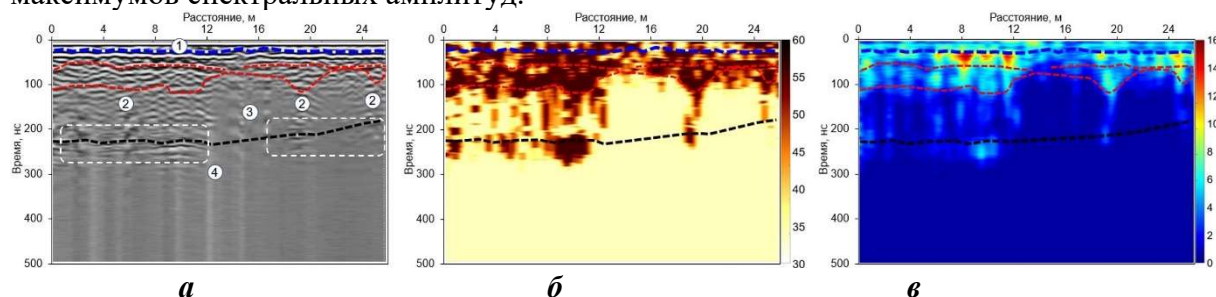


Рисунок 2. Профиль в направлении «север-юг»: а – исходная радарограмма; б – распределение основных частот спектра сигнала; в – распределение максимума спектральной амплитуды.

На рис. 3 представлены результаты 3D обработки георадарной площадной съемки в виде срезов на глубинах от 6,7 м до 9,6 м. Пунктирными линиями отмечены оси зон с максимальной (по модулю) амплитудой отраженного сигнала, которые мы интерпретируем как ледяные жилы. На разрезах можно выделить участки, на которых амплитуда сигнала относительно стабильна и незначительная по амплитуде (выделены штриховыми кружками). Эти однородные участки мы интерпретируем как грунтовые столбы. Данные структуры достаточно стабильны и без особых изменений наблюдаются в диапазоне задержек сигнала 60-200 нс. Ниже 200 нс интерпретация затруднена ввиду недостаточной амплитуды отраженного сигнала.

На горизонтальный срез 3D съемки (рис. 4б), схематически, в виде серых прямоугольников, нанесены зоны с субгоризонтальной слоистостью (рис. 2а, белый пунктирный контур), выделенные на каждом профиле. Можно предположить, что они отражают одну из границ в отложениях ледового комплекса, располагающуюся на глубине 14-16 м.

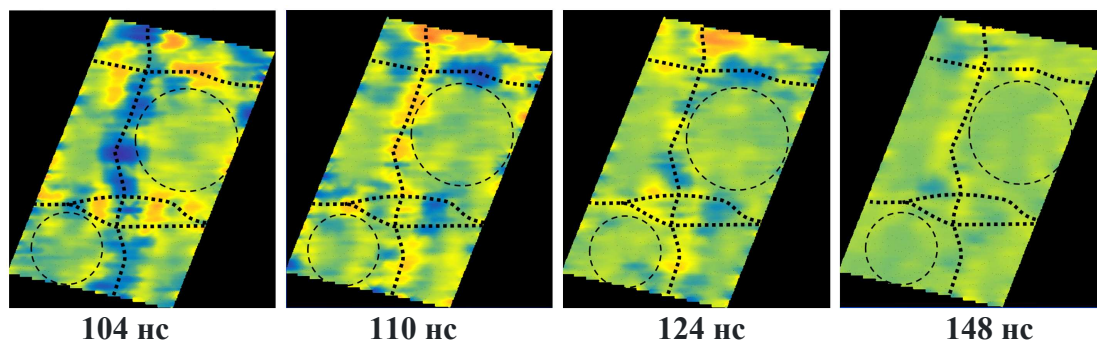


Рисунок 3. Рис. 3. Горизонтальные разрезы на глубинах от 6,7 м до 9,6 м.

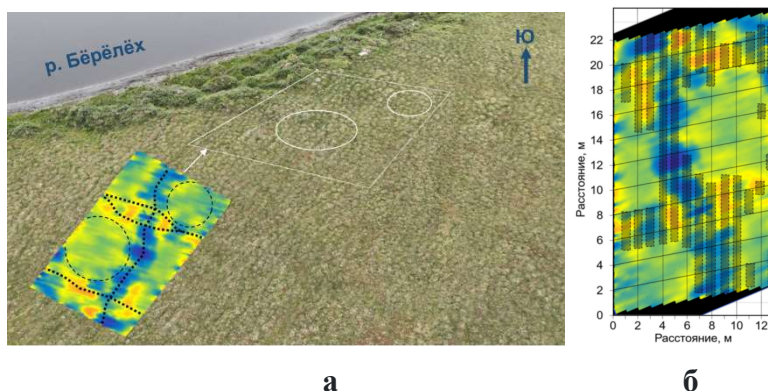


Рисунок 4. Профили 17_04(01-14): (а) – аэрофотоснимок со схемой расположения участка георадарной съемки; (б) – георадарный срез с отмеченными зонами слоистости.

Выводы

Приведенные результаты показывают, что георадар в сложных условиях вечной мерзлоты позволяет идентифицировать пространственные изменения структуры мерзлых толщ с подземными льдами на глубину до 20 м. Соответствующие отражения связаны с электроконтрастными областями, что определяется льдистостью отложений и ориентировкой границ раздела относительно трассы съемки. Показано, что стратегия получения и обработки 3D-изображений имеет решающее значение для надежной идентификации относительно глубоко залегающих структур, что невозможно при использовании обычного подхода 2D съемки, которая не позволяет выделять протяженные объекты, выходящие за пределы вертикальной плоскости.

