

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
Кафедра инфокоммуникаций и радиофизики

Т. К. Артёмова
С. О. Ширяева

Современные проблемы радиофизики

Учебное пособие

Ярославль
ЯрГУ
2018

УДК 537.86(075)
ББК 3841я73
А86

*Рекомендовано
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2018 года*

Рецензенты:

Г. С. Голубев, кандидат технических наук, доцент;
кафедра физики и информационных технологий
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Ярославский государственный
педагогический университет им. К. Д. Ушинского»

А86 Артёмова, Татьяна Константиновна.

Современные проблемы радиофизики : учебное пособие
/ Т. К. Артёмова, С. О. Ширяева ; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Де-
мидова. — Ярославль : ЯрГУ, 2018. — 96 с.
ISBN 978-5-8397-1148-8

Пособие содержит материалы авторского курса «Современные проблемы радиофизики», разработанного преподавателями кафедры инфокоммуникаций и радиофизики ЯрГУ им. П. Г. Демидова.

Оно знакомит со структурой и направлениями развития современной радиофизики как области науки и даёт представление о современных проблемах радиофизики, а также путях их решения. Несколько глав посвящены отдельным проблемам радиофизики, заслуживающим особого рассмотрения, в том числе задачам, над которыми работают учёные ЯрГУ им. П. Г. Демидова. Приводится основная постановка задачи, описываются достижения современной радиофизики на пути её решения и области применения этих достижений, а также радиофизические методы на практике, в том числе в смежных областях. В конце глав приводятся вопросы для самоконтроля и задания по курсу, формирующие и развивающие способность обучающихся использовать в своей профессиональной деятельности знание современных проблем и новейших достижений физики и радиофизики.

УДК 537.86(075)
ББК 3841я73

ISBN 978-5-8397-1148-8

© ЯрГУ, 2018

Введение

Пособие предназначено для магистрантов направлений «Радиофизика» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», изучающих курс «Современные проблемы радиофизики».

Ряд тем представлены обзорно; темы же, по которым авторы и их коллеги в течение ряда лет проводили научные исследования в ЯрГУ, представлены более подробно. Читателю предлагается ознакомиться с терминологией, методологией и проблематикой различных направлений современной радиофизики, а также ставятся задачи для самостоятельной работы.

Каждая глава завершается списком вопросов для самоконтроля; вопросы, не имеющие прямых ответов в тексте пособия, помечены «звёздочкой». Для практической отработки требуемых умений, навыков и самостоятельного получения знаний на основе анализа различных источников научной информации даны определённые задания, в том числе для главы 1 – в конце главы, а для глав 2–6 – в приложении А (однотипные). Для удобства литература приведена к каждой главе отдельно. Такая компоновка материала способствует формированию и развитию способности студентов использовать в своей профессиональной деятельности знание современных проблем и новейших достижений физики и радиофизики. Актуальность всех электронных ресурсов подтверждена на 12.02.2018.

Определения в тексте выделены полужирным подчёркнутым шрифтом, элементы классификаций – полужирным, термины, содержание которых в данном пособии не раскрываются (но которые, однако, нужно освоить для грамотного владения материалом на высоком уровне), – курсивом.

Для изучения курса и самостоятельного ознакомления с современными проблемами и достижениями радиофизики рекомендуем использовать открытые полнотекстовые статьи в Научной электронной библиотеке (<http://elibrary.ru>), в том числе статьи в журналах «Вестник Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова. Серия Технические науки»»,

«Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии»; «Успехи физических наук» (<https://ufn.ru>) (см. в том числе рубрику «Обзоры актуальных проблем»), «Журнале радиоэлектроники», издаваемом институтом радиоэлектроники РАН (<http://jre.cplire.ru/jre/contents.html>), в «Журнале технической физики» (<http://journals.ioffe.ru/journals/3>), а также статьи, размещённые в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (<http://CyberLeninka.ru>), предоставляющей свободный полнотекстовый доступ ко всем размещённым в ней публикациям. Для анализа технического аспекта современной радиофизики и практических применений современных методов можно использовать открытые реестры патентов РФ на сайте ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности» (<http://www1.fips.ru>).

Авторы выражают огромную признательность Н. Ю. Колбневой, без труда и любезно предоставленных авторских материалов которой часть курса и часть пособия не могли бы состояться.

Глава 1

Основные направления развития современной радиофизики

1.1. Специальность ВАК «Радиофизика». **Основные отрасли современной радиофизики**

Радиофизика относится к *физико-математическим наукам* и занимается исследованиями общезначимого характера. Некоторые её разделы (разработка и создание приборов, установок, теплотехнических процессов и их применение в народном хозяйстве) могут быть отнесены и к техническим наукам.

Паспорт научной специальности 01.04.03 даёт следующую формулу специальности: «**Радиофизика** – раздел физики, занимающийся изучением общих закономерностей генерации, передачи, приема, регистрации и анализа колебаний и волн различной физической природы и разных частотных диапазонов, а также их применением в фундаментальных и прикладных исследованиях» [1].

Радиофизика занимается исследованиями в следующих областях [1]. Это:

1. Разработка физических основ генерации, усиления и преобразования колебаний и волн различной природы (электромагнитных, акустических, плазменных, механических), а также автоволн в неравновесных химических и биологических системах. Поиски путей создания высокоэффективных источников когерентного излучения миллиметрового, субмиллиметрового и оптического диапазонов, техническое освоение новых диапазонов частот и мощностей;

2. Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах;

3. Разработка, исследование и создание новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов: резонаторов, волноводов, фильтров и антенных систем в радио, оптическом и ИК-диапазоне;

4. Исследование флуктуаций, шумов, случайных процессов и полей в сосредоточенных и распределенных стохастических си-

стемах (*статистическая радиофизика*). Создание новых методов анализа и статистической обработки сигналов в условиях помех. Разработка статистических основ передачи информации. Исследование нелинейной динамики, пространственно-временного хаоса и самоорганизации в неравновесных физических, биологических, химических и экономических системах;

5. Разработка научных основ и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач. Создание систем дистанционного мониторинга гео-, гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы. Радиоастрономические исследования ближнего и дальнего космического пространства;

6. Разработка физических основ и создание новых волновых технологий модификации и обработки материалов;

7. Разработка теоретических и технических основ новых методов и систем связи, навигационных, активных и пассивных локационных систем, основанных на использовании излучения и приема волновых полей различной физической природы и освоении новых частотных диапазонов.

Многогранность природы радиофизических процессов включает возможность близкого знакомства с проблемами радиофизики во всех этих областях в рамках настоящего курса, поэтому основное внимание будет уделено тем аспектам, над которыми работают учёные ЯрГУ.

1.2. Радиофизические методы исследований

Радиофизика как наука имеет различные методы исследований в своём арсенале. Однако, как указывается в [1], «общность изучаемых радиофизических закономерностей излучения, распространения, взаимодействия и трансформации колебаний и волн в различных средах, в том числе в неоднородных, нелинейных и нестационарных, позволяет [любому исследователю] включить радиофизические методы как универсальное средство исследования окружающей среды на самых различных уровнях: от микромира до космического пространства».

Среди методов радиофизики есть **пассивные**, когда исследователь только наблюдает и регистрирует информацию, и **активные**, когда предпринимаются специальные усилия по созданию определённых колебаний и излучению их в область интереса. Реакция на колебания, будучи зарегистрированной, позволяет извлечь информацию о предмете интереса или среде распространения сигнала. Пассивные методы используются, например, для наблюдения за погодой, а активные – для исследования толщины арктических льдов.

Радиофизика опирается на модели процессов и систем. Модели могут быть **детерминированными**, **статистическими** и **имитационными**. Каждый тип моделей применяется для решения определённого круга задач с заданными требованиями к решению.

1.3. Современные проблемы и направления развития радиофизики

Радиофизика – динамически развивающаяся отрасль науки. Несмотря на сложившиеся традиции, определяющие её инструментарий и понятийный аппарат, радиофизика постоянно осваивает новые, неизведанные ранее возможности. Это

– освоение новых диапазонов частот (например, диапазона 60-100 ГГц и прилегающего к нему терагерцового диапазона 0,1–10 ТГц), в том числе построение моделей распространения в них сигналов, анализ колебательных процессов в системах генерации, канализации, приёма колебаний, что ведёт к построению аппаратуры различного назначения для этих диапазонов;

– построение новых, более точных моделей распространения сигналов в различных средах на основе накопленных и обработанных огромных многолетних массивов данных (что позволяет впоследствии использовать их для анализа качества связи в процессе коммуникации и адаптации параметров аппаратуры к изменяющейся обстановке незаметно для пользователя);

– разработка новых физических принципов построения устройств (квантовые приборы, системы с динамическим управляемым хаосом);

– анализ физики работы и характеристик уже привычных устройств под воздействием новых, например сверхкороткоимпульсных сигналов, а также разработка методов анализа устройств в таких условиях (и создание на их основе новых программных модулей в системах электродинамического, схемотехнического и блочного моделирования устройств и систем связи, радиолокации, зондирования и т. п.);

– исследование и применение новых материалов, обладающих улучшенными или новыми, порой ещё неизвестными свойствами (например, метаматериалов для получения почти двумерных радиопоглощающих материалов или плоских, но фокусирующих излучение линз).

Спектр вопросов, находящихся на переднем крае радиофизики, постоянно меняется, но эти направления развития можно считать неизменно присутствующими, составляющими саму суть радиофизики как науки, при этом изменяются лишь параметры – конкретный диапазон частот, конкретные свойства веществ и т. п.

Радиофизические теории, методы, задачи ведут себя как объекты, обладающие характерным жизненным циклом из ряда «горбов», в ходе которого от пионерских, новаторских работ (основание главного горба) через шквал массовых разработок (резкий рост) тема приходит к уровню всесторонней проработанности (область насыщения), уступает новым острым задачам (спад) и далее либо сходит с научного горизонта (например, при появлении более эффективных и точных методов, более простых для реализации принципов построения устройств), либо получает вторую жизнь на новом уровне развития технологий, материальной базы, прогностических возможностей моделей, а также при переносе на новую почву, в новый диапазон частот, новое, невозможное ранее применение (второй пик).

Самый эффективный способ ознакомления с современным состоянием дел – анализ тематик работ, представленных в последние годы на крупных международных и всероссийских научных конференциях (см., например, календарь проводимых IEEE конференций [2], мероприятия «Московской микроволновой недели» [3]), а также опубликованных в журналах с малым сроком рецензирования, например в журналах IEEE (для поиска можно пользоваться системой [ieeexplore](#) [4]).

1.4. Современные проблемы излучения, распространения и приёма электромагнитных колебаний

В настоящее время человечеством накоплено огромное количество устройств и методов, позволяющих работать в различных диапазонах частот, реализовывать разный функционал и обеспечивать качество, соответствующее любым имеющимся критериям. Особенности настоящего момента являются:

– во-первых, большая загруженность частотного спектра в диапазонах до десятков ГГц, порождающая освоение новых диапазонов частот и исследование физических принципов, на которых можно было бы построить эффективную аппаратуру в этих диапазонах, разработка новых элементов и устройств, создание методов приёма и обработки с учётом особенностей частотного диапазона;

– во-вторых, стремление к миниатюризации, обеспечивающее тот же или более мощный функционал при большей мобильности и вызывающее потребности в применении новых материалов и сверхплотном размещении элементов, в интеграции приёмопередатчиков и элементов их антенно-фидерных трактов в одном кристалле, в дроблении одного крупногабаритного устройства на сеть из множества мелких устройств при сохранении общих характеристик и управляемости;

– в-третьих, потребность во всё больших скоростях передачи и обработки информации, что заставляет расширять полосу используемых частот, искать способы построения всё более широкополосных устройств, разрабатывать схемы и программы компенсации неоднородности свойств основных блоков аппаратуры, а также экономить мощность и энергоресурсы передатчиков путём разработки методов адаптивного диаграммоформирования для антенно-фидерных систем и адаптивного энергопотребления и приёмо-передатчиков, методов контроля занятости частотных полос и оптимизации частотного спектра для передачи с минимальными затратами, методов энергетически эффективных модуляции и кодирования, методов приёма сигналов в условиях априорной неопределённости, методов идентификации свойств сигнала для адаптации к нему приёмника и т. п.;

– в четвёртых, необходимость обеспечивать всё более высокое качество сигнала на выходе приёмника, лучшую вероятность правильного обнаружения в радиолокации, большую вероятность правильного распознавания объектов одновременно с уменьшением мощности и габаритов передатчика порождает потребность во всё более точном измерении уровня сигнала на входе приёмника (в том числе для компенсации потерь в канале), в выделении его из-под помех и внутренних шумов аппаратуры, в разработке методов снижения собственных шумов устройств (в том числе за счёт охлаждения), методов повышения радиоконтраста сигнал-фон (или объект-фон), в том числе за счёт обработки или прогнозирования вероятностно-статистических свойств помех и шумов;

– в-пятых, потребность в обеспечении электромагнитной совместимости огромного количества одновременно работающих устройств с запасом «по умолчанию», в том числе за счёт использования для работы шумоподобных сигналов, оказывающих слабое влияние на устройства с «чужой» формой кодового сигнала, а также в координации их работы, т. е. в существенно большем быстродействии вычислителей.

Таким образом, в настоящее время изменяются и физические принципы генерации, излучения, приёма и обработки сигналов. Формулируются и соответствующие задачи. Например, задача выбора диапазона частот, обеспечивающего в условиях конкретного приёмника наилучший контраст радиоизображения; задача разработки надёжного сверхчувствительного приёмника терагерцевого диапазона с применением, по возможности, дешёвых в массовом производстве материалов; задача создания оболочек, обеспечивающих радионевидимость укрываемых объектов и парная ей задача разработки методов радиовидения объектов, скрытых с применением «стелс»-технологий.

Остаются также задачи построения и апробации физических моделей каналов и распространения в них сигналов (для использования их в вероятностных моделях приёма (в том числе многоканального) и обработки информации. Так как связь охватывает все территории, то множество моделей расширяется для различных условий – лесов и лесополос с конкретными свойствами,

для различных ситуаций городской застройки, для турбулентной атмосферы с различными нестационарными процессами, для комбинированных каналов связи на большие расстояния, наконец, для таких новых каналов, как межспутниковые (с учётом гравитации, накопившегося космического мусора и действующих космических аппаратов).

1.5. Радиофизические основы радиоастрономии

Основные современные радиофизические задачи в радиоастрономии следующие.

Во-первых, спектральный анализ космического излучения, излучения звёзд, а также электромагнитных волн, переизлучённых в результате отражения от поверхности планет, астероидов и других космических объектов – это есть **радиоспектроскопия** [5]. Используя построенные на сегодняшний день модели излучения тел, можно получить информацию о состоянии излучателя, например о его температуре и химическом составе, как в обычной спектроскопии. Анализируя рассеянное небесными телами излучение, получают информацию в том числе об их размерах, рельефе поверхности, наличии и газовом составе атмосферы. Несмотря на то что подобные исследования начаты во второй половине XX века, открытие новых объектов интереса и задачи освоения ближнего космоса ставят новые и новые цели.

Во-вторых, задача отслеживания структуры и свойств космических сигналов для анализа информации об их источниках, в том числе поиска сигналов внеземных цивилизаций. Существуют проекты SETI (Search of Extra Terrestrial Intelligence) [6] направленного поиска и сплошные обзоры небесной сферы в радиодиапазоне. Сюда же относится выбор момента приема сигналов возможных внеземных цивилизаций (задача формирования выборки данных), а также установление соответствия космических радиосигналов критериям искусственности (анализ свойств сигналов, корреляционный, фрактальный и т. п., например в рамках проекта SETI@HOME [7]). Отдельно проводят поиск монохроматического и искусственного стохастического радиоизлучения.

В третьих, это задачи, связанные с обнаружением и анализом гравитационных волн. В настоящее время есть ряд национальных и международных проектов по обнаружению гравитационных волн, в том числе наземные обсерватории LIGO [8] и VIRGO. Были построены детекторы гравитационных волн [9], основанные на различных принципах: твердотельные резонансные, комбинированные лазерно-твердотельные системы, доплеровские радиосистемы обнаружения гравитационных волн, гравитационные антенны на свободных массах, ротационно-гетеродинные гравитационные антенны, антенны с использованием высокодобротных резонаторов СВЧ и наиболее эффективные – лазерно-интерферометрические гравитационные детекторы, которые после увеличения чувствительности дали возможность LIGO обнаружить гравитационно-волновые всплески. В 2016 г. гравитационные волны (от слияния двух чёрных дыр) были впервые зарегистрированы (сигнал GW150914, здесь первые две цифры – год, вторые – месяц, последние – число события [10]), а в 2017 г. – зарегистрированы волны, порождённые слиянием нейтронных звёзд (событие GW170817 [9]). Среди разработок российской группы участников LIGO есть радиофизические [10] – создание и исследование колебаний противовеса пробных масс из плавляющего кварца, обеспечивающего отсутствие избыточных механических шумов в отличие от ранее использовавшихся стальных; исследование шумов, обусловленных электрическими зарядами на кварцевых зеркалах; обнаружение нового класса фундаментальных термодинамических шумов в зеркалах детектора; предсказание эффекта параметрической неустойчивости интерферометра и разработка способов его предотвращения.

1.6. Биомедицинская радиофизика

Биомедицинская радиофизика ставит следующие задачи.

Во-первых, задачи медицинского применения электромагнитных волн для лечения, а также диагностики различных заболеваний. Это и задачи получения информации о состоянии различных органов и систем человека и животных с помощью

электромагнитных волн или ультразвуковых колебаний (визуализация органов и внутренней структуры тканей). Наиболее перспективным из диапазонов ЭМВ сейчас считают терагерцовый диапазон частот благодаря сочетанию ряда факторов: эти волны имеют большую проникающую способность, чем видимый свет, поэтому позволяют получить изображения внутренних органов и слоёв; длина волны в этом диапазоне меньше, чем у обычных радиосигналов, и достигаемое разрешение на изображениях значительно лучше; диапазон изменения свойств тканей человека в этой полосе частот очень велик, и поэтому обеспечивается большая контрастность изображений, можно чётко отличать по цвету и яркости больные и здоровые ткани, это более информативные изображения, позволяющие, например, хирургам, проводить щадящие операции. Сюда же относятся задачи анализа особенностей воздействия радиосигналов различных типов и частот на биологические организмы и выявление терапевтических эффектов (как возбуждение каких-либо состояний, так и угнетение, обеспечение концентрации излучения в каком-то органе или в каком-то слое кожи для запуска биологических реакций).

Во-вторых, это задачи анализа преобразования сигналов биологическими организмами и исследования возможности использования этих эффектов для медицинских исследований, для обнаружения людей или животных, для различения состояний (в том числе живое и неживое) биологического организма, для контроля (в том числе удалённого) состояния здоровья людей (например, по частоте дыхания, пульсу и т. п.).

В-третьих, это проблемы использования тела человека как среды для распространения сигналов связи и других устройств ближнего действия. Среди таких задач – создание антенн систем персональной связи или медицинского наблюдения, интегрированных в кожу человека, но безопасных для него. Это и задачи обеспечения физической целостности системы живой организм-бионический протез, хорошей проводимости сигналов, управляемости рабочих элементов, например пальцев вживлённой роботизированной руки, интеграции электрических цепей с нервными волокнами в единый сигнальный канал и исследование его свойств, временных и других характеристик.

Последняя группа задач – задачи электромагнитной безопасности излучающих устройств. Выработка рекомендаций по обеспечению безопасных уровней и условий облучения ЭМВ на основе наблюдений за эффектами воздействия ЭМВ на организм, органы и системы биологического организма (человека). Создание материалов и средств защиты от электромагнитных полей (экранов, заземлённых костюмов), исследование прохождения ЭМВ через эти экраны и оценка обеспечиваемой ими степени защиты.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение радиофизики в соответствии с паспортом специальности.
2. К каким отраслям науки относится радиофизика?
3. Каковы области научных интересов радиофизики?
4. Почему радиофизические методы исследований можно считать универсальными?
5. Относится ли исследование колебательных процессов химической природы к радиофизике?
6. В чём отличие активных и пассивных методов исследования?
7. Приведите примеры использования активных и пассивных методов.
8. Что такое гравитационные антенны?
9. Каковы современные требования к излучателям и приёмникам сигналов?
10. Зачем стремятся достигнуть большей широкополосности устройств и системы?
11. Как миниатюризация сказывается на требованиях к передаче и приёму сигналов?
12. Какие радиофизические задачи ставит терапевтическое применение электромагнитных волн?
13. Приведите примеры детерминированных, статистических и имитационных моделей в радиофизике.
14. Какие новые задачи ставит перед радиофизикой освоение нового диапазона частот?

