

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых



На правах рукописи
УДК 621.371

ШУЛЯТЬЕВ Аркадий Андреевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ МЕТОДОВ
РАДИОМОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОКРОВОВ

Специальность 05.12.04 – радиотехника,
в т.ч. системы и устройства телевидения

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук,
профессор Никитин О. Р.

Владимир
2015 г.

Содержание

Введение.....	4
1. Анализ методов радиомониторинга лесных покровов.	
Электрофизические свойства аномальных участков.....	17
1.1. Обзор существующих технологий ДЗЗ и их приложений. Выявление аномалий как обратная задача дистанционного зондирования	17
1.2. Отличительные признаки аномальных участков.....	24
1.3. Обзор методов моделирования отражательных и излучательных свойств лесного покрова. Выбор способа моделирования	30
Выводы к главе 1	34
2. Разработка компьютерной фацетной модели рассеяния радиоизлучения на лесном покрове	35
2.1. Аппроксимация геометрии лесного покрова	35
2.2. Алгоритмическая база фацетной модели	38
2.3. Математический аппарат фацетной модели	44
2.4. Программная реализация фацетной модели	58
2.5. Проверка адекватности результатов моделирования.....	64
Выводы к главе 2.....	66
3. Разработка методики распознавания типа лесного покрова по радиолокационному изображению	67
3.1. Структура задачи	67
3.2. Математическая модель формирования радиолокационного снимка. Выделение сигнатур ДФОС из оконтуренного РЛИ	70
3.3. Классификация сигнатуры ДФОС с использованием банка данных	77
3.4. Оптимизация методики распознавания участка снимка по результатам компьютерного моделирования.....	79
3.5. Оценка достоверности процедуры классификации типа подстилающей поверхности	89

Выводы к главе 3.....	94
4. Апробация и практическое применение результатов исследования	95
4.1. Практическая проверка методики распознавания типов лесного покрова.....	95
4.2. Выбор бортового РСА	97
4.3. Рекомендации по построению беспилотной системы радиомониторинга	100
4.4. Разработка структурной организации программно-аппаратного комплекса радиомониторинга лесных покровов	103
Выводы к главе 4.....	105
Заключение	106
Литература	107

Введение

По мере развития промышленности и усиления антропогенного влияния на окружающую среду возрастает важность оперативного и точного экологического мониторинга. В последние десятилетия для решения задач экомониторинга всё большее применение находят бурно развивающиеся методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В связи с чрезвычайной важностью решения этих задач на современном этапе развития общества принципы построения таких радиотехнических средств и их функционирования все более широко входят в практику и требуют от специалистов новых методов математического моделирования физических процессов ДЗЗ.

Практическая значимость дистанционных исследований природных сред велика в самых различных областях решения научных и народно-хозяйственных задач. Так, при решении задач изучения земной коры в геологии, гидрологии и гидрографии важнейшее значение имеют изображения рельефа поверхности, распределения его высот, наклонов, текстурные особенности, воспроизводящие совокупности геологических и топографических образований различных форм, позволяющие определять зоны разломов, залегания жил рудных месторождений и др. На радиолокационных изображениях видны береговые линии морей, озер, рек, болот, зоны увлажнений, водотоки, снежные покровы, позволяющие решать различные задачи гидрографии. Многократные анализы этих изображений имеют особое значение для изучения динамики развития побережий, определения ущерба, наносимого стихийными бедствиями, для контроля уровня воды в водохранилищах и др. По оценкам диэлектрических параметров поверхностей можно получать информацию о вещественном составе горных пород, их плотности и влажности. Используя свойства проникающей способности волн, можно решать задачи подповерхностного

картографирования, выявлять геологические структуры под растительным покровом и рыхлыми слоями почв.

Развитие средств обзора Земли и других планет с аэрокосмических носителей выдвигает ряд задач в области ДЗЗ, связанных с исследованием электрофизических, геометрических параметров и статистических характеристик поверхностей. Это, прежде всего, задачи повышения точности измерений и разрешающей способности, достоверности интерпретации полученных данных, проблемы выбора оптимальных условий проведения экспериментов при их планировании, обеспечивающих минимальные или заданные погрешности измерений, проблемы, связанные с расширением функциональных возможностей средств зондирования. Знание точных значений параметров и статистических характеристик поверхностей необходимо для решения многих важнейших задач, связанных с изучением природных ресурсов, мониторингом и экологической защитой земных покровов и морской поверхности как в пределах России и ближнего зарубежья, так и при решении глобальных задач в масштабах всей планеты.

О важности решения этих задач свидетельствуют те факты, что ДЗЗ Земли и других планет Солнечной системы осуществляются практически во всех освоенных диапазонах электромагнитных волн, в том числе и в радиодиапазонах на основе приема рассеянных полей и собственного радиотеплового излучения поверхностей. Возможности выполнения этих исследований во многом обязаны тем обстоятельствам, что искомые параметры и статистические характеристики поверхности отображаются в комплексных амплитудах, характеристиках мощности, доплеровских сдвигах частот, корреляционных и спектральных характеристиках принятых сигналов. Среди наиболее значимых исследований последних десятилетий выделяются следующие [24]: исследования и запуски ИСЗ по программам «Океан» и «Сич» (Россия, Украина); проект «Природа»; результаты советско-американского эксперимента «Беринг»; исследования поверхности океана и динамики его взаимодействия с атмосферой по программе «Разрезы»

(СССР); космическая система исследования Земли «Ресурс-О1» (Россия); международная программа «Эквалант»; исследования, выполненные серией ИСЗ «Метеор» и «Космос», станциями «Салют» и «Мир»; создание метеорологической системы на базе полярно-орбитальных космических аппаратов серии NOAA; системы геостационарных аппаратов GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite); работы по программе EOS (Earth Observing System); исследования, выполненные системами ИСЗ «Тайрос» (США – Television Infra-Red Orbital Satellite), «Нимбус» (США), «Сисат» (США – Sea Satellite) «Лендсат» (США – Land Satellite), «Радарсат» (Канада – Radar Satellite), «Метеосат» (Европейское космическое агентство ESA – Meteorological Satellite), ERS (ESA – European Remote Sensing Satellite), «Инсат» (Индия – Indian Satellite), «Бхаскара» (Индия), космическими лабораториями «Скайлэб» и «Спейслэб», многоразовыми транспортными кораблями (МТК) по программе «Спейс шаттл», TOPEX/POSEIDON, ENVISAT, METOR, MOS и др., а также различными автоматическими межпланетными станциями (АМС), предназначенными для исследований поверхности Луны, Венеры, Марса, его спутника Фобоса и др., снабженными различной фотографической многозональной оптико-электронной, а также микроволновой радиолокационной активной и пассивной аппаратурой. Использование последних имеет ряд преимуществ, связанных с возможностью зондирования поверхностей сквозь облака в сложных метеорологических условиях.

В частности, многоканальной радиометрической аппаратурой приема собственного излучения в микроволновом (СВЧ) диапазоне были оснащены ИСЗ «Космос-243» (1968), «Космос-384» (1978), «Космос-1500» (1983), «Океан» (1988-1994), «Нимбус-5» (1972), «Нимбус-5» (1975), «Бхаскара-1» (1979), «Бхаскара-2» (1981), «Сисат-А» (1978), МОС-1 (Япония – Marine Observation Satellite) (1978), ERS (1991-1995). Активные РЛС (РЛС БО, РСА, скаттерометры) были установлены на ИСЗ «Космос-1500», «Океан» (РЛС БО), «Сич», «Алмаз-1» (РСА «Экор-А», 1991), «Сисат-А» (РЛС БО,

скаттерометр), «Скайлэб» (скаттерометр), «Аполлон-17» (РСА), МТТК «Спейс шаттл» (РСА SIR-A и SIR-B – Shuttle Imaging Radar), «Радарсат» (РСА, 1995), ERS-1, 2 (РСА, скаттерометр, 1991-1995), Envisat-1 (РСА, 1998), Metop-1 (РСА, 2001) и др. [24] В последние годы большое внимание уделяется проектам по созданию систем дистанционного зондирования на основе использования малых космических аппаратов и микроспутников.

Естественно, что многочисленные исследования рассеивающих свойств и радиотеплового излучения земных покровов, а также конкретные практические задачи, важные для народного хозяйства, выполняются не только спутниковыми, но и различными самолетными комплексами. При этом следует отметить результаты исследований, полученные с помощью самолетных комплексов-лабораторий дистанционного зондирования ИКИ АН СССР, ИРЭ РАН (г. Москва), Главной геофизической обсерватории (ГГО) им. А.И. Воейкова, Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) (Санкт-Петербург), многоцелевого функционального самолетного комплекса радиотехнических средств дистанционного зондирования «Марс» (РБО-0,8, РБО-3, РСА-180) ИРЭ НАН Украины (г. Харьков) и др. [24]

Состояние проблемы. Исследование СВЧ-излучения системы почва-растительность, а также возможностей определения параметров почвы и растительности по данным дистанционного СВЧ радиометрического зондирования с борта самолетов и спутников активно ведется на протяжении последних тридцати лет многочисленными научными группами и организациями различных стран. Библиография работ по указанной проблеме насчитывает сотни наименований.

Принципиальные возможности применения СВЧ радиометрического метода для определения влажности почвы под растительным покровом и биометрических показателей растительности выявлены около четверти века назад. Несмотря на то, что ряд основных исследований в этом направлении выполнен достаточно давно, их актуальность и интерес к проведению

исследований в данной области не только не ослаб, но и существенно вырос в последнее десятилетие. Данный факт объясняется, во-первых, важностью самого объекта исследований в общей системе дистанционного экологического мониторинга поверхности суши и, во-вторых, возросшими техническими возможностями СВЧ радиометрических средств дистанционного зондирования.

Основным недостатком методов ДЗЗ является сложность интерпретации результатов измерений, поскольку параметры собственного либо отражённого излучения зондируемого участка земной поверхности, получаемые в ходе измерений, связаны с исследуемыми характеристиками участка весьма сложным образом. Тем не менее, ввиду больших перспектив данных методов это направление продолжает интенсивно развиваться, а по мере появления новых достижений в этой области спрос на услуги ДЗЗ возрастает с каждым годом. Результаты ДЗЗ успешно применяются для решения задач картографирования, экомониторинга, геологоразведки. Таким образом, развитие методов и создание новых средств ДЗЗ являются на сегодняшний день весьма актуальными задачами.

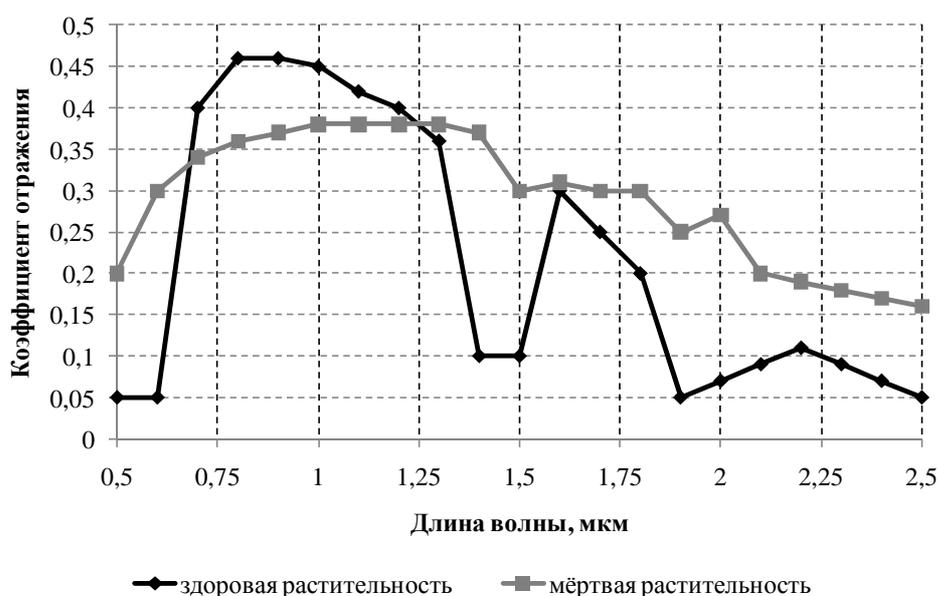


Рис. 1. Обобщённая кривая отражательной способности сосудистых растений в диапазоне 0,5 – 2,5 мкм

Одной из важнейших сфер применения методов ДЗЗ является лесное

хозяйство. Здесь технологии ДЗЗ с успехом применяются для картографирования (в частности, классификации типов растительности), мониторинга лесных пожаров, обнаружения незаконных вырубок леса, выявления очагов поражения лесонасаждений различными вредителями. В настоящее время для решения указанных задач в основном используются результаты спутниковых наблюдений в видимом и ближнем ИК диапазонах, а также в диапазонах сантиметровых и дециметровых волн. Приведём два примера. На рис. 1 представлены графики интенсивности отражённого растительностью излучения в видимом и ближнем ИК диапазонах. Очевидные отличия в кривых частотной зависимости альбедо для различных состояний растительной биомассы свидетельствуют о возможности эффективного различения типов растительности по результатам измерения интенсивности отражённого излучения. На рис. 2 приведён радиолокационный поляриметрический снимок местности в трёх поляризациях, полученный в L-диапазоне (1,27 ГГц). Даже из визуального сравнения изображений, полученных на разных поляризациях, очевидно, что каждое из них содержит уникальные детали. Анализ различных областей снимка позволяет идентифицировать на нём те или иные объекты земной поверхности. Так, наиболее светлые участки на HH-изображении соответствуют лесу, на HV-изображении – болотистой местности, на VV-изображении – низкорослой растительности. Области, тёмные на всех трёх изображениях, соответствуют водоёмам.

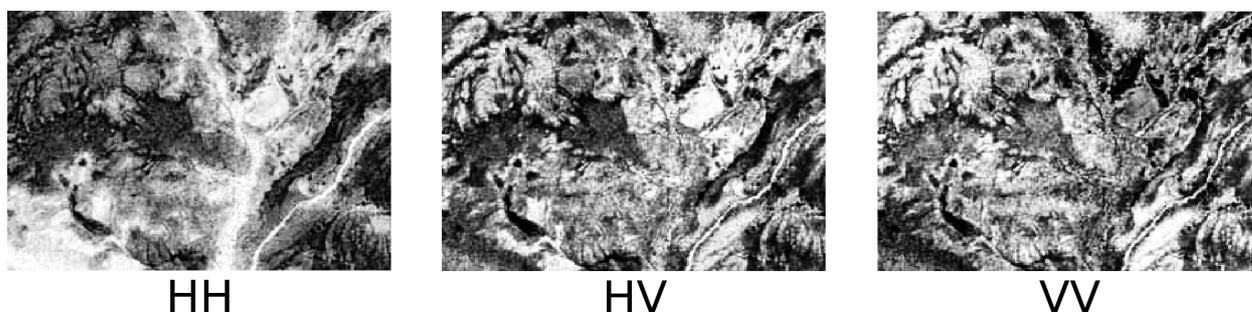


Рис. 2. Радиолокационный снимок участка местности в трёх поляризациях, полученный аппаратом ALOS PALSAR

Помимо рассмотренных выше, интерес представляет наблюдение

также и в других диапазонах электромагнитного спектра. Однако здесь имеет место ряд ограничений, на которых следует остановиться отдельно.

Проведение спутниковых наблюдений лесного покрова в более коротких диапазонах длин волн (ультрафиолет) невозможно ввиду сильного поглощения излучения озоновым слоем атмосферы. Спутниковые исследования в более длинных диапазонах длин волн (ММВ и субмиллиметровые волны) затруднены по двум причинам. Во-первых, в указанных диапазонах уровень собственного излучения растительного покрова весьма низок, и для превышения порога чувствительности современных радиометров необходимо вести измерения с большой высоты, принимая излучение с большой площади, что, в свою очередь, означает относительно низкую разрешающую способность получаемых снимков [22]. Во-вторых, ЭМВ с длинами волн от 14 мкм до 2 см испытывают сильное атмосферное поглощение ($10^0 \div 10^3$ дБ/км) и практически полностью поглощаются толщиной атмосферы [24], а следовательно, невозможна какая бы то ни было спутниковая съёмка, даже с низким разрешением¹.

Решением последней проблемы является проведение измерений с малой высоты. Платформой для проведения подобных измерений могут служить как тропосферные летательные аппараты (дирижабли, самолёты, БПЛА), так и естественные либо искусственные возвышенности — склоны гор, вышки сотовой связи и пр. Однако при этом лишь обостряется первая проблема — низкий уровень собственного излучения лесного покрова; кроме того, к ней прибавляется проблема высокого уровня радиопомех, создаваемых радиорелейными линиями и другими искусственными источниками радиоизлучения, наличие которых обусловлено прогрессирующим освоением СМВ-диапазона для целей радиосвязи и

¹ Отдельные «окна прозрачности» атмосферы, тем не менее, находят применение для решения узкого ряда задач. Так, на спутниковых изображениях, полученных на длине волны 13,5 мкм, поверхность земли неразличима, однако чётко выделяется облачный слой. Это позволяет использовать данные изображения как опору для эффективного определения границ облаков при сегментации снимков, полученных в других диапазонах.

радиолокации. Это, в свою очередь, означает, что пассивное зондирование леса в диапазонах СМВ и ММВ неосуществимо за исключением частных случаев — таких, как лесной пожар, когда благодаря высокой температуре уровень собственного излучения очага возгорания существенно возрастает.

Согласно ряду исследований, большие перспективы имеет активное зондирование леса в ММВ-диапазоне [22]. Проведённые в 1980-х гг. исследования ИРЭ РАН [40] показывают, что применение локаторов бокового обзора позволяет получить радиокартину местности с приемлемым разрешением. Более новые исследования, выполненные в 2005 г. на Урале [32], подтверждают эту информацию, а также показывают, что результаты радиолокации лесного массива в ММВ- и СМВ-диапазонах могут быть использованы для целей ДЗЗ, т.к. несут в себе ряд сведений о биометрических параметрах зондируемого участка местности, отсутствующих в результатах спутниковых наблюдений. Также в литературе имеются сведения об использовании измерений электромагнитного излучения леса в ММВ-диапазоне для прогнозирования и предупреждения лесных пожаров. Из более ранних исследований, посвящённых распространению радиоволн в толще лесного массива, известно о зависимости влияния среды распространения на радиосигнал от биометрических параметров леса. Всё вышеперечисленное говорит о том, что ДЗ леса в ММВ- и СМВ-диапазонах является перспективным направлением исследований и требует изучения.

Необходимо отметить, что к настоящему времени количество исследований, посвящённых ДЗ леса в ММВ- и СМВ-диапазонах, весьма невелико. В основном это объясняется тем, что на протяжении длительного времени подобные исследования являлись экономически невыгодными ввиду дороговизны проведения съёмки с летательных аппаратов, тем более на регулярной основе. Тем не менее, в последние годы развитие техники привело к появлению на рынке дешёвых средств мониторинга с воздуха. Это обстоятельство уже оказало определённое влияние на различные сектора

рынка. В качестве примера можно привести коммерческую аэрофотосъёмку городов России при помощи беспилотных дирижаблей, проводимую в настоящее время по заказу компании «Яндекс»: благодаря данному проекту возможность панорамного обзора различных городов с малой высоты становится доступной рядовым пользователям сети Интернет, а не только сотрудникам военных и других специальных ведомств.

Появление спроса на активное зондирование лесных покровов в СМВ- и ММВ-диапазонах обуславливает необходимость разработки соответствующих методов исследования. Однако, как показывает обзор литературы, в настоящее время данное направление находится в зачаточном состоянии: исследования подобного рода ведутся лишь в нескольких десятках научных центров по всему миру. К настоящему времени уже получены определённые практические результаты, свидетельствующие о перспективах данного направления исследований в плане повышения информативности и оперативности получения результатов ДЗ. В России исследования подобного рода проводятся, в частности, сотрудниками ИРЭ РАН. Результаты, достигнутые ими, свидетельствуют о больших перспективах использования ДЗ лесных покровов в СМВ- и ММВ-диапазонах в гражданской сфере.

Целью настоящей работы является создание программного комплекса классификации типа и состояния лесного покрова по данным активного СВЧ-зондирования в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Работа состоит из введения, четырёх глав и заключения.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Анализ существующих методов моделирования рассеяния электромагнитного излучения на физических объектах.
2. Разработка компьютерной модели рассеяния электромагнитного излучения на лесном покрове различных видов и её реализация в виде программы для ЭВМ.

3. Разработка математического и алгоритмического инструментария для решения задачи распознавания типов лесного покрова на радиолокационном снимке.

4. Калибровка и оценка адекватности разработанного инструментария по результатам экспериментальных измерений.

5. Разработка структурной схемы программно-аппаратного комплекса распознавания типов лесного покрова.

6. Испытание разработанной методики распознавания типов лесного покрова на наборе образцовых радиолокационных снимков.

Методы исследования. При решении поставленных задач в работе использовались современные методы математического и компьютерного моделирования, математического анализа, математической статистики.

Объектом исследования являются лесные покровы различных биологических видов и вегетативного состояния.

Предметом исследования является зависимость характера рассеяния электромагнитного СВЧ-излучения СМВ- и ММВ-диапазонов на лесном покрове от биометрических параметров последнего.

Научная новизна заключается в том, что:

1. Разработана фацетная модель рассеяния электромагнитного излучения лесным покровом.

2. Разработана методика выделения фрагмента диаграммы рассеяния электромагнитного излучения из радиолокационного снимка с коррекцией атмосферного поглощения.

3. Разработана и апробирована методика оценки состояния лесного покрова путём сопоставления диаграммы рассеяния, полученной в результате активного радиозондирования, с банком образцовых диаграмм рассеяния электромагнитного излучения лесными покровами различных типов.

Результаты работы, имеющие **практическую ценность**:

1. Разработана и реализована в виде программы для ЭВМ компьютерная модель рассеяния электромагнитного излучения СМВ- и

ММВ-диапазонов лесным покровом различных типов, позволяющая существенно сократить объём экспериментальных исследований путём их замены компьютерным моделированием.

2. Разработана методика распознавания типов лесного покрова по данным СВЧ-зондирования в СМВ- и ММВ-диапазонах, позволяющая повысить достоверность распознавания различных типов лесного покрова на 12% по сравнению с использованием данных инфракрасного зондирования.

3. Установлено, что с точки зрения различимости типов лесного покрова наибольшую информативность имеют частотные поддиапазоны 5, 8, 14 мм на поляризации НН и 50 мм на поляризации VН.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Компьютерная модель рассеяния электромагнитного излучения на лесном покрове.

2. Методика распознавания типов лесного покрова по результатам активной радиолокации в СМВ- и ММВ-диапазонах.

3. Набор высокоинформативных частотных каналов в СМВ- и ММВ-диапазонах.

4. Структура программно-аппаратного радиотехнического комплекса распознавания типов лесного покрова.

Личный вклад автора заключается в разработке концепции и главных положений исследования, анализе, отборе и реализации способов решения поставленных задач, теоретическом обобщении результатов исследования, представленных в диссертации и опубликованных работах.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах различного уровня:

1. Пятой научно-технической конференции аспирантов и молодых учёных «Вооружение. Технология. Безопасность. Управление» (Ковров, 2010 г.)

2. Девятой и десятой международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации»

(Владимир-Суздаль, 2011 и 2013 гг.)

3. Десятой международной научно-технической конференции «Фи-зика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (Владимир-Суздаль, 2012 г.)

4. Третьей Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техни-ки» (Владимир, 2012 г.)

5. Всероссийской молодёжной научной конференции «Научный потенциал молодёжи – будущее России»: Четвёртые Всероссийские научные Зворыкинские чтения (Муром, 2012 г.)

6. Двадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков (г. Ижевск, 2014 г.)

Публикации по теме работы. По тематике исследования опубликовано 25 научных статей, из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получено два патента на полезную модель и один – на изобретение.

Работа состоит из четырёх глав, заключения и списка литературы.

Первая глава посвящена выработке стратегии решения задачи выявления аномалий методами дистанционного зондирования. В данной главе изложен общий подход к решению данной задачи и выполнен обзор существующих методов её решения. Рассмотрены возможности экстраполяции на СМВ- и ММВ-диапазоны существующих моделей рассеяния ЭМВ на лесном покрове в метровом и дециметровом диапазонах. Также изучена возможность использования для этой цели существующих промышленных средств электродинамического моделирования. Осуществлён и обоснован выбор метода фацетного моделирования как отправной точки для дальнейших исследований рассеяния ЭМВ.

Вторая глава содержит описание разработанной автором компьютерной фацетной модели рассеяния плоской ЭМВ на лесном покрове. Приводится вывод необходимых математических соотношений, реализующих метод геометрической оптики. По результатам изучения геометрической структуры лесного массива разрабатывается методика

генерации эквивалентной трёхмерной сцены. Выполняется проектирование общей структуры пакета программ для ЭВМ, осуществляющего генерацию трёхмерной сцены по набору параметров лесного покрова, факетное моделирование рассеяния плоской волны на поверхности сцены и составление банка диаграмм обратного рассеяния плоской волны на лесном покрове.

Третья глава посвящена выработке и проверке метода классификации лесного покрова. На данном этапе составлена общая схема классификации экспериментальной диаграммы рассеяния и разработана методика определения диаграммы рассеяния участков поверхности по сегментированному радиолокационному снимку. Разработана математическая модель коррекции результатов радиозондирования, устраняющей влияние диаграммы направленности антенны радара и атмосферного поглощения излучения.