Библиография

1. Арманд Н.А., Лукин Д.С., Чубинский Н.П. Современные проблемы подповерхностной радиолокации // Конспект лекций «Сверхширокополосные системы в радиолокации и связи». Муром, 2003. С. 92-107.
2. Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Прокопович И.В. Георадарное обследование арктических полигонально-жильных структур // Геология и геофизика. 2024. Online first. DOI: 10.15372/GIG2023186.
3. Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Овсяченко А.Н. Георадиолокационное зондирование отложений в пределах деградирующего полигонального микрорельефа в Арктике // Криосфера Земли Т. XXV № 5 С. 55-69. 2021. DOI: 10.15372/KZ20210506
4. Schennen S., Tronicke J., Wetterich S., Allroggen N., Schwamborn G., Schirrmeister L. 3D Ground-Penetrating Radar Imaging of Ice Complex Deposits in Northern East Siberia. Geophysics, 2016. V. 81. No. 1. P. WA195–WA202. DOI:10.1190/geo2015-0129.1

*Применение георадиолокации при выявлении зон
разрывных нарушений*

Едемский Д.Е. (ИЗМИРАН, deedemsky@gmail.com),
Прокопович И.В. (ИЗМИРАН, prokop@izmiran.ru)*

Аннотация

Приведены результаты георадарных исследований активных разломов, которые не были очевидны при поверхностном картировании, выполнена локализация линий разломов и условия их залегания. Профили с использованием комплекта антенн 50 МГц дали отличные результаты по фиксации зон деформации на глубинах до 45 м. В то же время, данные с использованием антенн 150 МГц обеспечили более подробный анализ неглубоких подповерхностных деформаций геологических структур и непосредственно разломов, включая стратиграфические структуры, угол наклона и направление плоскости разлома. Проанализирована применимость отдельных атрибутов для выявления линий и зон разломов как в арктическом регионе, так и в умеренных широтах.

Ключевые слова

Георадиолокация, георадар, тектонический разлом, сейсмические деформации.

Источники финансирования

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-12-00083.

Введение

Работа посвящена изучению активных разломов, методики выявления их положения и свойств. С активными разломами связан ряд природных процессов, таких, как деформации поверхности, землетрясения, извержения вулканов, а также обвальноподолзневые (не всегда сейсмогенные), просадочные (разного генезиса) и мерзлотно-термокарстовые явления, гидрогеологические изменения, аномальные эрозионно-абразионные и аккумулятивные проявления. В последние десятилетия метод георадиолокации используется и для картирования тектонических деформаций в молодых отложениях (Бричева и др., 2023; Лунина и др., 2016; Мак-Каплин, 2011; Овсяченко и др., 2022).

В работе мы рассмотрели и проанализировали возможность применения атрибутного анализа (Forte et al., 2012; Zhao et al., 2016), а также применение таких основных идентифицирующих признаков линий разрывов на георадарных разрезах: (i) разрывы осей синфазности с их смещением или изменением угла наклона по субвертикальным линиям разрыва; (ii) изменение мощности георадарных комплексов по мере приближения к линии разрыва; (iii) образование дифрагированных волн по линии разлома; (iv) формирование своеобразных локальных зон профиля с изменением волновой текстуры отражений по линии разрыва; (v) локализованное сильное затухание сигнала георадара из-за наличия проводящих сред в зоне основного разлома.

Результаты и обсуждение

В работе приведены отдельные результаты георадарной съемки при проведении геолого-геофизических исследований современных сейсмических и тектонических процессов в разных регионах страны, в разных геологических условиях и для решения различных задач. На рис. 1 приведен георадарный разрез, полученный у п. Териберка, Мурманская обл. Анализ волновой картины отражений показал наличие трех ярко выраженных георадарных комплексов (1)-(3), границы между которыми проведены по линиям изменения волновой текстуры и интенсивности сигналов от отражающих горизонтов. Георадарный комплекс (2) имеет характерный нерегулярный волновой характер отражений с наличием множественных локальных неоднородностей (разрушенный, крупнообломочный слой коренных пород). Георадарный комплекс (3) представлен песчано-гравийными отложениями и имеет субгоризонтальный волновой рисунок отражений. В георадарном комплексе (2) можно выделить характерные радиообразы отдельных локальных субвертикальных линий разрывов (*а*, *б*, *в*) в виде ряда гиперболических волн, затухающих по амплитуде с глубиной, формируя сигнал типа «реверберация». В георадарном комплексе (3), сложенном из рыхлых осадочных пород, можно наблюдать несколько другую картину отражений – нарушение субгоризонтальной стратификации в виде разрывов осей синфазности и характерного их изгиба вниз по линии сейсмотектонического разрыва (*г*).

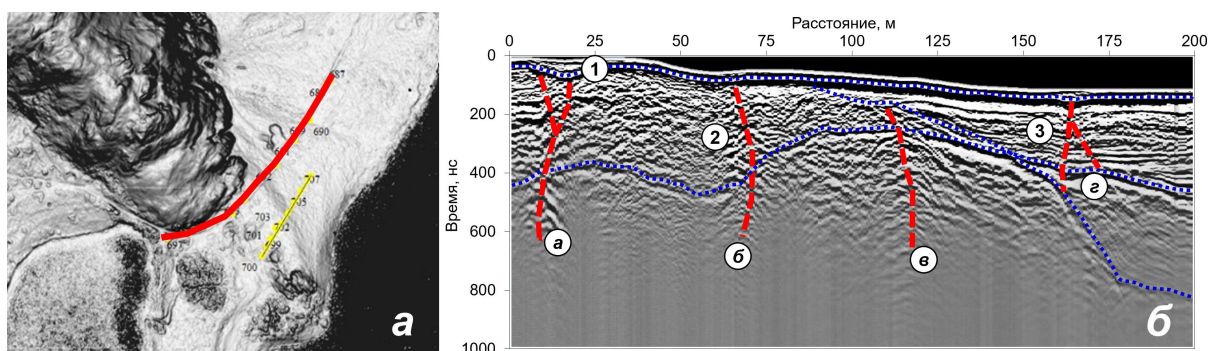


Рисунок 1. Георадарный профиль, п. Териберка, Мурманская обл.: *а* – положения георадарных профилей на цифровой модели рельефа местности; *б* – георадарный профиль; красная линия – георадарный профиль на цифровой модели; красная штриховая линия – линии разрыва (*а-г*); синяя штриховая линия – границы георадарных комплексов (1-3).

Тектонические разрывы (*а*), (*г*) хорошо фиксируются и по нарушениям в субгоризонтальных приповерхностных слоях (1), а в рельефе проявляются в виде соответствующих понижений. По характеру нарушений в приповерхностных слоях разреза к наиболее «молодым» можно отнести тектонический разрыв (*г*).