15. Почему при миниатюризации элементной базы требуется разработка новых методов исследования элементов и сигналов в них?

16. Почему интерферометрические детекторы гравитационных волн оказались самыми эффективными?

17. Удалось ли обнаружить сигналы внеземных цивилизаций проекту SETI?

18. Для чего требуется исследовать состав вещества и атмосферы планет и астероидов?

19. Каким образом можно идентифицировать биологические организмы по эффектам, исходя из взаимодействия с электромагнитными волнами?

Задание к главе

1. Ознакомиться с программами любой международной научно-технической или научной конференции в области радиофизики, радиотехники, связи за последние годы. В отчёте указать наименование конференции и годы её проведения, привести ссылку на размещение в Интернете программы и/или тезисов конференции.

2. Выделить радиофизические направления и секции в тематике этой конференции. В отчёте указать перечень секций, в спектре тематик которых есть радиофизика.

3. По программе за последний год выделить спектр обсуждаемых проблем, находящихся на переднем крае радиофизики как науки. В отчёте привести сформированный перечень.

4. По программам за несколько лет (от трёх лет) проследить изменение тематики. В отчёте описать характер изменений: какие темы появились, какие ушли, какие получили большее, какие меньшее освещение в работах исследователей.

5. Составить и привести в отчёте диаграммы использования различных методов и моделей в радиофизической тематике конференции: активных и пассивных методов; детерминированных, статистических и имитационных моделей (2 долевые диаграммы).

6. Выделить три конкретные работы, привести ссылки на их размещение в сети Интернет и аргументированно указать, на какой стадии жизненного цикла данные направления науки, на Ваш взгляд, находятся.

Литература

1. Паспорт научной специальности 01.04.03 «Радиофизика»: [Электронный ресурс]. — URL : <http://vak.ed.gov.ru/documents/10179/2327517/01.04.03+Радиофизика.doc/0076dcf3-e26e-4739-b6d9-0a8d7a81c73f>.

2. Календарь проводимых IEEE конференций. — URL : https://www.ieee.org/conferences_events/conferences/search/conference_search_results.html.

3. Сайт мероприятия «Московская микроволновая неделя». — URL : http://microwaveweek.ru/?page_id=270.

4. Поисковая система по публикациям IEEE. — URL : <http://ieeexplore.ieee.org/>.

5. Радиоспектроскопия // Энциклопедия физики и техники. — URL : http://www.femto.com.ua/articles/part_2/3262.html.

6. SETI // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/SETI>.

7. Интернет-страница проекта Seti at home. — URL : https://setiathome.berkeley.edu/sah_about.php.

8. LIGO // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/LIGO>.

9. Детектор гравитационных волн // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Детектор_гравитационных_волн.

10. Открытие гравитационных волн // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Открытие_гравитационных_волн.

Глава 2

Материалы и приборы СВЧ-радиофизики

2.1. Современные материалы радиофизики

В современных устройствах используются и хорошо себя зарекомендовавшие материалы, и новые, свойства которых только ещё открываются перед исследователями. Ряд материалов с интересными с точки зрения радиофизики свойствами были открыты и получены в последние годы.

Биоразлагаемые полимеры – используются для изготовления деталей устройств и обеспечивают экологичность их утилизации.

Сверхпроводники – вещества, способные пропускать большие токи практически без потерь. Их используют для сверхточных измерений магнитного поля; в качестве элементной базы квантовых вычислений; в обмотках соленоидов для создания больших постоянных магнитных полей, поддерживая при этом низкие температуры. На них строят сверхчувствительные детекторы микроволнового излучения. Последнее основано на том, что сверхпроводящее состояние вещества описывается комплексной функцией «параметр порядка», модуль которой фиксируется температурой, фазой же можно манипулировать.

Композитные материалы – состоят из разнородных веществ, применяются для изготовления различных сенсоров и мембран, оболочек антенн, радиопоглощающих и радиопрозрачных материалов, метаматериалов и т. п.

Самый интересный вид композитов – это композиты со сложной объёмной наноструктурой вещества, выращенные с помощью шаблонной матрицы из затравок на некоторой подложке методами формирования наноточек и нанонитей – на срезе поверхности под микроскопом видна эта структура. Формирование наноструктуры композита может обеспечить ему определённые электродинамические, или механические, или термодинамические свойства.

Есть более крупномасштабные материалы, представляющие собой макроскопические включения, например металлов в диэлектриках или сетки основы, залитые каким-то гибким материалом или многослойные структуры.

Среди современных композитов – углепластики (переплетённые нити углеродного волокна, пропитанные полимерной смолой), вещества на основе борных волокон, вещества с использованием наночастиц, в том числе многослойных. Такие вещества могут существенно уменьшить вес готового изделия, повысив его удобство и мобильность, а могут и обеспечить экологичность утилизации за счёт биоразлагаемости или стойкость к воздействиям среды, большую, чем у металлов. Это технологически выгодные материалы.

Прозрачные материалы – прозрачность материала подразумевает, что электромагнитная волна проходит сквозь него, практически не испытывая ослабления и рассеяния. Прозрачность определяется структурой вещества и в разных диапазонах частот разная. Как правило, вещества, прозрачные в оптическом диапазоне, являются даже более прозрачными для более длинных ЭМВ, т. е. радиоволн.

Радиопрозрачные материалы – традиционные, как правило непрозрачные в оптическом диапазоне вещества, используемые для изготовления плёнок, оболочек, укрытий, которые, не мешая функционированию основного устройства, защищают его от влияния погодных условий, обеспечивают электрическую изоляцию (т. е. безопасность использования человеком). Радиопрозрачными на данной частоте будут являться все материалы, толщина которых много меньше толщины скин-слоя.

Прозрачные в оптическом диапазоне проводники позволяют изготавливать из них антенны, которые можно наносить на стёкла: они не препятствуют обзору, например делать из них антенну радиолокатора, размещаемую на лобовом стекле автомобиля, или антенну спутниковой связи на заднем стекле. Матрицы прозрачных электродов управляют жидкими кристаллами в жидкокристаллических дисплеях. Прозрачность этих элементов в видимом диапазоне позволяет организовывать

многослойные структуры, обеспечивающие некий функционал одновременно с приятным для человека визуальным эффектом, что является одной из тенденций современности.

Гибкие материалы. Ещё одно требование современности – мобильность и реконфигурируемость устройств, что можно обеспечить в том числе за счёт использования гибких материалов, выполняя, например, патч-антенну из гибкой диэлектрической подложки с тонким устойчивым к растяжению напылением рабочего проводника.

Современные материалы для гибких подложек – силикон, «Роджер» различных номеров и др. Разработаны диэлектрики как с низкими потерями (низкой диэлектрической проницаемостью), так и с относительно высокой электропроводностью, что в применении, например к патч-антеннам, позволяет расширить их рабочую полосу частот.

Ещё одно применение – гибкие дисплеи. Ожидается появление гибкого стекла.

Биосовместимые материалы – вещества, которые подходят для внедрения в человеческий организм, например вместо повреждённой части. От них требуется иметь заданные механические и структурные свойства, т. е. обеспечить пролиферацию, клеточную адгезию, клеточное дифференцирование, а возможно, клеточную миграцию и транспорт некоторых веществ и сигналов. Для постоянных имплантов используют титановые и керамические материалы на основе Al_2O_3 и ZrO_2 , для временных – биоразлагаемые и биоактивные соединения: хитозан, полилактид, поликапролактон, гидрооксиапатит, октакальциевый фосфат. Конкретные объекты изготавливают методом 3D-печати. За рубежом уже есть стандарт, регламентирующий возможность использования веществ в качестве биоматериала.

Двумя настоящими прорывами в области материалов за последние годы являются получение двумерных материалов, в том числе графена, и практическая реализация метаматериалов с различными свойствами.

Метаматериалы – материалы со свойствами, отсутствующими в природе, например с отрицательной диэлектрической

или магнитной или даже обеими проницаемостями. Таким материалам в нашей стране посвящены работы в первую очередь В. Г. Веселаго, который заложил основы их теории и применения. Были созданы линзы Веселаго из вещества с отрицательным показателем преломления.

С помощью метаматериалов может быть достигнута радио- и оптиконевидимость.

Ещё одно свойство, отсутствующее ранее в природе, – ударопрочность за счёт отрицательного коэффициента Пуассона. Она может быть обеспечена при использовании *ауксетиков*, которые поглощают энергию при ударном воздействии лучше обычных материалов.

Ожидается, что будущий материал, содержащий ферменные конструкции на микро- или наноуровне (на макроуровне такие многослойные структуры есть) обеспечит механические свойства, недостижимые пока на макроуровне.

Метаматериалы позволяют также создать радиопоглощающие покрытия, а также оболочки и подложки с заданными свойствами, в том числе компенсирующие недостатки остальных элементов проволочной антенны (обтекатель из метаматериала) или печатной антенны (подложка).

Двумерные материалы – это материалы толщиной в один атом, т. е. практически без толщины. Первым двумерным материалом был графен – одна из форм углерода. На сегодняшний день известны сотни типов двумерных кристаллов. Есть материалы, которые превосходят графен по свойствам, например обладают ненулевой шириной запрещённой зоны и могут быть использованы при разработке радиоэлектронных устройств. Соединяют различные двумерные кристаллы в различных комбинациях.

Основная проблема – получение относительно дешёвого бездефектного двумерного материала большой площади в промышленных масштабах. Сейчас используются две технологии. Первая – с использованием плазмохимического синтеза, например графеновые полотна, однако пока она не даёт промышленных масштабов. Вторая – механическое отделение

слоёв – тоже имеет ограничение на максимальный размер получаемых структур.

Нанотрубки – это трубки из слоя углерода толщиной в один атом. Они появились в двухтысячные годы, но до сих пор нет промышленной технологии получения нанотрубок с заданными свойствами, в том числе не получается создать нанотрубки с определённой хиральностью (зеркальной симметрией структуры). Только в последние годы удалось создать электронные приборы с использованием нанотрубок, в том числе полевой транзистор, который по характеристикам существенно превосходит аналоги на основе кремния и арсенида галлия. Нанотрубки могут также использоваться для создания прозрачных проводников, дисплеев, светодиодов, а также как волокна, обеспечивающие свойства композитов с их применением.

2.2. Современная элементная база

В последние годы появились сверхпроводящие детекторы микроволнового излучения, обеспечивающие очень высокую чувствительность. Поглощение фотонов с большой энергией на короткое время приводит к возникновению ненулевого сопротивления провода, которое на фоне нулевого в отсутствие облучения сопротивления легко обнаружить. Такие детекторы устанавливают на спутниках, отправляя вместе с ними криогенную систему.

Другие варианты построения детекторов для терагерцового диапазона основаны на применении графеновых нанолент [1] или углеродных нанотрубок [2].

Очень широко ведутся работы по созданию антенн с использованием новых материалов.

Разрабатывают гибкие антенны, размещаемые на запястьях, на плечах, на голенищах обуви для систем персональной радиосвязи или систем дистанционного мониторинга состояния здоровья. Изгибание изменяет электродинамические свойства структур, составляющих антенну. Кроме того, оказывает большое влияние и тело человека, на поверхности которого

или рядом с которым антенна размещается, поэтому требуется создание теории именно таких антенн, прогнозирование их свойств и тщательное электродинамическое моделирование в каждом конкретном случае с учётом носителя – тела. Антенну нужно иметь возможность сгибать, фиксировать в согнутом виде и разгибать, а это предъявляет определённые требования к материалам.

Используют и тело человека, в том числе его кожу. Например, формируют антенны для персональной радиосвязи, наклеивая на кожу проводники и другие элементы (есть вариант, когда проводники рисуют, формируя тату-антенны).

Выполняют антенны из композитных материалов, в том числе с использованием графена [3]. Рассматривают нанотрубку одновременно как приёмник сигнала и как антенну. Создают планарные антенны на подложках из метаматериала, что обеспечивает антенне лучшее согласование с фидером. Используют для обтекателей штыревых антенн метаматериалы с заданными частотными свойствами, что делает узкополосную антенну широкополосной при использовании такого обтекателя.

Новые вещества позволяют повысить к. п. д. солнечных элементов до 25 %. Были построены терагерцевые транзисторы на основе графена [4] и проанализированы различные графеноподобные вещества в сильных полях и с учётом адсорбции [5].

Одна из интересных тенденций – применение наночастиц в качестве матрицы излучателей или приёмников излучения различных диапазонов. Одиночная наночастица является излучателем в оптическом диапазоне. Такой частицей может быть даже одиночный атом вещества – его моделируют диполем Герца, а может быть цепочка атомов – её моделируют элементарной магнитной антенной. В [6] показано, что нанокубические антенны, нагруженные на квантовые точки, могут работать с хорошей эффективностью как нано-патч-антенны, обеспечивая как ненаправленные, так и направленные диаграммы направленности за счёт дипольного, квадрупольного и других излучений. Наночастицы могут быть заключёнными

в оболочку. В [6] приводится пример того, как наноантенна в оболочке имеет лучшие свойства, чем наноантенна сама по себе или выполненная из метаматериала оболочки.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие материалы являются прозрачными для сигналов?
2. Чем привлекательны двумерные материалы?
3. Какие возможности обеспечивают нанотрубки?
4. В каком диапазоне длин волн излучают наноантенны?
5. Приведите пример гибких прозрачных материалов, пригодных для использования в радиоэлектронных или радиотехнических устройствах.
6. Какими свойствами обладают метаматериалы?
7. Какие объекты называют линзами Веселаго?
8. *Перечислите современные материалы и укажите эффект от их применения.
9. *Какие потребности стимулируют поиск новых материалов на данном этапе развития науки?
10. *В чём особенность проектирования антенн, носимых на теле человека?

Литература

1. Детектор модулированного терагерцевого излучения на основе графеновых нанолент / Ю. В. Стебунов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 7. — URL : <http://jre.cplire.ru/jre/jul12/1/text.html>.
2. Резонансный детектор модулированного излучения терагерцевого диапазона на основе углеродных нанотрубок / Ю. В. Стебунов [и др.] // Журнал технической физики. — 2012. — Т. 82, вып. 1. — С. 67–72. — URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/10503>.
3. Электродинамические характеристики рупорных СВЧ антенн из графеносодержащих углекомпозитных материалов

/ Н. А. Дугин [и др.] // Журнал технической физики. — 2018. — Вып. 2. — С. 276. — URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/45421>.

4. Давидович, М. В. Терагерцевый транзистор на основе графена / М. В. Давидович, О. Е. Глухова, М. М. Слепченков // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. — 2017. — Т. 17, вып. 1. — С. 44–54. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teragertsevyu-tranzistor-na-osnove-grafena>

5. Конобеева, Н. Н. Теория графеноподобных структур в сильных полях и при адсорбции : дис. ... д-ра физ.-мат. Наук / Н. Н. Конобеева. — Волгоград, 2017.— URL : http://www.volsu.ru/upload/iblock/1ee/disser_Konobeeva.pdf.

6. Arslanagić, S., Ziolkowski, R. W. Cylindrical and Spherical Active Coated Nanoparticles as Nanoantennas / S. Arslanagić, R. W. Ziolkowski // IEEE Antennas and Propagation Magazine, Dec. 2017. P. 14-29.

Глава 3

Дистанционное зондирование объектов и сред

3.1. Дистанционное зондирование

Дистанционное зондирование – сбор информации об объекте или явлении с помощью бесконтактного регистрирующего прибора. Структурная схема системы дистанционного зондирования приведена на рис. 3.1. Пример: фотограф (*подвижная база*) носит фотоаппарат (*прибор, формирующий изображение*), в нём – плёнка или матрица ПЗС (*среда регистрации данных*), фотографирует лес (объект исследования), находясь на некотором расстоянии. Изображение несёт в себе информацию об объекте (лес) и среде распространения (воздух, особенно если есть осадки или дым, туман).

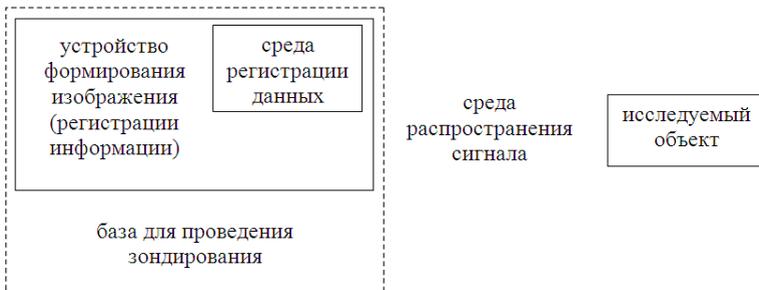


Рис. 3.1. Обобщённая структурная схема системы дистанционного зондирования

Колебания, которые используются для переноса информации, в зависимости от физической природы подразделяют на электромагнитные волны различных диапазонов частот и акустические (т. е. механические) колебания. Однако получение информации дистанционно возможно и с помощью механических, гравитационных, плазменных и других колебаний.

По диапазону частот (длин электромагнитных волн) регистрирующие информацию приборы можно подразделить на устройства, использующие:

1) гамма-лучи 10^{20} – 10^{19} Гц (0,003–0,03 нм) и рентгеновские лучи 10^{19} – $3 \cdot 10^{16}$ Гц (0,03–10 нм): это

- сцинтилляционные счётчики,
- гамма-спектрометры;

2) ультрафиолетовое излучение (10–400 нм): это

– сканеры с фотоэлектронными умножителями и фильтрами,
– суперорбитроны (передающие ТВ трубки с накоплением заряда, переносом изображения с фотокатода на двустороннюю мишень, со считыванием изображения с мишени медленными электронами и с усилением сигнала вторичным электронным умножителем),

– камеры с фильтром и чувствительной к ИК-излучению плёнкой;

3) видимое излучение (400–700 нм): камеры с плёнкой;

4) ближнее ИК излучение (700–1500 нм): это

- камеры с плёнкой, чувствительной к ИК-лучам,
- полупроводниковые детекторы в сканерах и радиометрах;

5) ИК-лучи (1500 нм–0,1 мм): полупроводниковые фотоприёмники в сканерах и радиометрах;

6) СВЧ-излучение (0,1 мм–0,8 м): это

- радиолокаторы,
- радиочастотные приёмники в сканерах и радиометрах;

7) высокие и низкие частоты (0,8 м–3000 км): электромагнитные импульсные приборы.

В качестве приёмников акустических колебаний используются сонары, микрофоны и звукозаписывающие устройства, а также слуховой аппарат человека.

Аппаратура дистанционного зондирования может быть:

– воздушного и космического базирования, при этом в роли базы выступают:

- самолёты,
 - космические аппараты (в том числе спутники),
 - воздушные шары (в том числе метеозонды),
 - летательные аппараты, в том числе беспилотные;
- морского и речного базирования, где базами являются:
- морские корабли,

- суда морского и речного флотов,
- подводные аппараты, в том числе и беспилотные;
- сухопутного базирования на подвижных носителях:
 - механических сканерах,
 - автомобилях, поездах и другом наземном и подземном транспорте.

Данные обычно сначала сохраняются в базах и затем обрабатываются, если только применение не требует работы в режиме реального времени. Например, для прогноза погоды используются модели, опирающиеся на данные, зафиксированные в течение некоторого времени, предшествовавшего прогнозу. Результатом являются изображение, информация о форме, размерах, электродинамических параметрах материалов, свойствах поверхности, количестве объектов, их координатах, скорости и направлении движения.