Четвёртая глава посвящена практическому исследованию адекватности разработанных моделей и разработке структуры программно-аппаратного комплекса радиомониторинга лесных покровов. На основании найденных в литературе электродинамических параметров и измеренных экспериментально геометрических параметров некоторых видов лесного покрова составлены соответствующие им расчётные задания и выполнен компьютерный расчёт диаграмм рассеяния ЭМВ. При помощи разработанной методики классификации выполнен анализ набора радиолокационных снимков СМВ- и ММВ-диапазона. Разработана и обоснована структурная схема маловысотного программно-аппаратного комплекса радиомониторинга лесных массивов в указанных диапазонах.

В заключении изложены основные результаты работы.

Глава 1. Анализ методов радиомониторинга лесных покровов. Электрофизические свойства аномальных участков

1.1. Обзор существующих технологий ДЗЗ и их приложений.

Выявление аномалий как обратная задача дистанционного зондирования

Как было сказано во введении, в основе дистанционного зондирования лежит исследование связи между свойствами изучаемого объекта и характеристиками его излучения. В данном разделе будет рассмотрено влияние вариативности различных параметров лесного массива на его электрофизические свойства.

Способы классификации данных ДЗЗ. Прежде всего, данные дистанционного зондирования Земли различаются по физическим принципам их получения. Регистрироваться может собственное излучение объектов и отраженное излучение других источников. Этими источниками могут быть Солнце или сама съемочная аппаратура. В последнем случае используется когерентное излучение (радары, сонары и лазеры), что позволяет регистрировать не только интенсивность излучения, но также и его поляризацию, фазу и доплеровское смещение, что дает дополнительную информацию. Работа самоизлучающих (активных) сенсоров не зависит от времени суток, но зато требует значительных затрат энергии.

Съемочная аппаратура может размещаться на различных платформах. Платформой может быть космический летательный аппарат, самолет, вертолет и даже простая тренога. В последнем случае мы имеем дело с наземной съемкой боковых сторон объектов (например, для архитектурных и реставрационных задач) или наклонной съемкой с естественных или искусственных высотных объектов. На одной платформе может размещаться несколько съемочных устройств, называемых инструментами или сенсорами, что обычно для космических летательных аппаратов. Например, спутники

Ресурс-О1 несут сенсоры МСУ-Э и МСУ-СК, а спутники SPOT – по два одинаковых сенсора HRV (SPOT-4 – HRVIR). Понятно, что чем дальше находится платформа с сенсором от изучаемого объекта, тем больший охват и меньшую детализацию будут иметь получаемые изображения.

Наконец, данные ДЗЗ могут классифицироваться по различным видам разрешения и охвата, по типу носителя данных (фотографические и цифровые), по принципу работы сенсора (фотоэффект, пироэффект и др.), по способу формирования (развертки) изображения, по специальным возможностям (стереорежим, сложная геометрия съемки), по типу орбиты, с которой производится съемка, и т.д. В данном разделе мы ограничимся рассмотрением параметров, наиболее важных с точки зрения практического применения данных ДЗЗ. Возможность обнаружить и измерить то или иное явление, объект или процесс определяется, в первую очередь, разрешающей способностью сенсора. Данные ДЗЗ характеризуются несколькими видами разрешений: пространственным, спектральным, радиометрическим и временным. Под термином «разрешение» обычно подразумевается пространственное разрешение.

Пространственное разрешение характеризует размер наименьших объектов, различимых на изображении. В зависимости от решаемых задач, могут использоваться данные низкого (более 100 м), среднего (10 – 100 м) и высокого (менее 10 м) разрешений. Снимки низкого пространственного разрешения являются обзорными и позволяют одновременно охватывать значительные территории – вплоть до целого полушария. Такие данные используются чаще всего в метеорологии, при мониторинге лесных пожаров и других масштабных природных бедствий. Снимки среднего пространственного разрешения на сегодня – основной источник данных для мониторинга природной среды. Спутники со съемочной аппаратурой, работающей в этом диапазоне пространственных разрешений, запускались и запускаются многими странами – Россией, США, Францией и др., что обеспечивает постоянство и непрерывность наблюдения. Съемка высокого

разрешения из космоса до недавнего времени велась почти исключительно в интересах военной разведки, а с воздуха – с целью топографического картографирования. Однако сегодня уже есть несколько коммерчески доступных космических сенсоров высокого разрешения (КБР-1000, IRS, IKONOS), позволяющих проводить пространственный анализ с большей точностью или уточнять результаты анализа при среднем или низком разрешении.

Спектральное разрешение указывает на то, какие участки спектра ЭМВ регистрируются сенсором. При анализе природной среды, например, для экологического мониторинга, этот параметр – наиболее важный. Условно весь диапазон длин волн, используемых в ДЗЗ, можно поделить на три участка – радиоволны, тепловое излучение и видимый свет. Такое деление обусловлено различием взаимодействия электромагнитных волн и земной поверхности, различием в процессах, определяющих отражение и излучение ЭМВ.

Наиболее часто используемый диапазон ЭМВ – видимый свет и примыкающее к нему ближнее ИК-излучение. В этом диапазоне отражаемая солнечная радиация несет в себе информацию, главным образом, о химическом составе поверхности. Подобно тому как человеческий глаз обладает способностью различать вещества по цвету, сенсор дистанционного зондирования фиксирует «цвет» в более широком понимании этого слова. В то время как человеческий глаз регистрирует лишь три участка (зоны) электромагнитного спектра, современные сенсоры способны различать десятки и сотни таких зон, что позволяет надежно выявлять объекты и явления по их заранее известным спектрограммам. Для многих практических задач такая детальность нужна не всегда. Если интересующие объекты известны заранее, можно выбрать небольшое число спектральных зон, в которых они будут наиболее заметны. Так, например, ближний ИК-диапазон очень эффективен в оценке состояния растительности, определении степени ее угнетения. Для большинства приложений достаточный объем информации

дает многозональная съемка со спутников LANDSAT (США), SPOT (Франция), Ресурс-О (Россия). Для успешного проведения съемки в этом диапазоне длин волн необходимы солнечный свет и ясная погода.

Обычно оптическая съемка ведется либо сразу во всем видимом диапазоне (панхроматическая), либо в нескольких более узких зонах спектра (многозональная). При прочих равных условиях, панхроматические снимки обладают более высоким пространственным разрешением. Они наиболее пригодны для топографических задач и для уточнения границ объектов, выделяемых на многозональных снимках меньшего пространственного разрешения.

Тепловое ИК-излучение несет информацию, в основном, о температуре поверхности. Помимо прямого определения температурных режимов видимых объектов и явлений (как природных, так и искусственных), тепловые снимки позволяют косвенно выявлять объекты, скрытые под землёй – подземные реки, трубопроводы и т.п. Поскольку тепловое излучение создается самими объектами, для получения снимков не требуется солнечный свет. Такие снимки позволяют отслеживать динамику лесных пожаров, нефтяные и газовые факелы, процессы подземной эрозии. Следует отметить, что получение космических тепловых снимков высокого пространственного разрешения технически затруднительно, поэтому сегодня доступны снимки с разрешением около 100 м. Много полезной информации даёт также тепловая съемка с самолетов.

Сантиметровый диапазон радиоволн используется для радарной съемки. Важнейшее преимущество снимков этого класса – в их всепогодности. Поскольку радар регистрирует собственное, отраженное земной поверхностью, излучение, для его работы не требуется солнечный свет. Кроме того, радиоволны этого диапазона свободно проходят через сплошную облачность и даже способны проникать на некоторую глубину в почву. Отражение сантиметровых радиоволн от поверхности определяется её текстурой («шероховатостью») и наличием на ней всевозможных плёнок.

Так, например, радары способны фиксировать наличие нефтяной пленки толщиной 50 мкм и более на поверхности водоемов даже при значительном волнении. Еще одной особенностью радарной съемки является ее высокая чувствительность к влажности почвы, что важно и для сельскохозяйственных, и для экологических приложений. В принципе, радарная съемка с самолетов способна обнаруживать подземные объекты, например, трубопроводы и утечки из них.

Радиометрическое разрешение определяет диапазон различимых на снимке яркостей. Большинство сенсоров обладают радиометрическим разрешением 6 или 8 бит, что наиболее близко к мгновенному динамическому диапазону зрения человека. Но есть сенсоры и с более высоким радиометрическим разрешением (10 бит для AVHRR и 11 бит для IKONOS), позволяющим различать больше деталей на очень ярких или очень темных областях снимка. Это важно в случаях съемки объектов, находящихся в тени, а также когда на снимке одновременно находятся большие водные поверхности и суша. Кроме того, такие сенсоры, как AVHRR, имеют радиометрическую калибровку, что позволяет проводить точные количественные измерения.

Наконец, временное разрешение определяет, с какой периодичностью один и тот же сенсор может снимать некоторый участок земной поверхности. Этот параметр весьма важен для мониторинга чрезвычайных ситуаций и других быстро развивающихся явлений. Большинство спутников (точнее, их семейств) обеспечивают повторную съемку через несколько дней, некоторые – через несколько часов. В критических случаях для ежедневного наблюдения могут использоваться снимки с различных спутников, однако, нужно иметь в виду, что заказ и доставка сами по себе могут потребовать немалого времени. Одним из вариантов решения является приобретение приемной станции, позволяющей принимать данные непосредственно со спутника. Это удобное решение для ведения постоянного мониторинга используется некоторыми организациями на территории России,

обладающими приемными станциями данных со спутников Ресурс-О. Для отслеживания изменений на какой-либо территории важна также возможность получения архивных (ретроспективных) снимков.

Задачи дистанционного зондирования принято подразделять на прямые (определение характеристик собственного, рассеянного или вынужденного электромагнитного излучения объекта по его физическим, геометрическим и прочим параметрам) и обратные (определение параметров объекта по характеристикам его излучения). Очевидно, что задачу выявления аномальных участков можно отнести к обратным задачам ДЗЗ.

Анализируя существующие модели решения прямой и обратной задач дистанционного зондирования, можно условно выделить два подхода к решению данных задач, между которыми не всегда возможно провести чёткую границу. В основе *модельного* подхода лежит использование набора адекватных математических моделей, устанавливающих связь параметров отражённого излучения с биометрическими параметрами зондируемой среды (в нашем случае – леса). Создание банка таких моделей является весьма трудоёмкой задачей ввиду, во-первых, высокой вариативности параметров зондируемой среды, что приводит к необходимости учёта большого количества факторов, и, во-вторых, сопоставимости линейных размеров рассеивателей с длиной волны, что исключает возможность использования ряда классических решений задачи обратного рассеяния, основанных на допущениях об однородности моделируемой среды, и, опять же, ведёт к усложнению задачи моделирования.

Суть *эмпирического* подхода заключается в сопоставлении результатов измерений с обширной базой уже дешифрованных данных. Несмотря на высокую точность, данный способ требует предварительного создания базы данных, что, в свою очередь, является очень трудоёмкой задачей, т.к. требует проведения огромного количества полевых измерений. Кроме того, данный метод характеризуется низкой робастностью и высоким уровнем ложных срабатываний. Тем не менее, практика показывает, что в значительном числе

случаев использование эмпирических методов является гораздо более выгодным по сравнению с моделированием. В немалой степени развитию эмпирических методов ДЗЗ в ИК- и ДМВ-диапазонах способствует наличие огромных архивов многолетних спутниковых наблюдений, что в сочетании с поступлением информации от лесных хозяйств и других наземных источников информации о предмете исследования позволяет эффективно обучать и непрерывно развивать эмпирические модели, добиваясь высокой достоверности получаемых с их помощью результатов.

В последние годы благодаря развитию средств вычислительной техники и методов обработки «больших данных» (англ. *big data*) модельные методы дешифрирования результатов ДЗ вышли на новый виток развития. Широкое распространение получили комбинированные методы, объединяющие в себе черты как эмпирического, так и модельного подходов. Комбинированная схема, как правило, в основе своей является эмпирической, в то время как отдельные её составные части реализуются при помощи тех или иных средств математического или компьютерного моделирования. Последнее обстоятельство способствует существенному упрощению модели.

Задача составления базы данных аномалий только по результатам измерения отражённого радиоизлучения является весьма трудоёмкой. В силу этого для целей настоящей работы было принято решение обратиться к комбинированному подходу: заполнение базы данных осуществляется при помощи компьютерной модели рассеяния радиоизлучения на лесном покрове, а исходные данные для модели рассеяния подготавливаются на основе реальных измерений. Предпосылкой к использованию синтетического подхода к заполнению базы данных явился факт существования адекватных способов моделирования рассеяния радиоизлучения на различных природных средах, о чём будет подробно сказано далее.

В рамках изучения вопроса моделирования рассеяния электромагнитного излучения на лесном покрове была рассмотрена

возможность использования для этой цели существующих промышленных программных средств моделирования рассеяния ЭМВ (CST Studio Suite, FEKO). Данные программные средства позволяют выполнить моделирование процессов распространения электромагнитной энергии сквозь объекты произвольной формы при помощи различных методик моделирования. Использование данных средств для достижения поставленных целей, тем не менее, признано нерациональным. Во-первых, исходной информацией для данных инструментов выступает статическая трёхмерная модель местности, вопрос наличия которой (генерации, создания вручную либо съёмки с натуры) не снимается. Во-вторых, платой за высокую степень универсальности заложенных в данные средства моделей является их значительная требовательность к вычислительным ресурсам ЭВМ и невысокая скорость работы; введение в модели ряда упрощений, обоснованных особенностями геометрии растительного покрова, позволило бы существенно увеличить производительность моделирования, тем самым существенно снизив его стоимость. Таким образом, не отрицая достоинств существующих промышленных средств, следует прийти к выводу о целесообразности разработки собственной модели, оптимизированной под решение поставленных задач. Существующие средства могут быть использованы как референтные в процессе проверки адекватности разрабатываемой модели.

1.2. Отличительные признаки аномальных участков

Как было рассмотрено выше, в целях выявления аномалий в ММВ-диапазоне нами будет рассматриваться активное ДЗЗ с малой высоты. Рассмотрим более подробно основные элементы геометрии лесного массива и их вклад в распространение радиоволн с точки зрения моделирования этого процесса.

Кроны деревьев. В случае, когда линейные размеры отдельных рассеивающих элементов (листьев, хвои, веток), составляющих крону дерева,

по порядку величины много меньше длины волны, крону можно считать границей раздела двух сред, на которой происходит преломление электромагнитных волн по законам геометрической оптики. Однако в случае волн миллиметрового диапазона, когда линейные размеры рассеивающих элементов сопоставимы с длиной волны и превышают её, достоверность данной аппроксимации следует поставить под сомнение [24]. Для описания рассеяния электромагнитного излучения на кроне дерева целесообразно отказаться от моделирования последней в виде некоей поверхности и вместо этого представить её как совокупность рассеивающих элементов различной природы, взаимно влияющих на процесс распространения волны. Далее эти элементы будут рассмотрены подробнее.

Листья, хвоя. Существуют два основных подхода к моделированию этих элементов. Во-первых, листья и хвою можно представить в виде аморфной среды с постоянным (в среднем) показателем диэлектрической проницаемости. Данный подход демонстрирует удовлетворительные результаты в случаях, когда линейные размеры рассеивающих элементов по порядку величины много меньше длины волны. Второй подход основан на представлении листьев и хвои в виде совокупности большого числа хаотично ориентированных дискретных рассеивателей – проводящих дисков в случае листьев и короткозамкнутых линейных вибраторов в случае хвои. В случае миллиметровых волн целесообразно применить именно этот подход. При этом следует учесть наличие значительных эффектов дифракции волн на данных рассеивающих элементах, а также сильное поглощение волн ввиду того, что биомасса является средой с потерями (мнимая часть комплексного коэффициента диэлектрической проницаемости отлична от нуля; проводимость обусловлена наличием в клетках дерева большого количества влаги с растворёнными в ней минеральными солями и полярными органическими соединениями [24]).

Ветви. Длины и диаметры ветвей деревьев очень различаются, ввиду чего их моделирование может быть затруднено. Однако следует принять во

внимание тот факт, что при исследованиях в миллиметровом диапазоне волн линейные размеры ветвей сопоставимы с длиной волны и превышают её, ввиду чего к данным объектам целесообразно применить унифицированный подход и рассмотреть их как совокупность квазихаотично расположенных проводящих цилиндров или конусов. Немаловажным является вопрос о том, какой величиной диэлектрической проницаемости следует задаться при моделировании этих цилиндров. Как показано в работе [9], в реальных ветвях и стволах деревьев величина диэлектрической проницаемости сильно зависит от глубины погружения и диаметра ствола. Однако для целей настоящей работы диэлектрическую проницаемость стволов и ветвей можно считать постоянной; данное соображение продиктовано тем, что в СМВ- и ММВ-диапазонах толщина скин-слоя составляет доли миллиметра, ввиду чего излучение проникает в толщу древесины на незначительную глубину.

Стволы деревьев. К стволам в целом применимы те же рассуждения, что и к ветвям, но с поправкой на то, что, во-первых, стволы ориентированы не хаотично, а преимущественно вертикально, а, во-вторых, в зависимости от вида растения диаметр ствола может более или менее значительно зависеть от высоты над землёй. В первом приближении стволы можно моделировать в виде цилиндров постоянного диаметра. Как показано в работе [9], моделирование стволов в виде цилиндров с однородным по всему объёму значением показателя диэлектрической проницаемости не является достаточно достоверным, а введение зависимости значения показателя диэлектрической проницаемости от глубины даёт лучший результат. Кроме того, в [32] показывается, что более достоверный результат может быть получен при моделировании стволов в виде конусов.

Снег. Во-первых, рассмотрим вопрос моделирования отражения радиоизлучения от снега. Как показано в работах [10], [13], слой снега в миллиметровом диапазоне волн может быть представлен в виде слоя с однородным по объёму значением показателя комплексной диэлектрической проницаемости, что хорошо согласуется с результатами экспериментов.

Большое количество необходимых измерений диэлектрической проницаемости снега было проделано, например, в ходе работ, описанных в [13]. Во-вторых, следует учесть, что наличие или отсутствие снега, а также покрытие им различных частей лесного массива зависят от времени года и типа растительности. В летний период снег отсутствует. В зимний период снег, во-первых, лежит горизонтальным слоем на слое опада и почвы и, во-вторых, покрывает ветки хвойных деревьев. Также при определённых условиях снег может покрывать ветви лиственных деревьев.

Подстилка. Почва в лесу покрыта слоем опада с деревьев, состоящим из мелких веток, щепок, листьев, хвои и т.д. [12] С одной стороны, целесообразно моделировать его по аналогии со слоями листвы и ветвей в виде совокупности дискретных рассеивателей (цилиндров, дисков, вибраторов), однако существуют два важных отличия, заставляющие поставить под сомнение эту точку зрения. Во-первых, рассеиватели в слое опада ориентированы менее хаотично, преимущественно горизонтально. Во-вторых, слой имеет значительно большую концентрацию биомассы на единицу объёма: отдельные рассеивающие элементы плотно прилегают друг к другу, образуя слой с однородным (в среднем) значением показателя преломления. С учётом этого предсказание наилучшего варианта моделирования данного слоя затруднено и требует дальнейших исследований. Не исключено, что моделирование данного слоя в виде аморфной среды в данном случае позволяет меньшими усилиями получать более достоверные результаты, нежели представление его в виде совокупности дискретных рассеивателей.

Почва. Моделирование данного слоя затруднено, поскольку его свойства очень сильно зависят от типа почвы, температуры и влажности. В целом почва может быть достаточно достоверно промоделирована в виде полубесконечного плоского слоя с показателем диэлектрической проницаемости, зависящим от глубины по закону, близкому к экспоненциальному [24], [25]. При рассмотрении свойств данного слоя

может потребоваться также учесть влияние корней деревьев, залегающих в почве. Моделирование корней целесообразно проводить по аналогии с моделированием ветвей, т.е. представляя корни в виде хаотично расположенных цилиндров разного диаметра. Однако следует иметь в виду, что в ММВ-диапазоне верхний слой почвы может обладать значительной диэлектрической проницаемостью, благодаря чему доля излучения, доходящая сквозь почву до корней, будет настолько незначительной, что этим можно будет пренебречь и за счёт этого отказаться от моделирования глубокого залегания корней, ограничившись небольшим по глубине верхним слоем. [25].

По результатам анализа работ [38], [39] автором были рассмотрены несколько классов подстилающей поверхности (табл. 1.1). Для каждого класса были перечислены отличительные признаки, позволяющие выявлять объекты данного класса на радиолокационных снимках, предложен способ распознавания данного класса и перечислены исходные данные, необходимые для реализации процесса распознавания рассмотренным способом. Следует отметить, что ввиду многообразия разновидностей подстилающей поверхности данный перечень может быть существенно расширен и дополнен; в целях настоящего исследования ставилась задача рассмотреть лишь несколько классов с целью проверки целесообразности исследований в данном направлении.

Табл. 1.1

Различаемые классы	Отличительный признак	Способ различения	Необходимые исходные данные
Наличие/отсутствие лесного покрова (луга, вырубки, гари)	На покрытых лесом участках высотный профиль местности, снимаемый радиолокацией в диапазонах 10 см и более, отличается от такового, снимаемого в диапазоне 3 см и менее, за счёт отражения более коротких волн в основном от крон деревьев, а более длинных – в основном от почвы и стволов	Сравнение высотных профилей местности, снятых на разных длинах волн	Высотные радиолокационные карты местности, полученные в диапазонах 8 мм и 15–30 см
Растительность различных	Различные типы растительности дают разный уровень собственного	Сопоставление вектора отклика	Многоспектральные снимки в

типов и биологических видов	излучения в красном и ближнем ИК-диапазонах, а также обеспечивают разный отклик на различных вариантах поляризации (HH, VV, HV, VH) при активной радиолокации на разных длинах волн (1 мм – 3 см)	растительности во всех режимах измерения с заранее составленной базой данных	видимом и ИК-диапазонах, радиолокационные снимки на разных поляризациях и длинах волн
Растительность различного биологического состояния (различные вегетационные периоды, поражённость болезнями, влажность и т.д.)	В зависимости от биологического состояния и потребительских качеств растительный покров даёт специфический отклик в узких полосах видимого и ИК-диапазонов, соответствующих поглощению излучения молекулами различных веществ (хлорофилл, вода, соли)	Выводы по результатам вычисления т.н. вегетационных индексов по специальным формулам	Многоспектральные снимки в видимом и ИК-диапазонах
Древесина различных потребительских качеств			
Суша/водная поверхность/снежный покров	Специфические отклики в радиодиапазоне и ИК-диапазоне	Сопоставление вектора отклика в ИК- и сантиметровом диапазоне с базой данных	ИК- и радиолокационные снимки
Стоячий лес/бурелом/ветровал	Изменение угла между направлением стволов деревьев и лучом локатора приводит к появлению контрастных областей на радиолокационных снимках диапазона 3–8 см. Вид этих областей отличается на снимках, сделанных с орбит разного наклона и направления	Выявление отличающихся областей на радиолокационных снимках, полученных под различными зенитными углами	Радиолокационные снимки в диапазонах 3-8 см
Искусственные объекты (здания, техника, автодороги)	Характерная геометрическая форма, идентичная на снимках разных диапазонов	Анализ снимков видимого и ИК-диапазонов при помощи алгоритмов распознавания образов	Снимки в видимом и ИК-диапазонах

Очевидно, различные виды аномалий проявляют себя в изменении геометрических и электрофизических свойств отдельных составляющих частей лесного покрова, что, в свою очередь, оказывает влияние на характер распространения радиоволн. В табл. 1.2 были сведены некоторые факторы, определяющие характер распространения радиоволн в толще лесного массива [39].

Табл. 1.2

Фактор	Вариативные параметры	Примеры
тип подстилающей поверхности	<ul style="list-style-type: none"> • наличие стволов и листвы • диэлектрическая проницаемость слоя почвы 	<ul style="list-style-type: none"> • лес • луг • водоём • асфальт, бетон
тип леса	<ul style="list-style-type: none"> • диэлектрическая проницаемость элементов дерева • плотность и доля элементов кроны на единицу объёма 	<ul style="list-style-type: none"> • хвойный • лиственный • смешанный
погодные условия	<ul style="list-style-type: none"> • диэлектрическая проницаемость всех элементов геометрии леса 	<ul style="list-style-type: none"> • сухая погода • влажность • снежный покров
возраст древостоя	<ul style="list-style-type: none"> • высота и диаметр стволов • плотность элементов кроны на единицу объёма • диэлектрическая проницаемость элементов геометрии деревьев 	<ul style="list-style-type: none"> • молодая поросль • высокая растительность • сухостой
характер повреждений	<ul style="list-style-type: none"> • геометрия слоёв стволов и кроны • диэлектрическая проницаемость тех или иных элементов геометрии леса 	<ul style="list-style-type: none"> • ветровал • бурелом • гарь • вырубка • поражение вредителями

Как видно, на распространение электромагнитного излучения оказывает влияние множество различных факторов, что с неизбежностью означает высокую сложность создания адекватной модели этого процесса ввиду необходимости учёта десятков исходных параметров.

1.3. Обзор методов моделирования отражательных и излучательных свойств лесного покрова. Выбор способа моделирования

Задача моделирования рассеяния электромагнитного излучения на объектах произвольной формы может быть математически выражена как задача нахождения *двулучевой функции отражательной способности*² (ДФОС) [24]:

$$v = v(\varphi, \psi, \varphi_0, \psi_0, p_1 \dots p_n) [\text{ср}^{-1}],$$

² Англ. BRDF – bidirectional reflectance distribution function

где φ , ψ – азимутальный и зенитный углы наблюдения (здесь и далее система координат и углов определяется в соответствии с рис. 1.1); φ_0 , ψ_0 – азимутальный и зенитный углы облучения поверхности; $p_1 \dots p_n$ – вектор физических и биометрических параметров поверхности.