Сложными для локализации и идентификации являются линии разрывов в рыхлых отложениях. При отсутствии послойной стратификации в виде соответствующих линий синфазности сокращается возможный список признаков, по которым может быть выделена зона разрыва на георадарном профиле. В этом случае важным характерным признаком является изменение волновой текстуры отражений. На рис. 2а между вертикальными линиями разрывов находится зона (3) с характерной текстурой отражений в виде повторяющихся гиперболических волн, сформированных в результате сейсмотектонических подвижек. В данной зоне также происходит формирование осей

синфазности в вид вала, ограниченного сходящимися на глубине двумя взбросами (красная штриховая линия) и приподнимающего подошву рыхлого чехла (1), что соответствует процессу сжатия.

На грязевом вулкане Карabetова, рис. 2б, произошел горизонтальный сдвиг части поверхности вулкана с формированием вертикальной плоскости разрыва (смещения). Как показали результаты георадарной съемки для локализации линий разрыва (4) может быть использован атрибут изменения волновой текстуры отражений, которые на рис. 2в отмечены красной штриховой линией (4).

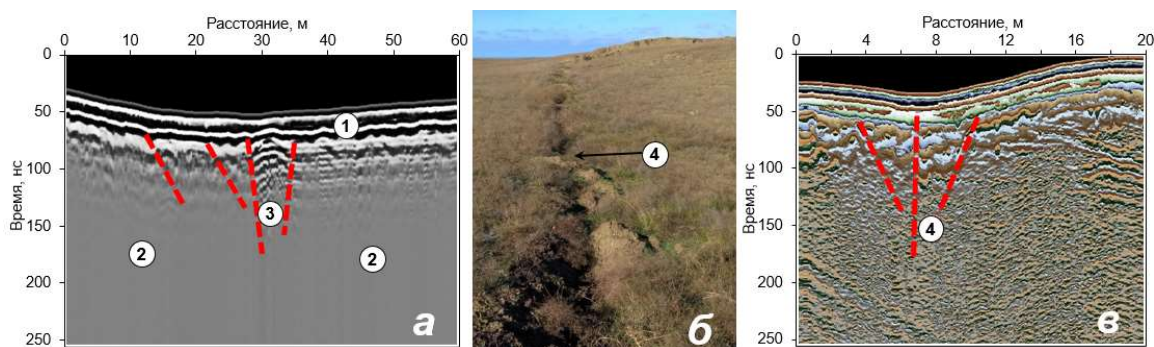


Рисунок 2. Разрывы в рыхлых отложениях: а – мыс Ефремов камень, Красноярский край; б – грязевой вулкан Карabetова, Краснодарский край; красная штриховая линия – линии разрыва (3-4); 1-2 – георадарные комплексы.

В большинстве случаев геологический разрез представляет собой многослойную структуру отложений, граница между которыми на георадарном профиле отображаются в виде осей синфазности – хороших маркеров границ геологических слоев, на основе анализа которых и нанесено большинство линий разрывов. На рис. 3а представлен георадарный профиль через морозобойные трещины в песчано-галечных отложениях, границы трещин определяются по изменению осей синфазности на стенках ледяных жил (Едемский и др., 2024). На рис. 3б по разрывам и смещениям осей синфазности однозначно фиксируются линии разрыва. При этом линии разрыва разделяют участки профиля с разной волновой текстурой отражения, что предполагает разные структурные и физические свойства вмещающей среды на данных участках (Овсюченко и др., 2023).

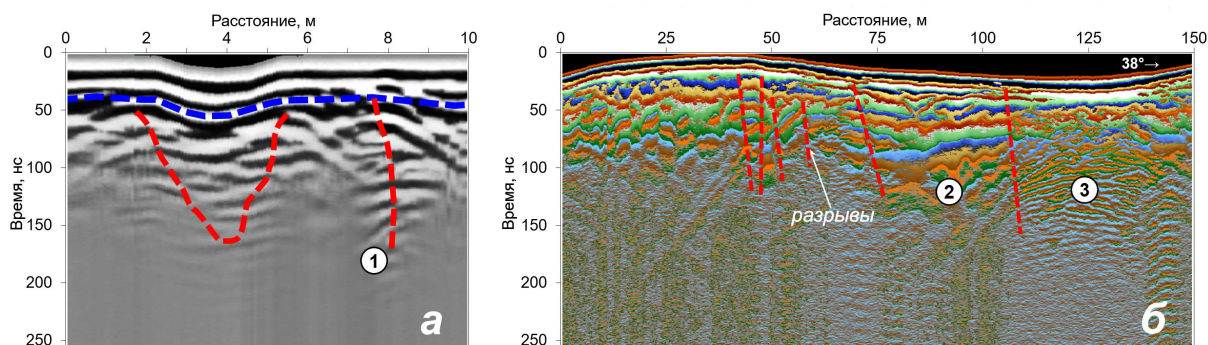


Рисунок 3. Разломы в мерзлых и коренных породах. а – о. Котельный, Новосибирские о-ва: красные штриховые линии – морозобойные трещины; синяя штриховые линии – граница сезонно-талого слоя; 1 – узкая морозобойная трещина; б – о. Земля Александры, Земля Франца-Иосифа; 2 – аллювиально-пролювиально-морские наносы, возможно, вулканогенно-осадочные породы мелового возраста; 3 – базальты мелового возраста.

Продemonстрирована возможность метода георадиолокации предоставлять подробную информацию о геологическом строении и геометрии разрыва в условиях, где ландшафтные проявления и геоморфологические маркеры не наблюдаемы. Георадарные профили облегчают идентификацию, картирование и сбор данных об области, затронутой слепыми тектоническими подвижками или иными геологическими процессами. Использование основных идентифицирующих признаков разломов, связанных с геометрией отложений и электромагнитными свойствами зондируемой среды, позволяет однозначно локализовать разломы при исследовании сейсмических и тектонических процессов.