3.2. Методы дистанционного зондирования

Радиовидение – получение изображения объектов и сцен при помощи электромагнитных волн в радиодиапазоне. Это один из методов радиолокации. Регистрируется пространственное распределение амплитуды излучаемого или переотражённого объектом электромагнитного поля и решается обратная задача – по этим данным получить искомое изображение. Подробнее ознакомиться с методом можно, например, в [1]. Аналогичный метод, использующий акустические колебания, называется **звуквидение**, или акустическое дистанционное зондирование.

Голография – это метод записи и воспроизведения волновых полей с учётом как амплитуд, так и фаз волн. Сохранение фазы поля – ключевой принцип голографии. Он отражён и в самом названии метода: название происходит от греческих слов «холо» и «графия» и имеет значение «запись всего» – и амплитуды, и фазы электромагнитного поля. Если реализуется голография какого-то объекта, то сигнал передатчика делится на две части. Одна излучается в сторону объекта, рассеивается им и частично возвращается в приёмник, называясь объектной волной.

Вторая часть поступает на второй (опорный) вход приёмника и называется опорной волной. На первом этапе процесса регистрируется голограмма – результат интерференции объектной и опорной волн. На втором этапе в ходе её обработки получают искомое изображение. Так как регистрировалось и фазовое распределение, то решением обратной задачи можно получить трёхмерное изображение.

В зависимости от того, какой физической природы регистрируемые волны, различают **оптическую, акустическую, радиоголографию**. Изображением объекта можно считать распределение поля в области его местонахождения, пространственное распределение коэффициента отражения или электродинамические (или акустические) характеристики материалов как функции координат. Голограмма физически представляет собой напряжённость электрического (или магнитного) поля интерференции объектной и опорной волн (в радио- или оптической голографии) или соответствующее ему напряжение или в зависимости от типа приёмника в акустической голографии – интенсивность звуковой волны (при квадратичных приёмниках) или мгновенные значения звукового давления или колебательной скорости (при линейных, как микрофоны или гидрофоны, приёмниках).

Если регистрация голограммы производилась без помощи *фокусирующих элементов* (линз, в том числе линз Френеля, объективов, амплитудной и фазовой пластинок Френеля), то голография называется **классической**, если с их помощью, то **голографией сфокусированных изображений**.

По модели распространения сигнала от объекта до голографической установки голограммы делят на **голограммы Фурье** (в плоских волнах) и **голограммы Френеля** (в сферических волнах). Так как голограммы Фурье представляют собой (с точностью до коэффициента, представляющего собой функцию преобразования линзы) спектр волн, исходящих от объекта, то изображение может быть найдено с помощью быстрого обратного преобразования Фурье. Для голограмм Френеля алгоритмы с высокой вычислительной эффективностью оказываются существенно медленнее.

Все голограммы, кроме голограмм сфокусированных изображений, обладают голографическим свойством – часть голограммы тоже позволяет восстановить изображение, только меньшей интенсивности и, возможно, меньшей контрастности. Это объясняется способом регистрации голограммы: оптический сигнал от каждой точки объекта (расходящиеся в пространстве волны, зачастую сферические) оказывается в каждой точке регистрирующей среды. Объектная волна в каждой точке у поверхности пластинки представляет собой интерференцию этих частных объектных волн. Теоретически, на какие бы мелкие части ни разбивали голограмму, каждая часть даст целое трёхмерное изображение. На практике, однако, качество этих изображений будет по мере уменьшения размера голограммы всё хуже и хуже, так как при этом обрезается спектр пространственных частот, что порождает на изображении искажения типа эффекта Гиббса (пульсации и ложные контуры) [2].

В ранних вариантах голографии регистрация производилась на непрерывную чувствительную среду. Сейчас производится дискретная в пространстве и времени регистрация. Дискретная регистрация радиоголограмм производится элементами антенных решёток или перемещающимися в пространстве антеннами, акустических голограмм – матрицей акустоэлектрических преобразователей (микрофонов или других).

Кроме того, раньше опорная волна физически освещала ту же область регистрации, что и объектная; сейчас же её подводят по закрытому каналу – в виде напряжения опорной волны, которое интерферирует с напряжением объектной внутри приёмника, а не снаружи. Однако физически существующая опорная волна, взятая, однако, не от собственного передатчика, а от внешнего источника сигнала, используется в пассивной радиоголографии. Таким образом, например, получают изображения объектов с помощью сигналов телевидения или в лучах подсвечивающего самолёты у аэродромов радиолокатора: опорная волна – принимаемый установкой сигнал напрямую, объектная – переизлучённый объектом.

В зависимости от взаимного расположения излучающей части голографической установки, объекта и приёмной части различают отражательные и теневые голограммы. Если передающая и приёмная системы располагаются по одну сторону от объекта, то голография является **отражательной** – регистрируется отражённая объектом волна; если по разные – голография является **теновой** (или **просветной** голографией) – регистрируется сумма прямого и теневого (дифрагировавшего на объекте) сигналов.

Интроскопия – неразрушающее исследование внутренней структуры объекта и протекающих в нём процессов. Может производиться с помощью акустических колебаний (в том числе звуковых, ультразвуковых и сейсмических волн), электромагнитных волн, постоянного и переменного электромагнитного поля и потоков элементарных частиц.

Выделяют три основных вида методов интроскопии:

– **проекционные** – получение теневого изображения объекта облучением с некоторого одного ракурса методом, не обладающим разрешением по дальности; при этом все детали внутренней структуры проецируются (сливаются) в одно изображение и, чтобы сделать отличающееся изображение, нужно облучить объект с нового ракурса;

– **томографические** (см. ниже);

– **эхозондирование** – получение изображения путём совместного построения временных откликов отдельных акустоэлектрических преобразователей, облучивших объект в разных направлениях: по одной оси откладывают направления, по другой – временную задержку отклика (соответствующую расстоянию до объекта), а яркость изображения соответствует интенсивности отклика.

Томография [3] – получение послойного изображения внутренней структуры объекта. Название происходит от греческого слова «томэ» – сечение. В ходе некоторого регистрирующего процесса с помощью сигнала какой-то природы (радио, оптического, рентгеновского, позитронного) получают массив проекционных снимков (**томограмм**) и затем решают прямую томографическую задачу – получают массив вокселей (точек объёмного

представления изображения) по проекционным данным, что называется **реконструктивной томографией** (*volume rendering* (англ.)). Томографию реализуют *томографы*.

Реконструктивная томография как метод 3D-реконструкции может быть применена к проекционным данным, полученным любым методом, обладающим разрешением минимум по двум координатам (по азимуту и дальности при отображении сектора или прямоугольного пространства) или по радиусу и углу (при отображении цилиндрического или сферического пространства), – радиовидением, голографией, методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и т. п. В этом смысле комбинация метода зондирования и метода реконструкции 3D-изображения называют ультразвуковой томографией, отражательной радиотомографией, оптической теневой томографией и т. д.

Математические модели и аспекты реализации цифровой томографии можно найти в [4]. Модели основаны на *преобразованиях Радона*, Абеля, Вейерштрасса и других.

Подповерхностное зондирование [5] – метод неразрушающего исследования объектов, погружённых в некоторую среду (т. е. находящихся под поверхностью раздела сред, у (или на) которой находится подповерхностный радар (ground penetrating radar)), заключающийся в излучении сигналов в сторону границы раздела сред и регистрации сигналов, отражённых от различных объектов или слоёв зондируемой среды. Основы георадиолокации см. в [6–8].

Различают импульсные подповерхностные радары и радары непрерывного действия.

Если радар находится над поверхностью земли, то между его излучающей и приёмной антеннами распространяются несколько волн:

- прямая воздушная волна между антеннами за счёт боковых лепестков их диаграмм направленности;
- прошедшая в грунт и отразившаяся от внутренней границы раздела слоёв грунта или от объекта, а затем вышедшая в воздух волна;
- прошедшая в грунт и отражённая от объекта волна;

– прямая грунтовая волна;
– преломлённая волна, прошедшая внутрь следующего слоя и через него дошедшая до приёмной антенны, –
которые в совокупности формируют временную зависимость регистрируемого сигнала. Из-за преломления волн на границе воздуха с более плотной средой приёмную антенну приходится относить на некоторое расстояние от передающей. Каждой паре положений приёмной и передающей антенн соответствует одна временная диаграмма, как в методе эхозондирования. Если переместить радар вдоль некоторой линии (профиля), то получим *георадарограмму*, на которой временные диаграммы построены друг за другом вдоль профиля. Так как сигнал получен сложением большого числа волн, возникающих от границ слоёв или объектов, не являющихся объектами интереса, то георадарограмма нуждается в обработке, в том числе очищении от помех, и интерпретации, т. е. в преобразовании от зависимости время–координата–уровень к зависимости глубина–координата–вещество (или свойство вещества).

3.3. Особенности регистрации сигналов и полей и характеристики методов дистанционного зондирования

Современные методы используют пространственную дискретизацию сигналов за счёт набора антенн и перевод в цифровую форму при помощи аналого-цифровых преобразователей. При этом должны соблюдаться классические требования, переформулированные применительно к двумерному случаю, т. е. к понятию пространственной частоты. Если рассмотреть ситуацию дифракции плоской электромагнитной волны на перпендикулярной волновому вектору одномерной дифракционной решётке с пространственным периодом d (ориентированной, например, вдоль оси x), то получим максимум первого порядка в дифракционной картине под углом θ к направлению падения: $d \sin\theta = \lambda$, откуда величина, обратная d , т. е. пространственная

частота, определяется $\nu = \frac{1}{d} = \frac{\sin \theta}{\lambda}$ и характеризует направление в пространстве, по которому удаляется дифрагированная волна или с которого приходит объектная волна. Таким образом, требуется обеспечить пространственный интервал дискретизации

вдоль оси x $\Delta x \leq \frac{1}{2\nu_{\max}} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{\max}}$, где θ_{\max} характеризует

направление на границу области пространства, которую установка должна захватить.

Одновременная регистрация с помощью большого числа антенн весьма дорогая, поэтому ищут способы уменьшить число антенных элементов за счёт *синтезирования апертуры* по той или иной схеме, например за счёт скрещенных посередине антенных решёток или Т-скрещенных решёток или за счёт *сканирования* имеющимся небольшим количеством антенн (перемещения их в пространстве или изменения ракурса). Формируемые таким образом голограммы имеют недостаток – абберации по сравнению с полной регистрацией в пространстве или на плоскости [9].

Основные отличительные характеристики методов дистанционного зондирования следующие.

Разрешающая способность метода получения изображений – это величина разноса (пространственного или углового) между двумя объектами, позволяющая при данных условиях эксперимента обеспечить принятие решения о том, что на изображении два отдельных объекта. Она определяется методом и схемой пространственной регистрации, а также размером апертуры, дальностью и частотными свойствами сигнала. Для радиоголографии, например в декартовой системе координат, различают **азимутальную разрешающую способность** (способность системы различить объекты, отличающиеся направлением, но находящиеся на одном расстоянии от центра установки), определяющуюся выражением $\delta_{az} = \lambda z/A$, где λ – длина волны, z – расстояние до объекта, A – размер физической или синтезированной апертуры, и **разрешающую способность по дальности** (способность системы различить объекты, находящиеся на разных расстояни-

ях от центра установки, но расположенные на одной пространственной частоте), определяющуюся формулой $\delta z = c/(2\Delta F)$, где c – скорость света, ΔF – общая ширина спектра сигнала или диапазон перестройки частоты. Для различения выбирают уровень принятия решений. На рис. 3.2 [10] приведены изображения двух маленьких шариков, разнесённых на расстояние 17 см (слева) и 15 см (справа). Они получены при апертуре $0,21 \times 0,21 \text{ м}^2$, дальности 4 м и ожидаемом разрешении 16 см. Видно, что если установить порог в 50 % от максимальной яркости, то на левом рисунке будут два отдельных изображения, а на правом – одно; если же порог понизить, то и по правому рисунку можно решить, что объектов два.

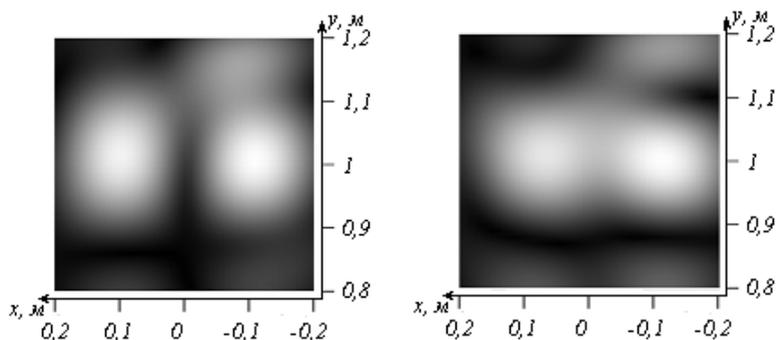


Рисунок 3.2. Изображения двух маленьких шариков

Объём отображаемой сцены – телесный угол или пара углов в перпендикулярных плоскостях, определяющих границу области, отображаемой системой с заданной точностью.

Размер апертуры – величина области регистрации (физически существующей или синтезированной апертуры).

Время регистрации кадра, время обработки и время индикации кадра характеризуют динамические свойства систем дистанционного зондирования, формирующих изображение. Для радиоголографии эти аспекты рассмотрены в [11].

3.4. Современные задачи дистанционного зондирования

При помощи дистанционного зондирования собирается информация:

- о Солнечной системе (для астрономии и сравнительной планетологии);
- об атмосфере Земли и других планет;
- изменении в облачности и развитии циклонов, образовании и движении ураганов и тайфунов;
- о морском дне;
- об изменении морских течений (для сокращения продолжительности морских перевозок);
- о поверхности Земли (подготовка карт землепользования, топографических карт) [12];
- лесных массивах и лесных пожарах (для лесоводства);
- сезонных изменениях снегового покрова в северном полушарии планеты (для климатических исследований);
- об изменениях (в том числе суточных) в состоянии ледового покрова в морях Арктики и Антарктики (для судоходства и климатологии);
- о природных пастбищах;
- сезонных изменениях растительного покрова;
- геологическом строении местности (типы пород, структурные и тектонические особенности местности) [13];
- месторождениях полезных ископаемых (в том числе по зависимости от ископаемых растительного покрова) (для энергетики и металлургии);
- местах и глубинах залегания строительных материалов (в том числе для выбора места для строительства);
- ходе горных открытых работ;
- сельскохозяйственном использовании земель (для контроля рекультивации);
- вулканической деятельности;
- промышленных авариях;
- возможных местах археологических находок;

– наличии живых существ под завалами (МЧС и антитеррористические операции) [10];

– качестве строительных конструкций (в том числе производится контроль дорожного покрытия);

– местонахождении определённых объектов [10].

Помимо непосредственно получения информации, изображений или повышения их качества, практика дистанционного зондирования ставит ряд радиофизических задач, например: задачу выбора типа сигнала и построения соответствующей схемы установки, обеспечивающей наилучшие условия «видения» [14], задачу анализа устойчивости метода дистанционного зондирования к помехам с конкретными статистическими свойствами [15].

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы элементы системы дистанционного зондирования?

2. С помощью каких сигналов можно построить систему дистанционного зондирования?

3. В чём отличие томографии от проекционного метода?

4. Какие голограммы – Фурье или Френеля – обрабатываются быстрее при прочих равных условиях?

5. Что представляет собой георадарограмма?

6. Что такое пространственная частота?

7. Как обеспечить выполнение требований теоремы о дискретизации при дистанционном зондировании?

8. Что лучше – полная апертура или скрещенные решётки?

9. Каким образом можно обеспечить лучшую разрешающую способность метода радиоголографии?

10. Каковы современные проблемы в области дистанционного зондирования?

11. *Каким образом можно увеличить апертуру?

12. *В чём отличие радиовидения от радиолокации?

13. *Каким образом регистрация не только амплитуды, но и фазы способствует построению трёхмерного изображения предмета?

14. *Как можно охватить большой диапазон пространственных частот?

Литература

1. Кондратенков, Г. С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования земли / Г. С. Кондратенков, А. Ю. Фролов. — М. : Радиотехника, 2005. — 368 с.

2. Артёмов, К. С., Артёмова Т. К., Гвоздарёв А. С. Особенности формирования изображений с помощью радиоголографии / К. С. Артемов, Т. К. Артемова, А. С. Гвоздарев // Современные проблемы оптимизации в инженерных приложениях (IWOPЕ-2005): труды I междунар. науч.-техн. конф. — Ярославль : ЯрГУ, 2005 (CD-ROM).

3. Томография // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Томография>.

4. Kak, A. C. Principles of Computerized Tomographic Imaging / A. Kak, M. Slaney // Society of Industrial and Applied Mathematics, 2001. — URL: <http://www.slaney.org/pct/pct-toc.html>.

5. Георадиолокация // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Георадиолокация>.

6. Вопросы подповерхностной радиолокации / под ред. А. Ю. Гринева. — М. : Радиотехника, 2005. — 416 с.

7. Изюмов, С. В. Теория и методы георадиолокации / С. В. Изюмов, С. В. Дручинин, А. С. Вознесенский. — М. : Горная книга ; Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2008. — 196 с.

8. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию / М. Л. Владов, А. В. Старовойтова. — М. : Изд-во МГУ, 2004. — 153 с.

9. Артёмова, Т. К. Аберрации когерентной системы радиовидения со скрещенными решётками / Т. К. Артемова // Техника и технология. — 2007. — № 3 — С. 59–65.

10. Анализ возможностей системы голографического радиовидения миллиметрового диапазона в задачах дистанционного

зондирования / Т. К. Артемова [и др.] // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: Доклады IV Всероссийской конференции, 30 июня–3июля 2009 г. — Муром, 2009. — С. 141–146.

11. Артёмов, К. С. Построение системы голографического радиовидения: вопросы быстродействия / К. С. Артемов, Т. К. Артемова // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2008. — № 2. — С. 71–77.

12. Воробьева, А. А. Дистанционное зондирование Земли / А. А. Воробьева. — СПб. : ИТМО, 2012. — URL : http://open.ifmo.ru/images/e/e6/141011_distancionnoezondirovanie.pdf.

13. Гайкович, К. П., Максимович Е. С., Бадеев В. А. Микроволновая подповерхностная голография сплошных диэлектрических объектов / К. П. Гайкович, Е. С. Максимович, В. А. Бадеев // Журнал радиоэлектроники. — 2012. — № 6. — URL : <http://jre.cplire.ru/alt/jun12/2/text.html>.

14. Сайт лаборатории радиоволновой интроскопии и подповерхностной радиолокации. — URL : <http://gpr.spbstu.ru/>.

15. Artemova, T. K. An analysis of intentional interference statistical properties influence on microwave imaging resolving power / Т. К. Artemova, А. S. Gvozdarev // 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). — 2017. P. 377—381.

Глава 4

Физика акустической связи и акустического дистанционного зондирования

4.1. Физика звука и характеристики его распространения в атмосфере

Акустические сигналы дают возможность организовывать связь и получать дистанционно информацию о различных объектах, как и радиосигналы. Однако в их использовании есть специфика, обусловленная отличием физических свойств акустических сигналов и особенностями прохождения таких сигналов через среды.

Акустическими сигналами являются **звуки** – колебательные движения упругой среды (жидкости, газа, твёрдого тела).

Одна из основных характеристик звука как сигнала – его спектр. По диапазонам частот акустические колебания делят, исходя из возможностей человека воспринимать их на слух:

на звук слышимого диапазона («звуковые частоты») – от 16 до 20000 Гц; для восприятия этих колебаний не требуются специальные устройства, они обрабатываются слуховым аппаратом человека;

инфразвук – на частотах ниже слышимых, т. е. до 16 Гц; существуют природные инфразвуки на частотах в тысячные доли Гц;

ультразвук (УЗ) – на частотах выше слышимых – от 20000 Гц и выше;

гиперзвук – на частотах до 10^9 – 10^{13} .

В остальном деление звуков по спектру такое же, как и электромагнитных колебаний.

Возможности распространения акустических колебаний определяются строением сред: для того чтобы волна могла распространяться в газе, длина свободного пробега молекул (или атомов) должна быть меньше длины волны; чтобы волна была способна распространяться в жидкости или твёрдом теле, удвоенное межмолекулярное расстояние должно быть меньше

длины волны. Поэтому в газе верхняя частотная граница гиперзвука составляет 10^9 Гц, а в твёрдых телах – 10^{13} Гц.