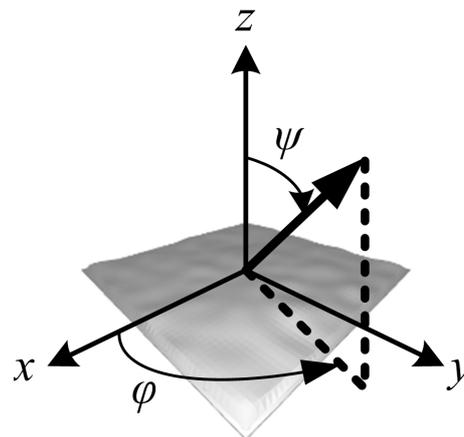


Рис. 1.1. К определению азимутального (φ) и зенитного (ψ) углов

Данная задача, как правило, не имеет аналитического решения. В силу этого при разработке моделей рассеяния приходится прибегать к тем или иным упрощениям и допущениям относительно характера поведения электромагнитных волн при взаимодействии их со средой (подробно об этом см. [24]). В качестве классического примера упрощения геометрии можно привести модели, представляющие зондируемую среду в виде полубесконечного однородного слоя, диэлектрическая проницаемость которого зависит от расстояния от границы слоя по какому-либо несложному закону. Следует также отметить распространённый приём аппроксимации природных сред многослойными структурами с резкими границами между слоями. Типичные примеры упрощённого представления поведения электромагнитной волны — это допущения о её однократном рассеянии или полном поглощении первой же поверхностью на пути волны. Практика показывает [24], что использование подобных подходов незначительно сказывается на достоверности моделей рассеяния излучения на различных типах подстилающей поверхности в случае, если речь идёт о длинах волн порядка десятков-сотен МГц.

В то же время, для более коротких волн (от единиц ГГц и выше) вклад поглощения и многократного рассеяния ЭМВ оказывается весьма существенным, что крайне усложняет поиск аналитического решения задачи рассеяния. Определённых успехов в экстраполяции рассмотренного выше подхода на СМВ- и ММВ-диапазоны можно, тем не менее, добиться в

отдельных узких случаях. Так, упомянутая в работе [8] модель описания ЭПР некоторых типов шероховатых поверхностей, справедливая для рабочих частот от 3 до 100 ГГц, удачно эксплуатирует тот факт, что описываемые ею поверхности состоят из множества квазиплоских площадок с достаточно малым разбросом их ориентации в пространстве. Модель рассеяния плоской волны на поверхности из диэлектрических цилиндров, рассмотренная в [42], удовлетворительно сходится с результатами экспериментов в ГГц-диапазоне при условии относительно невысокой плотности элементарных рассеивателей на единицу объёма. Большое количество аппроксимаций эмпирических зависимостей радиояркостной температуры поверхности в ИК-диапазоне от различных биометрических параметров растительности рассмотрено в [22]. Автором также была предпринята попытка [50] создания аналогичной модели для листовенного слоя, в основе которой лежал целый ряд допущений о форме и электромагнитных свойствах листьев. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало удовлетворительную сходимость, однако продолжение работы над моделью подвело к мысли о бесперспективности развития опробованного модельного подхода ввиду прогрессирующей деградации достоверности результатов моделирования по мере усложнения модели.

Поиски способа адекватного моделирования поверхности лесного покрова привели к рассмотрению методики фацетного моделирования, являющейся подмножеством методик, известных под общим названием «приближение геометрической оптики» [37]. При использовании данной методики задача рассеяния решается чаще всего численными методами, поскольку её аналитическое решение возможно лишь для частных случаев геометрии рассеивающей поверхности (одним из таких сугубо частных решений фактически являлась упомянутая выше модель [50]). Метод фацетного моделирования хорошо зарекомендовал себя в радиолокации при моделировании процессов рассеяния на объектах сложной формы. Важно отметить, что в случаях, когда линейные размеры рассеивателей отличаются

от длины волны на один-два порядка, значительное влияние на результат моделирования оказывают дифракционные эффекты, ввиду чего при построении фацетной модели, помимо методов геометрической оптики, необходимо использовать методы геометрической теории дифракции.

Рассмотрим данный метод подробнее. В основе метода лежит представление рассеивающего объекта в виде совокупности множества квазиплоских поверхностей (фацетов), задача рассеяния на каждой из которых решается относительно просто. Ввиду того, что поверхность рассеяния может иметь произвольную форму, задача анализа геометрического хода электромагнитной волны при её рассеянии на совокупности фацетов может в общем случае быть решена только на ЭВМ. Таким образом, исследователь оказывается в значительной степени избавлен от трудоёмкости учёта геометрии объекта, сосредотачиваясь на физике процессов рассеяния и преломления ЭМВ, изученных достаточно хорошо. С другой стороны, применение компьютерной фацетной модели позволяет получать лишь частные решения для конкретных исходных данных, аналитическое же их обобщение если и может быть осуществлено, то только путём аппроксимации большого количества таких частных решений.

Основным достоинством фацетного моделирования является его универсальность. Если для решения какой-либо задачи возможно принятие допущения о распространении радиоволн по законам геометрической оптики (возможно, с поправкой на дифракционные явления), то, располагая данными о физических свойствах материалов модели на разных частотах, можно выполнить моделирование сразу для широкого диапазона длин волн. Данное обстоятельство как нельзя лучше подходит для моделирования результатов многоспектральной съёмки, широко используемой в ДЗЗ. Один из главных недостатков фацетного моделирования заключается в его высокой вычислительной сложности; в то же время, фацетные алгоритмы идеально подходят для параллельных вычислений, ввиду чего могут быть реализованы на современных многопроцессорных ЭВМ, максимально эффективно

используя их ресурсы.

Возможность использования фацетного моделирования для анализа прохождения волн через толщу лесного массива в СМВ- и ММВ-диапазонах обосновывается тем фактом, что линейные размеры рассеивающих элементов (листьев, веток и др.) превышают длину волны. Тем не менее, ввиду близости порядка этих величин фацетная модель, основанная только на методе геометрической оптики, даст заведомо высокий уровень погрешности моделирования. Для преодоления этого недостатка, как было сказано ранее, необходимо воспользоваться методами геометрической теории дифракции. Практические аспекты реализации этой поправки будут рассмотрены далее.

В литературе периодически появляются упоминания о зарубежных исследованиях в сфере ДЗ растительных покровов, проводимых с использованием фацетного моделирования, однако подробная информация о результатах этих исследований в открытой печати представлена крайне скудно. Тем не менее, имеющаяся информация свидетельствует об успешном применении данного метода для решения ряда задач, что позволяет считать данный метод перспективным и обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований.

Выводы к главе 1

1. Основной проблемой создания радиотехнических систем мониторинга лесов является недостаточность теоретического аппарата обработки данных ДЗЗ.

2. На сегодняшний день на рынке представлено достаточное количество средств мониторинга с воздуха в рассматриваемых диапазонах.

3. Геометрия лесного массива может быть эффективно описана набором статистических параметров и аппроксимирована набором простых геометрических фигур.

4. Для моделирования распространения радиоволн в толще лесного массива выбран метод фацетного моделирования.

Глава 2. Разработка компьютерной фацетной модели рассеяния радиоизлучения на лесном покрове

2.1. Аппроксимация геометрии лесного покрова

Ввиду того, что фацетное моделирование осуществляется на ЭВМ, задача численного нахождения ДФОС разбивается на две подзадачи:

- 1) формирование сцены – трёхмерной геометрической модели растительного покрова, отвечающей заданным параметрам;
- 2) собственно нахождение диаграммы рассеяния излучения.

Настоящий раздел посвящён рассмотрению первой подзадачи. В качестве наиболее простого способа формирования сцены был рассмотрен вариант коллажирования сцены из готовых трёхмерных моделей отдельных объектов, которые можно найти в сети Интернет. Данный вариант был отвергнут по целому ряду соображений. Во-первых, готовые модели аппроксимируют геометрию многих частей растений плоскими фигурами, что не позволяет непосредственно использовать их для расчёта преломления электромагнитной волны. Во-вторых, эти модели имитируют лишь геометрические и цветовые характеристики лесного покрова; привязка к ним электродинамических параметров требует их полной переработки. В-третьих, зачастую модели не являются замкнутыми трёхмерными телами, тогда как условие замкнутости каждого объекта является необходимым для корректного расчёта хода луча. Ввиду этого было решено рассмотреть возможность алгоритмического синтеза трёхмерных сцен.

Задача натуралистичной алгоритмической генерации геометрии растительных покровов различных видов исследуется достаточно давно. В качестве примера одной из классических работ данной области можно назвать [6]. Выдающиеся результаты в этом направлении достигнуты сотрудниками Университета Калгари (Канада). В основе предлагаемого ими метода лежит представление растений в виде L-систем (разновидность фракталов). Разработанное ими семейство алгоритмов генерации

растительной геометрии³ позволяет получать реалистичные трёхмерные модели широкого спектра растений, от травяных до древесных.

Анализ геометрии растений и местности реального лесного массива позволяет сделать заключение, что лес большей частью может быть представлен в виде замкнутых поверхностей относительно несложной формы – цилиндров, плоских фрагментов, криволинейных поверхностей с крупномасштабными неровностями. Преимуществом использования данных геометрических приближений по сравнению с точным моделированием формы деревьев является существенное снижение вычислительных затрат. Как показывает исследование [32], данные приближения несущественно снижают точность моделирования, что позволяет прибегать к ним на практике. Для учёта этих особенностей лесной геометрии было принято решение ввести в модель следующие геометрические объекты:

1) замкнутый многогранник, составленный из множества треугольников. Такие объекты могут иметь произвольную форму, благодаря чему с их помощью можно моделировать рельеф местности, наросты на коре деревьев, снежный покров и проч. Классическая для компьютерной графики аппроксимация поверхности треугольниками (тесселяция) [27] базируется на том факте, что три точки – необходимый минимум для построения участка поверхности в пространстве. Для дальнейшего уточнения геометрии вместо плоских треугольников можно использовать лоскуты поверхностей высших порядков (бикубической поверхности Кунса, поверхности Безье, B-сплайнов и т.д.) [31].

2) цилиндр. Введение в модель подобных объектов продиктовано тем, что выраженную цилиндрическую форму имеют пни, а также спиленные стволы и ветви деревьев; листья также можно представить в виде цилиндров, диаметр которых много больше высоты. Таким образом, для представления указанных частей сцены исчезает необходимость в тесселяции, что приводит

³ Сайт <http://algorithmic-botany.org/> целиком посвящён данным разработкам.

к резкому уменьшению количества объектов на сцене и положительно сказывается на производительности компьютерной модели.

3) конус. Форму, близкую к конической, имеют стволы и ветви деревьев. Согласно исследованию [32], использование конусов вместо цилиндров для представления цельных стволов и ветвей при моделировании распространения ЭМВ в толще лесного массива позволяет добиться существенно большей точности результатов.

Из методики построения структуры дерева, упомянутой выше, был выбран ряд допущений о геометрии дерева, актуальный для решаемой задачи. Часть допущений не была включена в рассмотрение по причине того, что необходимость их введения в оригинальном алгоритме диктовалась требованиями тесселяции высокого разрешения, от которой, как было сказано выше, было решено отказаться. Рассмотрим подробнее допущения о геометрии дерева, положенные в основу разработанной программы-генератора. Введём понятие порядка ветвления: ствол дерева имеет нулевой порядок, его ответвления – первый и т.д.

1) ветвь каждого порядка (включая ствол) разделяется на две зоны – свободную от ветвления и ветвящуюся. Положение границы зоны ветвления индивидуально для каждого порядка ветвления и задаётся статистически;

2) точки ветвления от начала зоны ветвления до конца ветви располагаются квазилинейно;

3) угол наклона ветви к ветви-родителю, длина и радиус ветви по отношению к родителю, густота ветвления задаются статистически и индивидуальны для каждого порядка ветвления;

4) матожидание угла наклона дочерних ветвей к ветви-родителю линейно убывает от максимума на границе зоны ветвления ветви-родителя до нуля к концу ветви;

5) матожидание длины дочерних ветвей по отношению к ветви-родителю убывает от максимума на границе зоны ветвления до ветви-родителя до нуля к её пропорционально корню квадратному расстояния от

начала зоны ветвления до точки ветвления;

б) угол наклона к горизонту ветвей более чем первого порядка ветвления имеет матожидание, соответствующее направлению на горизонт.

Для генерации ландшафта был выбран алгоритм на основе тесселяции. Фрагменту ландшафта заданного размера ставится в соответствие виртуальная регулярная сетка, узлы которой представляют собой карту высот местности. Узлы сетки заполняются случайными значениями, после чего сетка несколько раз фильтруется простым двумерным КИХ-ФНЧ для придания гладкости складкам местности. Затем на основе сетки осуществляется генерация набора треугольников, после чего к полученной кусочно-гладкой поверхности, соответствующей поверхности почвы, добавляется несколько треугольников, превращающих модель ландшафта в замкнутый многогранник (замкнутость facets является необходимым условием для корректной трассировки лучей).

2.2. Алгоритмическая база фацетной модели

Анализируя определение фацетной модели, нетрудно заметить, что основополагающие принципы фацетного моделирования тесно перекликаются с типовыми задачами трёхмерной компьютерной графики. Главное отличие состоит в конечных целях моделирования: методы компьютерной графики предназначены для решения интеграла рендеринга [31], т.е. проекции трёхмерной сцены на двумерную плоскость, имитирующую фоточувствительную матрицу, тогда как в случае фацетного моделирования речь идёт об анализе процессов рассеяния излучения. Тем не менее, сопоставляя две эти области исследований, в них можно найти много схожего, что позволяет заимствовать методики из одной области и применять их в другой. Так, наиболее близкой к задаче фацетного моделирования является задача вычисления интеграла освещённости сцены, а также вытекающие из неё частные подзадачи составления фотонных карт (англ. *photon maps*), кэширования засветки (*irradiance caching*) и местного

затенения (*ambient occlusion*) [31]. Фундаментом решения всех упомянутых задач является метод трассировки лучей (*ray tracing*), заключающийся в вычислении пути луча сквозь пространство сцены с учётом возможных явлений отражения и преломления, происходящих с ним и оказывающих влияние на ход процесса.

По результатам изучения вышеуказанных методов компьютерной графики и способов их решения был сформулирован следующий алгоритм решения задачи построения базы данных ДФОС лесного покрова:

1. Для данного вектора физических и биометрических параметров сцены $p_1 \dots p_n$ выполняется генерация её геометрической модели.

2. Из случайной точки в направлении сцены под углом (φ_0, ψ_0) испускается луч, эквивалентный бесконечно малому сечению плоской электромагнитной волны и параметризованный направлениями и комплексными амплитудами двух ортогональных векторов поляризации.

3. Выполняется анализ пересечения луча с тем или иным факетом сцены и рассчитываются направление и мощность поляризационных компонент отражённого и преломлённого лучей. В случае если луч не пересёкся ни с одним факетом, его направление и мощность поляризационных компонент учитываются в формировании гистограммы ДФОС.

4. Шаг 3 рекуррентно повторяется до тех пор, пока все лучи не покинут сцену либо их мощность не упадёт ниже определённого порога.

5. Шаги 2-4 повторяются многократно с целью уточнения гистограммы ДФОС. Критерием остановки является изменение дисперсии гистограммы по сравнению с предыдущим повторением шагов 2-4 менее чем на заданную величину.

6. Шаги 2-5 повторяются многократно для различных значений начального угла (φ_0, ψ_0) и различной ориентации вектора поляризации плоской волны для начального луча шага 2.

7. Шаги 1-6 повторяются многократно для различных

инициализационных векторов $p_1 \dots p_n$.

Рассмотрим процесс построения гистограммы ДФОС. Азимутальный и зенитный углы луча, улетающего от сцены, являются вещественными числами, поэтому в общем случае ДФОС является непрерывной функцией этих двух углов. При реализации модели на ЭВМ необходимо квантовать эти углы с определённым шагом; таким образом, непрерывная функция фактически превращается в гистограмму. Выбор шага квантования каждого угла следует, очевидно, выбирать сопоставимым по порядку величины с угловой разрешающей способностью радаров бокового обзора.

Важным моментом при построении трассировщика является разрешение конфликтов взаимопроникновения объектов. В случае, когда два объекта, частично проникающие друг в друга, имеют различную диэлектрическую проницаемость, возникает неоднозначность интерпретации диэлектрической проницаемости области их взаимопроникновения. Типовым вариантом решения данной проблемы является назначение каждому объекту сцены дополнительной скалярной величины – приоритета: в случае возникновения неоднозначности область взаимопроникновения нескольких объектов считается принадлежащей объекту с наивысшим приоритетом. До определённой степени такой подход позволяет реализовывать поддержку аддитивной и субтрактивной геометрии – например, имитировать дупла в деревьях или учитывать проникновение корней дерева в почву.

В ходе трассировки луча возникает необходимость определения facets, с которым произошло пересечение луча, а в случае наличия нескольких facets – выделения самого ближнего к точке испускания. «Наивный» алгоритм выполнения этой операции (сложности $O(N)$, где N – число facets) состоит в переборе всех facets сцены и проверки луча на пересечение с каждым из них. Данный алгоритм хорошо показывает себя на сценах, составленных из нескольких facets, однако на больших сценах, в которых число facets исчисляется тысячами, а то и миллионами, данный метод становится крайне расточительным. Для оптимизации процесса

трассировки и уменьшения числа проверяемых facets придуман ряд ускоряющих структур, смысл которых – в распределении всех facets сцены по ячейкам (обычно вложенным) и поиске пересечения луча только с теми facets, которые входят в пересекаемые лучом ячейки. Перечислим основные ускоряющие структуры [15]:

1) регулярная сетка (англ. *regular grid*) представляет собой трёхмерную сетку из ячеек одинакового размера. В ходе трассировки луч движется сквозь сетку ячейка за ячейкой. Отличительной особенностью данной структуры является простота и высокая скорость построения. Основным недостатком регулярной сетки, существенно ограничивающим её применение в реальных задачах, является её крайняя подверженность т.н. проблеме «чайника на стадионе», заключающейся в непропорциональном распределении объектов сцены по ячейкам в условиях большого разброса их линейных размеров.

2) нерегулярная сетка (*irregular grid*) представляет собой регулярную сетку из относительно крупных ячеек, каждая из которых содержит дочернюю регулярную сетку из меньших ячеек и т.д. Адаптивность разбивки сеток снижает остроту проблемы «чайника на стадионе» на произвольных сценах по сравнению с чисто регулярным случаем.

3) октодерево (*octree*). Ограничивающий параллелепипед сцены разбивается на восемь равных частей (октантов) тремя плоскостями, перпендикулярными трём осям координат. Процесс разбиения рекурсивно продолжается для каждого октанта до достижения некоторого критерия остановки. Принцип обхода октодерева аналогичен таковому для сеток. Данная структура более качественно приближает геометрию сцены по сравнению с различными сетками, оставаясь столь же простой в построении. Октодеревья наиболее часто применяются в воксельной трёхмерной графике по соображениям унификации, поскольку одновременно несут ещё одну функцию – эффективное в плане затрат памяти хранение воксельных объектов сцены.

4) *kD*-дерево (*kD-tree*). Ограничивающий объём сцены разбивается

на две части плоскостью, перпендикулярной одной из осей координат. Процесс разбиения рекурсивно продолжается до достижения некоторого критерия остановки. Выбор ориентации и положения разбивающей плоскости существенно влияет на степень ускорения трассировки луча. Благодаря существованию высокоэффективных алгоритмов построения и обхода дерева данная ускоряющая структура является одной из наиболее часто используемых в задачах трассировки лучей, позволяя сократить сложность поиска пересечения луча с факетом до величины порядка $O(\log_2 N)$ [16].

5) дерево двоичного разбиения пространства (*binary space partitioning tree*, *BSP-tree*) [1]. Данная ускоряющая структура отчасти является обобщением *kD*-дерева. Пространство сцены разбивается на две части плоскостью, могущей иметь произвольную ориентацию и выбираемой каким-либо эвристическим алгоритмом. Данный процесс продолжается рекурсивно до тех пор, пока каждый узел дерева не будет представлять собой выпуклый многогранник. В отличие от *kD*-деревьев, к *BSP*-деревьям предъявляется требование однозначной принадлежности каждого объекта сцены не более чем одному узлу дерева, ввиду чего любой объект, пересекаемый разбивающей плоскостью, подлежит разбиению на два новых объекта. Последнее обстоятельство крайне затрудняет алгоритмическую реализацию *BSP*-деревьев для сцен, содержащих поверхности произвольной формы. В силу ряда специфических свойств наибольшую популярность *BSP*-деревья снискали в компьютерных играх, где алгоритмы визуализации сцены исторически не используют трассировку лучей за очень редким исключением.

б) иерархия ограничивающих объёмов (*bounding volume hierarchy*, *BVH*) [15]. Совокупность объектов сцены разбивается на несколько групп, каждая из которых окружается ограничивающим объёмом (сферой, параллелепипедом и пр.). Разбиение каждой группы продолжается рекурсивно. Каждый листовой узел содержит только один объект сцены,

ограничивающие объёмы узлов имеют право пересекаться. Эффективность обхода дерева базируется на том факте, что отсутствие пересечения луча с ограничивающим объёмом какого-либо узла отменяет необходимость обхода данного узла и рассмотрения facets, содержащихся в нём.

Благодаря наличию эффективных алгоритмов построения BVH-деревья являются столь же востребованными в задачах трассировки лучей, сколь и kD -деревья. Две данных разновидности ускоряющих структур незначительно отличаются друг от друга по эффективности, ввиду чего выбор между kD - и BVH-деревом в равной степени диктуется соображениями расхода памяти, времени построения и другими, второстепенными по отношению к вопросу ускорения трассировки луча.

Для дальнейшего рассмотрения в качестве ускоряющей структуры было выбрано kD -дерево. Во-первых, BVH-деревья, популярные для ускорения трассировки лучей в анимированных сценах ввиду возможности частичной перестройки дерева, утрачивают данное преимущество в рассматриваемом случае ввиду того, что сцена является полностью статической и необходимость перестройки дерева отсутствует. Во-вторых, в работе [5] доказано, что для статических сцен kD -деревья являются оптимальным выбором с точки зрения скорости обхода в подавляющем большинстве случаев.

Рассмотрим подробнее ключевой аспект построения качественного kD -дерева – выбор разбивающей плоскости. «Наивный» алгоритм предполагает разбиение ограничивающего объёма подузла ровно посередине его большей стороны; в этом случае kD -дерево вырождается в структуру, близкую к октодереву, и, как и последнее, оказывается подвержено проблеме «чайника на стадионе» (см. рис. 2.1). Наиболее совершенным алгоритмом разбиения на сегодняшний день является алгоритм подбора положения разбивающей плоскости по критерию минимума функции *эвристики площадей поверхности* (англ. *surface area heuristics*, SAH) [15], [16]:

$$SAH = C_E + S_L N_L + S_R N_R,$$

где C_E – вычислительная стоимость пересечения пустого узла (некоторая константа, определяемая на этапе калибровки алгоритма); S_L, S_R – площадь поверхности ограничивающих объёмов левого и правого подузлов; N_L, N_R – число объектов, отнесённых к левому и правому подузлам соответственно.

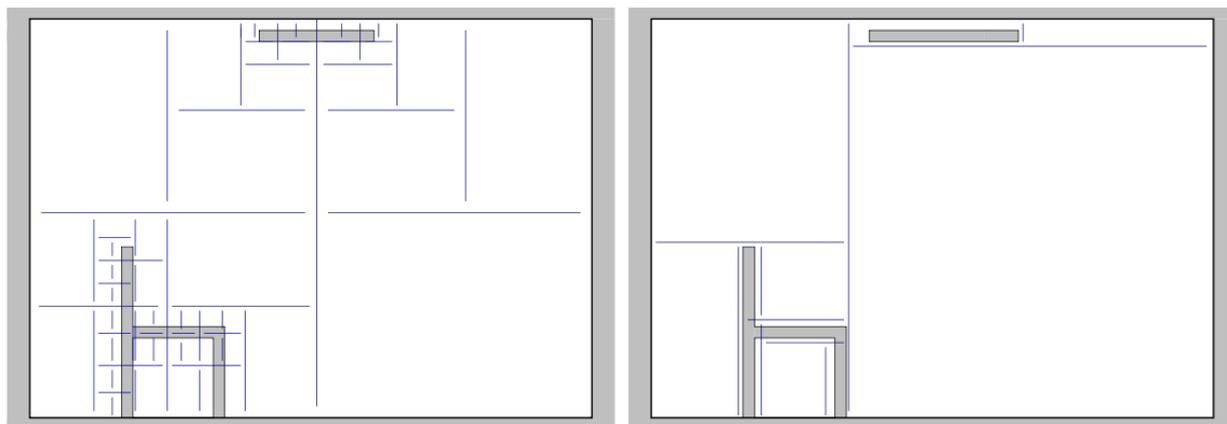


Рис. 2.1. Двумерная иллюстрация [15] алгоритмов построения kD -дерева: слева – «наивный» алгоритм, справа – оптимальный алгоритм на основе SAH. Видно, как SAH-алгоритм быстро отсекает большие объёмы пустого пространства, минимизируя глубину дерева и необходимость проверки пересечения с разбивающими плоскостями.