Библиография

1. Бричева С.С., Деев Е.В., Дергач П.А., Зобнин Г.Ю. Геофизические исследования поверхностных разрывов палеоземлетрясений на восточном фланге Кубадринского разлома, Горный Алтай // Сборник материалов 19-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная Геофизика 2023», Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 года. – С. 303-307.
2. Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Прокопович И.В. Георадарное обследование арктических полигонально-жилых структур // Геология и геофизика, 2024. DOI 10.15372/GIG2023186.
3. Лунина О.В., Гладков А.С., Афонькин А.М., Серебряков Е.В. Стиль деформаций в зоне динамического влияния Мондинского разлома по данным георадиолокации (Тункинская впадина, юг Восточной Сибири) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 9. С. 1616-1633. DOI: 10.15372/GiG20160902.
4. Мак-Каплин Д.П. Палеосейсмология: М.: Научный мир, 2011, т.1. 560 с.
5. Овсяченко А.Н., Едемский Д.Е., Жостков Р.А. Активная неотектоника Восточной Арктики: новые данные геолого-геофизических исследований на мысе Фомы (запад острова Врангеля) // Геотектоника. 2022. № 3. С. 1-17 DOI: 10.31857/S0016853X22030055.
6. Овсяченко А.Н., Жостков Р.А., Прокопович И.В., Едемский Д.Е. Сейсмотектонические исследования о. Земля Александры и сейсмическая опасность архипелага Земля Франца-Иосифа // Сборник научных материалов II Лавёровские чтения. Арктика: актуальные проблемы и вызовы. Архангельск: ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН. 2023. С. 300-304.
7. Forte E., Pipan M., Casabianca D., Di Cuia R., Riva A. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes // Journal of Applied Geophysics. 2012. V. 81. P. 76-87, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.009.
8. Zhao W.K., Forte E., Dossi M., Pipan M. Integrated attribute analysis for improved GPR data interpretation // 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). Hong Kong, China. 2016, p. 1-5, DOI: 10.1109/ICGPR.2016.7572678.

*Оценка диаграммы направленности георадара в археологических
исследованиях на полуострове Крым*

** Лазарев М.А. (ИЗМИРАН, m.a.x.i.m.2000@mail.ru),
Боголюбов Л.А. (ИЗМИРАН, l.e.o.n.2002@mail.ru)
Морозов П.А. (ИЗМИРАН, ВНИИСМИ, pmoroz5@yandex.ru)*

Аннотация: В работе изложены результаты георадарного исследования антропогенных объектов на полуострове Крым: Павловского иудейского некрополя (южная часть города Керчь), и трассы античного водопровода (поселок Героевка). Интерпретация результатов подтвердила наличие этих объектов и ненарушающим способом уточнила ряд особенностей. Наряду с решением культурно-исторической задачи были получены экспериментальные результаты по определению диаграммы направленности георадара.

Ключевые слова: Глубинный георадар, электромагнитное зондирование, диаграмма направленности, античный водопровод, некрополь.

Поддержка и источники финансирования: Георадарные исследования выполнены в составе комплексной экспедиции Керченского отряда Института археологии РАН, Института археологии Крыма, Юго-Восточной археологической экспедиции Государственного Эрмитажа и ООО «Компания ВНИИСМИ» при поддержке гранта РНФ № 22-12-00083

Объекты исследования

- 1) Павловский иудейский некрополь. В южной части города Керчь в ходе археологической разведки были обнаружены 30 могильных камней с иудейской символикой – Павловский иудейский некрополь. Второй объект – вход в подземное помещение, вырубленное в скале известняка, расположен в северной части участка обследования. Задача состояла в получении ненарушающей информации об объектах.
- 2) Античный водопровод. В районе поселка Героевское на расстоянии около 2.5 км от Керчи существует древний колодец, видимый на космоснимках, его подземная часть хорошо сохранилась. Между колодцем и берегом моря выявлено еще несколько элементов водоснабжения античного города Нимфей. Задача геофизического обследования состояла в получении информации о существовании подземного водопровода между выявленными объектами.

Геофизические задачи: в рамках экспедиции были проделаны эксперименты по экспериментальному определению диаграммы направленности георадара:

- Определение диаграммы направленности георадара в верхней полусфере (воздухе) с помощью контрастного объекта. (линия электропередач).
- Определение диаграммы направленности с помощью известных подземных объектов.

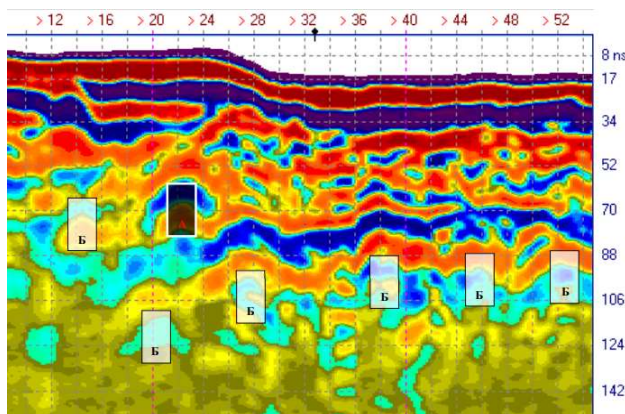
Оборудование: Георадиолокационное обследование выполнено комплектом импульсного георадара «Лоза-1В» с передатчиком 5 кВ (в импульсе) и антеннами с центральной частотой 200 МГц (длина антенн 1.0 метр), временная развертка при

проведении измерений 256 нс (глубинность ~ 3-5 метров) и 100 МГц (длина антенны 1.5 метра), временная развертка 256 нсек (глубинность ~ 8 - 10 метров).

Результаты культурно-исторического исследования

1) Павловский иудейский некрополь

В результате георадарного обследования получены георадарные разрезы с выделенными подземными аномалиями, которые могут быть интерпретированы как антропогенные подземные объекты (захоронения), имеющие отношение к структурам некрополя и представлять интерес для археологических исследований.



На георадарном разрезе по краю двух небольших карьеров уверенно регистрируется гипербола – радиообраз известного подземного объекта (склепа или скального захоронения). Далее легко выделяются, еще, шесть объектов, имеющих сходные радиообразы. Всего выделено восемь антропогенных объектов (захоронений), представляющих интерес для археологических исследований Павловского некрополя.

2) Античный водопровод

В результате георадарного обследования в 10 точках выявлены объекты, имеющие схожие характеристики (положение, размеров и глубину залегания), обладающие признаками радиообразов двух параллельных неметаллических труб, пересекаемых георадарным профилем. Эти объекты и пять элементов, вскрытых при оползнях и при прокладке газопровода, образуют линию, имеющую равномерный уклон в сторону моря, подтверждая предположения археологов о существовании самотечного водопровода к городищу Нимфей. Эта версия подкрепляется объективными геофизическими данными.