Распространение акустического сигнала в среде можно описать так. Если резко надавить на частицы среды в некотором месте, то давление передастся на соседние частицы, а возникшие силы упругости и инерции в прежнем месте будут способствовать формированию области пониженного давления и так далее. Таким образом, область повышенного давления перемещается в сторону удара, что вызывает смещение области разрежения, а ряд таких чередующихся областей распространяется в среде в виде волны. Каждая частица упругой среды в этом случае будет совершать колебательные движения [1].

Распространение акустического сигнала в среде описывается изменением звукового (акустического) давления.

Звуковое, или акустическое, давление в среде представляет собой разность между мгновенным значением давления в данной точке среды при наличии звуковых колебаний и статическим давлением в той же точке при их отсутствии. Например, если в толще жидкости на некоторой глубине имеется статическое давление P_0 , то при возникновении колебаний мгновенные значения давления будут колебаться около него $p(t)=P_0+\delta p(t)$, а среднее значение акустического давления $\delta p(t)$ будет равно нулю.

Максимальное значение переменного акустического давления (амплитуда) P может быть рассчитано через амплитуду смещения частиц среды A [2]:

$$P=2\pi f\rho cA,$$

где f – частота; c – скорость распространения звука; ρ – плотность среды. На расстоянии в половину длины волны ($\lambda/2$) значение звукового давления из положительного становится отрицательным. Единицы измерения звукового давления в системе СИ обычные – Па.

Акустические колебания являются в большинстве своём *продольными* (в жидкости и газе). Существуют возникающие за счёт деформации сдвига *поперечные* звуковые колебания – в твёрдых телах.

Физические характеристики звука следующие.

Колебательная (акустическая) скорость частиц среды – скорость, с которой движутся по отношению к среде в целом частицы, колеблющиеся около положения равновесия при прохождении звуковой волны. Она является переменной величиной и имеет амплитуду v , которая определяется произведением амплитуды смещения частиц A на угловую частоту ω : $v = A\omega$. Единица измерения – м/с.

Скорость звука в среде c .

В газах скорость звука определяется плотностью газа ρ и статическим атмосферным давлением p_{atm} [3]:

$$c = \sqrt{\gamma p_{atm} / \rho},$$

где $\gamma = C_p / C_v$ – показатель адиабаты, равный отношению теплоёмкостей газа при постоянном давлении C_p и при постоянном объёме C_v (от 1,28 до 1,668, у воздуха около 1,4 при нормальных условиях).

В жидкостях и твёрдых телах она определяется модулем упругости вещества E для соответствующего вида деформации (продольных колебаний, изгибных, крутильных и т. п.):

$$c = \sqrt{E / \rho}.$$

Скорость звука в воздухе составляет 330–340 м/с, в пресной воде – около 1430 м/с, в солёной воде – 1500 м/с.

Энергетической характеристикой звуковых волн является **интенсивность звука I** – средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, в единицу времени. Она определяется амплитудой звукового давления или колебательной скорости частиц, волновым сопротивлением среды, а также формой волны. Измеряется в СИ в Вт/м², а также в логарифмическом масштабе относительно пороговой чувствительности слухового аппарата человека $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² $N = 10 \lg(I/I_0)$.

Для плоской синусоидальной бегущей волны

$$I = P v / 2 = P^2 / (2 \rho c) = v^2 \rho c / 2.$$

В гармонической плоской бегущей волне интенсивность звука равна плотности энергии звуковой волны, умноженной

на скорость звука. В сферической бегущей волне интенсивность звука изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника [4].

При распространении в средах акустические сигналы постепенно *затухают* из-за расхождения, рассеяния и поглощения [5].

Затухание вследствие *расхождения* вызвано тем, что поток изучаемой звуковой энергии приходится на всё увеличивающуюся волновую поверхность, т. е. уменьшается интенсивность волны – поток, приходящийся на единицу площади. Эта компонента затухания отсутствует только для плоских волн.

Акустические сигналы испытывают два вида *рассеяния* в среде.

Во-первых, это *рассеяние на препятствиях и неоднородностях*, включая объекты интереса дистанционного акустического зондирования. Если размеры неоднородностей малы или сравнимы с длиной волны, то поток энергии в первоначальном направлении распространения звука уменьшается. Примерами рассеивателей, присутствующих практически всегда, являются:

– в газах: капли (например, капли воды в тумане), частицы твёрдых веществ (пыль, пыльца растений и другие аэрозоли);

– в жидкостях: пузырьки воздуха, мелкие животные, плавающие растения.

Во-вторых, это *рассеяние на границах сред* (воздух–почва, вода–донные грунты, вода–воздух и т. п.), которое, особенно в случае неровных и неоднородных границ, приводит к уменьшению интенсивности при отражении звука и прохождении его через границу, т. е. к изменению коэффициента отражения и прохождения волны, определяемого согласно законам геометрической акустики.

Третий эффект, вызывающий затухание сигнала – это *поглощение* звука – необратимый переход звуковой энергии в другие виды энергии (например, в теплоту). Для жидкостей и газов оно обусловлено в первую очередь вязкостью и теплопроводностью среды.

Затухание звука, обусловленное рассеянием и поглощением, описывается как убывание амплитуды колебаний с расстоянием r по экспоненциальному закону $\exp(-Sr)$ или как уменьшение

интенсивности звука – по закону $\exp(-2Sr)$, где S – коэффициент затухания [6].

Затухание колебаний характеризуется тремя величинами:

1) **время затухания колебаний** τ – время, в течение которого амплитуда уменьшается в $e = 2,718$ раз;

2) **коэффициент затухания** S отражает быстроту убывания амплитуды с течением времени: $S = 1/\tau$, измеряется в m^{-1} или в логарифмическом масштабе в дБ/м;

3) **логарифмический декремент** D характеризует уменьшение амплитуды за 1 цикл колебаний и равен отношению периода колебаний T ко времени затухания τ : $D = T/\tau$.

Среда распространения характеризуется с точки зрения передачи акустических сигналов **удельным акустическим сопротивлением** – произведением плотности среды на скорость распространения в ней звука:

$$Z = \rho c = \frac{P}{v}.$$

Это выражение можно рассматривать как акустический аналог закона Ома (давление играет роль напряжения, а колебательная скорость – силы тока цепи) [2]. Акустическое сопротивление измеряется в паскаль-секундах на метр (Па·с/м) и характеризует отношение амплитуды звукового давления в среде P к амплитуде колебательной скорости её частиц v . Чем больше акустическое сопротивление, тем выше степень сжатия и разрежения среды при данной амплитуде колебания частиц среды. Детали определения сопротивления сред см., например, в справочнике [3]. На преодоление акустического сопротивления тратится энергия источника, однако она передаётся в следующий слой среды. Таким образом осуществляется необратимый переход механической энергии колебательной системы источника звука в энергию звуковой волны.

Значение акустического сопротивления воздуха – около 420 Па·с/м, пресной воды – 1430 Па·с/м, солёной – 1550 Па·с/м, льда – 2,93 МПа·с/м, гранита – 10,7 МПа·с/м [3].

Дальность распространения звука в среде определяется:

а) **затуханием** звука, на которое оказывают влияние

– влажностью воздуха/среды – в сухом воздухе звук сильнее затухает,

– плотностью – в более плотной среде затухает слабее;

б) **рефракцией** (преломлением, искривлением пути звукового «луча»);

в) **рассеянием** и дифракцией на неоднородностях (создаёт *реверберацию* – появление эха).

Звуковые волны, как и электромагнитные, испытывают отражение и преломление на границе раздела сред. Законы отражения и преломления для звуковых волн такие же, как и для электромагнитных волн.

Угол падения равен углу отражения. Эффективность отражения зависит от различия в акустических сопротивлениях сред: звуковое давление в отражённой волне $p_{отр}$ связано со звуковым давлением в падающей волне $p_{пад}$ выражением [3]:

$$p_{отр} = p_{пад} \frac{Z_{над} - Z_{отр}}{Z_{над} + Z_{отр}} = p_{пад} \beta e^{i\psi},$$

где $Z_{пад}$ и $Z_{отр}$ – удельные акустические сопротивления сред, β – модуль коэффициента отражения по давлению, ψ – сдвиг фаз в волнах давления при отражении. Коэффициент отражения по интенсивности:

$$\alpha_{отр} = \left| \frac{P_{отр}}{P_{пад}} \right|^2 = \beta^2.$$

На границе воздушных масс с температурами 20°C (акустическое сопротивление 413 Па·с/м) и 0°C (сопротивление 428 Па·с/м) звуковая волна испытывает отражение по интенсивности $3 \cdot 10^{-6}$, а от пресной воды отражается 99,94 % всей энергии. Выражения для коэффициента прохождения и значения коэффициентов для различных жидкостей см. в [2].

Если акустическое сопротивление отражающей среды много больше сопротивления первичной среды (например, отражение от воды при падении из воздуха или ото дна при падении из водной толщии моря), то сдвиг фаз по давлению при отражении равен нулю и у границы раздела сред получается пучность звукового давления и узел скорости. Если же наоборот (например,

в процессе передаче звука в толще воды при отражении от верхней кромки воды на границе с воздухом), то сдвиг фаз для звукового давления будет равен 180° и у границы будет узел давления и пучность скорости колебаний.

Звуковые волны можно фокусировать, как и электромагнитные, на тех же принципах. Пассивные *фокусирующие устройства* – линзы, зеркала – изменяют акустическую длину пути $k\lambda$ таким образом, что преобразуют плоский или расходящийся волновой фронт в сходящийся. По сравнению с оптикой меньшую роль играют aberrации, большую – неравномерность амплитуды, а также поглощающие свойства веществ фокусирующего устройства и окружающей среды. В фокусе образуется фокальное пятно или фокальная полоса, размеры которых являются вместе с коэффициентами усиления по давлению, колебательной скорости и интенсивности волн техническими характеристиками фокусирующего устройства (о них см., например, [7, 8]). Существует возможность сконцентрировать звуковую волну одновременно с её генерацией, подобно тому как применение оптических устройств фокусирует луч лазера; для этого применяются *концентраторы* [8, 9].

4.2. Источники и приёмники звука, источники шумов, акустические антенны

Акустические сигналы естественного происхождения могут нести информацию о состоянии природных объектов и сред: морей, лесов, животных, атмосферы и т. п., а также являться шумовым фоном для приёма полезных сигналов.

Источниками естественных шумов могут служить, например:

- мелкие неоднородности – пузырьки и микроорганизмы – причина затягивания звуковых импульсов;
- удары волн на поверхности воды;
- шум прибора;
- шум перемещаемых частиц грунта (галька, песок);
- звуки, издаваемые морскими обитателями, как средство их коммуникации;

– переотражения от морских обитателей как от неоднородностей.

Характерные неоднородности: для УЗ – пузырьки газов, микроорганизмы (поглощают и рассеивают энергию звуковых волн), сравнимые с длиной волны, для звуковых НЧ волн – крупные объекты, дно, водная поверхность.

Звуки возбуждаются также:

– при обтекании твёрдых тел потоком воздуха за счёт образования и отрыва вихрей, например при обдувании ветром углов зданий, гребней морских волн и т. п.,

– взрывах и обвалах: за счёт резкого воздействия на среду возникает звук низких и инфразвуковых частот;

– работающими механизмами.

Итак, источниками звука могут быть любые явления, вызывающие возмущение упругой среды, т. е. местное отклонение давления от равновесного значения или локальные смещения частиц от положения равновесия.

В создаваемых искусственно излучателях звука для этой цели используются:

– колебания твёрдых тел (например, струны и деки музыкальных инструментов, диффузоры громкоговорителей и мембраны телефонов, пьезоэлектрические пластины);

– колебания ограниченных поверхностью некоторой формы объёмов воздушной или водной среды (органные трубы, свистки).

Колебания могут:

– возбуждаться ударом (струны рояля, колокола),

– поддерживаться за счёт постоянного потока газа (свистки),

– создаваться путём преобразования колебаний электрического тока в механические (электроакустические преобразователи).

Последний способ является наиболее практически ценным для построения исследовательской аппаратуры с целью применения в различных задачах акустического зондирования.

Возможности приёма сигналов конкретных частот определяются быстродействием регистрирующих сред в акустических приёмниках.

Излучатели, создающие плоскую волну, характеризуются **интенсивностью излучения**. Под этим понимается удельная мощность излучателя, т. е. излучаемая мощность звука, отнесённая к единице площади излучающей поверхности.

Акустические сигналы могут быть зарегистрированы приёмниками различного типа. **Приёмники звука** – устройства, предназначенные для обнаружения звуковых волн, измерения их характеристик (звукового давления, колебательного смещения, колебательной скорости, интенсивности и т. д.) и преобразования акустического сигнала в электрический с целью усиления, анализа, передачи на расстояние, записи. Самые распространённые – электроакустические преобразователи, которые позволяют при компактных размерах (малых $k\lambda$) воспроизводить временную и пространственную структуру звукового поля.

В зависимости от основной среды применения приёмники звука называются [10]:

- для воздушной среды – *микрофонами* [11],
- для водной – *гидрофонами* [12],
- для приёма звуковых волн в земной коре – *геофонами*;
- для приёма упругих волн на поверхности твёрдых тел – *виброметрами*.

Микрофоны и гидрофоны в большинстве случаев служат приёмниками звукового давления, однако существуют и приёмники градиента давления, приёмники колебательной скорости. Виброметры являются приёмниками колебательного смещения частиц, колебательной скорости частиц (*велосиметры*) или ускорения (*акселерометры*). Эти функциональные особенности микрофонов и гидрофонов обеспечиваются как конструкцией приёмного элемента, так и электронной схемой первичной обработки выходного сигнала приёмника-преобразователя.

Наряду с приёмниками, воспроизводящими временную структуру звукового сигнала, существуют приборы, воспринимающие усреднённые по времени характеристики волны (например, диск Рэлея и акустический радиометр) [13].

Основной элемент приёмника звука – *чувствительный элемент*. Такие элементы могут иметь форму стержней, цилиндров,

пластин, мембран, полых сфер, выполненных из пьезоэлектрических материалов (редко – из пьезокристаллов, чаще из пьезокерамики или пьезополимеров, пьезоплёнок или пьезополупроводниковых материалов) или из магнитострикционных материалов. Соответственно чувствительным элементом приёмников звука могут быть:

- **пьезоэлектрические** преобразователи,
- **магнитострикционные** преобразователи.

Существуют в зависимости от ширины рабочей полосы частот:

– **широкополосные** акустические приёмники, которые работают с постоянной чувствительностью в широкой области частот, лежащей ниже первой собственной частоты механической системы преобразовательного элемента, и используются, например, при приёме речи и музыки, при исследованиях в гидроакустике и геоакустике, изучении акустических шумов и т. п.;

– **узкополосные** приёмники, которые служат для приёма тональных сигналов с заданной частотой или узкополосных сигналов. Они обладают повышенной за счёт резонанса чувствительностью и применяются в режимах активной акустической локации в гидроакустике, дефектоскопии, медицинской диагностике, в контрольно-измерительных УЗ-устройствах.

Приёмники звука характеризуются рядом параметров [2].

Чувствительность холостого хода

$$\gamma_{xx} = E_{xx} / p \text{ (В/Па),}$$

где E_{xx} – уровень выходного электрического сигнала, определяемый как э. д. с. холостого хода чувствительного элемента, а p – уровень входного акустического сигнала, определяемый как действующее звуковое давление.

Удельная чувствительность, определяющая минимальное звуковое давление, которое приёмник может зарегистрировать при заданном отношении сигнал-собственные шумы приёмника при оптимальном согласовании со входом усилителя или индикатора:

$$\gamma_{y\delta} = \gamma_{xx} / \sqrt{|Z|} \text{ (Ом}^{1/2} \text{ В/Па),}$$

где Z – собственный электрический импеданс чувствительного элемента.

Существенное влияние на приём звука оказывают:

– неравномерность **частотной характеристики** (зависимости чувствительности приёмника от частоты, измеряется обычно в децибелах),

– **характеристика направленности** приёмного элемента как антенны – зависимость чувствительности от направления прихода звукового сигнала;

– **динамический диапазон** приёмника – область амплитуд сигнала, в которой чувствительность сохраняется неизменной (снизу ограничен собственными шумами приёмного элемента, электрических цепей и внешними шумами, а сверху – нелинейностью свойств приёмника).

Чувствительность приёмников звука различных частот отличается. Например, чувствительность микрофонов, принимающих колебания слышимого диапазона, изменяется от единиц до сотен мВ/Па (а их динамический диапазон – от единиц до десятков дБ), а в гидроакустической технике приёмники, выполненные из пьезокерамики, обладают чувствительностью от единиц мкВ/Па до мВ/Па и динамическим диапазоном порядка 100 дБ.

Пары «источник–приёмник» образуют вместе с соответствующим программным обеспечением *акустические радары* или *системы акустической связи*.

Несмотря на то что слуховые аппараты человека и животных также способны эффективно выполнять функции приёмника звука, в научных исследованиях, особенно дистанционных, они не используются.

Направленность приёмников звука определяется их волновыми размерами и конструктивными особенностями. Для получения острой НЧ-направленности приёма могут служить приёмники параметрического типа, основанные на использовании нелинейных свойств среды, в которой распространяется звук.

Рассмотрим характеристики акустических антенн [2].

Звуковое давление в дальней зоне в направлении единичного вектора \mathbf{i} на расстоянии r от антенны имеет вид сферической волны с амплитудой E :

$$p(r, \mathbf{u}) = E \frac{e^{i(kr - \omega t)}}{r} f(\mathbf{u}), \quad (4.11)$$

где $k=2\pi/\lambda$ – волновое число, а $f(\mathbf{u})$ – функция распределения по направлениям. При этом источник предполагается точечным.

Характеристика направленности антенны определяется давлением по направлению, характеризуемому вектором \mathbf{u} , по сравнению с давлением по направлению, характеризуемому некоторым вектором \mathbf{u}_0 :

$$D(\mathbf{u}) = \frac{p(r, \mathbf{u})}{p(r, \mathbf{u}_0)} = \frac{f(\mathbf{u})}{f(\mathbf{u}_0)} \quad (4.12)$$

и может быть представлена в виде

$$D(\mathbf{u}) = R(\mathbf{u})e^{i \arg D(\mathbf{u})},$$

где $R(\mathbf{u})$ – **амплитудная диаграмма направленности**, которая характеризует нормированное на давление по выбранному направлению (максимального излучения) угловое распределение звукового давления, создаваемого антенной, $\arg D(\mathbf{u})$ – **фазовая диаграмма направленности**.

Ширина ДН – диапазон направлений, в пределах которого квадрат давления уменьшается в 2 раза, т. е. определяется по уровню 0,707 от максимума.

Излучение реальных акустических антенн $p(\mathbf{u})$ создаётся каждой точкой их поверхности или (в случае антенных решёток) каждым излучающим элементом, развивающими давление $p_q(\mathbf{u})$, поэтому в дальней зоне

$$p(\mathbf{u}) = \sum_{q=1}^n p_q(\mathbf{u}). \quad (4.13)$$

Чтобы получить выражение, аналогичное связи напряжённости электрического поля и распределения комплексных

амплитуд тока по поверхности антенны, т. е. $p(\mathbf{u}) = \sum_{q=1}^n w_q p'_q(\mathbf{u})$

требуется ввести величину $p'_q(\mathbf{u}) = p_q(\mathbf{u}) / w_q$, имеющую смысл акустического сопротивления, причём w_q – нормальная составляющая колебательной скорости q -й точки v_q . Тогда, нормируя распределение колебательных скоростей по антенне на величину

скорости w_1 в некоторой точке приведения (зачастую в максимуме или в начале антенны), получим **комплексный коэффициент амплитудно-фазового распределения (АФР) колебательной скорости** элемента с номером q :

$$\frac{w_q}{w_1} = A_q = a_q e^{i\alpha_q}. \quad (4.14)$$

Его модуль a_q определяет амплитудное распределение, а аргумент α_q — фазовое. Тогда $p(\mathbf{u}) = w_1 \sum_{q=1}^n A_q p'_q(\mathbf{u})$ и, подобно тому как АФР тока создаёт ДН электрических антенн, АФР колебательной скорости определяет ДН акустических:

$$D(\mathbf{u}) = \frac{\sum_{q=1}^n A_q p'_q(\mathbf{u})}{\sum_{q=1}^n A_q p'_q(\mathbf{u}_0)}. \quad (4.15)$$

Антенны сравнивают друг с другом по **коэффициенту концентрации**:

$$K(\mathbf{u}_0) = \frac{4\pi}{\int_{\Omega} R^2(\mathbf{u}) d\Omega}. \quad (4.16)$$

Это аналог коэффициента направленного действия радиоантенн:

$$K(\mathbf{u}) = K(\mathbf{u}_0) R^2(\mathbf{u}). \quad (4.17)$$

Электроакустический к. п. д. — отношение излучаемой активной акустической мощности к активной электрической мощности, подводимой к антенне.