На практике значение SAH-функции имеет смысл вычислять лишь в узловых точках, определяемых проекциями вершин объектов на ту или иную координатную ось, поскольку в промежутках между узловыми точками функция монотонна. Для очень больших сцен существуют алгоритмы огрублённого вычисления SAH, незначительно снижающие качество разбиения, но резко повышающие скорость построения kD -дерева (см., например, [3]). Естественным следствием применения функции эвристики площадей поверхности становится формулировка критерия остановки разбиения узла [16]: если значение SAH-функции для лучшего варианта разбиения узла оказывается больше значения SAH-функции неразбитого узла, от разбиения следует отказаться.

2.3. Математический аппарат фацетной модели

Получим основные геометрические соотношения, необходимые для организации процесса трассировки луча. Введём обозначение: $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ –

радиус-вектор точки испускания луча; $\vec{d}_f = (x_f, y_f, z_f)$ – вектор направления луча.

Рассмотрим вопрос о нахождении пересечения луча с треугольным факетом, заданным тремя точками:

$$\begin{aligned}\vec{r}_1 &= (x_1, y_1, z_1); \\ \vec{r}_2 &= (x_2, y_2, z_2); \\ \vec{r}_3 &= (x_3, y_3, z_3);\end{aligned}\tag{2.1}$$

Это позволяет записать уравнение плоскости факета в векторной форме [21]:

$$(\vec{r} - \vec{r}_1) \cdot \underbrace{[(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \times (\vec{r}_3 - \vec{r}_1)]}_{\vec{n}} = 0;\tag{2.2}$$

Запишем уравнение прямой, на которой лежит луч, в параметрической форме:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{d}_f t;\tag{2.3}$$

Подставив (2.3) в (2.2), выразим t :

$$t = \frac{\vec{n} \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_0)}{\vec{n} \cdot \vec{d}_f};\tag{2.4}$$

Если скалярное произведение в знаменателе равно нулю, значит, плоскость факета параллельна лучу и пересечения нет. В противном случае можно, подставив (2.4) в (2.3), найти искомые координаты точки пересечения прямой с плоскостью факета. Ещё одним аспектом оптимизации являются свойства величины t , которой параметризована прямая. При $t = 0$ радиус-вектор точки на прямой соответствует радиус-вектору точки испускания луча. По мере роста параметра t эта точка начинает двигаться в том же направлении, что и луч. Отсюда следует, что если параметр t , вычисленный по формуле (2.4), отрицателен, то луч движется в направлении от точки пересечения, а не к ней, т.е. пересечения нет.

Угол между лучом и плоскостью треугольника (угол падения луча) легко может быть найден из скалярного произведения между направляющим вектором луча и нормалью к треугольнику:

$$\cos \varphi = \frac{\vec{n} \cdot \vec{d}_f}{|\vec{n}| |\vec{d}_f|}; \quad (2.5)$$

Исследуем теперь вопрос проверки принадлежности точки треугольнику на плоскости. Для решения этой задачи существует несколько алгоритмов: аффинное преобразование треугольника в единичный треугольник; нахождение барицентрических координат в треугольнике и проверка их неотрицательности; подсчёт количества сторон треугольника, пересекаемых любой прямой, проходящей через точку пересечения и лежащей в плоскости треугольника; сравнение площади треугольника с суммой площадей трёх треугольников, каждый из которых строится путём замены одной из вершин исходного треугольника на точку пересечения.

С учётом объёма необходимых вычислений и погрешности арифметики с плавающей точкой для реализации был выбран первый метод. Рассмотрим его подробнее. Введём косоугольную систему координат, единичными осями которой выступит тройка векторов: $\vec{r}_2 - \vec{r}_1; \vec{r}_3 - \vec{r}_1; \vec{n}$. Исходный треугольник после переноса в эту систему будет тождественно отображён в треугольник с фиксированным набором вершин: $(0; 0; 0); (1; 0; 0); (0; 1; 0)$. Перенос точки пересечения в эту систему координат осуществляется при помощи аффинного преобразования:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_n & y_n & z_n \end{pmatrix}^{-1} \cdot \left[\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \right]; \quad (2.6)$$

Точка считается лежащей внутри треугольника, если $x' \geq 0$, $y' \geq 0$ и $x' + y' \leq 1$. С точки зрения оптимизации вычислений следует отметить следующее:

1) ввиду того, что сцена является статической, вектор $\vec{n} = (x_n; y_n; z_n)$ для каждого треугольника может быть единожды вычислен заранее (например, на этапе генерации сцены либо в ходе её загрузки в оперативную память ЭВМ);

2) аналогично, обратная матрица в (2.6) для каждого треугольника

также может быть вычислена заранее;

3) поскольку координата z' любой точки в плоскости facets тождественно равна нулю, её можно не вычислять. Это же позволяет сократить на треть объём вычислений обратной матрицы.

Теперь исследуем вопрос о пересечении луча с цилиндрическим или коническим facets, заданными радиусом R , высотой h , радиус-вектором центра $\vec{r}_c = (x_c, y_c, z_c)$ и направляющим вектором оси $\vec{d}_c = (l_c, m_c, n_c)$. Facets обоих видов состоят из нескольких поверхностей: торцов (одного для конуса, двух для цилиндра), представляющих собой круглые участки плоскостей, и боковой поверхности, являющейся поверхностью второго порядка. Пересечение луча с торцами может быть найдено по формуле (2.4) путём

замен $\vec{r}_1 \rightarrow \vec{r}_c \pm \frac{\vec{d}_c}{|\vec{d}_c|} \cdot \frac{h}{2}$, $\vec{n} \rightarrow \vec{d}_c$, а факт попадания в круг торца – проверкой

$$\left| \vec{r} - \left(\vec{r}_c \pm \frac{\vec{d}_c}{|\vec{d}_c|} \cdot \frac{h}{2} \right) \right| \leq R; \quad (2.7)$$

(в двух последних формулах знак «+» или «-» соответствует одному или другому торцу цилиндра; для конуса условимся выбрать знак «-», считая, что направляющий вектор оси направлен к острию конуса). Задача поиска пересечения луча с боковой поверхностью facets более сложна. В литературе удалось найти готовые решения только в самом общем виде, ввиду чего для рассматриваемых случаев необходимые уравнения потребовалось вывести. Введём обозначение: $\vec{r}_p = (x_p; y_p; z_p)$ – проекция радиус-вектора какой-либо точки пространства на ось facets. Координаты этой точки найдём из того факта, что угол между осью и прямой проектирования должен быть равен 90° , вследствие чего

$$(\vec{r} - \vec{r}_p) \cdot \vec{d}_c = 0, \quad (2.8)$$

Выполнив в (2.3) замену $\vec{r} \rightarrow \vec{r}_p$ и объединив её с (2.8), получим:

$$(\vec{r} - \vec{r}_c - \vec{d}_c t) \cdot \vec{d}_c = 0, \quad (2.9)$$

откуда:

$$t = \frac{\vec{d}_c(\vec{r} - \vec{r}_c)}{|\vec{d}_c|^2}; \quad (2.10)$$

Подставляя (2.10) в (2.3), окончательно получим:

$$\vec{r}_p = \vec{r}_c + \vec{d}_c \cdot \frac{\vec{d}_c(\vec{r} - \vec{r}_c)}{|\vec{d}_c|^2} \quad (2.11)$$

Уравнение боковой поверхности можно записать в следующем виде:

$$|\vec{r} - \vec{r}_p| = f(|\vec{r}_p - \vec{r}_o|); \quad (2.12)$$

Другими словами, боковая поверхность цилиндра или конуса есть геометрическое место точек пространства, расстояние которых от своей проекции на ось есть функция расстояния этой проекции от некоторой особой точки на оси факета. Для цилиндра $f(|\vec{r}_p - \vec{r}_o|) \equiv R$, поэтому выбирать особую точку нет необходимости. Для конуса в роли особой точки выступает «острие», положение которого можно найти как

$$\vec{r}_o = \vec{r}_c + \vec{d}_c \cdot \frac{h}{2}; \quad (2.13)$$

(знак «+» выбран в согласии с вышеуказанным условием о направлении вектора \vec{d}_c). Учитывая, что радиус конуса линейно растёт от острия до противоположной стороны, нетрудно записать:

$$f(|\vec{r}_p - \vec{r}_o|) = |\vec{r}_p - \vec{r}_o| \cdot \frac{R}{h}; \quad (2.14)$$

Переходя от векторов к трёхмерным координатам и выполняя необходимые преобразования (опустим их для краткости), придём к следующим уравнениям боковой поверхности: для цилиндра –

$$\frac{\left| \begin{matrix} x-x_c & y-y_c \\ l_c & m_c \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} y-y_c & z-z_c \\ m_c & n_c \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} z-z_c & x-x_c \\ n_c & l_c \end{matrix} \right|^2}{l_c^2 + m_c^2 + n_c^2} - R^2 = 0 \quad (2.15)$$

и для конуса –

$$\left| \begin{matrix} x-x_o & y-y_o \\ l_c & m_c \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} y-y_o & z-z_o \\ m_c & n_c \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} z-z_o & x-x_o \\ n_c & l_c \end{matrix} \right|^2 - \left(\frac{[l_c(x-x_o) + m_c(y-y_o) + n_c(z-z_o)] \cdot R}{h} \right)^2 = 0 \quad (2.16)$$

Найдём координаты точки пересечения луча с боковой поверхностью цилиндра. Расписав (2.3) по компонентам векторов, подставив в (2.15) и сгруппировав члены относительно переменной t , будем иметь:

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\left(\begin{vmatrix} x_f & y_f \\ l_c & m_c \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} y_f & z_f \\ m_c & n_c \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} z_f & x_f \\ n_c & l_c \end{vmatrix}^2 \right)}_{a_t} \cdot t^2 + \\
 & + 2 \cdot \underbrace{\left(\begin{vmatrix} x_f & y_f \\ l_c & m_c \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_0 - x_c & y_0 - y_c \\ l_c & m_c \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} y_f & z_f \\ m_c & n_c \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} y_0 - y_c & z_0 - z_c \\ m_c & n_c \end{vmatrix} + \right.}_{b_t} \\
 & \left. + \begin{vmatrix} z_f & x_f \\ n_c & l_c \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} z_0 - z_c & x_0 - x_c \\ n_c & l_c \end{vmatrix} \right) \cdot t}_{b_t} + \\
 & \cdot t + \underbrace{\left(\begin{vmatrix} x_0 - x_c & y_0 - y_c \\ l_c & m_c \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} y_0 - y_c & z_0 - z_c \\ m_c & n_c \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} z_0 - z_c & x_0 - x_c \\ n_c & l_c \end{vmatrix}^2 - R^2(l_c^2 + m_c^2 + n_c^2) \right)}_{c_t} = 0;
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Имеем обыкновенное квадратное уравнение. Если его дискриминант $D = b_t^2 - 4a_t c_t < 0$, это означает, что пересечения нет. В противном случае можно найти $t_{1,2} = -\frac{b_t \pm \sqrt{D}}{2a_t}$ и, подставив эти значения в (2.3), найти искомые точки пересечения. При этом, как и в случае с пересечением лучом плоскости, следует игнорировать значения $t < 0$. Необходимо ввести ещё один критерий отбора: два значения t соответствуют «влёту» и «вылету» луча из боковой поверхности цилиндра, соответственно, из значений $t \geq 0$ следует выбирать одно – наименьшее, т.к. оно соответствует первому пересечению луча с боковой поверхностью. Критерий принадлежности точки пересечения цилиндру может быть выражен следующим неравенством:

$$\sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2} \leq \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + R^2}; \tag{2.18}$$

Другими словами, точка не должна находиться от центра цилиндра дальше, чем на длину его полудиagonали.

Теперь по аналогии найдём пересечение луча с боковой поверхностью конуса. Как и в случае с цилиндром, придём к квадратному уравнению с коэффициентами (см. (2.17)):

$$\begin{aligned}
a_t &= \left| \begin{array}{cc} x_f & y_f \\ l_c & m_c \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{cc} y_f & z_f \\ m_c & n_c \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{cc} z_f & x_f \\ n_c & l_c \end{array} \right|^2 - \left(\frac{(x_f l_c + y_f m_c + z_f n_c) \cdot R}{h} \right)^2; \\
b_t &= 2 \cdot \left(\left| \begin{array}{cc} x_0 - x_o & y_0 - y_o \\ l_c & m_c \end{array} \right| \cdot \left| \begin{array}{cc} x_f & y_f \\ l_c & m_c \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} y_0 - y_o & z_0 - z_o \\ m_c & n_c \end{array} \right| \cdot \left| \begin{array}{cc} y_f & z_f \\ m_c & n_c \end{array} \right| + \right. \\
&+ \left. \left| \begin{array}{cc} z_0 - z_o & x_0 - x_o \\ n_c & l_c \end{array} \right| \cdot \left| \begin{array}{cc} z_f & x_f \\ n_c & l_c \end{array} \right| - \right. \\
&\left. - \frac{[l_c(x_0 - x_o) + m_c(y_0 - y_o) + n_c(z_0 - z_o)] \cdot (x_f l_c + y_f m_c + z_f n_c) \cdot R^2}{h^2} \right); \\
c_t &= \left| \begin{array}{cc} x_0 - x_o & y_0 - y_o \\ l_c & m_c \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{cc} y_0 - y_o & z_0 - z_o \\ m_c & n_c \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{cc} z_0 - z_o & x_0 - x_o \\ n_c & l_c \end{array} \right|^2 - \\
&- \left(\frac{[l_c(x_0 - x_o) + m_c(y_0 - y_o) + n_c(z_0 - z_o)] \cdot R}{h} \right)^2;
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Все высказанные выше для цилиндра соображения относительно нахождения и фильтрации значений величины t справедливы и для конуса; кроме того, необходимо ввести ещё один критерий отбраковки точек пересечения: поскольку форма (2.15) описывает не один, а два конуса, соприкасающихся остриями, необходимо отфильтровать пересечение с одним из них. Простой способ это сделать заключается в проверке угла между векторами $\vec{r} - \vec{r}_o$ и \vec{d}_c : если этот угол тупой, значит, точка пересечения находится в нужном конусе.

Поскольку центр конуса, определённый выше, является, по сути, серединой его высоты, критерий принадлежности точки пересечения боковой поверхности конуса можно записать так:

$$\sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2 + (z_p - z_c)^2} \leq \frac{h}{2}; \tag{2.20}$$

Иначе говоря, расстояние от центра конуса до проекции точки пересечения на ось не должно превышать половину высоты конуса.

В случае пересечения луча с треугольником или торцом цилиндра вектор нормали к поверхности в точке падения известен заранее и равен вектору нормали к плоскости. Вектор нормали к боковой поверхности цилиндра или конуса в точке падения будет иметь вид [21]:

$$\vec{n}(x_f, y_f, z_f) = \left(\frac{\partial F(x, y, z)}{\partial x}; \frac{\partial F(x, y, z)}{\partial y}; \frac{\partial F(x, y, z)}{\partial z} \right) \Bigg|_{(x, y, z) = (x_f, y_f, z_f)}, \quad (2.21)$$

где $F(x, y, z)$ – левые части выражений (2.15) или (2.16) соответственно. Опуская промежуточные выкладки, приведём соответствующие выражения в окончательном виде: для цилиндра –

$$\vec{n} = \left(2 \left\| \begin{array}{cc} x-x_c & y-y_c \\ l_c & m_c \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{cc} z-z_c & x-x_c \\ n_c & l_c \end{array} \right\| \sqrt{(l_c^2 + m_c^2 + n_c^2)}; \right. \\ \left. 2 \left\| \begin{array}{cc} y-y_c & z-z_c \\ m_c & n_c \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{cc} x-x_c & y-y_c \\ l_c & m_c \end{array} \right\| \sqrt{(l_c^2 + m_c^2 + n_c^2)}; \right. \\ \left. 2 \left\| \begin{array}{cc} z-z_c & x-x_c \\ n_c & l_c \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{cc} y-y_c & z-z_c \\ m_c & n_c \end{array} \right\| \sqrt{(l_c^2 + m_c^2 + n_c^2)} \right) \quad (2.22)$$

и для конуса –

$$\vec{n} = \left(2 \left[\left\| \begin{array}{cc} x-x_o & y-y_o \\ l_c & m_c \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{cc} z-z_o & x-x_o \\ n_c & l_c \end{array} \right\| - l_c X \right]; \right. \\ \left. 2 \left[\left\| \begin{array}{cc} y-y_o & z-z_o \\ m_c & n_c \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{cc} x-x_o & y-y_o \\ l_c & m_c \end{array} \right\| - m_c X \right]; \right. \\ \left. 2 \left[\left\| \begin{array}{cc} z-z_o & x-x_o \\ n_c & l_c \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{cc} y-y_o & z-z_o \\ m_c & n_c \end{array} \right\| - n_c X \right] \right) \quad (2.23)$$

$$\text{где } X = [l_c(x_0 - x_o) + m_c(y_0 - y_o) + n_c(z_0 - z_o)] \cdot \frac{R^2}{h^2}.$$

Координаты точки пересечения луча с поверхностью facetsа, нормаль к поверхности в этой точке и диэлектрические проницаемости пространства по обе стороны поверхности составляют необходимый минимум для осуществления расчёта преломления луча в данной точке (рис. 2.2). Рассмотрим процесс преломления более подробно. При падении (индекс f на рисунке) плоской волны на поверхность раздела двух сред с различными показателями комплексной диэлектрической проницаемости волна разделяется на две компоненты – отражённую (индекс r) и преломлённую

(индекс e). Угол отражения равен углу падения (закон Снеллиуса). Угол преломления не равен углу падения и зависит от соотношения диэлектрических проницаемостей сред. В процессе преломления энергия горизонтальной (индекс h) и вертикальной (индекс v) поляризационных компонент падающей волны распределяется между отражённой и преломлённой волнами следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{E}_{(v,h)r} = \dot{K}_{f(v,h)} \dot{E}_{(v,h)f}, \\ \dot{E}_{(v,h)e} = \dot{K}_{fe(v,h)} \dot{E}_{(v,h)e}; \end{cases} \quad (2.24)$$

где K – коэффициенты Френеля:

$$\dot{K}_{fh} = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_1} \cos \varphi - \sqrt{\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1 \sin^2 \varphi}}{\sqrt{\dot{\epsilon}_1} \cos \varphi + \sqrt{\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1 \sin^2 \varphi}}; \quad \dot{K}_{fv} = \frac{\dot{\epsilon}_2 \cos \varphi - \sqrt{\dot{\epsilon}_1} \sqrt{\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1 \sin^2 \varphi}}{\dot{\epsilon}_2 \cos \varphi + \sqrt{\dot{\epsilon}_1} \sqrt{\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1 \sin^2 \varphi}}; \quad (2.25.1)$$

$$\dot{K}_{feh} = \frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}_1} \cos \varphi}{\sqrt{\dot{\epsilon}_1} \cos \varphi + \sqrt{\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1 \sin^2 \varphi}}; \quad \dot{K}_{fev} = \frac{2\dot{\epsilon}_2 \cos \varphi}{\dot{\epsilon}_2 \cos \varphi + \sqrt{\dot{\epsilon}_1} \sqrt{\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1 \sin^2 \varphi}}; \quad (2.25.2)$$

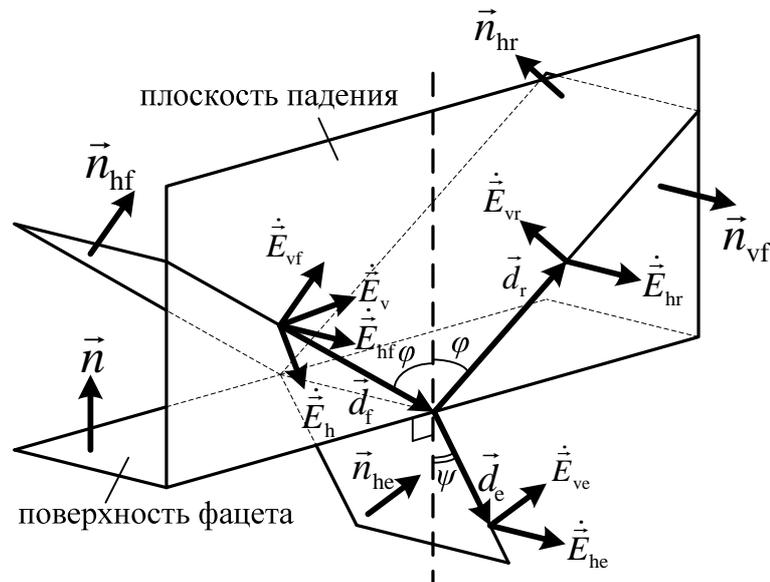


Рис. 2.2. Геометрия преломления волны на поверхности facets

Направления векторов \dot{E}_v и \dot{E}_h падающей волны в общем случае не совпадают с направлением векторов \dot{E}_{hf} и \dot{E}_{vf} , ввиду чего последние должны быть найдены из первых. С учётом взаимной ортогональности векторов в каждой паре данная задача может быть рассмотрена по аналогии с геометрической задачей поворота системы координат, и соответствующие

выражения будут иметь вид:

$$\dot{\vec{E}}_{\text{vf}} = \left(\dot{\vec{E}}_{\text{v}} + \dot{\vec{E}}_{\text{h}} \right) \cdot \frac{\vec{n}_{\text{hf}}}{|\vec{n}_{\text{hf}}|}; \quad (2.26.1)$$

$$\dot{\vec{E}}_{\text{hf}} = \left(\dot{\vec{E}}_{\text{v}} + \dot{\vec{E}}_{\text{h}} \right) \cdot \frac{\vec{n}_{\text{vf}}}{|\vec{n}_{\text{vf}}|}; \quad (2.26.2)$$

Длины этих векторов будут являться комплексными амплитудами соответствующих компонент электрического поля, что позволит найти комплексные амплитуды компонент отражённой и преломлённой волн. Теперь требуется найти все недостающие направляющие векторы.

В первую очередь найдём \vec{n}_{vf} – вектор нормали к плоскости падения. Он перпендикулярен вектору падающего луча и вектору нормали плоскости facets, поэтому его можно найти как векторное произведение этих двух векторов⁴:

$$\vec{n}_{\text{vf}} = \frac{\vec{d}_f \times \vec{n}}{|\vec{d}_f \times \vec{n}|}; \quad (2.27)$$

Найдём теперь вектора \vec{n}_{hr} и \vec{n}_{he} . Из рисунка видно, что вектор \vec{n}_{hr} перпендикулярен вектору падающего луча и вектору нормали плоскости падения, ввиду чего его можно найти через векторное произведение этих векторов по аналогии с (2.27). Аналогичные рассуждения справедливы и для векторов \vec{n}_{hr} и \vec{n}_{he} . Таким образом:

$$\vec{n}_{\text{h}(f,r,e)} = \frac{\vec{n}_{\text{vf}} \times \vec{d}_{(f,r,e)}}{|\vec{n}_{\text{vf}} \times \vec{d}_{(f,r,e)}|}; \quad (2.28)$$

Найдём недостающие направляющие вектора отражённого и преломлённого лучей:

$$\vec{d}_r = \vec{d}_f - 2\vec{d}_f^\perp; \quad (2.29)$$

$$\vec{d}_e = \frac{\vec{d}_f^\perp}{|\vec{d}_f^\perp|} \cos \psi + \frac{\vec{d}_f^\parallel}{|\vec{d}_f^\parallel|} \sin \psi; \quad (2.30)$$

⁴ Здесь и далее порядок перемножения векторов в векторных произведениях выбирается таким образом, чтобы направление результирующего вектора соответствовало рис. 2.2.

$$\text{где } \vec{d}_f^\perp = \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \cdot (\vec{d}_f \vec{n}), \quad \vec{d}_f^\parallel = \vec{d}_f - \vec{d}_f^\perp.$$

Осталось найти значение угла ψ . Если обе среды являются диэлектриками, справедливо классическое выражение (закон Снеллиуса):

$$\sin \psi = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2}} \sin \varphi; \quad (2.31)$$

В случае, когда хотя бы одна из сред является средой с потерями, её диэлектрическая проницаемость, а значит, и величина $\sin \psi$ приобретает комплексный характер ([45], см. также [2]). Если модуль мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости по крайней мере на порядок меньше действительной части, можно принять мнимую часть равной нулю и провести расчёт по формуле (2.31), однако с возрастанием значения мнимой части адекватность такого расчёта падает; так, при $\text{Re}[\dot{\varepsilon}] \approx \text{Im}[\dot{\varepsilon}]$ погрешность доходит до 50% [2]. В среде с потерями распространяется неоднородная плоская волна: поверхности равных фаз волны перпендикулярны направлению её распространения, поверхности равных амплитуд параллельны поверхности раздела. Направление распространения волны образует с нормалью к поверхности раздела *истинный угол преломления* [45]:

$$\text{tg } \psi = \frac{\sin \varphi}{\text{Re} \left[\sqrt{\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1} - \sin^2 \varphi} \right]}; \quad (2.32)$$

Выразив $\cos \psi$ через выражение (2.31) и затем вычислив $\text{tg } \psi$, можно убедиться, что (2.31) является частным случаем (2.32).

Амплитуда неоднородной плоской волны в среде с потерями затухает по экспоненциальному закону [45]:

$$\exp \left(- \text{Re} \left\{ \omega \sqrt{\dot{\varepsilon}_1} \cdot \text{Im} \left[\sqrt{\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1} - \sin^2 \varphi} \right] \right\} \cdot x \right), \quad (2.33)$$

где x – расстояние от поверхности раздела.