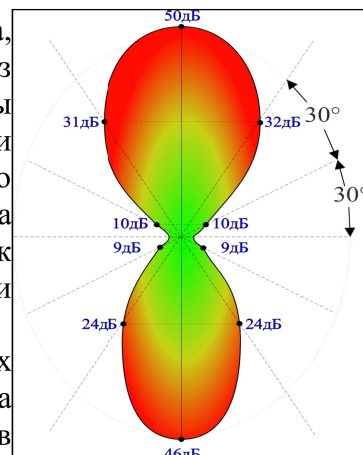
Результаты геофизических экспериментов

В результате экспериментов, на примере трех контрастных объектов были построены диаграммы направленности георадара.

1) Диаграмма излучения в верхнюю полуплоскость.



Антенны георадара Лоза-В размещаются в центре круга, размеченного на сектора по 30 градусов. В каждом из положений производится по 4 измерения, после чего, антенны радара поворачиваются на 30 градусов так чтобы центр ручки над центром круга, и делается еще 4 измерения. Объект, по которому выполняется оценка амплитуды рассеянного сигнала – провода 10 кВ ЛЭП на высоте 15 метров. Оператор, блок регистрации и кабель располагаются по оси антенн георадара и перемещаются по кругу синхронно с поворотом антенн.



В результате обмера отраженного сигнала (в реальных полевых условиях построена диаграммы направленности радара в верхней полусфере необходимая для понимания результатов измерений в городских условиях.

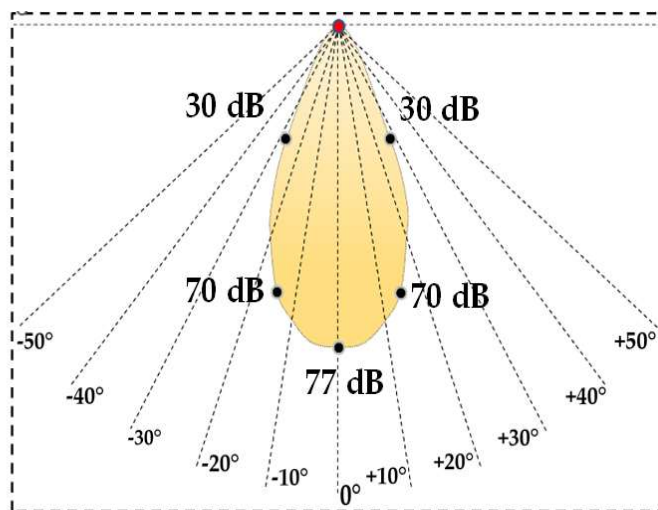
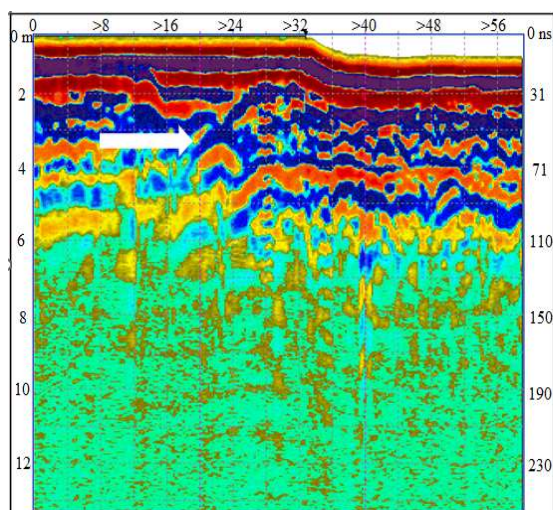
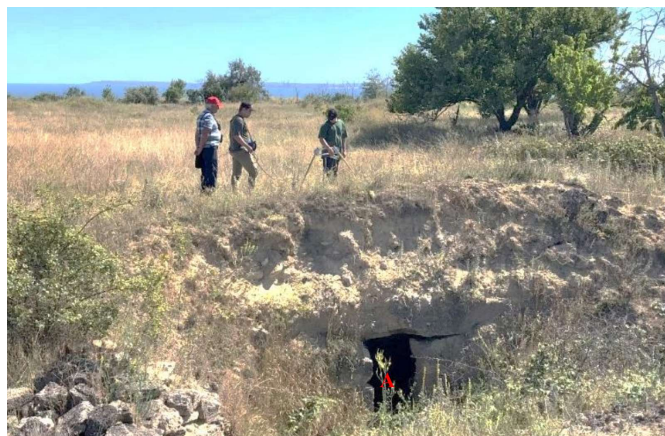
2) Открытый склеп на территории Павловского иудейского некрополя.

Данный склеп, открытый ранее грабителями, не представляет археологической ценности. Он подходил в качестве эталонного объекта для проведения эксперимента с контрастным подповерхностным объектом.

На представленной радиограмм по вертикальной оси указано время (нс, правая шкала), которое переводится в глубину, зная скорость

распространения сигнала $V = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon}} \approx 5 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ (левая шкала). Для

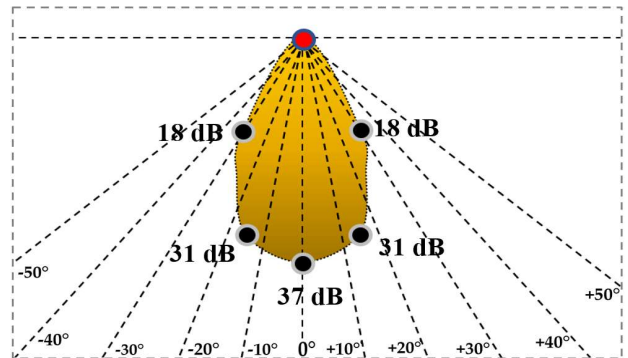
интерпретации этой радиограммы использовалась известная глубина склепа $\approx 3.5 \text{ м}$. Диаграмма направленности, построенная на основе полученных экспериментальных результатов, также представлена ниже.