Сопротивление излучения:

$$Z_{изл} = \frac{2P}{v_1^2} = R_s - iX_s. \quad (4.18)$$

Очень хороший обзор акустических антенн и требований к ним со стороны различных приложений представлен в [14].

4.3. Содары и акустическое зондирование атмосферы

Акустический радар [15] называется «**содар**», что является сокращением от **SONic Detection And Ranging** (англ.). Содар – излучатель, приёмник акустических колебаний и радар, устанавливающий местоположение источника звука или объекта. Он посылает звуковые колебания в атмосферу и принимает их после отражения от объектов или слоев с различной плотностью воздуха и скоростью движения.

Основные применения содаров следующие: во-первых, в метеорологии для предсказаний поведения ветров и возможных выбросов в атмосферу в зависимости от высоты, а также для контроля вихревых потоков самолётов. Анализ принятого звукового сигнала позволяет судить о скорости и направлении ветра на различных высотах от земли и турбулентных неоднородностях нижнего слоя атмосферы. Примером устройства такого назначения является ветровой профилометр AQ500 [16]. Основной параметр устройства – *глубина зондирования атмосферы* – нескольких сотен метров. Во-вторых, определение условий для работы ветряных источников электроэнергии. При этом рабочая область – область интереса (область турбулентных течений воздуха, где нижние слои тормозят верхние): до высот 100 м.

4.4. Физика и характеристики распространение звука в водной среде

Скорость распространения звука в жидкости изменяется с глубиной, причём изменения зависят от времени года и дня, глубины водоёма и ряда других причин.

Создаётся различное вертикальное распределение скорости звука.

Водная рефракция искривляет ход звуковых волн в сторону холодных слоёв жидкости:

– летом – ко дну водоёма (будет отражение ото дна с сильным ослаблением сигнала),

– зимой – к границе с воздухом (будет отражение от неё, оно меньше, чем ото дна, поэтому зимой связь в воде работает на больших расстояниях).

Если источник излучает монохроматический звук, то его траектория летом представляет собой параболу ветвями вверх, вершина которой лежит на глубине несколько км, а расстояние между излучателем и находящимся на той же глубине приёмником – 55–65 км. Далее эта форма повторяется.

Если сигнал имеет более сложный спектр, то для каждой из гармонических составляющих имеется своя траектория. Есть расстояния, где их интерференция образует минимумы (области молчания) и максимумы (где возможен уверенный приём).

Физические характеристики морских и океанических жидкостей см. в [17], модели рефракции, вертикального градиента скорости – в [2].

4.5. Подводный волновой канал и акустическая гидросвязь

В определённых климатических условиях возникает **подводный звуковой канал (ПЗК**, англ. наименование – **the SOFAR channel** – Sound Fixing and Ranging channel) [18]. Он обусловлен наличием слоя жидкости, в котором скорость звука минимальна: выше него она растёт, т. к. растёт температура воды, а ниже – растёт из-за роста плотности воды с глубиной (рис. 4.1 [19]). Такой слой называется **осью ПЗК**. Отклонившись из-за рефракции от оси канала, волна стремится в него вернуться. Образуется естественный акустический волновод.

Структура волны, как описывалось ранее, будет повторяться из-за многократного «переотражения», причём на глубине ПЗК зоны молчания и зоны уверенной связи будут чередоваться.

ПЗК применяется:

– во-первых, для организации сверхдальней подводной связи, причём связь дальняя, но не везде «ловится». Дальность связи в море: в отсутствие ПЗК – 55–65 км, при наличии ПЗК – сотни км;

- во-вторых, для анализа распределения температуры в океане по данным связи через такой канал (*акустическая томография*);
- в-третьих, для анализа состояния океана для различных задач, например чтобы понять, могли ли погодные условия повлиять на управляемость самолёта Малазийских авиалиний, потерпевшего катастрофу над океаном [18].

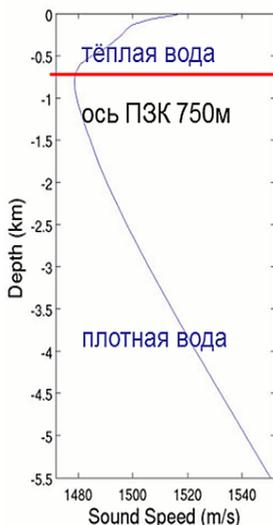


Рисунок 4.1. Ось подводного звукового канала [18]

- Сама по себе акустическая гидросвязь применяется:
- и для связи судов и подводных лодок друг с другом,
 - восприятия звука во время плавания (синхронное плавание или другие команды в бассейне),
 - связи с морскими животными.

4.6. Устройства и возможности гидроакустической локации

Гидроакустическая локация основана на анализе сигналов, рассеянных на интересующих неоднородностях. Она применяется:

- для морской навигации (определение направления приходящих акустических сигналов или локализация переотражателей);
- рыбопоисковой разведки (обнаружение рыб, классификация рыб в качестве целей);
- океанологических исследований (дна, в том числе эхолотами, состава воды, течений, обитателей).

Как в обычной радиолокации, рассеяние на объектах делят на зеркальное отражение и диффузное рассеяние. Следующие величины [2] характеризуют отражение объектами акустических волн.

Коэффициент отражения – отношение звуковых давлений зеркально отраженной от объекта компоненты и падающей волны

Эффективный коэффициент отражения – отношение звуковых давлений принятой P_r и падающей P_i волн на фиксированном расстоянии от объекта:

$$r_3 = \frac{P_r}{P_i}.$$

Потери при отражении $L_3 = 20 \lg r_3 = 20 \lg \frac{P_r}{P_i}$.

Коэффициент рассеяния – отношение мощности P_s , рассеянной единицей площади объекта, к интенсивности падающей волны I_i :

$$r_s = \frac{P_s}{I_i S_s},$$

где S_i – площадь объекта, с которой в точку приёма одновременно приходят рассеянные волны. Это аналог эффективной поверхности рассеяния.

Сила донного рассеяния: $L_s = 10 \lg r_s$.

Основная характеристика объектов – **индикатриса рассеяния** (или диаграмма рассеяния) – характеризует угловую зависи-

мость коэффициента рассеяния $r_s(\theta)$ при фиксированном направлении падающей волны:

$$D_s(\theta) = \frac{r_s(\theta)}{r_s(\theta_i)},$$

где $r_s(\theta_i)$ – коэффициент рассеяния по направлению θ_i зеркального отражения.

Объекты оставляют «следы» в принятом радиолокационном сигнале, так называемые «сигнатуры» («подписи»), по которым их и опознают.

4.7. Дистанционное зондирование морей и океанов: акустическая томография и картирование температур и скоростей течений

Акустическая томография [20] – измерение (картирование) температур и скоростей течений в больших областях океана. Измеряют с высокой точностью время распространения сигнала между излучателем и приёмником звуковых волн, разнесённых на расстояния от 100 до 5000 км (т. е. «на просвет»). Зная координаты излучателя и приёмника (и фиксируя расстояние между ними), можно сравнивать температуры воды по средней на путь распространения скорости звука. Особенностью метода является то, что получают карты усреднённых (т. е. без учёта волновой активности океана) абсолютных скоростей течений и относительных температур.

Чувствительность метода: изменению температуры в 1 градус Цельсия соответствует изменение среднепутевой скорости звука в 4 м/с.

Точность определения времени с помощью GPS – 1 мс.

Сигналы – шумоподобные длинные (боле 30 с) коды (М-последовательности), т. к. из-за больших расстояний ОСШ меньше 0 дБ, и только так и можно добиться передачи информации.

Один из примеров применения метода – карта скоростей течений в северной части Атлантического океана на глубине 300 м

(рис. 4.2), которую построили, когда исследовали Гольфстрим после того, как он изменил свои свойства [20].

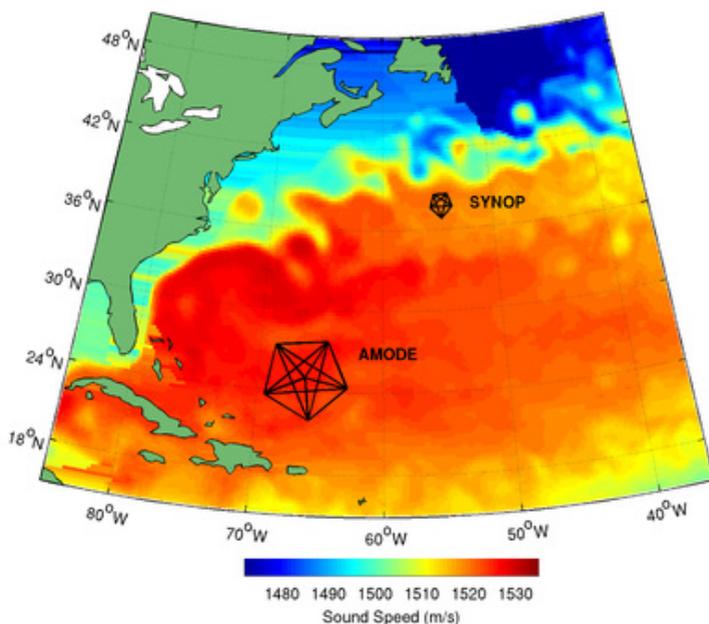


Рис. 4.2. Результаты акустической термографии [20]

Ещё одно применение называется **акустической термометрией** – это картирование температур. Пример такого масштабного исследования – картирование абсолютных температур северной части Тихого океана [20]: передатчик на Гавайях, 10 приёмников на расстоянии 4000 км, 10 лет наблюдений передачи сигналов с центральной частотой 75 Гц. Мощность источника 250 Вт, что соответствовало 195 дБ относительно 1 мкПа/м. Точность – 0,02 градуса.

Вопросы для самоконтроля

1. От каких факторов зависит амплитуда колебаний акустического давления в звуковой волне?
2. Чем определяется скорость звука в среде?
3. Каковы причины затухания звуковых волн?
4. В какой из сред – в сухом воздухе или в морской воде – дальность связи больше?
5. Каким образом изменяется фаза звуковой волны при отражении ото дна? От поверхности раздела вода–воздух?
6. Перечислите типичные источники акустических шумов.
7. На каких принципах строят акустические приёмники?
8. Какими характеристиками описываются акустические антенны?
9. Опишите работу акустического радара.
10. На какой глубине под поверхностью воды располагается ось подводного звукового канала?
11. Какая величина является сигнатурой объектов акустической локации?
12. *В какое время года сигналы будут передаваться в воде на наибольшее расстояние и почему?
13. *Почему в акустической томографии используются именно шумоподобные сигналы?
14. *За счёт чего достигается высокая точность изменения скорости течений и температуры сред в акустической томографии?
15. *В чём состоит сходство и различие акустического и радио- дистанционного зондирования?
16. *Из каких материалов могут быть выполнены акустические антенны и есть ли при этом отличие от электромагнитных антенн?
17. *Какие сигналы – радио- или акустические – обеспечивают преимущество в характеристиках системы связи при распространении в воздухе? В воде?

Литература

1. Звук // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Звук>.
2. Карлик, Я. С. Рыбопромысловая гидроакустика / Я. С. Карлик, Ю. В. Марапулец. — Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2004. — 260 с.
3. Акустика: Справочник / А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков, В. И. Шоров ; под ред. М. А. Сапожкова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Радио и связь, 1989. — 336 с.
4. Интенсивность звука // Физическая энциклопедия. — URL : http://femto.com.ua/articles/part_1/1379.html.
5. Затухание звука // Физическая энциклопедия. — URL : http://femto.com.ua/articles/part_1/1207.html.
6. Поглощение звука // Физическая энциклопедия. — URL : http://femto.com.ua/articles/part_2/2919.html.
7. Фокусировка звука // Физическая энциклопедия. — URL : http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4341.html.
8. Каневский, И. Н. Фокусировка звуковых и ультразвуковых волн / И. Н. Каневский. — М., 1977.
9. Концентратор // Физическая энциклопедия. — URL : http://femto.com.ua/articles/part_1/1754.html.
10. Приемники звука // Физическая энциклопедия. — URL : http://femto.com.ua/articles/part_2/3081.html.
11. Микрофон // Физическая энциклопедия. — URL : http://femto.com.ua/articles/part_1/2287.html.
12. Гидрофон // Физическая энциклопедия. — URL : http://femto.com.ua/articles/part_1/0780.html.
13. Звук // Физическая энциклопедия. — URL : http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1222.html.
14. Ульянов, Ю. Н. Звуковые антенны для акустического и радиоакустического зондирования / Ю. Н. Ульянов, С. В. Бутакова // Радіоелектронні і комп'ютерні системи (Харьків, "ХАІ"). — 2003.— № 4. — С. 83–89. — URL : <https://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/REKS/2003/REKS403/pdf/Ulyanov.pdf>.
15. SODAR (англ.) // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/SODAR>.

16. Ветровой профилемер // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Ветровой_профилемер.

17. Доронин, Ю. П. Физика океана / Ю. П. Доронин. — СПб., 2000.

18. SOFAR channel (англ.) // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/SOFAR_channel.

19. Бреховских, Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана / Л. М. Бреховских, Ю. П. Лысанов. — Л., 1982.

20. Ocean acoustic tomography (англ.) // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_acoustic_tomography.

Глава 5

Фрактальная радиофизика и современные методы обработки сигналов

5.1. Понятие фрактала

Фрактал – множество, обладающее свойством *самоподобия* (объект, в точности или приближённо совпадающий с частью себя самого по форме) [1]. Самоподобие – существенное свойство фрактальных объектов (в том числе сигналов), позволяющее построить эффективные способы обработки, т. к. объект и его части характеризуются, во-первых, повторяемой формой, во-вторых, масштабом этого повторения.

Множество фрактальных объектов можно наблюдать в природе (см. пионерскую книгу Б. Мандельброта [2]): это стебли, корни и плоды растений, ландшафты, пламя, облака и турбулентности жидкостей и атмосферы. У растений, например, часто встречается ситуация ветвления стебля на равные части, в том числе на две. Такая структура воспроизводит себя в более мелком масштабе – ствол дерева делится на две крупных ветви, крупные ветви – на две более мелких каждая и так далее, вплоть до уровня листьев. Для того чтобы описать такой объект, достаточно описать алгоритм деления ветви старшего уровня на два младших и указать масштаб и число повторений. Математически это означает, что объект можно воспроизвести с помощью рекурсии, если взять за исходную некоторую геометрическую форму x и применить к ней в цикле из конечного числа повторений один и тот же *алгоритм преобразования* $f(x, m)$ с некоторым *масштабом* m : $f(f(f(x, m)))$ и т. п. [3]. Некоторые учёные различают результат конечного числа итераций n – **префрактал n -го порядка** – и бесконечного – **фрактал**, но т. к. на практике бесконечное число итераций недостижимо, а все конечные дают сходные полезные свойства, мы такого различия делать не будем.

Одна из количественных характеристик фракталов – размерность. Она, например, может служить в качестве признака

для распознавания фрактальных объектов. Рассмотрим следующие ситуации [4].

Разделим отрезок прямой на N равных частей. Каждая из них в N раз короче исходного отрезка, т. е. имеет относительный масштаб $r = 1/N$. Произведение $Nr = 1$.

Аналогично разделим квадрат на N равных квадратов, каждый из которых будет иметь относительный масштаб по одной из сторон $r = 1/\sqrt{N}$, а площадь в $N = 1/r^2$ раз меньшую, чем у исходного квадрата. Произведение $Nr^2 = 1$.

Наконец разделим куб на N равных кубов с масштабом по одной из сторон $r = 1/\sqrt[3]{N}$ и объёмом в $N = 1/r^3$ меньшим, чем у исходного куба. Произведение $Nr^3 = 1$.

Если теперь обобщить эту запись, обозначив размерность объекта d (1 – для отрезка, 2 – для квадрата и 3 – для куба), то получим: $Nr^d = 1$. Взяв логарифм по любому удобному основанию (например, десятичный) от обеих частей равенства, получим выражение для вычисления **размерности по Хаусдорфу**:

$$d = \frac{\lg(N)}{\lg(1/r)}.$$

Свойство самоподобия приводит к интересной особенности объектов: их размерность d может быть дробной, т. е. строго их нельзя назвать, например, двумерными или трёхмерными. С увеличением порядка итерации ломаная увеличивается в длину и, как следствие, заполняет поверхность, на которой она находится, поэтому их ещё называют **кривыми, заполняющими поверхность или объём**.

Рассмотрим четыре простых фрактальных объекта.

Кривая Коха [4] строится следующим образом. Стартовый объект – отрезок длины, принятой за 1 (см. рис. 5.1, а). Применяем к нему следующий алгоритм преобразования: заменяем его среднюю треть двумя отрезками, образующими боковые стороны равнобедренного треугольника, т. е. поднимаем её домиком (в классическом варианте – с углом при основании 60° , т. е. по шаблону равностороннего треугольника). Результат приведён на рис. 5.1, б. В получившемся объекте $N = 4$ равных от-

резка, длина которых равна $1/3$ длины исходного, т. е. масштаб $r = 1/3$. Тогда размерность $d_1 = \lg(4)/\lg(3) = 1,2618$, т. е. больше единицы (соответствующей линии) и меньше 2 (соответствующей плоскости). Результаты второй и третьей итераций приведены на рис. 5.1 в и г. Они будут иметь свои размерности, отличающиеся от d_1 , благодаря другому числу элементов, подобных исходному, и другому более мелкому масштабу.



Рисунок 5.1. Стартовый объект и результаты первой (б), второй (в) и третьей (г) итераций при синтезе кривой Коха

Салфетка Серпинского [4] строится с исходным объектом в виде треугольника или прямоугольника. Пример синтеза для треугольника приведён на рис. 5.2. Алгоритм преобразования отмечает середины сторон треугольника, соединяет их отрезками прямых, и получившийся перевернутый треугольник удаляется из исходной фигуры. Такое членение даёт $N = 4$ меньших копии исходного чёрного треугольника. Стороны их имеют масштаб $r = 1/2$. Размерность получившегося объекта $d_1 = \lg(3)/\lg(2) = 1,585$.

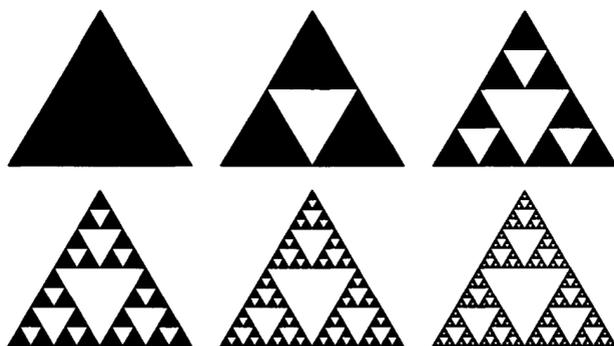


Рисунок 5.2. Построение ковра Серпинского со стартовым треугольником

Губка Менгера [4] строится с помощью исходного объекта в виде куба (рис. 5.3): он делится на 27 равных кубиков и вынимаются его центральная часть и прилегающие к ней по всем граням кубики. Итого остаются $N = 20$ кубиков масштаба $r = 1/3$, т. е. размерность объекта после первой итерации $d_1 = \lg(20)/\lg(3) = 2,7268$.