Формулы (2.24)–(2.33) полностью описывают процессы преломления лучей на фацетах с позиций физической оптики. Тем не менее, в случаях,

когда линейные размеры рассеивателей менее чем на несколько порядков отличаются от длины волны, необходимо ввести в модель учёт дифракционных явлений. В последние десятилетия была проделана большая работа по объединению геометрической оптики и дифракционной теории, воплотившаяся в создание Дж. Б. Келлером геометрической теории дифракции [20]. Одним из основных постулатов данной теории является утверждение о справедливости геометрической оптики в точках поверхности элементов геометрии сцены, имеющих малую кривизну и удалённых от краёв тела на определённое расстояние. В случае несоблюдения данных условий преломление лучей описывается уже иными уравнениями, дающими существенно отличающиеся результаты. Тем не менее, поскольку поверхности, на которых возникают дифракционные явления, имеют типовую форму, это позволяет найти точные решения дифракционной задачи для набора типовых дифрагирующих объектов (боковая поверхность цилиндра, клин, острие, отверстие и т.д.) с тем, чтобы впоследствии использовать то или иное решение для того или иного участка геометрии сцены, подобно сборке конструктора из частей. Данный принцип идеально согласуется с концепцией фацетной модели.

Таким образом, для введения в модель элементов ГТД необходимо прежде всего выработать правила выбора оптимального алгоритма преломления для данного луча в данной точке того или иного фацета. Далее в модель необходимо ввести описание дифракционных явлений на тех или иных видах неоднородностей. С точки зрения реализации в фацетной модели дифракционные явления приводят к появлению в точке падения луча не двух лучей (отражённого и преломлённого), но также бесконечного множества других лучей. На практике количество дифракционных лучей необходимо ограничить до приемлемого минимума.

Способы вычисления дифракционных лучей в области геометрической тени подробно рассмотрены и апробированы в работе [4]. Для волн соскальзывания направление лучей принимается параллельным поверхности

в точке отрыва, а их амплитуда экспоненциально затухает по мере движения вдоль поверхности в область тени. Для волн, рассеянных на клиновидном препятствии и диске, в фундаментальной работе [44] даётся описание формы области тени и способов вычисления поля в её окрестности и возле каустик. Также рассмотрены способы нахождения границ применимости того или иного алгоритма и приведены правила переключения между ними.

На основании изучения данных работ был составлен следующий перечень критериев применимости тех или иных алгоритмов ГТД:

1. Для боковых поверхностей цилиндра и конуса: если кривизна поверхности в данной точке вдоль плоскости, проходящей через вектор нормали и вектор направления распространения луча, превышает определённый порог, следует включить алгоритм добавления дифракционных лучей соскальзывания, «затекающих» в область тени.

2. Для всех поверхностей: если расстояние от точки падения до края поверхности меньше порогового, следует включить алгоритм формирования дифракционных лучей, рассеянных на клине.

Алгоритм формирования лучей затекания формулируется следующим образом. Для каждого отражённого луча рассчитывается точка, отстоящая от точки его испускания на расстояние одной длины волны. Из этой точки на поверхность опускается проекция. Из спроектированной точки выпускается новый луч, направленный по касательной к поверхности в точке испускания и имеющий меньшую мощность, нежели родительский луч. Данный луч также может породить дочерний луч, если его мощность превышает определённый порог, задаваемый на этапе калибровки алгоритма.

Алгоритм формирования лучей рассеяния на клине устроен похожим образом. Если при расчёте проекции по методу, описанному в предыдущем абзаце, точка проекции лежит за пределами поверхности, это означает, что отражённый или затекающий луч находится близко от края. В этом случае ищется пересечение границы поверхности с плоскостью, образованной нормалью к поверхности в точке испускания луча и направлением луча.

Результатом поиска является точка, которая и становится точкой испускания нескольких новых дифракционных лучей. Направление этих лучей выбирается случайным образом, а интенсивность рассчитывается по методике, рассмотренной в [44].

Изложенные алгоритмы иллюстрируются рис. 2.3. Падающий луч *a* формирует отражённый луч *б* по закону Снеллиуса, как было рассмотрено выше. В свою очередь, отражённый луч порождает луч затекания *в*. Пунктирной кривой обозначена кривая пересечения плоскости, образованной направлением луча *б* и нормалью в точке его испускания, с поверхностью цилиндра. Точка испускания луча *в* находится на этой кривой. Данная точка расположена достаточно близко к краю, что приводит к возникновению лучей дифракции на краю *г*.

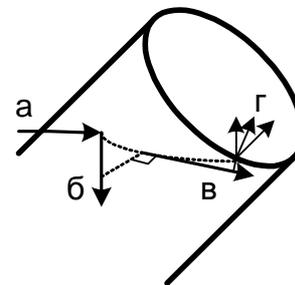


Рис. 2.3. К описанию алгоритмов формирования дифракционных лучей

Значения пороговых величин, упомянутых в рассмотренных алгоритмах ГТД, устанавливаются на этапе калибровки программы. Для калибровки можно использовать результаты реальных экспериментов, подробно описанных в [44], повторяя данные эксперименты на компьютерной модели и подбирая необходимые величины до достижения максимального совпадения.

В заключение к данному параграфу следует отметить, что исследование радиолокационных снимков лесных массивов позволяет сделать важный практический вывод [26]: ДФОС лесного покрова практически идеально изотропна по азимутальному углу падения излучения. Анизотропию можно наблюдать либо только у искусственных лесопосадок в ДМВ- и в более длинноволновых диапазонах, где влияние листвы не так существенно, либо на просеках и других крупных неоднородностях. Ввиду того, что в данном исследовании речь идёт об СМВ- и ММВ-диапазонах, где влияние листвы существенно, а просеки и крупные неоднородности

отделяются на этапе сегментирования снимка, лесной покров можно считать изотропным по азимутальному углу падения излучения. Также следует заметить, что, поскольку в случае совмещённой радиолокации направление облучения совпадает с направлением приёма, получаем, что в этом случае ДФОС лесного покрова зависит только от одного угла – зенитного угла облучения.

2.4. Программная реализация фацетной модели

В соответствии с изложенными в разделах 2.1–2.3 принципами разработан пакет программ для персональных ЭВМ, предназначенного для генерации сцены по заданным исходным данным и построения банка ДФОС. Макроструктура разработанного пакета представлена на рис. 2.4. Расчётное задание, содержащее характеристики сцены, поступает на вход программы-генератора. Результатом работы последней становится файл двоичного формата, содержащий сгенерированную сцену в виде набора фацетов, а также построенное для неё *kD*-дерево. Полученный файл является набором входных данных для программы-трассировщика. Благодаря тому, что трассировка каждого луча осуществляется независимо, появляется возможность распараллеливания вычислений путём одновременного запуска нескольких экземпляров трассировщика, что является оправданным с точки зрения эффективного использования вычислительной мощности современных многопроцессорных ЭВМ. Результаты работы каждого экземпляра программы-трассировщика, представляющие собой гистограмму ДФОС в сферических координатах, помещаются в отдельный файл. Сведение всех диаграмм воедино выполняется программой-агрегатором.

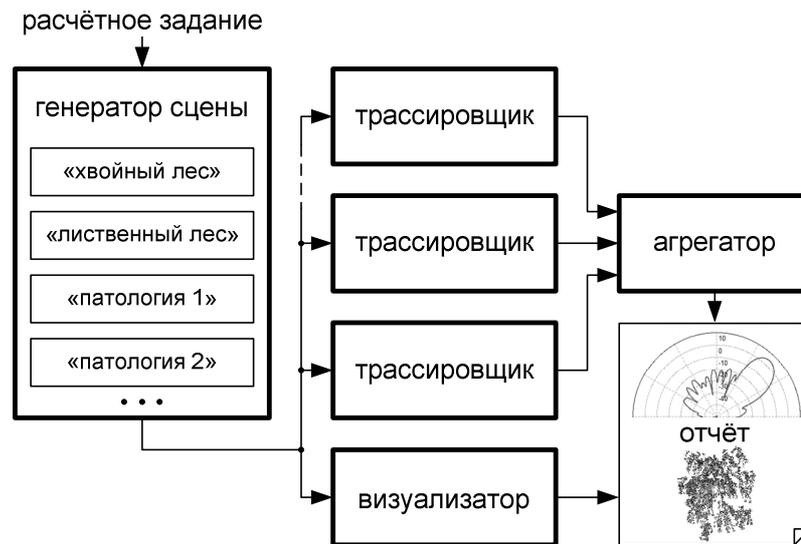


Рис. 2.4. Макроструктура проекта разработанного ПО для фацетного моделирования рассеяния ЭМВ

Помимо этого, в пакете программ присутствует программа-визуализатор (рэндерер), осуществляющая рисование трёхмерного изображения сгенерированной сцены с произвольного ракурса, задаваемого оператором. Для визуализации используется метод рейкастинга⁵, а тот факт, что в ходе трассировки каждого луча выполняется расчёт угла падения, позволяет сразу же выполнить реалистичную полутоную закрашку каждого пикселя по модели освещённости Фонга [31] исходя из угла наклона соответствующей поверхности к зрительному лучу и расстояния точки пересечения луча с фацетом от точки испускания (виртуальный источник света помещён в точку наблюдения). Кроме того, для каждого пикселя изображения выполняется измерение времени, затраченного на трассировку соответствующего ему луча, и полученная величина используется для составления «тепловой карты» вычислительных затрат на визуализацию, позволяя наглядно оценивать быстродействие базовых алгоритмов. Основной мотивацией к созданию программы-визуализатора послужила необходимость иметь максимально удобный инструмент отладки и профилирования ПО в

⁵ Упрощённый вариант метода обратной трассировки лучей, отличающийся отсутствием рекурсии: вычисление цвета пикселя базируется только на информации о пересечении зрительного луча и первого объекта на его пути; дальнейшее прослеживание хода луча от объекта к объекту не осуществляется.

процессе его разработки: поскольку процесс визуализации задействует почти все алгоритмы, необходимые в процессе построения гистограммы ДФОС, получение качественного результата визуализации является показателем корректности реализации данных алгоритмов.

Для примера на рис. 2.5 представлены результаты визуализации (1280×960 пикселей) тесселированной трёхмерной модели «Utah teapot»⁶: слева – синтезированное изображение⁷, справа – его «тепловая карта», построенная по вышерассмотренной методике. Модель состоит из 4032 треугольников; *kD*-дерево, построенное разработанной программой, содержит 18735 узлов. Изучение «тепловой карты» позволяет наглядно увидеть ряд особенностей процесса трассировки. Белые поля по краям карты соответствуют отказам алгоритма от трассировки ввиду того, что зрительный луч не пересекается с ограничивающим объёмом сцены, а значит, и с содержащимися внутри него объектами. Границы узлов *kD*-дерева отчётливо проступают на карте ввиду того, что расчёт точки пересечения зрительного луча с каждой разбивающей плоскостью вносит определённый вклад во временные затраты. Таким образом, наиболее тёмные участки изображения соответствуют наиболее долгому пути луча по узлам *kD*-дерева перед его пересечением с каким-либо факетом либо вылетом за пределы сцены. Области попадания луча на факет контрастируют с областями промаха мимо факета, поскольку промах означает более длинный путь луча сквозь пространство сцены.

⁶ Одна из классических моделей, широко используемых в компьютерной графике в качестве опорных и демонстрационных.

⁷ Следует уточнить, что в формуле расчёта диффузной освещённости по закону Ламберта вместо модуля косинуса угла между нормалью и зрительным лучом был использован квадрат косинуса, т.е. диаграмма рассеяния света поверхностью полагается не сферической, а кардиоидной. Данная модификация имеет своей целью повышение контрастности синтезированного изображения, хотя и ухудшает его фотореалистичность.

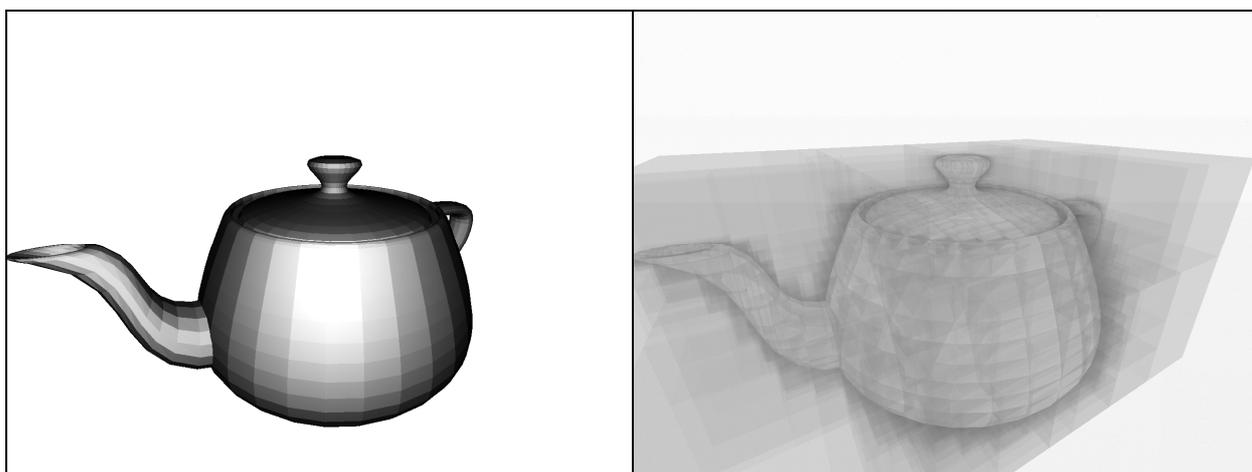


Рис. 2.5. Пример работы визуализатора и «тепловая карта» вычислительной сложности процесса визуализации

Для моделирования ствола и ветвей в программе-генераторе были использованы конусы. Скелетная структура дерева формировалась при помощи алгоритма, рассмотренного в разделе 2.2. Для моделирования хвои также были использованы конусы: фактически, хвойное покрытие моделировалось как ещё один порядок ветвления ствола, но с параметрами длины, радиуса, густоты и комплексной диэлектрической проницаемости, существенно отличающимися от таковых для ветвей и адекватными хвойному покрытию. Для моделирования листьев были использованы цилиндры малой высоты: при помощи формулы объёма конуса приблизительно вычислялся объём кроны, эта величина умножалась на плотность листьев в кубометре кроны и делилась на число ветвей высшего порядка, в результате чего получалось среднее число листьев на одной ветви высшего порядка. Листья располагались случайным образом вокруг конца каждой ветви высшего порядка на расстоянии, не превышающем длину ветви. Поверхность земли моделировалась при помощи тесселяции высотной карты. Статистические параметры геометрии деревьев различных видов брались из [6] и материалов сайта algorithmic-botany.org.

Для демонстрации работы алгоритмов генерации сцены, рассмотренных в разделе 2.2, на рис. 2.6 приведена визуализация полученных с их помощью моделей ландшафта (5011 треугольников), ствола дерева 2 порядка ветвления (1038 конусов), ствола с листвой (921 конус, 132689

цилиндров), ствола с хвоей (336662 конуса). На рис. 2.7 показана визуализация участка лесного массива (3222 треугольника, 3762 конуса, 879527 цилиндров – всего 10 деревьев).

В целях повышения гибкости моделирования распространения электромагнитных волн в программную модель фэцетов была введена поддержка поверхностных шейдеров – заменяемых подпрограмм, непосредственно выполняющих операции над лучом в точке падения на границу раздела. Для целей моделирования были созданы два шейдера (в исходном коде программного комплекса им соответствуют классы `Facet\EM\Shader\Fresnel` и `Facet\EM\Shader\Absorber`). Механизм работы первого заключается в вычислении преломления по закону Снеллиуса и соответствует изложенному в разделе 2.3. Механизм работы второго заключается в уничтожении всех лучей, попавших на фэцет (имитация абсолютно чёрного тела). Последний применён, в частности, для уничтожения лучей, проникших под поверхность земли, поскольку объект, имитирующий поверхность, имеет небесконечную глубину, и отражение лучей от его нижней грани может внести погрешность в результаты моделирования.

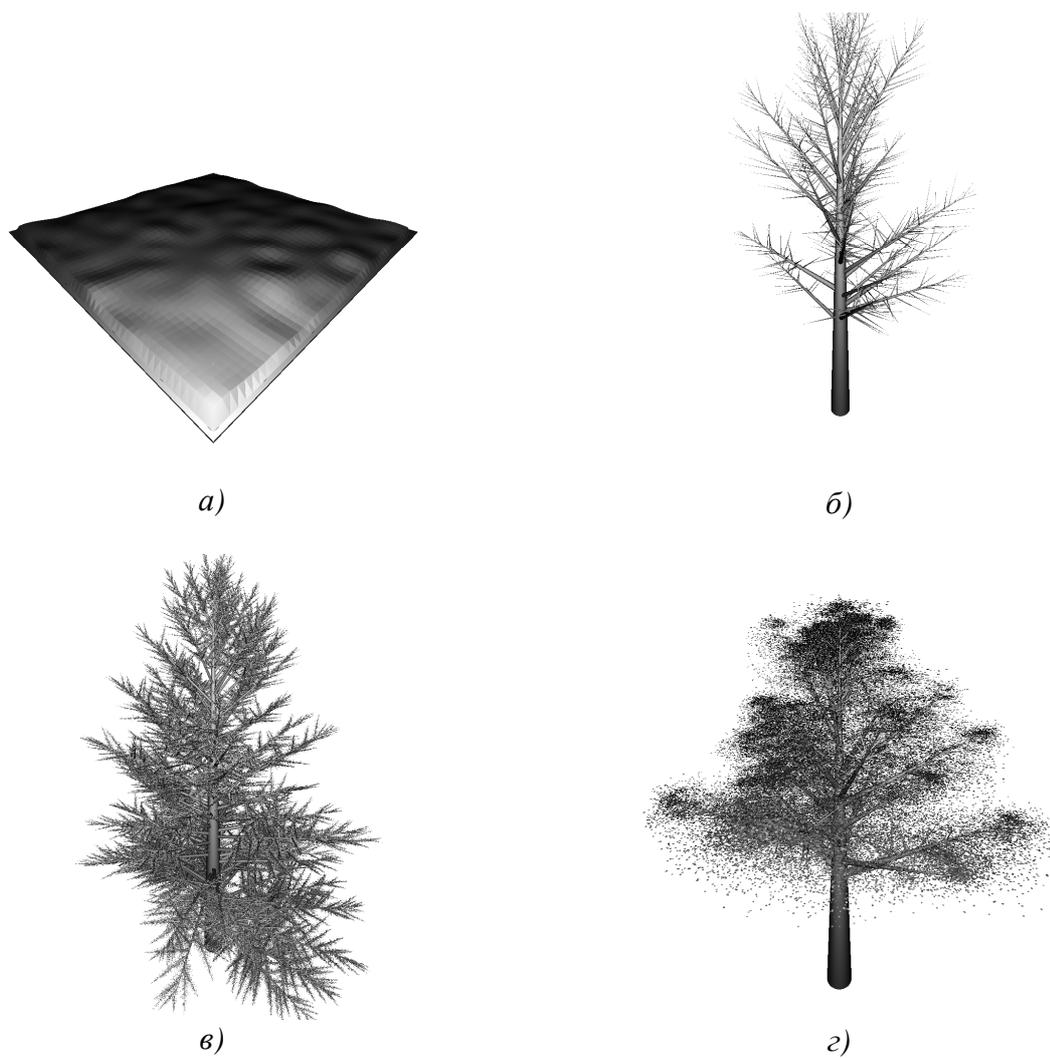


Рис. 2.6. Визуализация элементов сцены, сгенерированных при помощи алгоритмов, рассмотренных в разд. 2.2: поверхность земли (а); ствол дерева (б); хвойное дерево (в); лиственное дерево (г)

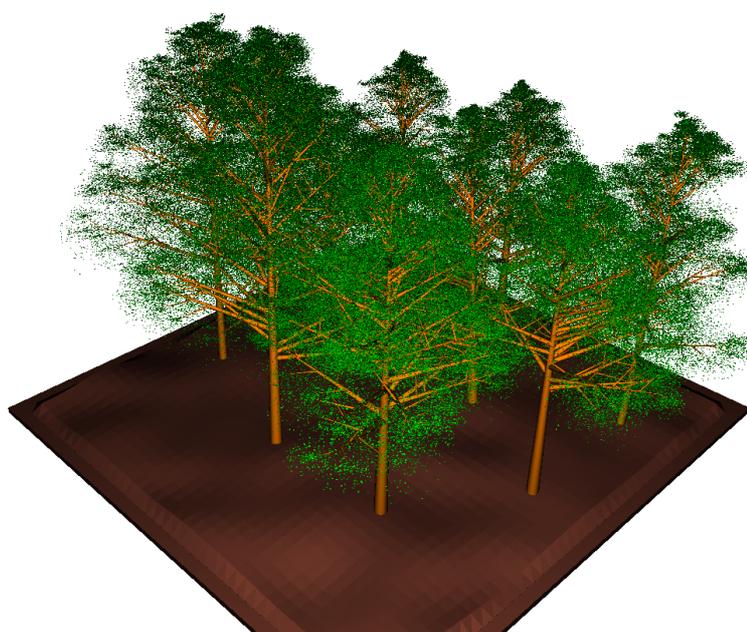


Рис. 2.7. Визуализация участка лиственного лесного массива

2.5. Проверка адекватности результатов моделирования

С целью проверки адекватности результатов моделирования была поставлена серия компьютерных экспериментов.

В первом эксперименте производилось математическое моделирование рассеяния плоской волны на простых геометрических телах: цилиндре, кубе, диэлектрическом слое, двух- и трёхслойной плоскопараллельных структурах. Полученные диаграммы рассеяния сравнивались с данными расчётов, выполненных согласно [45], и экспериментальными данными, полученными автором [47]. Выявлена их асимптотическая сходимость.

Во втором опыте при помощи разработанной модели исследовалось рассеяние плоской волны на телах более сложной геометрии (случайно расположенные кубы, набор параллельных диэлектрических цилиндров, случайно расположенные конусы). Затем каждый объект был тесселирован и экспортирован в среду электродинамического моделирования FEKO, где также было проведено моделирование рассеяния плоской электромагнитной волны на данных объектах. Результаты моделирования показали высокую степень корреляции между двумя моделями в диапазоне от единиц до десятков гигагерц, при этом разработанная модель за счёт более узкой специализации показала более высокую скорость решения.

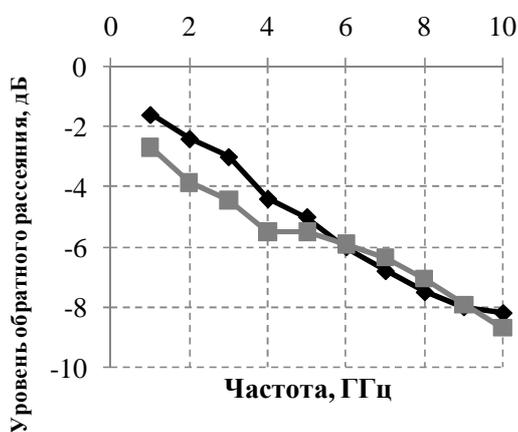
В третьем опыте [58] разработанная фацетная модель использовалась для воспроизведения экспериментов по обратному рассеянию радиоволн гигагерцового диапазона на лесном покрове. В [58] приведены описания ряда сцен лиственного и хвойного лесных массивов и соответствующие экспериментальные результаты исследований рассеяния ЭМВ. Данные сцены были воспроизведены при помощи разработанной модели, после чего выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

В качестве примера приведём результаты моделирования лиственного лесного массива для различных вариантов поляризации излучения. Параметры данной сцены сведены в табл. 2.1. Результаты моделирования и

экспериментальные данные представлены на рис. 2.8. Для случаев *в-е* рабочая частота равна 8 ГГц. Кривая «MIMICS» обозначает экспериментальные результаты, «модель» – результаты моделирования. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показывает их качественное сходство: расхождение не превышает $\pm 1,5$ дБ на всём диапазоне углов падения, что считается достаточным для практических целей.