3) Керамические трубы античного водопровода

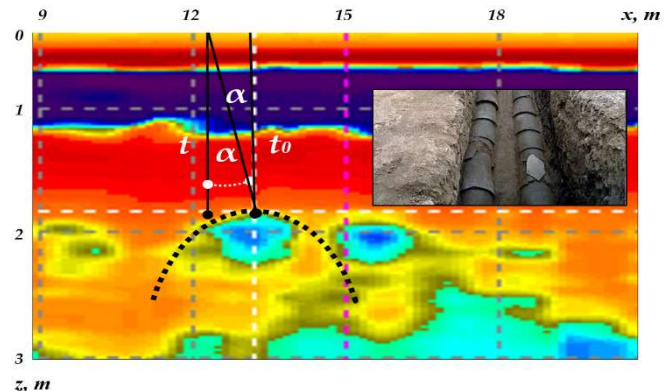
Данный объект расположен вблизи города Героевка. Керамические трубы также являются хорошим контрастным объектом. Методика данного эксперимента схожа с предыдущим. Двигаясь вдоль объекта по поверхности, мы увеличиваем расстояние по закону $\sqrt{h^2 + x^2} = \frac{h}{\cos \alpha}$. Амплитуду отраженного сигнала можно получить из радиограммы, представленной, вместе с диаграммой

направленности, учитывая временную задержку $t = \frac{t_0}{\cos \alpha}$, где $t_0 = \frac{2h}{c} \sqrt{\epsilon_r}$. Таким образом определяется диаграмма направленности георадара.



Выводы

- Георадарное зондирование позволило ненарушающим образом получить информацию об объектах, имеющих культурно-историческую ценность.
- Были получены экспериментальные результаты, которые позволили построить диаграмму направленности георадара. Для этого были использованы два подземных и один надземный контрастные объекты.
- Полученные оценки диаграммы направленности имеют практическое значение при планировании схемы профилей георадарного обследования в случае, когда необходимо работать в условиях неустраняемых посторонних источников воздушных и подповерхностных отражений.



Библиография

- Morozov P., Morozov F., Lazarev M. Bogolyubov L, Popov A. Characterization of antenna radiation pattern and penetration depth in ground penetrating radar field missions // Remote Sensing, 2023, V. 15, N 23 P. 5452. <http://dx.doi.org/10.3390/rs15235452>
- Berkut, A.I.; Edemsky, D.E.; Kopeikin, V.V.; Morozov, P.A.; Prokopovich, I.V.; Popov, A.V. Deep penetration subsurface radar : Hardware, results, interpretation. In Proceedings of the 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2017), pp. 1–6, Edinburgh, UK, 2017.

Георадарное обследование Патомского кратера

Морозов Ф.П. (ООО Компания ВНИИСМИ, fmorozov92@mail.ru),
Морозов П.А. (ИЗМИРАН, pmoroz5@yandex.ru),
Попов А.В. (ИЗМИРАН, popov@izmiran.ru)*

Аннотация

Обсуждаются результаты георадарного обследования Патомского кратера – уникального геологического объекта в Иркутской области, проведенного в рамках экспедиции, организованной Русским географическим обществом, газетой «Комсомольская правда» и телеканалом «Россия1». Использование мощного георадара «Лоза-Н» позволило прояснить структуру кратера до глубин порядка 150-200 м и дало объективный материал для выбора между обсуждающимися гипотезами о его происхождении.

Ключевые слова

Глубинный георадар, импульсное электромагнитное зондирование, обратная задача, происхождение кратера.

Источники финансирования

Георадарные исследования выполнены ООО «Компания ВНИИСМИ» и АО «ЗДК Лензолото» при поддержке гранта РНФ № 22-12-00083 «Глубинный георадар: теория, методы, эксперимент».

Введение

Представленный экспериментальный материал получен в рамках экспедиции, организованной Русским географическим обществом, газетой «Комсомольская правда» и телеканалом «Россия1» в конце лета 2022 года. Объектом исследования стал Патомский кратер – необычное геологическое образование в сибирской тайге, открытое в 1949 году в Бодайбинском районе Иркутской области [1]. Этот редкий объект (каменное кольцо диаметром 80 метров с центральным конусом, сложенным из крупных обломков известняка) [2] привлекал внимание исследователей в связи с различными экзотическими гипотезами его происхождения. Наши глубинные разрезы, выполненные низкочастотным георадаром повышенной мощности [3], оставляют выбор между вулканической и метеоритной моделью происхождения кратера.



Рисунок 1. *Общий вид Патомского кратера.*

Оборудование и методы

Принцип действия георадара основан на излучении в подстилающую среду сверхширокополосного электромагнитного импульса и регистрации его отражения от границ раздела геологических слоев или подповерхностных электрически контрастных объектов. Нами использовался глубинный георадар «Лоза-Н» с 6-метровыми антеннами (центральная частота 25 МГц) и двадцатикивольтным импульсным передатчиком.

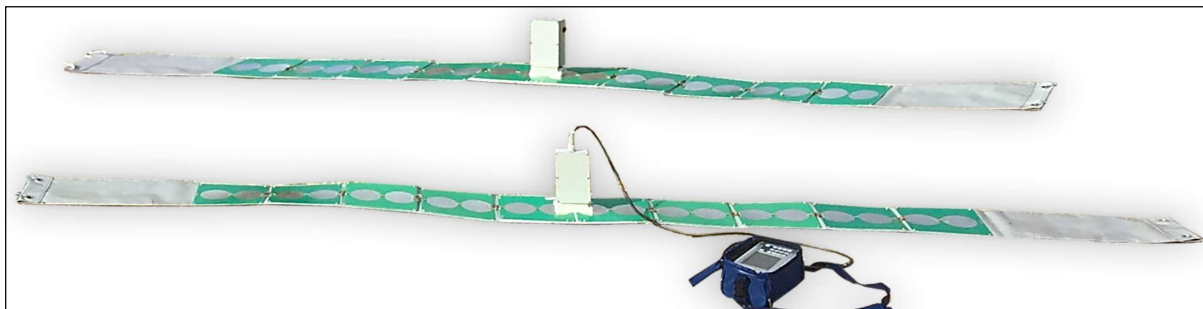


Рисунок 2. Георадар «Лоза-Н» (передающая и приемная антенна с блоком регистрации).

Этот прибор, выпускаемый ООО «Компания ВНИИСМИ», был выбран, учитывая его высокий энергетический потенциал, необходимый для подповерхностного зондирования на сотни метров, и проверенные эксплуатационные характеристики. Обработка результатов выполнялась с использованием программного обеспечения «Крот – 2033». Временная развертка 4096 наносекунд покрывала диапазон глубин порядка 200-250 м.

Результаты

Георадарные работы проводились методом горизонтального профилирования по предварительно намеченным профилям на поверхности кратера. На Рис. 3 показаны пять диаметральных сечений и полукруг, выполненный вдоль гребня внешнего кольца кратера. Для получения геологического разреза георадар с приемопередающими антеннами перемещался вдоль намеченных траекторий с шагом 50 см и остановкой в каждой точке. Определение расстояния проводилось методами инструментальной привязки.