Рисунок 5.3. Построение губки Менгера

Канторова пыль [4] – один из исторически первых фрактальных объектов. Строится путём выбрасывания середины единичного отрезка (рис. 5.4). После первой итерации получаем $N = 2$ новых отрезка масштаба $r = 1/3$. Размерность объекта $d_1 = \lg(2)/\lg(3) = 0,6309$.

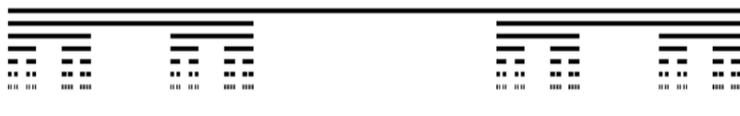


Рисунок 5.4. Построение канторовой пыли

Сумма длин интервалов, удалённых при построении фрактала Коха при бесконечном числе итераций, равна 1. Аналогично сумма площадей, удалённых из оригинала в ковре Серпинского, равна площади оригинала и т. п., то есть ковёр – область плоскости, фактически заполненная одномерной линией. Это полезное на практике свойство.

Фракталы можно разделить на **регулярные (детерминированные)**, например кривая Коха) и **нерегулярные (стохастические)**, например траектория броуновского движения частицы). Последние обладают **статистическим самоподобием**: если выделить участки траектории, то полученный усреднением

участок будет подобен целой траектории; а получить их можно, изменяя на каждом шаге случайным образом параметры алгоритма преобразования.

В **однородных** фракталах точки равноправны, в **неодродных (мультифракталах)** – имеют разный вес, т. е. области фрактала имеют разную вероятность заселения; так как при этом фрактальные размерности совпадают, то для их различения нужны другие характеристики. Пример мультифрактала – канторова пыль, при генерации которой исходное число точек распределяется преимущественно на один из двух оставшихся участков; более плотно заселенный будет выглядеть более ярко, оставшийся – постепенно исчезающим.

Фракталы могут генерироваться с постоянным коэффициентом самоподобия (например, канторова пыль – каждый раз выбрасывается треть отрезка), а могут – с переменным (если из отрезка удалять $1/3$, на следующей итерации $1/9$, затем $1/81$ и т. д., т. е. $(1/3)^{2^k}$ на k -й итерации). Вторые фракталы называют **толстыми**: в пределе длина остающихся отрезков или площадь фигур будет ненулевой в отличие от настоящей пыли. Для их характеристики используют *показатели скейлинга*, например показатель степенной аппроксимации $\mu(\varepsilon) = C\varepsilon^\beta$ суммарной длины всех пустот, длина которых не превышает ε , при $\varepsilon \rightarrow 0$ (для приведённого примера $\beta = 1$) [5].

Фрактальные структуры могут быть построены при помощи отображений точек одних множеств на другие, при этом отображения могут быть как вещественными, так и комплексными [3, 4]. Если рассмотреть формирование, например салфетки Серпинского, то исходный треугольник с единичной стороной и координатами вершин $(0,0)$, $(1,0)$ и $(1/2, \sqrt{3}/2)$ на комплексной плоскости переводится в три меньших следующими преобразованиями:

$$f_1(z) = z/2 \text{ (левый нижний – просто сжимается);}$$

$$f_2(z) = z/2 + 1/2 \text{ (сжатие и сдвиг вдоль вещественной оси);}$$

$f_3(z) = z/2 + 1/4 + i\sqrt{3}/4$ (сжатие и сдвиг вдоль левой стороны исходного треугольника). Это линейные преобразования, каждое из которых характеризуется парой коэффициентов: первый

(1/2) – коэффициент масштаба, второй – величина сдвига. Эти коэффициенты и общий вид функций кодируют преобразование: из любого равностороннего треугольника после скольких-то итераций получим салфетку Серпинского нужного порядка. Если вместо хранения изображения салфетки хранить функцию и коэффициенты, то можно осуществить сжатие информации. Более того, фрактальный объект является аттрактором системы таких итерируемых функций и может быть получен вторым способом – при случайном выборе последовательности преобразований [3]. Для построения ломаной Коха используется и преобразование поворота, тоже относящееся к аффинным. Для простых фракталов аффинные преобразования ищутся просто, для сложных – с трудом, на это уходит машинное время при фрактальном сжатии.

Фракталы могут широко применяться в различных областях – от естественных наук до инфометрии и экономики. В радиофизике с фракталами связаны следующие задачи:

- разработка антенн с фрактальной геометрией;
 - исследование пространственно-временного хаоса в системах различной физической природы;
 - создание новых методов анализа и статистической обработки сигналов (в том числе изображений и видео) на основе их фрактального анализа;
 - исследование рассеяния на объектах фрактальной геометрии.
- Большое количество примеров приведено в [6, 7].

5.2 Фрактальные свойства различных сигналов и методы фрактальной обработки информации различного назначения

Фрактальный анализ устанавливает, в какой степени в поведении сигналов проявляются фрактальные признаки. В первую очередь строят в двойном логарифмическом масштабе зависимости дельта-дисперсии и структурной функции от приращений времени. Если они хорошо аппроксимируются прямой в боль-

шом диапазоне изменения аргументов, то сигнал фрактален, а тангенс угла наклона определяет показатель Херста (при анализе структурной функции) или его удвоенное значение (при анализе дельта-дисперсии). Фрактальная размерность находится как $D = 2 - H$. Интервал, в пределах которого аппроксимация хорошая, определяет ширину области скейлинга. При этом считается, что фрактальный случайный процесс может описываться моделью обобщённого броуновского движения (ОБД) с гауссовской статистикой, с дельта-дисперсией

$$E[(X(t_2) - X(t_1))^2] = \sigma^2 |t_2 - t_1|^{2H}$$

и структурной функций первого порядка (математическим ожиданием приращения сигнала)

$$E[|X(t_2) - X(t_1)|] = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma (t_2 - t_1)^H,$$

где параметр Херста ($0 < H < 1$) характеризует степень изрезанности графика временного ряда: при малых H он изрезан, при больших – почти гладкий [5]. Настоящее броуновское движение имеет $H = 1/2$. Параметр Херста показывает также характер влияния прошлых значений на будущее: при $H > 1/2$ с ростом в прошлом продолжится рост в будущем, при $H < 1/2$ в будущем будет убывание значений. Он связан с показателем α в степенном законе аппроксимации $P(f) \propto f^\alpha$ спектральной плотности мощности стохастических сигналов ($\alpha = 0$ у белого шума, $\alpha = 1$ у розового, $\alpha = 2$ у коричневого, $\alpha = 3$ у чёрного): $\alpha = 2H + 1$. Это позволяет устанавливать фрактальность (и принадлежность к броуновским моделям, $0 < H < 1$) по спектру, если $1 < \alpha < 3$.

Для изображений, описываемых в системе координат (x, y) величиной X , используют двумерную модель ОБД [5] с додисперсией $\sigma^2 (\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2})^{2H}$, зависящей от смещения от центра координат $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$; анализ ведут по структурной функции

$$S_n = \frac{1}{(N-k)^2} \sum_{i=1}^{N-k} \sum_{j=1}^{N-k} (|X_{i+k,j} - X_{i,j}| + |X_{i,j+k} - X_{i,j}|),$$

где n – целочисленное смещение точки, в которой определяется величина S . Фрактальная размерность изображения $D = 3 - H$.

У фрактальных изображений линии уровня – фрактальные с размерностью $D = 2 - H$.

Для мультифракталов определяют целый спектр фрактальных размерностей, а мультифрактальный анализ – разложение исходного множества по множествам однородных фракталов с чётко выраженной фрактальной размерностью (см., например, [5]).

Фрактальные особенности были выявлены у различных одномерных и многомерных сигналов, в том числе в структуре магнитосферы Солнца [8], в тонкой структуре сигналов, рассеянных на различных текстурах, в том числе различных подстилающих поверхностях и поверхностях шероховатых объектов [7], у сигналов электрокардиограммы [9] и электроэнцефалограммы, в мелкомасштабной структуре изображений природных и урбанистических ландшафтов [10], в экономических явлениях, например колебаниях курсов валют [3, 4]. Это привело к развитию такой области радиофизики, как фрактальная обработка сигналов, временных рядов (последовательно во времени зафиксированных значений различных величин) или информационных потоков [11]. Фрактальные размерности ряда природных объектов были определены в [12]. Ведутся работы по связи фрактальных размерностей различных сигналов и структур и их физических свойств, в том числе для антенн есть попытки связать размерность с основной резонансной частотой или эффективностью.

Фрактальный анализ сигналов подразумевает целый ряд задач.

Во-первых, это задачи фрактального сжатия (кодирования) [13]. Особенность фрактального сжатия – очень высокий коэффициент сжатия при сохранении визуально высокого качества и отличие времён кодирования (большое) и декодирования (быстрое).

Во-вторых, задачи распознавания сигнатур, объектов и текстур. При этом определяется ряд фрактальных признаков, включая фрактальную размерность сигнала или изображения, и далее распознавание ведётся стандартными методами, например нейронной сетью. Подробно основа методов разобрана в [14, 15]. Особенность именно фрактальных методов – работоспособность

в условиях помех и на малоконтрастных образцах. Одно из применений – дистанционное зондирование Земли из космоса [16].

В-третьих, это анализ поведения нелинейных систем, в том числе так называемого динамического хаоса. С основными формулировками задач можно ознакомиться, например, в [17].

5.3. Фрактальные антенны

Для первого знакомства с фрактальными антеннами рекомендуем обзорные статьи В. И. Слюсара [18–20], где автор вводит в проблематику.

Фрактальные антенны – антенны, имеющие фрактальную геометрию. В качестве излучающего элемента берётся и запитывается в некоторой «точке» проводник в форме фрактала некоторого порядка (например, в форме ковра Серпинского у печатных антенн Серпинского или в форме фрактала Коха в монополе Коха) или в форме их комбинаций (два плеча диполя Коха выполняются как ломаные Коха или в антенне «снежинка Коха» ломаные Коха заменяют собой стороны равностороннего треугольника, образуя замкнутую линию).

Фрактальная геометрия обеспечивает ряд свойств антенн.

Во-первых, они оказываются компактнее, чем обычные проволочные или печатные антенны, и при меньших габаритах области пространства, в которую они вписываются, обладают практически таким же коэффициентом усиления. Это свойство объясняется тем, что характеристики антенны в первую очередь определяются амплитудно-фазовым распределением тока по ней и чем больше относительно длины волны физический путь тока с увеличением длины фрактальной линии при переходе от исходного отрезка к результатам всё более высоких порядков итерации, тем более длинной эквивалентной обычной антенной может быть смоделирована фрактальная антенна. С каждой итерацией растёт длина проводящих путей и понижается рабочая частота. Но нет смысла стремиться достигнуть очень высоких порядков. Это обусловлено двумя причинами: замедлением роста длины с увеличением порядка и необходимостью переходить

на более тонкий провод, чтобы выполнить все необходимые изгибы, что влечёт за собой рост сопротивления и падение эффективности антенны. Кроме того, проявляет себя и эффект лакуарности: на мелких деталях волна срывается и вместо следования изгибам провода попадает на следующий прямолинейный участок по воздуху. Поэтому на практике 5-6 порядки – это предел, а максимальный скачок коэффициента усиления достигается на первой итерации. Яркий пример компактности – антенна 2,4 ГГц размером $3,7 \times 2$ мм [21].

Во-вторых, это многодиапазонные антенны. Это свойство обусловлено наличием во фрактальной геометрии разных эквивалентных длин. Например, в линии Коха это и длина исходного отрезка, и его треть, и $1/9$ часть. Поэтому общий диапазон рабочих частот шире, чем у простой антенны. Однако фрактальные антенны остаются узкополосными для каждой конкретной рабочей частоты.

В-третьих, при создании рамочных антенн (например, для нужд радиопеленгации или частотного мониторинга) с помощью фрактальной геометрии можно добиться увеличения сопротивления антенны по сравнению с традиционно низким значением на частотах ниже резонансной и тем самым облегчить решение задачи согласования её с фидером [18].

В-четвёртых, при построении антенных решёток из антенн с фрактальной геометрией можно добиться уменьшения расхода материалов и массы антенны, что существенно для использования её в современных компактных мобильных устройствах.

В-пятых, именно фрактальные антенны могут обеспечить нормальную (без недопустимого влияния друг на друга) работу при более плотном размещении элементов в решётке, чем при традиционном (с интервалом в половину длины волны). Например, в габаритах пятиэлементной решётки Дольфа-Чебышёва из квадратных излучателей можно расположить семь элементов Минковского [18].

В целом фрактальные антенны – именно многодиапазонные, а не широкополосные (ширина полосы – единицы процента

от центральной), но есть геометрии, приводящие к явно выраженной широкополосности, например треугольник Серпинского [18].

Эксперименты показывают, что антенна Коха для многодиапазонных приложений лучше спиральной, т. к. у неё с ростом частоты пиковые значения активных и реактивных сопротивлений уменьшаются, а не возрастают [19], что облегчает согласование. С другой стороны, слишком низкие значения сопротивлений тоже неудобны; это можно обойти, если изменять угол при основании треугольника по сравнению с традиционным значением 60° . Кроме того, с ростом угла при основании на высоких порядках итерации сближаются частоты резонансов [19, 22] и антенна из многодиапазонной может стать широкополосной.

Опыты [22] показывают, что можно изменять свойства антенны в более широких пределах, если на каждой итерации изменять угол при основании. И эти же эксперименты доказывают, что даже при одинаковых суммах длин сегментов характеристики будут разные, т. е. ключевую роль в свойствах играет всё же геометрия проводника, а не его размеры.

Для анализа проволочной фрактальной антенны существует метод [22], основанный на структурировании фрактальной линии на ключевые с точки зрения электродинамики сегменты. Например, в линии Гильберта [20] различают параллельные проводники, короткозамыкающие перемычки и соединительные сегменты. Для такой антенны существует теоретический анализ свойств, и её можно использовать при создании систем на кристалле, когда антенный модуль и радиотехнические устройства могут быть размещены в одном корпусе, а большая физическая длина позволяет антенне работать на длинах волн, много больших габаритов кристалла. Таким образом, например, можно выполнять плоские антенны для устройств радиочастотной идентификации для Интернета вещей.

Из фрактальных антенн интересна ещё антенна Пеано [20], формирующая сигналы двойной поляризации, что позволяет повышать пропускную способность каналов связи. Пара ортогональных монополей Пеано – компактная альтернатива

турникетной антенны. Вообще для достижения низкого уровня кросс-поляризационной помехи целесообразно использовать фрактальные антенны с центрально симметричной структурой [20].

Чтобы достигнуть фундаментального предела добротности, фрактальные антенны следует выполнять в виде трёхмерных конфигураций, как это показано в [23]. Такие диполи Коха (рис. 5.5) были исследованы в ЯрГУ [24]. Показано, что угол между плечами оказывает существенное влияние. Так, при угле 150° (красная линия частотной зависимости коэффициента отражения от входа антенны S_{11} на рис. 5.6) самым эффективным оказывается первый резонанс и антенна является относительно низкочастотной, а при угле 10° (синяя линия) эффективны уже высшие резонансы.

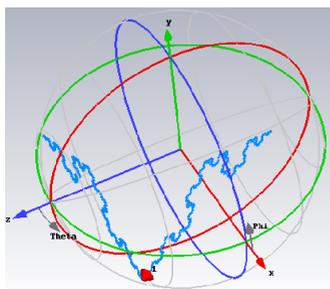


Рис. 5.5. Диполь Коха

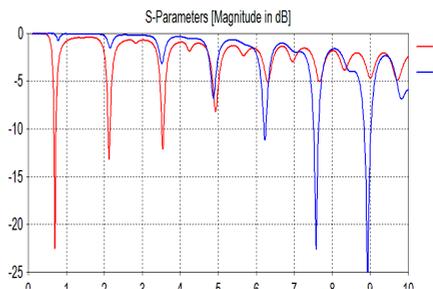


Рис. 5.6. Свойства диполя Коха

Планарные фрактальные антенны требуют высокой точности исполнения, поэтому для их производства используются технологии трёхмерного прототипирования.

Одно из современных применений фрактальных антенн – в системах ММО, где множественность входов и выходов обеспечивается антенными решётками передатчиков и приёмников.

Помимо формирования непосредственно проводящих путей фракталы могут использоваться для формирования технологии частотно-селективных поверхностей, обечаек зеркальных рефлекторов, построения профилей апертуры рупорных антенн, фрезеровки пазов в щелевых антеннах [19].

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите примеры фракталов.
2. Какие бывают фракталы?
3. Какие есть способы синтезировать фрактальный объект?
4. В чём суть фрактального анализа?
5. Каковы особенности фрактального сжатия?
6. Как определяется фрактальная размерность по Хаусдорфу?
7. Что показывает показатель Херста?
8. В чём отличие фрактальных антенн от других?
9. Приведите примеры использования фрактального анализа сигналов.
10. *Постройте систему итерируемых функций для получения салфетки Серпинского (треугольник).
11. *Какими величинами численно характеризуется фрактал?
12. *Какие преобразования и почему используются в теории фракталов?
13. *Какие геометрии чаще всего используются для синтеза фрактальных антенн и почему?
14. *Как по спектральной плотности мощности понять, фрактален ли сигнал?
15. *Как предсказать поведение сигнала в будущем с помощью фрактального анализа?

Литература

1. Фрактал // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Фрактал>.
2. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. — М. : Институт компьютерных исследований, 2002. — 656 с.
3. Божокин, С. В. Фракталы и мультифракталы / С. В. Божокин, Д. А. Паршин. — Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. — 128 с.
4. Кроновер, Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории / Р. М. Кроновер. — М. : Постмаркет, 2000. — 352 с.

5. Короленко, П. В. Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике. Фрактальные и мультифрактальные методы, вейвлет-преобразования / П. В. Короленко, М. С. Маганова, А. В. Меснянкин. — М. : МГУ ; НИИЯФ, 2004. — 82 с. — URL: <http://optics.sinp.msu.ru/stud/fractal.pdf>.

6. Потапов, А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Логос, 2002. 664 с.

7. Потапов, А. А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы как основа новых методов обработки информации и конструирования фрактальных радиосистем / А. А. Потапов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 5. — С. 3–19.

8. Могилевский, Э. И. Фракталы на Солнце / Э. И. Могилевский. — М. : Физматлит, 2001. — 152 с.

9. Потапов, А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: топология выборки / А. А. Потапов. — М. : Университетская книга, 2005. — 847 с.

10. Новейшие методы обработки изображений / А. А. Потапов [и др.] ; под общ. ред. А. А. Потапова. — М. : Физматлит, 2008. — 494 с.

11. Ландэ, Д. В. Фрактальные свойства тематических информационных потоков из Интернет / Д. В. Ландэ // Регистрация, сбор и обработка данных. — 2006. — Т. 8, № 2. — С. 93–99.

12. Шредер, М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая / М. Шредер. — Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. — 528 с.

13. Алгоритм фрактального сжатия // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_фрактального_сжатия.

14. Амосов, О. С. Исследование временных рядов с применением методов фрактального и вейвлет анализа / О. С. Амосов, Н. В. Муллер // Наукоедение. — 2014. — № 3 (22). — URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vremennyh-ryadov-s-primeneniem-metodov-fraktalnogo-i-veyvlet-analiza>.

15. Алиев, М. В. Выделение контуров на малоконтрастных и размытых изображениях с помощью фрактальной фильтрации

/ М. В. Алиев, А. Х. Панеш, М. С. Каспарьян // Вестник Аддыгейского гос. ун-та. Сер. 4. — 2011. — № 3. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vydelenie-konturov-na-malokontrastnyh-i-razmytyh-izobrazheniyah-s-pomoschyu-fraktalnoy-filtratsii>.

16. Кашкин, В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений / В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин. — М. : Логос, 2001. — 264 с.

17. Малинецкий, Г. Г. Нелинейная динамика: подходы, результаты, надежды / Г. Г. Малинецкий, А. Б. Потапов, А. В. Подлазов. — М. : КомКнига, 2006. — 279 с.