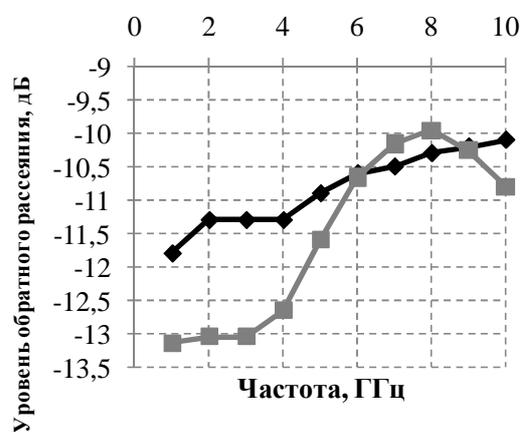
Табл. 2.1. Исходные данные для моделирования случая рис. 2.8

λ , мм	33	$\epsilon_{\text{ствола}}$	$3,1+0,01j$	$\rho_{\text{стволов}}$, М^{-2}	0,11	$d_{\text{стволов}}$, м	0,24
$\Delta\varphi_{\text{листьев}}$	$\pm 15^\circ$	$\epsilon_{\text{почвы}}$	$1,85+0,2j$	$\rho_{\text{листьев}}$, М^{-3}	830	$d_{\text{листьев}}$, м	0,06
$\varphi_{\text{пад}}$	$10-70^\circ$	$\epsilon_{\text{листьев}}$	$27+0,4j$	$h_{\text{стволов}}$, м	8	$h_{\text{листьев}}$, м	0,001



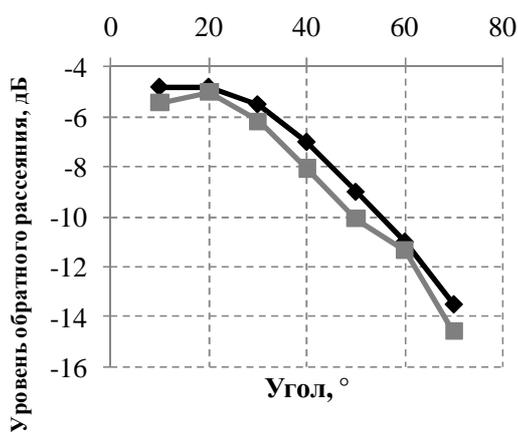
◆ MIMICS ■ Модель

а) поляризация HH



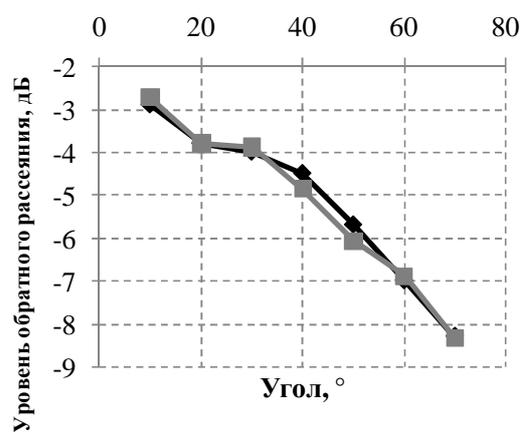
◆ MIMICS ■ Модель

б) поляризация VV



◆ MIMICS ■ Модель

в) поляризация HH



◆ MIMICS ■ Модель

г) поляризация VV

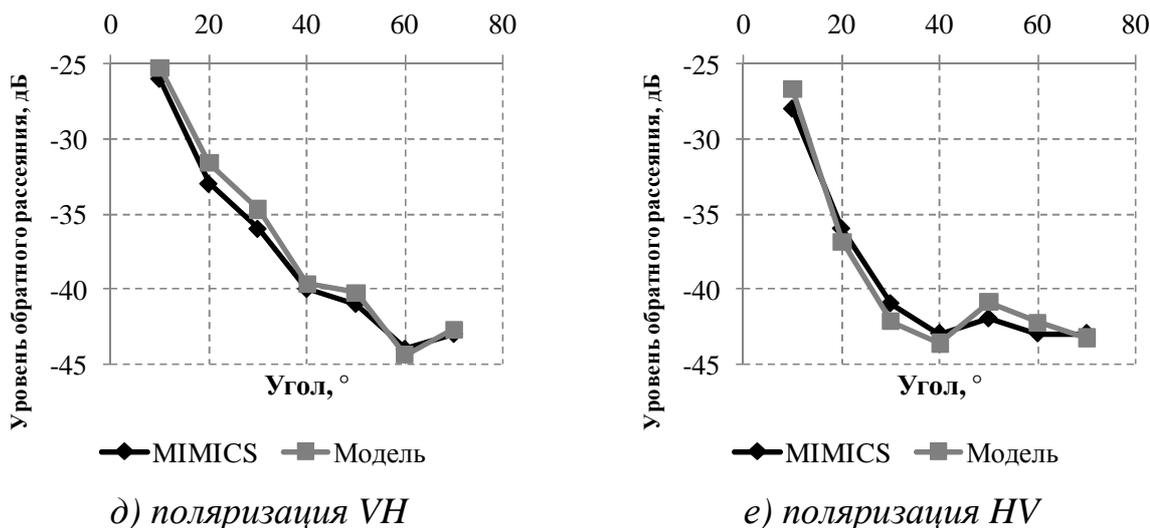


Рис. 2.8. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

Установлена достаточно высокая адекватность результатов моделирования распространения электромагнитных волн во всём исследуемом диапазоне частот. Расхождения, наблюдаемые в нижней части диапазона (до 4 ГГц), объясняются низкой адаптированностью модели для работы в данном диапазоне.

Выводы к главе 2

1. Предложен и обоснован способ задания геометрии лесного покрова различных видов в виде множества простых геометрических фигур, расположение которых описывается набором статистических параметров.
2. Разработан математический и алгоритмический аппарат фацетного моделирования на основе метода трассировки пути с поправками на дифракционные явления.
3. Разработана структура программного комплекса моделирования рассеяния электромагнитного излучения на лесных покровах различных видов.
4. Реализована фацетная модель рассеяния ЭМВ на лесном покрове в соответствии с результатами пп. 1–3.

Глава 3. Разработка методики распознавания типа лесного покрова по радиолокационному изображению

3.1. Структура задачи

Предыдущая глава настоящей работы была посвящена вопросу наработки банка данных ДФОС для различных видов лесного покрова. В данной главе решается задача разработки методики выявления и классификации типа лесного покрова на серии радиолокационных снимков участка местности при помощи банка данных ДФОС.

В настоящее время в сфере ДЗЗ накоплен богатый опыт распознавания и классификации объектов на космических и аэрофотоснимках в различных диапазонах длин волн, от ультрафиолетового до гигагерцового. Это позволяет при разработке метода распознавания опереться на ряд проверенных практикой технических решений. Рассмотрим вначале существующие подходы к распознаванию и классификации объектов на двумерных снимках различной природы. Затем перейдем от общего к частному и сформулируем структуру решения задачи классификации применительно к рассматриваемому в настоящей работе случаю.

Построение эффективных систем распознавания базируется не только на теоретических исследованиях, но и в значительной мере на методах математического и физико-математического моделирования, отличия которых состоят главным образом в следующем [29]. Сутью математического моделирования систем распознавания являются описания физических процессов формирования измеряемых величин, а также собственно процессов селекции и распознавания на основе полученной модельной апостериорной информации на языке математики: формул, аналитических соотношений, уравнений, алгоритмов. Результатом подобных описаний является построение комплекса математических моделей,

представляющего собой инструмент для организации исследований, основанных на проведении целенаправленных математических экспериментов.

Основное достоинство методов математического моделирования состоит в том, что затраты ресурсов на их реализацию существенно меньше, чем на постановку и проведение физического, лабораторного и тем более натурного моделирования. Однако меру доверия к результатам математического эксперимента следует связать со степенью адекватности модели физическим процессам, которые она описывает. В степени адекватности можно убедиться только в том случае, если модель проверена и откалибрована по реальной информации, получаемой в процессе лабораторных и/или натуральных испытаний разрабатываемой системы. Наличие откалиброванной и поэтому адекватной математической модели обеспечивает возможность замены значительных объёмов лабораторных и натуральных исследований математическими экспериментами.

Задачу распознавания объектов на радиолокационных изображениях (РЛИ) можно разделить на два этапа: выделение границ объектов на снимке (оконтуривание) и собственно классификация каждого объекта по набору тех или иных признаков [14]. Правильное выделение границ распознаваемых объектов является необходимым, хотя и недостаточным условием безошибочной их классификации.

Для выделения контуров объектов на двумерных растровых изображениях существует множество автоматических алгоритмов, основанных главным образом на использовании техник морфологической обработки изображений [28]. Типичный цикл обработки снимка состоит в двумерной фильтрации снимка с целью ослабления спекл-шума и других помеховых составляющих и последующем применении методик морфологической обработки для частичного устранения типовых помеховых артефактов и выделения контуров отдельных объектов снимка. При наличии нескольких снимков, выполненных различным способом (например, в

различных частотных диапазонах) и подвергнутых геометрическому совмещению, становится возможным более надёжное выделение контуров путём использования методик радиометрического комплексирования для построения более эффективных функций расстояния в пространстве признаков.

Вместе с тем, многолетняя практика обработки космических РЛИ показывает [26], что на сегодняшний день ни один промышленный алгоритм не способен справиться с этой задачей с достаточной для практических целей точностью для произвольного снимка. По этой причине оконтуривание объектов в существующих системах космического мониторинга осуществляется в полуавтоматическом режиме: оператор визуально контролирует процесс оконтуривания, подстраивая параметры алгоритма для отдельных регионов изображения, и затем вносит правки в конечный результат средствами графического пользовательского интерфейса. Автоматические алгоритмы минимизируют труд оператора, однако полностью исключить последнего из процесса на данный момент не представляется возможным. Данное обстоятельство связано не только с тем, что визуальный анализ снимка обеспечивает более высокую точность оконтуривания по сравнению с существующими алгоритмами, но и с тем, что оператор при принятии решения о включении объекта на снимке в тот или иной контур может руководствоваться множеством эмпирических соображений, которые крайне трудно формализовать в виде алгоритмов. К примеру, если какой-либо очевидно рукотворный объект на снимке по случайности имеет одинаковые радиометрические характеристики с интересующими исследователя областями снимка, выделяясь лишь узнаваемой формой, оператор может вручную исключить данный объект из рассмотрения и тем самым избежать ошибочной классификации. Автоматизация данной процедуры путём создания всеобъемлющего банка образов рукотворных объектов и реализации алгоритма выявления и устранения данных объектов из рассмотрения является едва ли не более

сложной технической задачей, чем собственно разработка алгоритма оконтуривания изображения.

Исследование РЛИ СМВ- и ММВ-диапазонов при помощи программного комплекса ENVI [26] показало, что автоматические алгоритмы для данных РЛИ демонстрируют столь же невысокую степень надёжности выделения контуров, что и для снимков видимого и ИК-диапазонов. Помимо этого, проблема сложности принятия решения по-прежнему остаётся, поскольку и в рассматриваемых диапазонах многие нежелательные объекты снимка имеют близкие к исследуемым областям характеристики. Ввиду этого было принято решение на данном этапе отказаться от попыток разработать надёжный автоматический алгоритм оконтуривания РЛИ ММВ- и СМВ-диапазонов и воспользоваться проверенной на практике схемой полуавтоматического оконтуривания.

Обратимся теперь к задаче классификации объекта по фрагменту РЛИ с использованием банка ДФОС, сгенерированных при помощи модели, рассмотренной в разделе 2.1. Решение данной задачи состоит в том, чтобы по участку РЛИ восстановить сигнатуру (фрагмент) ДФОС лесного покрова, после чего выполнить её распознавание путём сопоставления с банком ДФОС.

3.2. Математическая модель формирования радиолокационного снимка. Выделение сигнатур ДФОС из оконтуренного РЛИ

Чтобы выработать способ выделения фрагмента ДФОС по сегменту РЛИ, необходимо проанализировать физические процессы, происходящие при формировании радиолокационного снимка.

Радиолокация основана на некоторых свойствах радиоволн, позволяющих использовать их для обнаружения местонахождения целей. К таковым относятся [23]: отражение радиоволн от объектов, имеющих физические параметры, отличающиеся от параметров среды, в которой они распространяются; постоянство и конечность скорости распространения

радиоволн в однородной среде; возможность направленного излучения и приёма радиоволн. Сущность отражения радиоволн от объекта заключается в том, что под влиянием переменного электрического поля проходящих радиоволн в материале объекта возникают переменные токи той же частоты. Они являются источником, создающим в пространстве вторичные радиоволны, которые распространяются во все стороны. Интенсивность вторичных радиоволн зависит от многих факторов, среди которых наиболее важными являются материал, из которого изготовлен объект, соотношение размеров объекта и длины волны, а также форма объекта и его ориентация в пространстве.

В простейшем случае формирование снимка заключается в сканировании пространства узконаправленным электромагнитным лучом и приёме отклика. Большинство современных радиолокаторов вырабатывает поток информации о целях в участке пространства, содержащем весьма большое число разрешаемых объемов. При этом могут использоваться принципы последовательного, параллельного и параллельно-последовательного обзора пространства и составления потоков информации [19]. Эти принципы закладываются в основу построения отдельного радиолокатора и системы радиолокаторов. Принцип последовательного обзора пространства радиолокатором с лучом игольчатого вида подразумевает формирование РЛИ путём движения луча по определённой траектории. Закон перемещения луча может быть различным, например, по спирали. Принцип параллельного обзора и получения нескольких потоков информации позволяет ускорить процесс формирования РЛИ. Создается пучок игольчатых лучей, каждому из которых соответствует свой приемник. Если по одной из угловых координат (углу места) поток информации получается параллельно, а по другой (азимуту) – последовательно, например, за счет вращения многоканальной антенной системы, имеет место параллельно-последовательное составление потока информации. При распространении от антенны луч подвержен, во-первых, расхождению, что

приводит к ослаблению плотности потока мощности обратно пропорционально квадрату расстояния, и, во-вторых, атмосферному поглощению, что, как было сказано ранее, нельзя игнорировать, когда речь идёт о миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Рассмотренный подход к формированию РЛИ находит своё применение в радиолокаторах бокового обзора (РБО), устанавливаемых на фюзеляжах самолётов.

Более распространённым на сегодняшний день способом формирования РЛИ является использование радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), принцип действия которых основан на синтезе радиоизображения по радиоголограмме [41], [30]. В процессе полета самолета передатчик облучает местность, отраженные сигналы, усиленные в приемнике, запоминаются в специальном устройстве с учетом их амплитуды и фазы, после чего осуществляется их когерентное суммирование, аналогичное формированию диаграммы антенны. Одновременное суммирование СВЧ-сигналов в антенной решетке РБО заменяется в РСА последовательным суммированием сигналов, принятых на участке траектории, пока цель находится в пределах луча реальной антенны РЛС. Длина искусственного раскрытия синтезированной антенны в РСА соизмерима с размером элемента разрешения РБО вдоль линии пути и значительно превышает размеры физической антенны, установленной на самолете, что и позволяет реализовать высокое разрешение в РСА.

Применение РСА вместо РБО при самолётной и спутниковой съёмке позволяет резко увеличить разрешающую способность радиолокатора и уменьшить его габариты ценой усложнения процедуры обработки принятого сигнала. В ранних РСА данная процедура обработки реализовывалась в основном аналоговыми способами, малоудобными в эксплуатации – чаще всего методом оптического синтеза апертуры, подразумевающим регистрацию радиоголограммы на фотоплёнке и последующее воспроизведение радиоизображения при помощи облучения голограммы лазерным лучом. Развитие микроэлектроники позволило к настоящему

моменту отказаться от подобных способов в пользу полностью цифрового синтеза радиоизображений и тем самым обеспечить удобство формирования и передачи радиоизображений, не уступающее РБО.

Рассмотрим простейшую математическую модель формирования РЛИ при классической радиолокации [23]. Нижеприведённые рассуждения затрагивают главным образом вопросы распространения сигнала, поэтому выводы, полученные из них, можно экстраполировать и на случай РСА.

Поверхность лесного покрова в первом приближении можно считать плоской. ДФОС лесного покрова обозначим $D(\varphi, \psi, \varphi_0, \psi_0)$, где (φ, ψ) – направление наблюдения⁸, (φ_0, ψ_0) – направление облучения;

$0 \leq \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} D(\varphi, \psi, \varphi_0, \psi_0) d\psi d\varphi < 1$ (знак «меньше» означает, что часть мощности поглощается, а не рассеивается). Диаграмму направленности антенны обозначим $D_A(\alpha, \beta)$; $\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_A(\alpha, \beta) d\beta d\alpha = 1$, где за $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ примем направление главного максимума.

Волна, излучаемая антенной, имеет не плоскую, но сферическую форму, что означает ослабление плотности потока мощности пропорционально квадрату расстояния [19]:

$$\rho_0(\alpha, \beta) = \frac{P_0 D_A(\alpha, \beta)}{4\pi d^2}, \quad (3.1)$$

где ρ_0 – плотность потока мощности, P_0 – излучаемая мощность, d – расстояние до антенны.

На миллиметровых волнах имеет место сильное поглощение излучения в атмосфере, ввиду чего в модель необходимо ввести учёт этого поглощения:

$$\rho = \rho_0 e^{-\chi(\lambda)d}, \quad (3.2)$$

где $\chi(\lambda)$ – удельное поглощение излучения с данной длиной волны.

Пусть антенна поднята над поверхностью лесного покрова на высоту h . Тогда расстояние до точки поверхности, видимой из точки расположения

⁸ Определение системы координат и углов см. на рис. 1.1 в разд. 1.3.

антенны в направлении (φ, ψ) , будет равно:

$$d = \sqrt{h^2 + (h \operatorname{tg} \psi)^2} = h\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi} = h \sec \psi; \quad (3.3)$$

Пусть главный максимум ДН антенны ориентирован в направлении (φ_0, ψ_0) . Тогда, объединив (3.1)–(3.3), найдём плотность потока мощности в точке поверхности, видимой в направлении (φ, ψ) :

$$\rho_{\text{пад}}(\varphi, \psi) = \frac{P_0 D_A(\varphi_0 - \varphi, \psi_0 - \psi) e^{-\chi h \sec \psi}}{4\pi h^2 \sec^2 \psi}; \quad (3.4)$$

Доля мощности, рассеиваемой элементарной площадкой, облучаемой в заданном направлении:

$$dP_{\text{пад}}(\varphi, \psi) = \rho_{\text{пад}}(\varphi, \psi) dS = \rho_{\text{пад}}(\varphi, \psi) h^2 \sec^2 \psi d\varphi d\psi; \quad (3.5)$$

Мощность, отражённая этой точкой обратно в сторону антенны:

$$dP_{\text{отр}}(\varphi, \psi) = dP_{\text{пад}}(\varphi, \psi) D(\varphi, \psi, \varphi, \psi); \quad (3.6)$$

Отражённая волна также является сферической, что обуславливает её затухание обратно пропорционально квадрату расстояния. Также имеет место ослабление излучения в атмосфере. Таким образом, доля мощности, принятой антенной с данного направления:

$$dP_{\text{прм}}(\varphi, \psi) = \frac{dP_{\text{отр}}(\varphi, \psi) D_A(\varphi_0 - \varphi, \psi_0 - \psi) e^{-\chi h \sec \psi}}{4\pi h^2 \sec^2 \psi}; \quad (3.7)$$

Общая принятая мощность:

$$P_{\text{прм}} = \iint_{\varphi \psi} dP_{\text{прм}}; \quad (3.8)$$

Подставляя (3.4)–(3.7) в (3.8), получим:

$$\begin{aligned} P_{\text{прм}} &= \int_0^{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{P_0 D_A^2(\varphi_0 - \varphi, \psi_0 - \psi) e^{-2\chi h \sec \psi} D(\varphi, \psi, \varphi, \psi)}{16\pi^2 h^2 \sec^2 \psi} d\psi d\varphi = \\ &= \frac{P_0}{16\pi^2 h^2} \int_0^{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{D_A^2(\varphi_0 - \varphi, \psi_0 - \psi) e^{-2\chi h \sec \psi} D(\varphi, \psi, \varphi, \psi)}{\sec^2 \psi} d\psi d\varphi; \end{aligned} \quad (3.9)$$

Видно, что мощность принимаемого отклика убывает пропорционально квадрату расстояния, а не четвёртой степени. Это объясняется тем, что при изменении расстояния до цели угловые размеры пятна, засвеченного локатором на её поверхности – а значит, и доля

мощности, переизлучаемая этим пятном – остаются неизменными. Пределы интегрирования по зенитному углу от $\pi/2$ до π означают, что интегрирование ведётся только по нижнему полупространству (лесной массив располагается ниже антенны по оси z).

Поскольку ДН антенны имеет определённую ширину, в поле зрения лоатора попадает некоторая зона на поверхности, что и отражено в выражении (3.9) в виде квадрата двумерной свёртки диаграммы рассеяния с ДН антенны. Кроме того, лоатор миллиметрового диапазона работает в условиях сильного атмосферного поглощения, что, в свою очередь, отражено в числителе подынтегрального выражения в виде экспоненты. В случае радиолокации с синтезированной апертурой рассуждения о коррекции атмосферного поглощения остаются в силе, в то время как задача восстановления чёткости снимка решается в ходе математической обработки радиоголограммы.

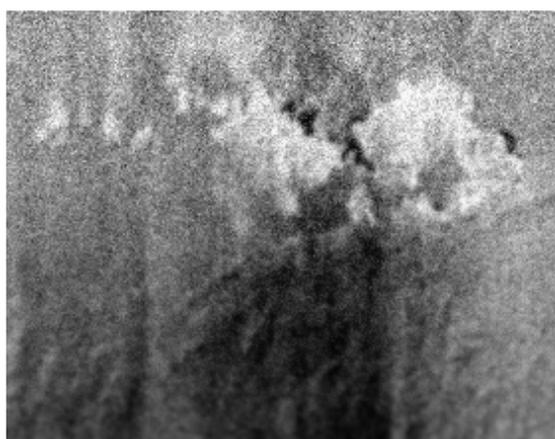
Изучение характеристик существующих самолётных радиолокационных систем СВВ- и ММВ-диапазонов [41], [30], [33] позволяет заключить, что задача восстановления чёткости снимка уже решается в данных системах на аппаратном уровне. Вопрос о коррекции атмосферного поглощения требует отдельного решения, поскольку не может быть решён без дополнительной априорной информации о высоте съёмки и уровне удельного поглощения. Частичная коррекция также осуществляется на аппаратном уровне. Мету добавочной коррекции можно эффективно оценить путём анализа результатов калибровки РСА [41].

На борту современных летательных аппаратов, как правило, имеется альтиметр, позволяющий получать сведения о высоте полёта, и навигационная система, позволяющая уточнять географические координаты летательного аппарата и его ориентацию в пространстве (рыскание, тангаж и крен). Таким образом, каждый радиолокационный снимок, выполненный с борта летательного аппарата, возможно сопроводить информацией о высоте съёмки и диапазоне азимутального и зенитного углов наблюдения, а

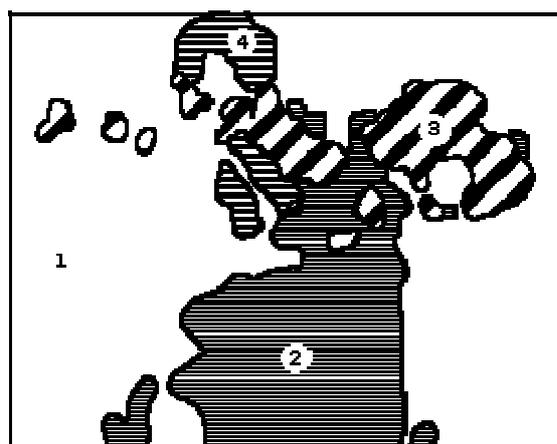
следовательно, каждому пикселю снимка можно поставить в соответствие его зенитный угол и относительный азимутальный угол.

Поскольку ДФОС в банке данных фактически представляют собой гистограммы, квантованные по углам, при привязке пикселей изображения углы также следует квантовать с соответствующим шагом. ДФОС лесного покрова в направлении обратного рассеяния фактически зависит только от одного угла – зенитного угла наблюдения. Следовательно, значения пикселей, которым соответствуют одинаковый относительный азимутальный угол и одинаковый номер сегмента, можно осреднить. В результате данных преобразований получаем несколько (по числу сегментов снимка) сигнатур ДФОС, зависящей только от зенитного угла наблюдения.

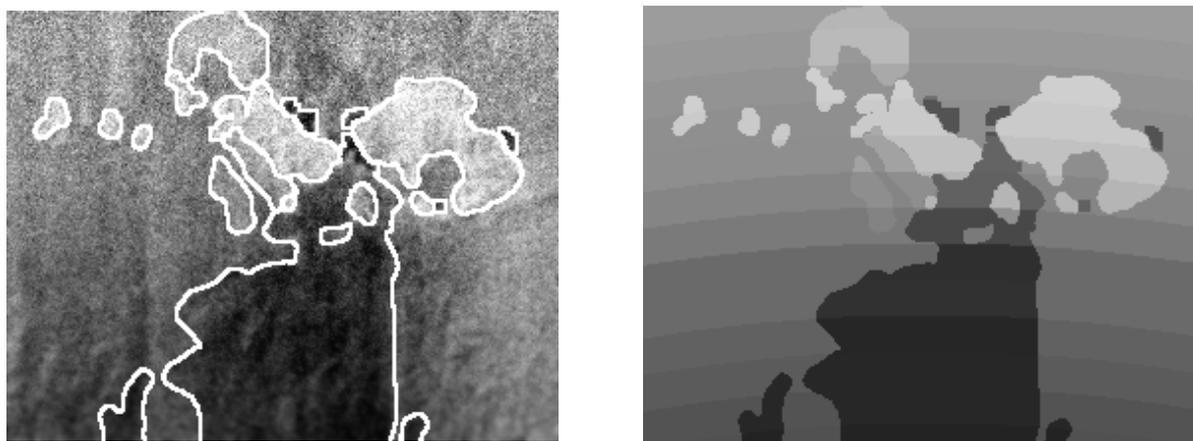
Рассмотренная процедура обработки снимка иллюстрируется рис. 3.1. На очищенном от шумов и откорректированном снимке (*а*) были выделены четыре области (*б*). Для наглядности на рисунке (*в*) проиллюстрированы границы этих областей, наложенные на исходное изображение. Далее была осуществлена классификация пикселей снимка по их принадлежности к тому или иному кванту зенитного угла. Яркость пикселей каждого множества была осреднена (*г*). В результате получены четыре фрагмента диаграммы обратного рассеяния (*д*).