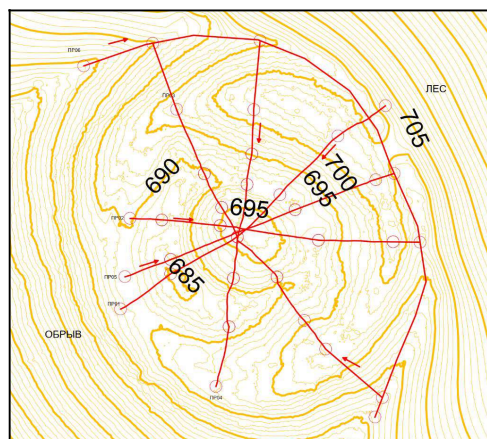


Рисунок 3. Траектории горизонтального профилирования

Георадарный В-скан (Рис. 4б), выполненный вдоль внешнего кольца кратера (Рис. 4а), отражает геологическую структуру за пределами конуса кратера. Горизонт 0 – 60 м представлен известняками однородного ненарушенного строения. Глубже отмечаются ненарушенные породы, заметно отличающиеся от вышележащего горизонта. Основной результат анализа – отсутствие вертикальных аномальных структур за пределами кратера.

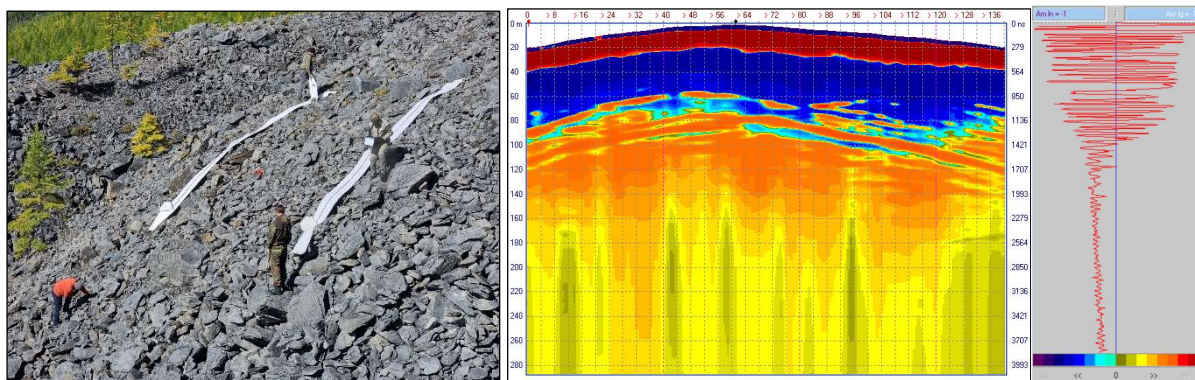


Рисунок 4. Георадарное зондирование по периметру кратера. Процесс работы (а); глубинная радарограмма, В-скан (б); цветная шкала амплитуд (в).

Здесь использована палитра с «теплыми» цветами для сигналов положительной поляризации и «холодными» для отрицательной поляризации, свидетельствующими о свойствах среды распространения. Холодные оттенки интерпретируются как зоны с высокой диэлектрической проницаемостью, обусловленной влагонасыщением.

Более интересная картина возникает на диаметральных сечениях Патомского объекта – см, например, СЗ-ЮВ разрез №3, представленный на Рис. 5.

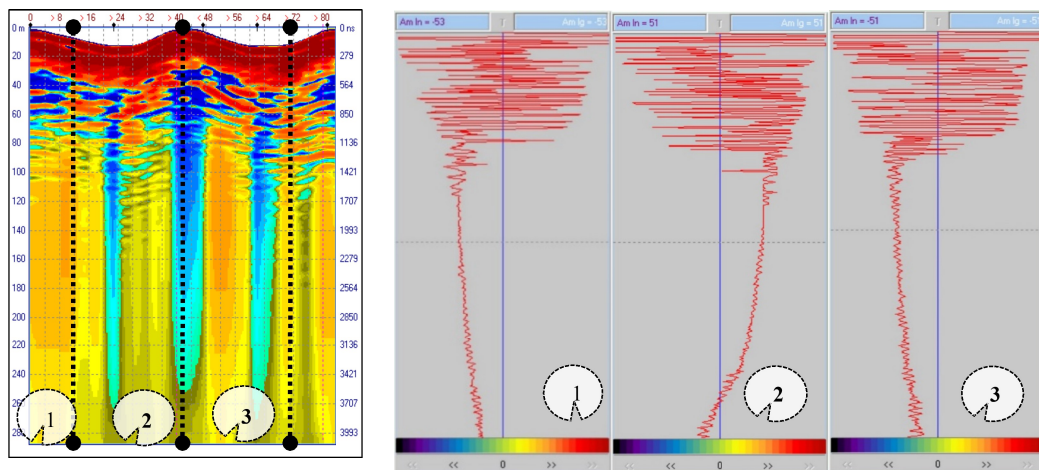


Рисунок 5. Георадарный В-скан №3 и три избранных А-скана в центре (2) и на периферии кратера (1,3).

Наиболее заметная аномальная структура вертикального развития зафиксирована на центральном холме кратера. Обращает на себя внимание различная поляриность монотонных «хвостов» отраженного сигнала в центральном сечении (2) и на периферии

кратера (1 и 3). Для волновых форм (1,3) отраженного сигнала над массивом скальных пород характерно отклонение амплитуды в область отрицательных значений, свидетельствующее о низких значениях диэлектрической проницаемости [3]. Волновая форма (2) фиксирует отклонение амплитуды сигнала в область положительных значений, характерное для сред с высокими значениями диэлектрической проницаемости и проводимости, связанными с поступлением влаги в канал, возникший в результате вулканических процессов или локального ударного воздействия.

Рисунок 6. Решение модельной обратной задачи [4] – диэлектрическая проницаемость грунта вдоль оси (A38) и на периферии канала (A21 и A48).