18. Слюсарь, В. И. Фрактальные антенны / В. И. Слюсарь // Радиоаматор. — 2002. — № 9. — С. 54–56.

19. Слюсар, В. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломаных» антенн. Ч. 1 / В. Слюсар // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2007. — №5. — С. 78–83.

20. Слюсар, В. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломаных» антенн. Ч. 2 / В. Слюсар // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2007. — № 6. — С. 82–89.

21. Миниатюрные антенны, заполняющие пространство : пат. 263378 РФ. 2002122110/09 ; заявл.: 19.01.2000 ; опубл. 27.10.2005, Бюл. № 30.

22. Vinoy, K. J. Fractal Shaped Antena Elements for Wide-and Multiband Wireless Applications. – Thesis of PhD Dissertation. The Pennsylvania State University, 2002. — URL : https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/3436.

23. Слюсар, В. И. 60 лет теории электрически малых антенн. Некоторые итоги / В И. Слюсар // Электроника : НТБ. — 2006. — № 7.

24. Gvozdayev, A. S. An Analysis of the Multiband Non-planar Koch-type Fractal Dipole with Steerable Geometry / A. S Gvozdayev, T. K. Artemova // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). — М., 2018.

Глава 6

Излучение жидкости в электрическом поле

6.1. Обзор проблем в области излучения жидкости

В последние годы был решён целый ряд задач, связанных с описанием поведения жидкостей в электрическом и магнитном полях, а также с анализом их вынужденного излучения. В этих задачах рассматривалась различная геометрия: капли, струи, свободные поверхности жидкостей, что соответствует:

- природным объектам и компонентам сред (например,
 - капельки воды в атмосфере, образующие туман, облака, грозовые фронты – для капель различной формы и размера,
 - струи жидкости, в том числе в виде гейзеров, струи ливня,
 - поверхности воды в каналах, реках, озёрах, морях)
- или искусственно сформированным
 - каплям (например, чернил принтеров или краски в устройствах окрашивания напылением различных поверхностей),
 - струям (в том числе струям фонтанов или искусственных гейзеров, использовавшихся, как описано, например, в [1] в качестве ВЧ/УВЧ/КВЧ антенн некоторой системы связи,
 - поверхностям жидкости в различных сосудах.

Интересные следующие эффекты.

Во-первых, капли жидкости, обладающей некоторой (а иногда и очень хорошей) проводимостью, т. к. жидкость – электролит из растворённых солей металлов или расплав металла, могут под действием внешнего электрического поля изменять свою форму. При попадании жидкости в поле создаются условия, при которых собственные (малые, случайные, вызванные хаотичным движением частиц жидкости в обычных условиях) колебания поверхности жидкости превращаются в вынужденные. При этом в зависимости от формы поверхности и свойств жидкости (электропроводности, плотности, вязкости) может возникнуть целый спектр колебаний (в соответствии с собственными колебаниями данной формы), некоторые из которых могут быть неустойчивыми. Практически это означает, что заведомо изменится форма

поверхности (например, на открытой поверхности жидкости, ранее практически плоской, начинаются волны [2], капля начинает пульсировать и подрагивать, вытягивается из равновесной сферы в сфероид, поверхность струи испытывает колебания), её уравнение описывается некоторой функцией времени, а при условиях, порождающих неустойчивость, жидкость теряет свою односвязность: капля разбивается на множество более мелких, выбрасывая с острых полюсов сфероида фонтанчики капелек [3], струя начинает прерываться [4, 5], а открытая поверхность может сформировать выброс жидкости вверх [6]. Явления такого характера могут быть практически полезными, например, в формировании мелкодисперсной смеси газа и жидкости, обеспечивающей равномерность покрытия некоторой поверхности данной жидкостью (при печати или окраске). Следовательно, одна из задач современной радиофизики – исследование поведения поверхностей жидкости различных форм и свойств и прогноз устойчивости её как системы, поиск способов управления этими свойствами.

Во-вторых, так как большинство практически интересных жидкостей являются в той или иной степени электролитами, то при попадании в электрическое поле они электризуются – происходит процесс перераспределения зарядов под действием внешнего поля. А так как поверхность уже отличается от равновесной, то в сочетании с появлением градиента заряда создаются условия для того, чтобы в каждой конкретной точке поверхности удельный заряд изменялся по величине во времени, т. е. поверхность жидкости излучала электромагнитные волны с некоторым спектром. Если внешнее поле можно считать электростатическим, то такая ситуация возникает, например, в грозových облаках, где капли находятся в электростатическом поле ионосферного волновода. Примером ситуации, когда можно использовать модель капли в переменном внешнем поле, является распространение электромагнитной волны через атмосферу. Как показывает практика, оно сопровождается вынужденным излучением капель. Таким образом, ещё одной задачей радиофизики является уточнение моделей вынужденного излучения проводящих жидкостей, в том числе для целей прогнозирования уровня помех

на ионосферных и спутниковых трассах в зависимости от свойств атмосферы, содержащей капли воды, а также для целей анализа состояния и структурного состава атмосферных слоёв при зондировании атмосферы. Можно сказать, что это давняя задача, до сих пор не потерявшая своей актуальности, в том числе благодаря применению новых сигналов. Сегодня требуются уже не только энергетические характеристики такого излучения, но и поляризационные (т. к. появились методы управления поляризацией сигналов и актуализированы методы поляризационного разделения каналов) и, что важно, временные, т. к. для современных многоканальных систем связи особенно важны модели задержек и дисперсии сигналов по каждому из реальных или виртуальных каналов вследствие того, что приём и обработка их осуществляются одновременно и совместно и результат интерференции существенно зависит от задержки сигнала. Сегодняшний уровень достижений в этой области – не финальный: например, ещё нет адекватного описания прохождения сигналов различных частот с различными сигнально-кодowymi конструкциями через турбулентную и локально турбулентную атмосферу. При этом именно аналитические решения позволяют строить фундамент для дальнейших исследований, описывая при этом причинно-следственные связи.

Рассмотрим подход к формализации и решению таких задач на примере недавно решённой [7] задачи излучения незаряженной капли жидкости, находящейся в электростатическом поле. Задача имеет относительно просто формализуемую постановку, но в то же время результаты её решения весьма показательны.

6.2. Электромагнитное излучение дипольного типа от осциллирующей в электростатическом поле незаряженной капли

В облаках присутствуют как заряженные, так и незаряженные капли различного размера в разной концентрации. Так как капля незаряженная, то электрический потенциал можно пред-

ставить в виде разложения в ряд Тейлора, причём слагаемые порождаются мультиполями – чётным числом эквивалентных зарядов (диполем, т. е. двумя, квадруполем, т. е. четырьмя и т. п.). Дипольное излучение происходит из-за ускоренного движения зарядов, индуцированных внешним электростатическим полем, при осцилляциях поверхности капли.

Для заряженных облачных капель проблема теоретической оценки электромагнитного излучения была сформулирована в 1982 г. [8] и уточнена в 2002 г. [9]. В линейных расчётах было выявлено лишь слабое квадрупольное излучение, в то время как в нелинейных квадратических расчётах обнаруживается на 14–15 порядков более интенсивное дипольное излучение, фиксируемое экспериментально [10].

Для незаряженной капли интенсивность квадрупольного излучения получена в [11], а дипольного излучения – в [7].

6.2.1. Постановка и ход решения задачи

Рассмотрим задачу об электромагнитном излучении незаряженной капли идеальной, несжимаемой, идеально проводящей жидкости с плотностью ρ , коэффициентом поверхностного натяжения σ , осциллирующей в однородном электростатическом поле напряженностью \mathbf{E}_0 . Примем, что капля находится в вакууме, а её объем равен объему сферы с радиусом R . Под действием внешнего электростатического поля в капле индуцируются электрические заряды: отрицательный – на её половинке, обращённой к полю, и положительный – на противоположной, – образующие дипольный момент ([12], с.19). Капля при этом вытягивается в сфероид с $r = r(\theta)$, ось симметрии которого коллинеарна внешнему полю. Квадрат эксцентриситета сфероида e^2 будем считать малым параметром: $e^2 = 1$.

В связи с тепловым движением молекул воды поверхность капли является возмущённой. В присутствии внешнего электрического поля эти малые отклонения формы капли от равновесной сфероидальной усиливаются. Для снижения громоздкости примем, что возмущение формы поверхности $\zeta(\theta, t)$

осесимметрично. Отношение $\max|\zeta(\theta, t)/R|$ примем в качестве второго малого параметра задачи и обозначим ε . Индуцированные заряды распределятся по возмущённой капиллярным волновым движением поверхности капли, уравнение которой определится выражением

$$r(\theta, t) = r(\theta) + \zeta(\theta, t). \quad (6.1)$$

Математическая формулировка задачи об электромагнитном излучении незаряженной капли, осциллирующей во внешнем электростатическом поле, в сферической системе координат (r, θ, φ) с началом в центре масс капли в безразмерных переменных, в которых $R = \rho = \sigma = 1$ имеет вид: уравнение Лапласа для потенциала $\psi(\mathbf{r}, t)$ поля скоростей $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t) = \nabla\psi(\mathbf{r}, t)$ волнового течения жидкости:

$$\Delta\psi(\mathbf{r}, t) = 0; \quad (6.2)$$

уравнение Лапласа для $\Phi(\mathbf{r}, t)$ – электрического потенциала поля индуцированных в капле зарядов:

$$\Delta\Phi(\mathbf{r}, t) = 0; \quad (6.3)$$

граничные условия в центре капли, на бесконечности:

$$r \rightarrow 0: \psi(\mathbf{r}, t) \rightarrow 0; \quad r \rightarrow \infty: \Phi(\mathbf{r}, t) \rightarrow 0; \quad (6.4)$$

на поверхности капли:

$$r = r(\theta) + \zeta(\theta, t):$$

$$\frac{\partial\zeta(\theta, t)}{\partial t} = \frac{\partial\psi(\mathbf{r}, t)}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial\psi(\mathbf{r}, t)}{\partial\theta} \left(\frac{\partial r(\theta)}{\partial\theta} + \frac{\partial\zeta(\theta, t)}{\partial\theta} \right);$$

$$P(\mathbf{r}, t) - P_{am} + P_E(\mathbf{r}, t) = P_\sigma(\mathbf{r}, t); \quad \Phi(\mathbf{r}, t) = \Phi_s(t), \quad (6.5)$$

где $\Phi_s(t)$ – постоянное вдоль поверхности капли значение её электрического потенциала; $P(\mathbf{r}, t) = P_0 - \frac{\partial\psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$ – гидродинамическое давление; P_0 – давление внутри капли в состоянии равновесия; P_{am} – давление вне капли; $P_E = (\nabla\Phi)^2/8\pi$ – давление электрического поля, $P_\sigma = \text{divn}(\mathbf{r}, t)$ – капиллярное давление; $\mathbf{n}(\mathbf{r}, t)$ – единичный вектор нормали к возмущённой поверхности капли.

Дополним выписанную систему интегральными условиями: неизменности полного объема капли (следствие несжимаемости жидкости), неподвижности её центра масс, а также незаряженности капли.

$$\int_V r^2 dr \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{4}{3} \pi; \quad \int_V \mathbf{r} \cdot r^2 dr \sin \theta d\theta d\varphi = 0; \quad (6.7)$$

$$V = [0 \leq r \leq r(\theta) + \xi(\theta, t), \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi];$$

$$\frac{1}{4\pi} \oint_S (\mathbf{n}, \nabla \Phi) dS = 0; \quad S = [r = r(\theta) + \xi(\theta, t), \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi]. \quad (6.8)$$

Искомые величины раскладываются по порядкам малости безразмерной амплитуды осцилляций ε :

$$\begin{aligned} \xi(\theta, t) &= \xi^{(1)}(\theta, t) + O(\varepsilon^2), & \psi_j(\mathbf{r}, t) &= \psi_j^{(1)}(\mathbf{r}, t) + O(\varepsilon^2), \\ P(\mathbf{r}, t) &= P^{(0)}(\mathbf{r}) + P^{(1)}(\mathbf{r}, t) + O(\varepsilon^2); \\ P_\sigma(\mathbf{r}, t) &= P_\sigma^{(0)}(\mathbf{r}) + P_\sigma^{(1)}(\mathbf{r}, t) + O(\varepsilon^2), \\ P_E(\mathbf{r}, t) &= P_E^{(0)}(\mathbf{r}) + P_E^{(1)}(\mathbf{r}, t) + O(\varepsilon^2), \\ \Phi(\mathbf{r}, t) &= \Phi^{(0)}(\mathbf{r}) + \Phi^{(1)}(\mathbf{r}, t) + O(\varepsilon^2), \end{aligned} \quad (6.9)$$

где $\Phi^{(0)}(\mathbf{r})$ – электрический потенциал в окрестности равновесного незаряженного сфероида, находящегося во внешнем электростатическом поле; $\Phi^{(1)}(\mathbf{r}, t)$ – электрический потенциал индуцированных зарядов возмущенного сфероида. Верхний индекс означает порядок малости по ε .

В безразмерных переменных потенциал $\psi(\mathbf{r}, t)$ будет иметь тот же порядок малости, что и амплитуда осцилляций поверхности капли $\psi(\mathbf{r}, t) \sim \xi(\theta, t) \sim \varepsilon$, потому что возмущение порождается капиллярным волновым движением.

Подставляя разложения (6.9) в (6.2)–(6.8), можно выделить задачи нулевого и последующих порядков. Задача решается стандартными методами (см. [13]). Подробное решение см. в [7]. Этапы решения следующие.

Сначала решением задачи нулевого порядка малости по ε находят форму равновесной поверхности капли. В данной задаче с точностью до квадрата эксцентриситета e^2 это вытянутый сфероид:

$$r(\theta) \approx 1 + e^2 h(\theta) + O(e^4) \equiv 1 + \frac{1}{3} e^2 P_2(\mu) + O(e^4),$$

где эксцентриситет связан с напряженностью электростатического поля соотношением $e \equiv \sqrt{9E_0^2/16\pi}$. Определяют переходом от известного выражения [7, с. 41] равновесный потенциал $\Phi^{(0)}(\mathbf{r})$ в линейном по e^2 приближении.

Далее в линейном приближении по ε записывают ожидаемый вид будущих решений – это разложения в ряд по полиномам Лежандра [14] с ε в первой степени:

$$\Phi^{(1)}(r, \theta, t) = \varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} F_n(t) r^{-(n+1)} P_n(\mu);$$

$$\psi(r, \theta, t) = \varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} D_n(t) r^n P_n(\mu);$$

$$\xi(\theta, t) = \varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} M_n(t) P_n(\mu)$$

и формулируют краевые задачи для электрического потенциала, волнового потенциала и смещения поверхности (ищут коэффициенты F_n , D_n и M_n). При этом, так как в задаче имеются два малых параметра: эксцентриситет равновесной поверхности капли e и амплитуда ε её осцилляций (причём напряженность электростатического поля $E_0 \sim e$), оставляют слагаемые, имеющие порядок малости $\sim \varepsilon$, слагаемые $\sim e \cdot \varepsilon$ (учитывающие взаимодействие возмущения ζ с напряженностью E_0), слагаемые $\sim e^2 \varepsilon$ (учитывающие взаимодействие возмущения с отклонением равновесной поверхности капли от сферы), $\sim E_0 e^2 \varepsilon$ (учитывающие взаимодействие возмущения с полем и отклонением равновесной поверхности от сферы).

Далее получают соотношения между коэффициентами и записывают неоднородное дифференциальное (эволюционное) уравнение для нахождения коэффициентов $M_n(t)$ при $n \geq 0$. Избавившись от неоднородности, приравняв к нулю правую часть и полагая, что решением уравнения являются гармонические функции времени t с коэффициентами:

$$M_n(t) = a_n \exp(i(\omega_n t + b_n)) + \text{компл. сопряж.}, \dots (n \geq 0),$$

где a_n и b_n – вещественные константы, определяемые из начальных условий, получим выражение для квадрата частоты соб-

ственных осцилляций n -моды (записанное в размерном виде) поверхности незаряженной сфероидальной капли в однородном электростатическом поле:

$$\omega_n^2 = \frac{\sigma}{\rho R^3} n(n-1)(n+2) \left[1 - e^2 \frac{(2n^5 + 23n^4 + 21n^3 - 17n^2 - 7n - 2)}{(n-1)(n+2)(2n-1)(2n+1)(2n+3)} \right],$$

качественно совпадающее с полученным в [15], но обладающее асимптотиками, более адекватными реальной ситуации.

Следующим шагом получают форму поверхности осциллирующей капли, линейную и по безразмерной амплитуде осцилляций ε , и по квадрату эксцентриситета e^2 :

$$r(\mathbf{r}, t) = 1 + e^2 h(\theta) + \varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} M_n(t) P_n(\mu).$$

После этого, подразумевая модель электрического диполя, определяют поляризационные заряды q_+ и q_- верхней и нижней половинок капли (с площадями поверхности S_1 и S_2):

$$q_+ = \int_{S_1} dq_+ = \int_{S_1} \nu(\theta, t) dS_1; \quad q_- = \int_{S_2} dq_- = \int_{S_2} \nu(\theta, t) dS_2,$$

выразив заряд его через поверхностную плотность заряда $\nu - \nu(\mathbf{r}, t) = (\mathbf{n}(\mathbf{r}, t), \nabla \Phi(\mathbf{r}, t))/4\pi$ на возмущенной поверхности капли (r, θ, φ) . Итоговые заряды q_+ и q_- отличаются знаком и имеют модуль:

$$q_+(t) = \frac{3}{4} E_0 \left(1 + \frac{1}{15} e^2 + 2\varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} M_n(t) (G_1(n) + e^2 G_2(n)) \right).$$

Громоздкие выражения для коэффициентов $G_1(n)$ и $G_2(n)$ см. в [7]. Видно, что зависящая от времени часть выражения содержит слагаемые $\sim \varepsilon$ и $\sim \varepsilon \cdot e^2$.

Затем находят смещения эквивалентных центров положительного и отрицательного зарядов в модели диполя от центра капли $\mathbf{R}_{q_{\pm}}(t)$ и плечо диполя $\mathbf{d}(t)$ [7]:

$$\mathbf{R}_{q_{\pm}} = \frac{1}{q_{\pm}} \int_{S_{1,2}} \mathbf{r} dq_{\pm}, \quad \mathbf{d}(t) = 2q_+(t) \cdot \mathbf{R}_{q_+}(t).$$

Эти центры расположатся на оси симметрии капли (в силу симметричности осцилляций) и при осцилляциях её поверхности будут также осциллировать. Причём их осцилляции будут происходить в противофазе друг относительно друга (центры будут сближаться и удаляться). Поскольку вектор напряжённости электрического поля направлен вдоль оси z , то смещения центра заряда капли в плоскости x, y не происходит. Проекция вектора смещения центра положительного поляризованного заряда вдоль оси z будет иметь вид (коэффициенты A_1 и A_2 см. в [7]:

$$R_{qz}(t) = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{1}{3} e^2 + \varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} M_n(t) (A_1 - e^2 A_2) \right).$$

Видно, что зависящая от времени часть выражения содержит слагаемые $\sim \varepsilon$ и $\sim \varepsilon \cdot e^2$.

На последнем этапе находится интенсивность излучения диполя с помощью формулы [16, с. 213]:

$$I = \frac{2}{3c^3} \left(\frac{d^2 \mathbf{d}(t)}{dt^2} \right)^2.$$

Окончательное выражение для интенсивности электромагнитного излучения незаряженной сфероидальной капли, осциллирующей во внешнем электростатическом поле [7]:

$$I = \frac{E_0^2 R^6 \varepsilon^2}{3c^3} \left(1 + \frac{1}{15} e^2 + 2\varepsilon \sum_{j \in \Xi} h_j (B_1^{(j)} + e^2 B_2^{(j)}) \right)^2 \times \left(\sum_{j \in \Xi} h_j \left(\omega_j^2 (B_3^{(j)} + e^2 B_4^{(j)}) + e^2 (\omega_{j+2}^2 B_5^{(j)} + \omega_{j-2}^2 B_6^{(j)}) \right) \right)^2.$$

Выражение существенно нелинейно: в задаче два малых параметра ε и e^2 (т. к. $E_0 \sim e$) и содержит произведения малых параметров до $\sim \varepsilon^5 e^{10}$.