а)

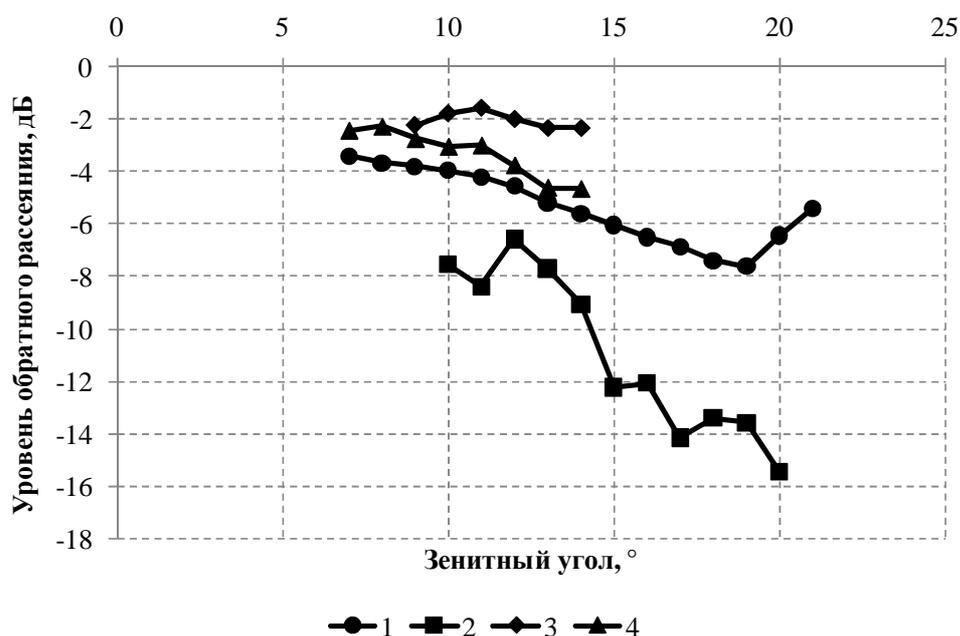


б)



в)

г)



д)

Рис. 3.1. Процесс выделения фрагментов диаграммы обратного рассеяния по оконтуренному радиолокационному снимку

3.3. Классификация сигнатуры ДФОС с использованием банка данных

Следующей задачей, встающей при идентификации типа лесного покрова, является классификация участка снимка по банку предрасчитанных сигнатур.

Методы классификации, существующие на сегодняшний день, принято делить на детерминистские и статистические [28]. В первом случае классификатор строится на основании имеющейся в распоряжении исследователя обучающей выборки. Во втором случае классификация осуществляется в отсутствие достаточного количества априорных сведений о

свойствах распознаваемых данных; при этом кластеризация (разбиение поступающих данных на группы) является частью процесса распознавания, а не выполняется заранее.

Рассматриваемый случай классификации участка снимка относится к детерминистским, поскольку используются предрассчитанные сигнатуры, соответствующие тому или иному кластеру, т.е. типу подстилающей поверхности. Каждую сигнатуру можно представить в виде точки в многомерном пространстве. Простейший способ классификации сигнатуры, выделенной из участка снимка, не основанный на эмпирических сведениях о природе классифицируемых данных, заключается в определении той образцовой сигнатуры, расстояние до которой в пространстве признаков было бы минимальным. Использование данного метода требует формулировки способа вычисления метрики – расстояния в пространстве признаков.

Простейшей метрикой является Евклидово расстояние:

$$d_k = |\vec{D}_k - \vec{D}_{0k}|, \quad (3.10)$$

где \vec{D}_k – фрагмент измеренной сигнатуры ДФОС, \vec{D}_{0k} – соответствующий фрагмент в банке данных.

Недостатком данной метрики является её неинвариантность к масштабу измерений по различным координатам. Этот факт делает Евклидово расстояние применимым только в узких случаях, когда эквивалентность размерности по каждой координате известна заранее, что, очевидно, не соответствует действительности в рассматриваемом случае ввиду разноприродности некоторых координат. Более совершенной метрикой, учитывающей обозначенную проблему, является расстояние Махаланобиса. Оно позволяет учесть не только различие масштабов по координатам, но и корреляцию между каналами. Вычисление расстояния Махаланобиса осуществляется в соответствии с формулой

$$d_M = \sqrt{(\vec{D}_k - \vec{D}_{0k})' S^{-1} (\vec{D}_k - \vec{D}_{0k})}, \quad (3.11)$$

где S – квадратная матрица ковариации между набором выборок векторов \bar{D}_k и \bar{D}_{0k} . На её главной диагонали располагаются дисперсии соответствующих компонент вектора измерений. В случае, когда эта матрица является диагональной, формула (3.11) вырождается в т.н. нормализованное Евклидово расстояние [11]:

$$d_{kn} = \sqrt{\sum_i \frac{(D_{ki} - D_{0ki})^2}{\sigma_i^2}}, \quad (3.12)$$

где суммирование выполняется по компонентам вектора выборки.

В рассматриваемом нами случае направление распространения излучения от источника сквозь пространство лесного массива сильно зависит от длины волны. Таким образом, можно предположить, что при замерах уровня обратного рассеяния в различных спектральных каналах уровень ковариации выборок будет не слишком существенным. Если данное предположение подтвердится в ходе проверки метода классификации, это даст возможность использования в качестве метрики нормализованного Евклидова расстояния вместо расстояния Махаланобиса, что выгоднее с точки зрения вычислительных затрат.

3.4. Оптимизация методики распознавания участка снимка по результатам компьютерного моделирования

С целью накопления исходных данных для дальнейшего изучения был выполнен расчёт набора ДФОС. Вариативными параметрами явились:

- тип подстилающей поверхности: гарь; вырубка; сухостой; лиственный лес, поражённый короедом; здоровый лиственный лес, здоровый хвойный лес;
- поляризация излучения: HH, VV, HV, VH;
- длина волны: 5, 8, 14, 20, 50, 80 мм;
- зенитный угол испускания излучения: $0 \dots 75^\circ$ с шагом 5° .

Исходные данные для построения соответствующих сцен (линейные размеры, густота и электродинамические параметры рассеивающих

элементов) были взяты из [40], [39], [38], [36], [6]. Для каждого варианта подстилающей поверхности было сгенерировано 50 сцен. Каждый вариант сцены был облучён 10000 лучей, падающих со случайного направления под заданным углом к надиру. Таким образом, для каждой комбинации длина волны – поляризация – тип подстилающей поверхности ДФОС строилась на основании результатов трассировки 500000 лучей.

Выбор данного объёма вычислений продиктован следующими соображениями. В качестве критерия останова вычислений был выбран следующий: расчёт прекращается, когда вклад трассировки очередного луча в окончательный вид ДФОС составляет менее 10^{-7} (0,00001%), что составляет среднему вкладу в один элемент ДФОС⁹ на уровне 0,3%. Опытным путём было установлено, что для разных типов подстилающей поверхности данный критерий может быть достигнут путём трассировки примерно 250000–350000 лучей, причём данная величина от расчёта к расчёту колеблется весьма незначительно. Для надёжности данная цифра была взята с запасом и доведена до 500000 лучей.

Пример рассчитанной ДФОС приведён на рис. 3.2. «Строкам» на рисунке соответствуют различные виды поляризации, а «столбцы» в пределах каждой строки представляют одну и ту же диаграмму с разных ракурсов (перспективная проекция). Условно можно представить, что облучаемая сцена накрыта полусферическим куполом радиуса много больше её линейных размеров и потоки отражённого излучения проецируются на внутреннюю поверхность этого купола, создавая окраску в зависимости от интенсивности излучения. У подножия полусферы находится шкала азимутального угла (φ), где за 0° принят азимутальный угол направления облучения сцены.

Математически полученную диаграмму можно условно записать как

$$D_{\text{BRDF}}(\psi_0, \varphi, \psi, \lambda, P, T), \quad (3.13)$$

⁹ При составлении ДФОС азимутальный и зенитный углы квантовались с шагом в 1° ; таким образом, ДФОС состояла из $360 \cdot 90 = 32400$ элементов.

где литерой P обозначен тип поляризации, T – тип подстилающей поверхности.

Рассмотрение диаграммы двумерной функции освещённости сцены позволяет сделать ряд выводов о характере отражения излучения от лесного покрова. Пик отражённого излучения приходится на направление, соответствующее углу отражения по закону Снеллиуса. На диаграммах, соответствующих перекрёстным поляризациям (HV и VH), можно увидеть проявление эффекта угла Брюстера в виде полос пониженного уровня излучения.

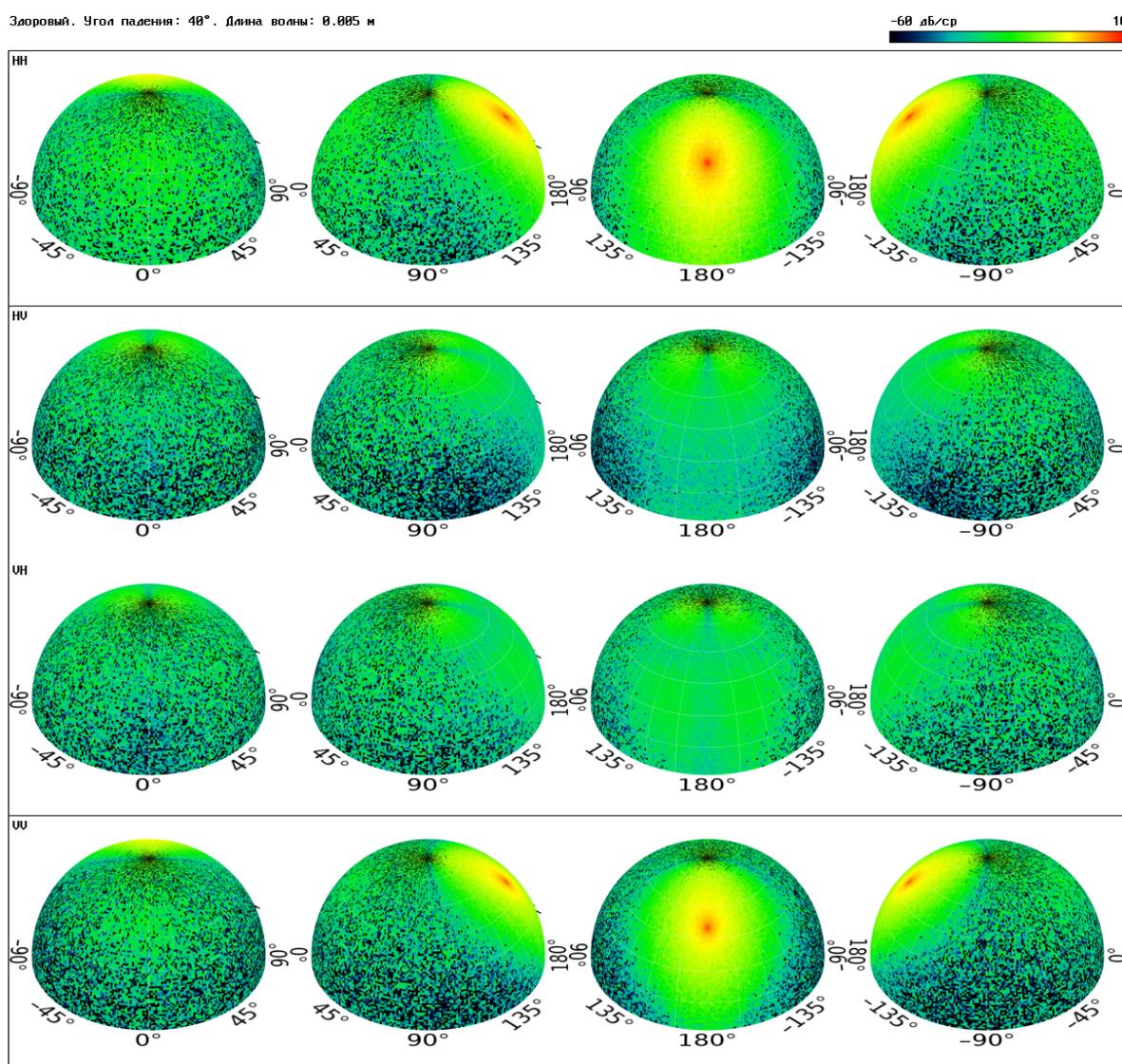


Рис. 3.2. Визуализация ДФОС здорового лиственного леса, облучаемого плоской волной длиной 5 мм под углом 40° от надира

В ходе расчёта были найдены матрицы ковариации между векторами

различных признаков (см. раздел 3.3). Изучение их показало, что данные матрицы фактически являются диагональными: недиагональные компоненты по абсолютной величине не превышали 10% от величины минимального элемента главной диагонали, что, согласно [18], можно считать достаточным критерием для отказа от использования в качестве метрики расстояния Махаланобиса в пользу нормализованного Евклидова расстояния.

Использование радиолокационных систем самолётного базирования накладывает определённые ограничения на возможности измерения интенсивности отражённого излучения. Так, использование распределённой радиолокации (приёмник и передатчик разнесены в пространстве на значительное расстояние) означает необходимость, во-первых, использования двух летательных аппаратов и, во-вторых, принятия дополнительных навигационных и конструкторских мер по обеспечению определённого взаимного расположения приёмной и передающей антенн в процессе эксплуатации комплекса. Данное обстоятельство подводит к выводу о необходимости использования сосредоточенной системы радиолокации. В свою очередь, последнее ставит вопрос оценки информативности съёмки подстилающей поверхности под теми или иными углами: наличие данной информации позволит оптимизировать конструкцию аппаратной части комплекса.

Ещё одним аспектом оптимизации затрат, тесно связанным с предыдущим, является минимизация набора измерительных приборов, входящих в состав программно-аппаратного комплекса. С этой целью необходимо оценить информативность съёмки подстилающей поверхности при том или ином сочетании несущей частоты и поляризации.

Использование сосредоточенной системы радиолокации подразумевает, что направление приёма излучения совпадает с направлением его испускания. Таким образом, для построения диаграммы обратного рассеяния, зависящей от зенитного, но не от азимутального угла (см. раздел 3.2), необходимо сделать выборку из набора рассчитанных ДФОС. По

аналогии с (3.13) можем записать¹⁰:

$$D_{BS}(\psi_0, \lambda, P, T) = D_{BRDF}(\psi_0, 0, \psi_0, \lambda, P, T); \quad (3.14)$$

В рассматриваемом случае моделирование обратного рассеяния осуществлялось для шести длин волн и четырёх вариантов поляризации (всего 24 комбинации). Таким образом, каждое измерение интенсивности обратного рассеяния можно представить в виде выборки 24-мерных векторов, которая соответствует тому или иному типу подстилающей поверхности и тому или иному углу зондирования. В ходе моделирования использовались выборки размером 500000 векторов каждая, что позволило с высокой достоверностью вычислить соответствующие центральные моменты каждой компоненты вектора-центра кластера.

Примеры диаграмм обратного рассеяния, вычисленных по правилу (3.14), приведены на рис. 3.3, 3.4, 3.5. По горизонтали отложен зенитный угол направления приёма излучения ($\varphi = \varphi_0$), по вертикали – интенсивность излучения в дБ/ср. Изучение данных графиков позволяет сделать вывод о высокой степени корреляции между данными, получаемыми в различных диапазонах и на различных поляризациях, что позволяет сделать вывод о возможности сокращения количества сенсоров при незначительной потере информативности.

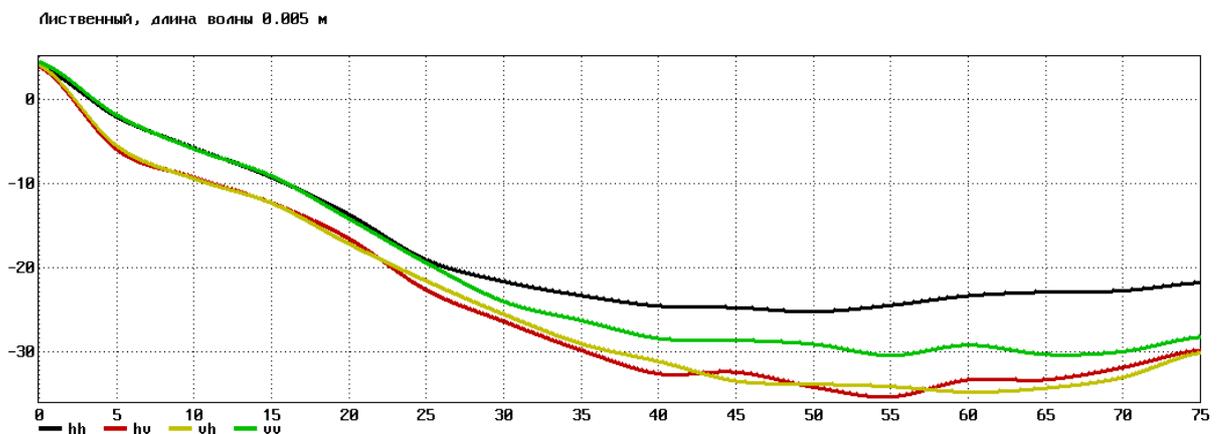


Рис. 3.3. Диаграмма обратного рассеяния здорового лиственного леса на длине волны 5 мм при различных поляризациях

¹⁰ Аббревиатура BS означает «обратное рассеяние» (англ. *backscattering*)

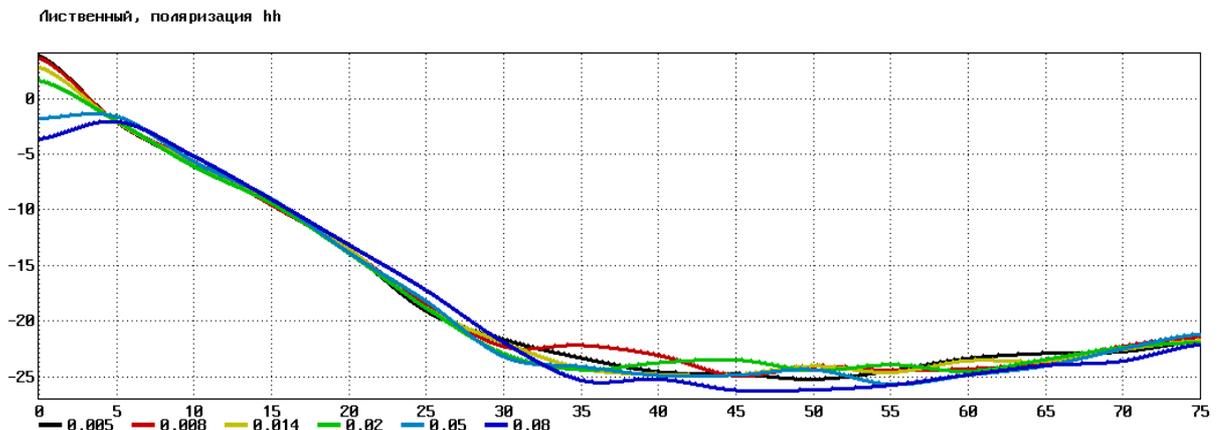


Рис. 3.4. Диаграмма обратного рассеяния здорового лиственного леса на поляризации HH при различных длинах волн

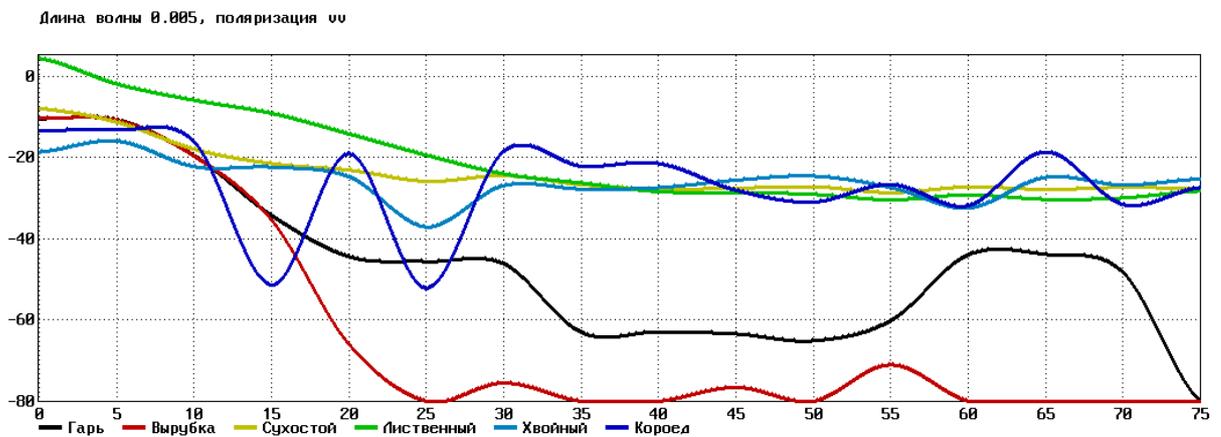


Рис. 3.5. Диаграмма обратного рассеяния различных видов подстилающей поверхности на длине волны 5 мм при поляризации VV

С целью определения оптимального зенитного угла зондирования к полученным данным был применён следующий алгоритм:

1. Выбирается одна из комбинаций компонент 24-мерного вектора.
2. Выбирается один из углов зондирования, для которого имеется смоделированная выборка.
3. Для всех попарных сочетаний классов (т.е. типов подстилающей поверхности) вычисляется нормированное Евклидово расстояние между соответствующими векторами-центрами кластеров. Данная величина принимается в качестве метрики различимости классов. Среди всех значений метрики выбирается наименьшее (худшее). Данная величина является мерой различимости классов для данного сочетания компонент при данном угле зондирования.
4. Шаги 3-4 повторяются для всех вариантов углов зондирования.

Определяется наибольшее («лучшее из худших») нормированное Евклидово расстояние и соответствующий ему угол зондирования. Данный угол принимается как оптимальный угол зондирования для данной выборки компонент 24-мерного вектора измерений.

5. Шаги 1-4 повторяются для всех $2^{24} - 1 = 16777215$ комбинаций компонент 24-мерного вектора (исключается вариант пустой комбинации).

Результаты рассмотренного алгоритма иллюстрируются рис. 3.6 и 3.7. На рисунке 3.6 по оси абсцисс отложено нормированное «лучшее из худших» Евклидово расстояние между кластерами, по оси ординат – угол зондирования. Степень затемнённости соответствующей области рисунка соответствует тому, насколько часто данный угол оказывается оптимальным при данном уровне нормированного Евклидова расстояния.

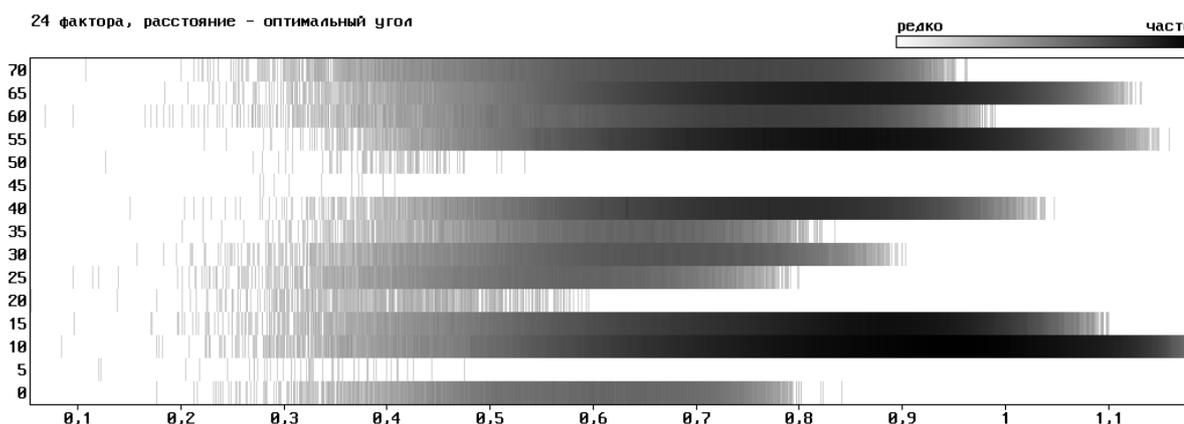


Рис. 3.6. К определению оптимального угла зондирования

На графике рис. 3.6 видно, что наибольшей информативностью обладают варианты угла зондирования в районе 55° от надира и 10° от надира. Данные углы могут быть рекомендованы как оптимальные при построении программно-аппаратного комплекса зондирования лесных покровов.

Рисунок 3.7 построен по аналогичному принципу с той разницей, что по оси абсцисс отложено количество компонент, выбранных из 24-мерного вектора. Иными словами, изучение рис. 3.7 позволяет ответить на вопрос, какое минимальное количество компонент вектора необходимо для обеспечения того или иного уровня различимости классов.