Выводы

– Георадарное зондирование прояснило структуру Патомскрго кратера до глубин порядка 150-200 м;

– Плавное изменение диэлектрической проницаемости с глубиной делает маловероятной гипотезу [5] о нахождении в скважине некоего инородного тела;

– Весьма вероятным представляется вулканическое происхождение кратера;

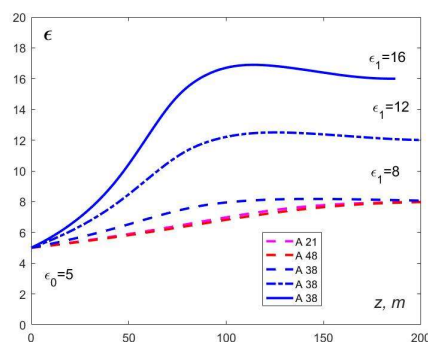
– Однако характерная форма поверхности кратера, состоящей из кольцевой структуры, с насыпным конусом, кольцевым рвом и центральной горкой, может свидетельствовать о том, что кратер возник из-за ударного воздействия метеорита («астроблема» [6]) с последующим морозным пучением.

Объективные данные, полученные в ходе экспедиции, могут стимулировать дальнейшие геофизические исследования Патомскрго кратера.

Авторы благодарят В.Д. Суляндикова и Е.Г. Мальченко за помощь в организации экспедиции и интерпретации результатов измерений.

Библиография

1. Колпаков В.В. Загадочный кратер в Патомском нагорье // Природа. 1951. № 1-2. С. 58-61.
2. Антипин В.С., Федоров А.М. Происхождение Патомского кратера (Восточная Сибирь) по геолого-геохимическим данным // Доклады Академии наук, 2008. Т. 423. № 3. С. 361-366.
3. Berkut, A.I.; Edemsky, D.E.; Kopeikin, V.V.; Morozov, P.A.; Prokopovich, I.V.; Popov, A.V. Deep penetration subsurface radar: Hardware, results, interpretation. In Proceedings of the 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2017), pp. 1-6, Edinburgh, UK, 2017,
4. Morozov P., Morozov F., Lazarev M. Bogolyubov L., Popov A. Characterization of antenna radiation pattern and penetration depth in ground penetrating radar field missions // Remote Sensing, 2023, V. 15, N 23 P. 5452. <http://dx.doi.org/10.3390/rs15235452>.
5. Портнов А.М. Кратер на Патомском нагорье // Природа, 1962. №11. С. 102-103.
6. Фельдман В.И. Астроблемы – звездные раны Земли. Соросовский Образовательный Журнал, № 9, 1999.



	Список участников конференции, (*) докладчик	Организация
1	Аверин Александр Анатольевич	* ИЗМИРАН
2	Антипов Вадим Валерьевич	* ИНТЕРРАСКАН, ИЗМИРАН
3	Ахмад Али	МТУСИ
4	Барков Евгений Викторович	* ИЗМИРАН
5	Беркут Андрей Ильич	Компания ВНИИСМИ
6	Богати Сергей Роландович	* МТУСИ
7	Боголюбов Леонид Анатольевич	МГТУ им. Баумана
8	Боярина Екатерина Денисовна	* МФТИ
9	Бычков Георгий Васильевич	* ИНТЕРРАСКАН
10	Варенков Владимир Викторович	* ИЗМИРАН
11	Волошин Андрей Юрьевич	* ИМАШ РАН
12	Горкин Дмитрий Сергеевич	* ИЗМИРАН
13	Дружин Геннадий Иванович	ИКИР ДВО РАН
14	Дуйсиналиев Нурбулат Амангельдиевич	ИНТЕРРАСКАН
15	Едемский Дмитрий Евгеньевич	* ИЗМИРАН
16	Журавлев Андрей Викторович	МГТУ им. Баумана
17	Зильберштейн Арпине Романовна	МФТИ
18	Ивашов Сергей Иванович	* МГТУ им. Н.Э. Баумана
19	Капустина Ольга Васильевна	* ИЗМИРАН
20	Клименко Максим Владимирович	КФ ИЗМИРАН
21	Колесник Сергей Анатольевич	* Томский госуниверситет
22	Королева Ксения Дмитриевна	* АО «НПК «НИИДАР»,
23	Корсукова Валерия Сергеевна	ИЗМИРАН
24	Крашенинников Игорь Васильевич	ИЗМИРАН
25	Лазарев Максим Александрович	* МИЭМ НИУ ВШЭ
26	Лундин Борис Викторович	* ИЗМИРАН
27	Маханов Канат Мэтович	* ЕНУ имени Л.Н. Гумилева
28	Митин Олег Вячеславович	* МиКМ ЮУрГУ, ИЗМИРАН
29	Морозов Павел Анатольевич	* Компания ВНИИСМИ
30	Морозов Федор Павлович	* Компания ВНИИСМИ
31	Нгуен Ван Кыонг	* МТУСИ
32	Николаев Алексей Владимирович	МТУСИ, ИМАШ РАН
33	Носиков Игорь Анатольевич	* КФ ИЗМИРАН
34	Носикова Вера Вячеславовна	КФ ИЗМИРАН
35	Падохин Артем Михайлович	КФ ИЗМИРАН
36	Пикалов Максим Вячеславович	Томский госуниверситет
37	Попов Алексей Владимирович	ИЗМИРАН
38	Прокопович Игорь Валерьевич	* ИЗМИРАН
53	Прохоркин Александр Геннадиевич	Академия им. М. В. Фрунзе
39	Разевиг Владимир Всеволодович	МГТУ им. Баумана
40	Романов Илья Владимирович	ИИГ
52	Рычков Андрей Владимирович	Академия им. М. В. Фрунзе
41	Сахтеров Владимир Иванович	* ИЗМИРАН
42	Сахтерова Татьяна Викторовна	ИЗМИРАН

43	Смирнов Дмитрий Андреевич		Самарский университет
44	Тужилкин Дмитрий Алексеевич		Томский госуниверситет
54	Тумской Валерий Евгеньевич		ИМЗ СО РАН
45	Фам Дык Хи	*	МГУСИ
46	Хасанн Диаа	*	МГУСИ
47	Шлыков Владимир Вячеславович	*	МФТИ
48	Шнерук Сергей Андреевич		ПАО "Россети"
51	Щербаков Григорий Николаевич		Академия им. М. В. Фрунзе
49	Щирий Андрей Олегович	*	ИЗМИРАН
50	Янченко Степан Геннадьевич		МФТИ

ISBN 978-5-6052190-0-2