6.2.2. Модель осциллирующего диполя

Итак, электромагнитное излучение незаряженной капли проводящей жидкости, осциллирующей в электростатическом поле, определяется излучением ускоренно движущихся зарядов, индуцированных в капле внешним электростатическим полем. Сопоставляя зарядам противоположных знаков, индуцированных на противоположных половинках капли, «эффективные» заряды на оси капли, получим осциллирующий диполь, чей момент меняется при осцилляциях. Его излучением и моделируем излучение осциллирующей в электростатическом поле незаряженной капли. Само излучение является дипольным, в отличие от квадрупольного (в $10^{14} \div 10^{15}$ раз менее интенсивного, чем дипольное), практически не влияющего на общую интенсивность.

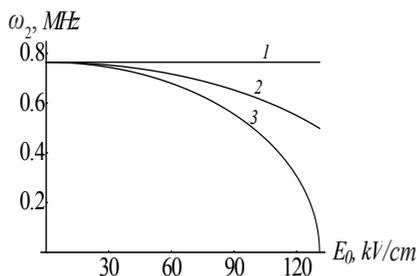


Рис. 6.1. Сравнение зависимостей поведения трёх моделей частоты от E_0

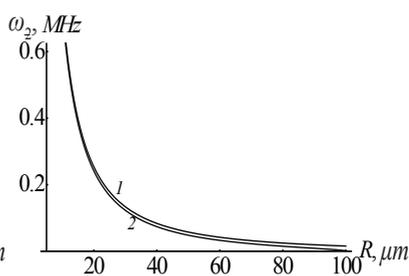


Рис. 6.2. Сравнение зависимостей поведения трёх моделей частоты от R

Капля осциллирует, в спектре колебаний основная мода имеет частоту ω_2 (рис. 6.1), зависящую от напряженности электростатического поля через эксцентриситет посредством размерного выражения $e^2 \equiv 9E_0^2 R / 16\pi\sigma$ [17]. Полученная зависимость для сфероидальной капли (кривая 2) сравнивается с прямой 1 для сферической капли при $\varepsilon = 0,1$, $\sigma = 73$ дин/см, $\rho = 1$ г/см³, $R = 10$ мкм. Кроме того, модельный результат искусственно подгоняется под реальную ситуацию (кривая 3): известно, что при $E_0^2 R / \sigma \geq 2,62$ частота обращается в нуль и капля претерпевает неустойчивость по отношению к поляризационному заряду [16]. Чтобы при этом

условии обращалось в нуль полученное выражение для частоты, перед e^2 в квадратных скобках поставим подгоночный параметр 1.74. Расчеты проведены в линейном приближении по e^2 и дают адекватные результаты при малых e^2 (соответствующих $E_0 \approx 30 \div 60$ кВ/см).=

От радиуса равновеликой сферической капли все три модели для частоты дают близкие зависимости (рис. 6.2). В частности, зависимости 2 и 3 при малом e^2 , определяемом напряжённостью поля $E_0 = 40$ кВ/см, очень близки, а при $E_0 = 1$ кВ/см они совпадают в пределах толщины линии.

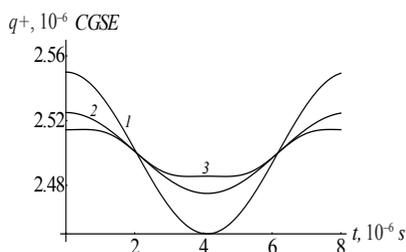


Рис. 6.3. Периодическое изменение положительного индуцированного заряда капли q_+ во времени

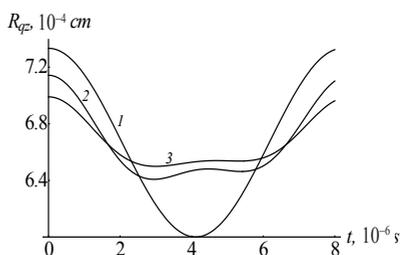


Рис. 6.4. Смещение центров положительного и отрицательного зарядов от центра сфероида во времени

Рис. 6.3 иллюстрирует периодическое изменение положительного индуцированного заряда капли q_+ во времени в относительно слабом поле $E_0 = 1$ кВ/см для трёх разных начальных возбуждений формы поверхности в линейном по ϵ приближении: $\epsilon P_2(\mu)$ (кривая 1), $\epsilon[P_2(\mu) + P_3(\mu)]/2$ (кривая 2) и $\epsilon[P_2(\mu) + P_3(\mu) + P_3(\mu)]/3$ (кривая 3).

Смещение центров положительного и отрицательного зарядов от центра сфероида во времени является периодическим (рис. 6.4).

Оценим излучение облака. Источники излучения в облаках: осцилляции основных (мелких, 3–30 мкм) капель, излучение свободно падающих в облаке гидрометеоров, сливающихся с более мелкими капельками и непрерывно поэтому осциллирующих на высоких модах.

Осцилляции капель могут быть вызваны различными причинами, в том числе слиянием, дроблением, столкновением с другими, неустойчивостью в электростатическом поле, электрическим взаимодействием с пролетающими рядом каплями [18].

Амплитуды колебаний облачных капель, согласно данным натуральных наблюдений [19–20], могут достигать десятков процентов от радиуса капли.

Оценка интенсивности фонового дипольного электромагнитного излучения мелких капель воды со свойствами $\varepsilon = 0.1$, $h_2 = 1$, $\sigma = 73$ дин/см $\rho = 1$ г/см³, $R = 10$ мкм для случая, когда смещение центров поляризационных зарядов связано с возбуждением моды $j = 2$ в поле с напряжённостью $E_0 = 50$ В/см, даёт $I \sim 1 \cdot 10^{-28}$ мкВт на частоте около 100 кГц.

Проанализируем поведение интенсивности излучения единичной капли от различных факторов для тех же условий.

На рис. 6.5 приведены зависимости интенсивности излучения капли от напряженности внешнего электрического поля при различных моделях частоты осцилляций: кривая 1 соответствует модели кривой 2 на рис. 6.1, а кривая 2 – искусственно модифицированной частоты кривой 3 на рис. 6.1. На рис. 6.6 более детально показан участок зависимостей в области малых значений напряжённости, на котором интенсивности быстро растут, а кривые 1 и 2 и совпадают.

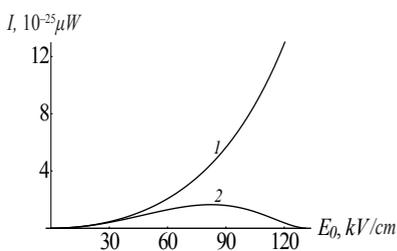


Рис. 6.5. Зависимости интенсивности излучения капли от напряженности электрического поля при различных моделях частоты осцилляций

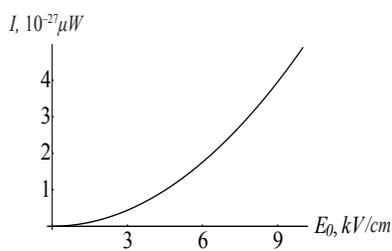


Рис. 6.6. Участок зависимостей интенсивности излучения капли от напряженности электрического поля в области малых значений напряжённости

Кривая 1 несколько выходит за пределы области своей применимости, которая определяется условием $e^2 = 1$, но её экстраполяция приведена с иллюстрационными целями. В области сильных полей при модифицированной модели частоты с увеличением напряжённости интенсивность излучения достигает максимума при $E_0 \sim 80$ кВ/см, а затем начинает уменьшаться, т. к. частота осцилляций стремится к нулю и реализуется электростатическая неустойчивость капли. В реальности незаряженные именно облачные капли целесообразно рассматривать только в слабых полях [21].

Интенсивность излучения единичной капли падает с ростом плотности жидкости ρ и с уменьшением коэффициента поверхностного натяжения σ . При малом σ зависимость от ρ и при большом ρ зависимость от σ практически отсутствуют.

В отличие от дипольного излучения заряженной капли интенсивность излучения незаряженной капли от радиуса капли не зависит (это видно и из аналитического выражения для интенсивности, если учесть в нём зависимость частоты от радиуса). При варьировании радиуса капли изменяется только частота излучения.

Оценим теперь радиоизлучение облака. Колебания поверхности капель находятся в различных фазах с разной вероятностью в зависимости от условий. Если принять, что все капли осциллируют синфазно, то интегральная интенсивность излучения из облака с N излучающих капель будет в N раз больше, чем интенсивность излучения одной капли. В случае облака диаметром 10 км $N \approx 5 \cdot 10^{20}$ и интенсивность излучения $I_{in} \sim 5 \cdot 10^{-8}$ мкВт, что может быть надёжно зарегистрировано радиоприёмной аппаратурой, как показывают эксперименты [22, с. 24; 10; 23]. Синфазность осцилляций отдельных капель может возникнуть в грозном облаке при резком изменении напряжённости внутриоблачного электрического поля, что имеет место при разряде молнии [23, 24]. Если же фазы осцилляции независимы друг от друга, то интегральная интенсивность будет в \sqrt{N} раз больше интенсивности излучения отдельной капли [23].

Вопросы для самоконтроля

1. Опишите, что происходит с каплей жидкости под действием электростатического поля.
2. Какие факторы влияют на величину излучения капли?
3. Чем образован дипольный момент проводящей капли в электростатическом поле?
4. Какова модель представления эволюции поверхности капли?
5. Как изменяется частота основной моды излучения капли с увеличением напряжённости внешнего электростатического поля?
6. Как изменяется частота излучения единичной капли с ростом радиуса сферического аналога капли?
7. Каковы наиболее типичные размеры капель воды в облаках?
8. Каков порядок интенсивности излучения из облака?
9. Как изменяется интенсивность излучения капли при росте напряжённости внешнего электростатического поля для реальных напряжённостей?
10. Какие проблемы ставит современная радиофизика в данной области?
11. *Как порядок модели (линейная, нелинейная, порядок приближения) влияет на прогноз величины излучения капли?
12. *Какие уравнения формируют формальную постановку задачи поиска уравнения поверхности?
13. *При каких условиях капли облака будут излучать синфазно (и прогноз даст наибольший результат)?
14. *Какие облака – сформировавшиеся над сельской местностью или над промышленным городом – будут порождать большее излучение при одинаковых прочих условиях?

Литература

1. Sea Water Antenna: — URL : https://www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=9tIZUhu21sQ.
2. Белоножко, Д. Ф. О волновом массопереносе вдоль заряженной жидкой поверхности, обдуваемой диэлектрической

средой / Д. Ф. Белоножко, А. А. Очиров // Электронная обработка материалов. — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 91–97.

3. Ширяева, С. О. Нелинейные осцилляции заряженной капли при начальном возбуждении соседних мод / С. О. Ширяева // ЖТФ. — 2002. — Т. 72, вып. 4. — С. 15–19.

4. Григорьев, А. И. Об электростатической неустойчивости объёмно заряженной струи диэлектрической жидкости / А. И. Григорьев, С. О. Ширяева // Электронная обработка материалов. — 2009. — Т. 45, № 6. — С. 35–41.

5. Ширяева, С. О. Спонтанный капиллярный распад заряженных струй / С. О. Ширяева, А. И. Григорьев, М. В. Волкова. — Ярославль : ЯрГУ, 2007. — 320 с.

6. Григорьев, А. И. О форме «конуса Тейлора» и характерном времени его роста / А. И. Григорьев [и др.] // Электронная обработка материалов. — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 34–40.

7. Ширяева, С. О. Асимптотический расчет интенсивности дипольного электромагнитного излучения от осциллирующей в электростатическом поле незаряженной капли / С. О. Ширяева, А. И. Григорьев, Н. Ю. Колбнева // ЭОМ. — 2017. — Т. 53, № 4. — С. 28–38.

8. Калечиц, В. И. О возможном механизме радиоизлучения конвективных облаков / В. И. Калечиц, И. Е. Нахутин, П. П. Полуэктов // ДАН СССР. — 1982. — Т. 262, № 6. — С. 1344–1347.

9. Григорьев, А. И. Электромагнитное излучение осциллирующей заряженной капли конечной проводимости / А. И. Григорьев, С. О. Ширяева // Изв. РАН. — МЖГ. — 2002, № 5. — С. 74–80.

10. Белоцерковский, А. В. Активно-пассивная радиолокация грозовых и грозоопасных очагов в облаках / А. В. Белоцерковский [и др.] ; под ред. Л. Г. Качурина и Л. И. Дивинского. — СПб. : Гидрометеиздат, 1992. — 286 с.

11. Ширяева, С. О. Излучение электромагнитных волн незаряженной каплей, осциллирующей в электростатическом поле / С. О. Ширяева [и др.] // ЖТФ. — 2015. — Т. 85, вып. 4. — С. 20–27.

12. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М. : Наука, 1982. — 621 с.

13. Найфе, А. Х. Методы возмущений / А. Х. Найфе. — М. : Мир, 1976. — 455 с.
14. Варшалович, Д. А. Квантовая теория углового момента / Д. А. Варшалович, А. Н. Москалев, В. К. Херсонский. — Л. : Наука, 1975. — 436 с.
15. Cheng, K. J. Capillary oscillations of a drop in an electric field / K. J. Cheng // Phys. Lett. — 1985. — Vol. A112, № 11. — P. 392–396.
16. Taylor, G. I. Disintegration of water drops in an electric field / G. I Taylor // Proc. Roy. Soc. — 1964. — Vol. A280. — P. 383–397.
17. O' Konski, C. J. The distortion of aerosol droplets by an electric field / C. J O' Konski, H. C. Thacher // J. Phys. Chem. — 1953. — Vol. 57. — P. 955–958.
18. Григорьев, А. И. Излучение электромагнитных волн осциллирующей сильно заряженной каплей / А. И. Григорьев, Н. Ю. Колбнева, С. О. Ширяева // Журнал технической физики. — 2016. — Т. 86, вып. 8. — С. 68–75.
19. Стерлядкин, В. В. Натурные измерения колебаний капель осадков / В. В. Стерлядкин // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1988. — Т. 24, № 6. — С. 613–621.
20. Beard Kenneth, V. Cloud and Precipitation Physics Research 1983–1986 / V. Beard Kenneth // Reviews of Geophysics. — 1987. — Vol. 25, № 3. — P. 357–370.
21. Мазин, И. П. Облака и облачная атмосфера : справочник / И. П. Мазин, А. Х. Хргиан, И. М. Имянитов. — Л. : Гидрометеоиздат, 1989. — 647 с.
22. Аджиев, А. Х. Грозы Северного Кавказа / А. Х. Аджиев, Е. М. Богаченко. — Нальчик : Полиграфсервис и Т, 2011. — 151 с.
23. Богатов, Н. А. Электромагнитное поле, генерируемое капиллярными колебаниями капель / Н. А. Богатов // Сборник тезисов докладов VI Международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Петропавловск-Камчатский, 9–13 сентября 2013. — Петропавловск-Камчатский : ДВО РАН, 2013. — С. 10–11.
24. Юман, М. Молния / М. Юман. — М. : Мир, 1972. — 328 с.

Приложение

Задание к главам 2–6

1. Провести информационный поиск с глубиной 10 лет по методам и проблемам рассматриваемой области радиофизики.

2. По результатам поиска описать в отчёте современное состояние области, указывая: глубину и объём поиска, количество и характер найденных источников, перечень проблем, над которыми в настоящее время работают и в ближайшем прошлом работали радиофизики, достижения в решении очерченного круга задач.

3. Выбрать одно из направлений внутри области, соответствующей главе, и сформулировать постановку задачи для конкретного примера, убедившись, что Ваш пример не повторяет примеров однокурсников.

4. Указать пути решения задачи (со ссылками на необходимые источники и с обоснованием выбора пути решения).

5. Указать возможные параметры решения и выбранных методов решения: точность (и другие количественные параметры решения), сходимости, устойчивость, вычислительные затраты методов.

6. Привести пример новых знаний о процессах, явлениях, объектах в рассмотренной области, полученных исследователями и описанных в статьях, убедившись, что Ваш пример не повторяет примеров однокурсников. В отчёте указать: что получено, когда, источник информации, радиофизический метод, его параметры – и охарактеризовать результат с точки зрения современных взглядов: удовлетворяет ли качество проведённых исследований современным требованиям. Привести пример практического использования этих знаний.

7. Укажите в отчёте, каким образом вы можете использовать новейшие достижения радиофизики из рассмотренной области в своей научной деятельности, а именно:

а) какие именно достижения можете использовать (открытия, модели, методы, факты и т. д.);

- б) в какой части своей работы;
 - в) можно это использовать непосредственно или нужна доработка; если нужна, то какая;
 - г) оцените эффект, который может дать применение отобранных достижений в Вашей НИР;
 - д) запланируйте и перечислите свои будущие действия по внедрению отобранных достижений в Вашу НИР.
8. По пп. 3–6 подготовьте презентацию на 5–10 минут и выступите на практическом занятии.

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Основные направления развития современной радиофизики.....	5
1.1. Специальность ВАК «Радиофизика». Основные отрасли современной радиофизики.....	5
1.2. Радиофизические методы исследований.....	6
1.3. Современные проблемы и направления развития радиофизики.....	7
1.4. Современные проблемы излучения, распространения и приёма электромагнитных колебаний.....	9
1.5. Радиофизические основы радиоастрономии.....	11
1.6. Биомедицинская радиофизика.....	13
Вопросы для самоконтроля.....	14
Задание к главе.....	16
Литература.....	17
Глава 2. Материалы и приборы СВЧ-радиофизики.....	18
2.1. Современные материалы радиофизики.....	18
2.2. Современная элементная база	22
Вопросы для самоконтроля.....	24
Литература.....	24
Глава 3. Дистанционное зондирование объектов и сред.....	26
3.1. Дистанционное зондирование.....	26
3.2. Методы дистанционного зондирования.....	28
3.3. Особенности регистрации сигналов и полей и характеристики методов дистанционного зондирования.....	33
3.4. Современные задачи дистанционного зондирования.....	36
Вопросы для самоконтроля.....	37
Литература.....	38
Глава 4. Физика акустической связи и акустического дистанционного зондирования.....	40
4.1. Физика звука и характеристики его распространения в атмосфере	40

4.2. Источники и приёмники звука, источники шумов, акустические антенны.....	46
4.3. Содары и акустическое зондирование атмосферы.....	53
4.4. Физика и характеристики распространение звука в водной среде.....	53
4.5. Подводный волновой канал и акустическая гидросвязь.....	54
4.6. Устройства и возможности гидроакустической локации.....	56
4.7. Дистанционное зондирование морей и океанов: акустическая томография и картирование температур и скоростей течений.....	57
Вопросы для самоконтроля.....	59
Литература.....	60
Глава 5. Фрактальная радиофизика и современные методы обработки сигналов.....	62
5.1. Понятие фрактала.....	62
5.2 Фрактальные свойства различных сигналов и методы фрактальной обработки информации различного назначения.....	67
5.3. Фрактальные антенны.....	70
Вопросы для самоконтроля.....	74
Литература.....	74
Глава 6. Излучение жидкости в электрическом поле.....	77
6.1. Обзор проблем в области излучения жидкости.....	77
6.2. Электромагнитное излучение дипольного типа от осциллирующей в электростатическом поле незаряженной капли.....	79
6.2.1. Постановка и ход решения задачи.....	80
6.2.2. Модель осциллирующего диполя.....	86
Вопросы для самоконтроля.....	90
Литература.....	90
Приложение.....	93
Задание к главам 2–6.....	93

Учебное издание

Артёмова Татьяна Константиновна
Ширяева Светлана Олеговна

Современные проблемы радиофизики

Учебное пособие

Редактор, корректор Л. Н. Селиванова
Компьютерная верстка Е. Б. Половкова

Подписано в печать 22.06.18. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Усл.-печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 4,3 .
Тираж 22 экз. Заказ .

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе
Ярославского государственного университета

Ярославский государственный университет
им. П. Г. Демидова.
150003, Ярославль, ул. Советская, 14.