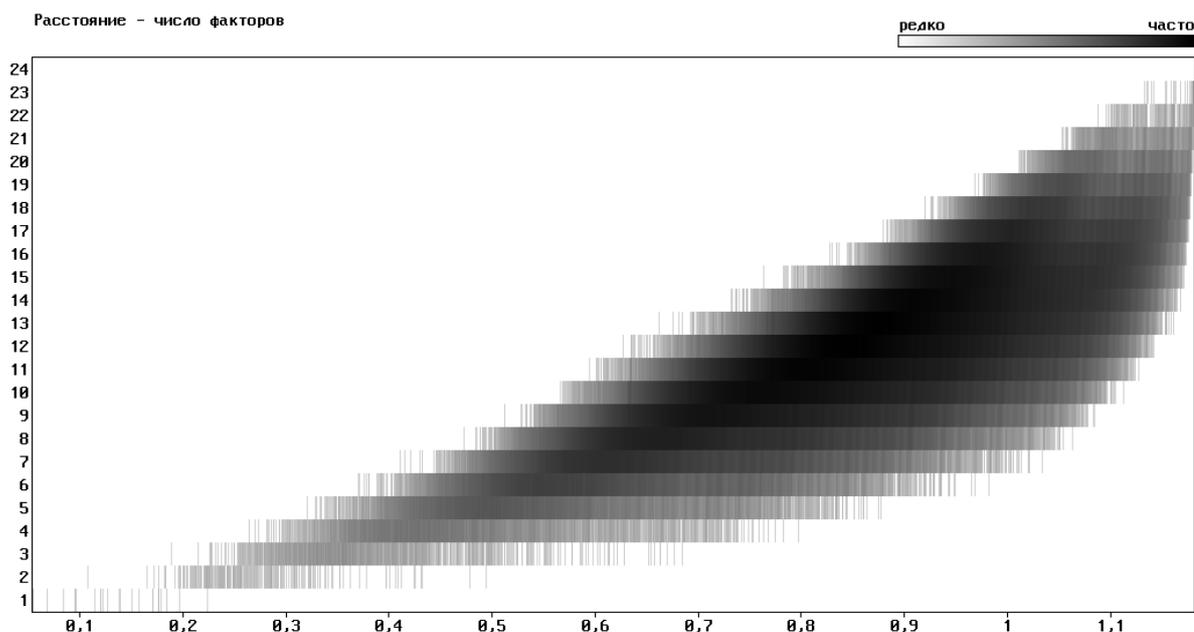


Рис. 3.7. К определению оптимального числа факторов

Согласно [18], одной из мотиваций снижения размерности вектора измерений является тот факт, что наличие большого количества факторов, принимаемых во внимание при решении задачи распознавания, может привести не к улучшению, а к ухудшению достоверности. Рис. 3.7 косвенно иллюстрирует этот факт. В правой части графика можно видеть небольшую область высокой достоверности, в которую включается 7–13 компонент вектора: именно эта область представляет дальнейший интерес для изучения. Основной же набор комбинаций, содержащих большее количество компонент, лежит левее, т.е. в области меньшей различимости классов.

Среди наиболее информативной области не составляет труда выделить ряд комбинаций компонент 24-мерного вектора измерений, состоящих из 6 и менее компонент. Некоторые из них приведены в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Некоторые высокоинформативные короткие комбинации

№ п/п	Состав комбинации		Угол зондирования, °	Норм. Евкл. расстояние
	Длина волны, м	Поляризация		
1	0,005	НН	10	1,06
	0,008	НН		
	0,014	НН		
	0,02	НН		
	0,05	НН		
	0,05	VH		
2	0,005	НН	10	0,99
	0,008	НН		

	0,014	НН		
	0,05	НН		
	0,05	VH		
	0,08	НН		
3	0,005	НН	10	0,88
	0,008	НН		
	0,014	НН		
	0,05	НН		
	0,05	VH		
4	0,005	НН	10	0,87
	0,008	НН		
	0,014	НН		
	0,02	НН		
	0,05	VH		
5	0,005	НН	10	0,68
	0,008	НН		
	0,014	НН		
	0,05	VH		

Из табл. 3.1 можно сделать вывод, что наиболее информативными являются более коротковолновые участки спектра на поляризации НН; также особый интерес представляет спектральный канал длиной волны 0,05 м на поляризации VH.

Для проверки вышеизложенного указания относительно оптимальных углов зондирования был проведён расчёт диаграмм, аналогичных рис. 3.6, но для комбинаций, содержащих ровно 6 и ровно 4 компоненты. Как следует из табл. 3.1, шестикомпонентные комбинации могут обеспечить уровень различимости классов на 9,2% хуже оптимального, что условно можно считать приемлемым; четырёхкомпонентные комбинации можно условно считать неприемлемыми. Исследование оптимального угла зондирования представляет интерес и в том и в другом случае с целью отслеживания тренда. Соответствующие диаграммы приведены на рис. 3.8 и 3.9.

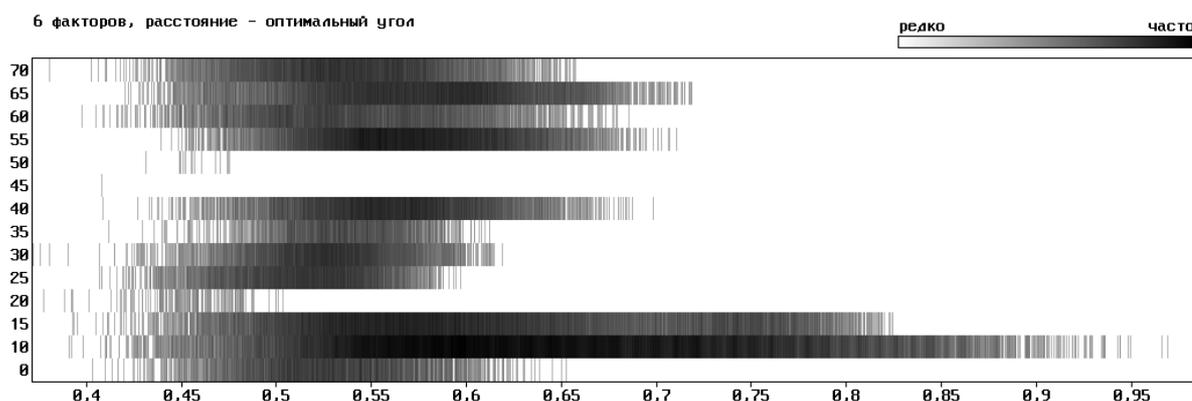


Рис. 3.8. К определению оптимального угла зондирования при шести факторах

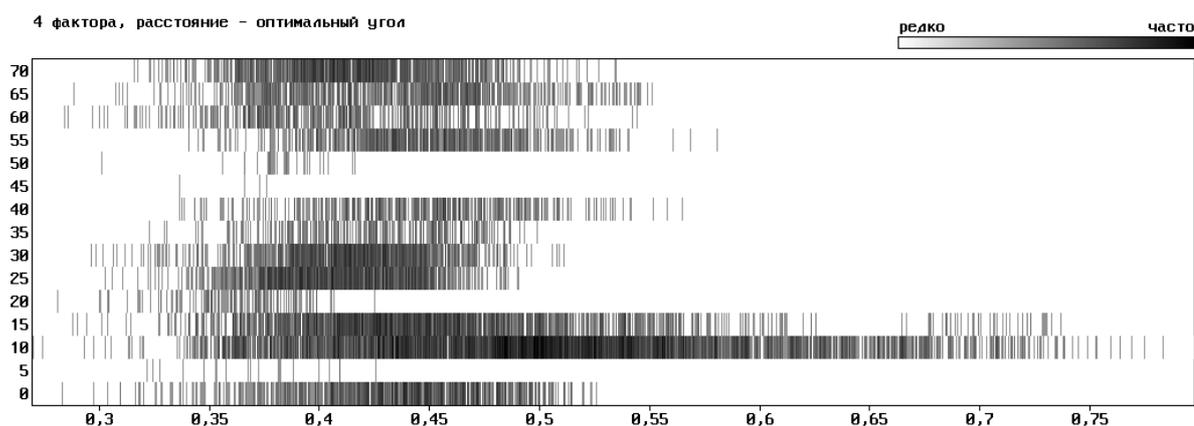


Рис. 3.9. К определению оптимального угла зондирования при четырёх факторах

Из рисунков видно, что для коротких комбинаций признаков справедлив ранее сделанный вывод об оптимальности углов зондирования в районе 55° и 10° от надира.

В заключение сформулируем основные выводы по результатам изложенного компьютерного исследования:

- ввиду существенно различной информативности тех или иных каналов измерения существует возможность уменьшения числа необходимых сенсоров в несколько раз при сохранении высокой степени различимости типов растительности;
- наиболее информативные результаты получаются при съёмке на поляризации НН;
- увеличение числа спектральных каналов более предпочтительно с точки зрения информативности, чем увеличение числа вариантов поляризации.

3.5. Оценка достоверности процедуры классификации типа подстилающей поверхности

Необходимым этапом разработки методики классификации является оценка её достоверности. В настоящее время разработан ряд методов и алгоритмов совместной классификации, т.е. принятия решения о принадлежности объекта тому или иному классу по результатам рассмотрения решений нескольких классификаторов. В основе многих алгоритмических моделей лежит теорема Байеса, утверждающая, что если плотности распределения каждого из классов известны, то искомый алгоритм можно выписать в явном аналитическом виде. Этот алгоритм оптимален, то есть обладает минимальной вероятностью ошибок.¹¹

На практике плотности распределения классов, как правило, неизвестны, вследствие чего их приходится оценивать (восстанавливать) по обучающей выборке. В результате байесовский алгоритм перестаёт быть оптимальным, так как восстановление плотности по выборке возможно только с некоторой погрешностью. Чем короче выборка, тем выше вероятность адаптации распределения под частный случай и возникновения эффекта переобучения.

По стратегии осуществления совместная классификация подразделяется на параллельную и последовательную [43]. В случае параллельной классификации каждый классификатор выносит своё решение либо в виде номера класса (т.н. случай *минимального объёма информации*), либо в виде набора апостериорных вероятностей принадлежности объекта к каждому классу (случай *максимального объёма информации*). В случае последовательной классификации осуществляется последовательное рассмотрение решений от каждого классификатора. На каждом шаге вычисляется оценка правдоподобия, после чего либо принимается

¹¹ Цит. с согласия автора по: *Воронцов, К.В.* Лекции по статистическим (байесовским) алгоритмам классификации (<http://www.ccas.ru/voron/download/Bayes.pdf>; ссылка проверена 2 апреля 2015 г.)

окончательное решение о принадлежности объекта к одному из классов и завершение процедуры классификации, либо осуществляется переход к следующему шагу и рассмотрение решения следующего классификатора.

Практика эксплуатации систем распознавания образов показывает [43], что методы параллельной классификации обеспечивают наименьший процент ошибок в реальных прикладных задачах распознавания. Поэтому предпочтительны именно параллельные алгоритмы. Кроме того, возможность оценки подобия каждой сигнатуры ДФОС той или иной записи в банке данных обуславливает необходимость рассмотрения задачи классификации фрагмента РЛИ как случая максимального объема информации, являясь предпочтительным ввиду меньшего процента ошибок по сравнению со случаем минимального объема информации.

Одной из основополагающих работ по этому направлению является работа [7]. В ней заложен теоретический фундамент построения систем совместной классификации на базе объединения максимума апостериорной информации от классификаторов, не просто оперирующих разнородным набором исходных данных, но и могущих иметь различную природу, что по возможностям даже превосходит уровень, требуемый для настоящего исследования.

Рассмотрим задачу классификации набора сигнатур Z по принадлежности к одному и только одному из набора m классов $\omega_1 \dots \omega_m$ при помощи R классификаторов, i -й из которых рассматривает сигнатуру \bar{x}_i из набора Z . В пространстве измерений каждому классу ω_k поставим в соответствие функцию плотности вероятности $p(\bar{x}_i | \omega_k)$. Априорную вероятность принадлежности набора Z данному классу обозначим $P(\omega_k)$.

Байесовское решающее правило причисления набора Z к классу ω_j выглядит следующим образом:

$$P(\omega_j | \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_R) = \max_k P(\omega_k | \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_R), \quad (3.15)$$

По формуле Байеса,

$$P(\omega_k | \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_R) = \frac{p(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_R | \omega_k)}{p(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_R)}, \quad (3.16)$$

где $p(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_R)$ – распределение полной безусловной вероятности измерений. Последнее, в свою очередь, может быть выражено через распределения условной плотности вероятности измерений:

$$p(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_R) = \sum_{j=1}^m p(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_R | \omega_j) P(\omega_j), \quad (3.17)$$

и, таким образом, дальнейшее рассмотрение вопроса целесообразно строить вокруг числителя (3.16). Авторы подвергают рассмотрению различные подходы к вычислению последнего, результатом чего становится формулировка нескольких модификаций правила (3.15):

$$P^{-(R-1)}(\omega_j) \prod_{i=1}^R P(\omega_j | \bar{x}_i) = \max_{k=1}^m P^{-(R-1)}(\omega_k) \prod_{i=1}^R P(\omega_k | \bar{x}_i) \quad (3.18.1)$$

– «правило перемножения»,

$$(1-R)P(\omega_j) + \sum_{i=1}^R P(\omega_j | \bar{x}_i) = \max_{k=1}^m \left[(1-R)P(\omega_k) + \sum_{i=1}^R P(\omega_k | \bar{x}_i) \right] \quad (3.18.2)$$

– «правило суммы». Помимо этого, путём введения ряда аппроксимаций авторы вырабатывают ещё несколько правил («правило максимума», «правило минимума», «правило медианы», «правило большинства голосов») и тем самым выводят некоторые известные методы решения задачи параллельной совместной классификации в условиях минимума апостериорной информации как частные случаи правил (3.18).

Важным этапом исследования [7] является масштабная экспериментальная апробация рассмотренных правил путём сравнения их эффективности в таких разнородных задачах, как идентификация людей по фотографии лица, идентификация дикторов по голосу, распознавание рукописного текста. Главный вывод работы [7] заключается в следующем: несмотря на тот факт, что формулировка «правила суммы» (3.18.2) выполнена исходя из наибольшего количества не вполне очевидных эмпирических допущений, именно указанное правило на практике обеспечивает самую высокую достоверность распознавания и наименее

чувствительно к шуму. Данному практическому выводу затем даётся теоретическое истолкование.

На основании вышесказанного в качестве стратегии совместной классификации было принято решение использовать «правило суммы». Практическое использование этого правила требует наличия информации об априорных вероятностях принадлежности каждой сигнатуры каждому классу, а также об априорной вероятности обнаружения того или иного класса на наборе РЛИ. На практике не существует строгих методов определения данных величин, ввиду чего прибегают к тем или иным их оценкам.

Существуют различные способы оценки априорной вероятности обнаружения класса $P(\omega_k)$. В простейшем случае можно предположить равную вероятность обнаружения любого класса, т.е. положить $P(\omega_k) = 1/m$. Применительно к задаче распознавания РЛИ этот подход неприемлем. К примеру, если распознаванию подлежит серия снимков тайги, то вероятности наличия на снимках классов «здоровый кедровый молодняк» и «тропические джунгли в сезон дождей» очевидно отличаются. Стоит также учесть, что, как было сказано в разделе 3.1, необходимым этапом процесса распознавания является участие оператора. В силу этого предлагается следующая схема формирования входного набора $P(\omega_k)$. Весь набор классов, подлежащих распознаванию, каталогизируется в виде древовидной структуры. Каждый уровень каталога представляется группами классов, максимально непохожими друг на друга. К примеру, группами верхнего уровня могут быть «Приполярье», «Средняя полоса», «Субтропики» и т.д.; для группы «Средняя полоса» подгруппами могут быть «Лето», «Осень», «Зима», «Весна». В процессе предварительной обработки снимков оператор при помощи графического пользовательского интерфейса включает или исключает из рассмотрения группы, актуальные для данного набора снимков. Включение или исключение группы более верхнего уровня подразумевает включение или исключение всех его дочерних групп; кроме того, на каждом

уровне вложенности возможно включение или исключение только части групп, что позволяет максимально гибко отбирать классы для распознавания. Вероятности $P(\omega_k)$ тех классов, которые в конечном итоге были отобраны для рассмотрения, можно положить одинаковыми (соблюдая условие $\sum_{k=1}^m P(\omega_k) = 1$), в то время как для всех прочих классов приравнять их к нулю.

Задача оценки вероятности принадлежности каждому классу каждого вектора \bar{x}_i оказывается более сложной. Весь набор величин $P(\omega_k|\bar{x}_i)$ каким-то образом зависит от набора оценок меры подобия каждого вектора соответствующему образцовому вектору в банке данных. Соответственно, для определения оценок вероятностей $P(\omega_k|\bar{x}_i)$ необходимо, во-первых, выбрать способ оценки подобия между измеренным и образцовым векторами и, во-вторых, выработать способ пересчёта набора оценок подобия в набор априорных вероятностей.

В качестве меры подобия может быть рассмотрена функция евклидова расстояния или обратная ей величина, если потребовать, чтобы с увеличением подобия мера также росла. Недостатком данной метрики является её ненормированность и неустойчивость к случайным выбросам. В силу того, что контуры классов на изображении качественно очерчиваются в процессе сегментации, а фрагментыДФОС являются результатом осреднения большого количества пикселей, случайных выбросов можно не ожидать, но проблема ненормированности сохраняется. В качестве более совершенной меры подобия, не имеющей данного недостатка, подходит уже рассмотренный в разд. 3.3 частный случай расстояния Махаланобиса – нормализованное евклидово расстояние:

$$d_k = \sqrt{\sum_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{(D_k[\psi] - D_{0k}[\psi])^2}{\sigma_k^2}}, \quad (3.19)$$

где

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{\psi_2 - \psi_1 + 1} \sum_{\psi_1}^{\psi_2} (D_k[\psi] - D_{0k}[\psi])^2} \quad (3.20)$$

– среднеквадратическое отклонение векторов друг от друга.

Процедуру оценки вероятности по метрике подобия можно символически записать в виде:

$$P(\omega_k|\bar{x}_i) = \theta(\forall d_k); \quad (3.21)$$

Иными словами, вероятность принадлежности сигнатуры, рассматриваемой i -м классификатором, k -му классу есть функция нормализованного евклидова расстояния между данной сигатурой и образцом не только данного класса, но и образцами всех прочих классов. Очевидно, что эта зависимость может иметь весьма сложный характер. Одним из вариантов решения этой проблемы может служить предположение о нормальном характере распределения вероятности; в этом случае оценку вероятности можно получить следующим образом:

$$P(\omega_k|\bar{x}_i) = \frac{P'(\omega_k|\bar{x}_i)}{\sum_k P'(\omega_k|\bar{x}_i)}, \quad (3.22)$$

где

$$P'(\omega_k|\bar{x}_i) = \frac{e^{-\frac{d_k^2}{2\sigma_k^2}}}{\sigma_k \sqrt{2\pi}}. \quad (3.23)$$

Для вычисления набора $P(\omega_k|\bar{x}_i)$ вначале рассчитывается набор величин по формуле (3.23), после чего осуществляется их нормировка по формуле (3.22).

Выводы к главе 3

1. Разработана методика выделения фрагмента диаграммы рассеяния электромагнитного излучения из радиолокационного изображения.
2. Разработана методика распознавания типа лесного покрова путём сравнения фрагмента диаграммы рассеяния с банком образцов. При помощи компьютерного моделирования выполнена оптимизация методики распознавания и выявлены наиболее информативные диапазоны измерений.
3. Создан математический аппарат байесовской оценки достоверности результатов классификации.

Глава 4. Апробация и практическое применение результатов исследования

4.1. Практическая проверка методики распознавания типов лесного покрова

С целью оценки адекватности разработанной методики классификации типа лесного покрова была выполнена её практическая проверка при помощи набора 18 образцовых радиолокационных снимков местности, доступных в сети Интернет. Источниками снимков послужили веб-сайты ИТЦ «СканЭкс¹²», проекта «Космоснимки¹³», ESDI¹⁴. Каждый снимок был выполнен в нескольких радиодиапазонах ММВ и СМВ (8 мм, 30 мм, 80 мм), а также в ИК-диапазоне (1500 мкм). Оконтуривание снимков выполнено их поставщиками. По каждому типу подстилающей поверхности имелась подробная информация о типе растительности и геометрических параметрах покрова, что позволило составить соответствующие расчётные задания для факетной модели и составить соответствующий банк сигнатурДФОС.

Данные о распознавании того или иного типа подстилающей поверхности сведены в табл. 4.1. Графа «распознано ИК» содержит результат распознавания существующим алгоритмом классификации для ИК-диапазона (информация предоставлена поставщиками снимков), графа «распознано СВЧ» – результат классификации алгоритмом, описанным в главе 3 настоящей работы и использующим данные всех спектральных каналов, имеющихся на снимках. Серым фоном в данных графах выделены ошибки распознавания.

¹² <http://catalog.scanex.ru/dewb/step1.pl>

¹³ <http://kosmosnimki.ru/>

¹⁴ <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>

Табл. 4.1. Результаты классификации

Время года	№ сцены	Тип подстилающей поверхности	Распознано ИК	Распознано СВЧ	
лето	1	лиственный лес	лиственный лес	лиственный лес	
		трава	трава	трава	
		вода	вода	вода	
	2	лиственный лес	лиственный лес	лиственный лес	
		густая трава	лиственный лес	густая трава	
	3	лиственный лес	лиственный лес	лиственный лес	
		хвойный лес	хвойный лес	хвойный лес	
		сухой песок	сухой песок	асфальт	
	4	сухой песок	сухой песок	асфальт	
	5	хвойный лес	хвойный лес	хвойный лес	
		лиственный лес	лиственный лес	лиственный лес	
	6	хвойный лес	хвойный лес	хвойный лес	
		смешанный лес	лиственный лес	смешанный лес	
		лиственный лес	лиственный лес	лиственный лес	
	7	асфальт	асфальт	асфальт	
		вода	вода	вода	
	осень	8	сухостой	сухая трава	сухостой
			лиственный лес	лиственный лес	лиственный лес
			сухая трава	сухая трава	сухая трава
		9	хвойный лес	хвойный лес	хвойный лес
			вырубка	сухая земля	вырубка
10		вода	вода	вода	
		сухая трава	сухая трава	сухая трава	
		сухостой	сухостой	сухостой	
11		мокрый песок	вода	вода	
		ветровал	ветровал	ветровал	
зима	12	лиственный лес	лиственный лес	лиственный лес	
		заснеженное поле	заснеженное поле	заснеженное поле	
	13	заснеженный лиственный лес	заснеженное поле	заснеженное поле	
		гарь под снегом	заснеженное поле	заснеженное поле	
		гарь открытая	гарь открытая	гарь открытая	
		листв. лес в снегу	заснеженное поле	заснеженное поле	
		вырубка	вырубка	вырубка	
	вода	вода	вода		
	14	сухостой в инее	заснеженное поле	сухостой	
		хвоя под снегом	заснеженное поле	хвойный лес	
		вода подо льдом	заснеженное поле	заснеженное поле	

ВЕСНА	15	влажная земля	влажная земля	влажная земля
		земля под снегом	земля под снегом	земля под снегом
	16	вода	вода	вода
		мокрый сухостой	мокрый сухостой	вода
	17	вода	вода	вода
		мокрая гарь	мокрая гарь	вода
	18	хвойный лес	хвойный лес	хвойный лес
		лиственный лес без листвы	сухостой	лиственный лес без листвы
		низкорослая трава	низкорослая трава	низкорослая трава
	Итого верно:		35/47 (74%)	39/47 (83%)

По результатам данного испытания были сделаны следующие выводы. Измерения в ИК-диапазоне наименее надёжны в отношении определения заснеженных покровов. Измерения в СВЧ-диапазоне наименее надёжны при определении влажных поверхностей. В широком спектре типов подстилающей поверхности СВЧ-измерения показывают большую (на 9%) надёжность результатов.

4.2. Выбор бортового РСА

Как было сказано ранее, наиболее перспективным направлением дистанционного зондирования лесных покровов в настоящее время может считаться зондирование с малой высоты, осуществляемое в первую очередь при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Использование БПЛА существенно увеличивает мобильность систем дистанционного зондирования, снижает стоимость их эксплуатации, способствует повышению автоматизации процесса исследования благодаря использованию методик автоматического пилотирования [23].

Построение радиолокационных систем авиационного базирования является весьма сложной технической задачей. Основной причиной обозначенной сложности является наличие ряда технических противоречий между конструктивными предпочтениями для целей радиолокации и для целей построения летательных аппаратов. Например, стремление конструктора РЛС использовать апертурные антенны с большим раскрытием

вступает в противоречие со стремлением авиаконструктора обеспечить летательному аппарату наименьшее воздушное сопротивление. Имеют место и другие технические сложности: ограниченность мощности бортовой электросети, ограниченность грузоподъёмности летательного аппарата и т.д.

Несмотря на указанные сложности, работа по созданию средств радиолокации, пригодных для использования в малой авиации, успешно идёт во многих странах мира [26]. Наибольшее применение находят радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), поскольку они обладают высоким разрешением, слабой зависимостью от погодных условий и возможностью получения информации в любое время суток. Предел разрешающей способности космических РСА 0,3–0,5 м/пикс преодолен их авиационными аналогами. Наилучшие образцы достигли уровня разрешения менее 10–15 см — РСА PAMIR (Германия), LYNX (США) и др. Малогабаритные АРСА находят применение для воздушного мониторинга, проводимого с малогабаритных БПЛА при поисково-спасательных операциях, чрезвычайных ситуациях и т. п. Для этого в первую очередь должна обеспечиваться всепогодность и круглосуточность получения информации. Основная характеристика таких РСА — минимальная масса. Здесь также получены выдающиеся результаты. Например, РСА NanoSAR (США) имеет массу менее 1 кг, при этом устройство обеспечивает работу в четырёх частотных диапазонах (Ku, X, UHF плюс сверхширокополосный режим) и разрешающую способность до 30 см/пикс. Устройство поставляется в комплекте со специализированным ПО для обработки снимков.¹⁵

Многодиапазонные РСА в основном используются для важных исследовательских задач: проведение экспериментов для обеспечения новых информационных технологий ДЗЗ, создания банков радиолокационных характеристик, совершенствования методик и алгоритмов обработки (дешифрирования) радиолокационных изображений. РСА данного класса

¹⁵ http://www.imsar.com/uploads/files/45_NanoSAR_B_Data_Sheet.pdf (ссылка проверена 27 апреля 2015 г.)

работают сразу в нескольких частотных диапазонах (от 2–3 и более), имеют совершенное метрологическое обеспечение для проведения сложных измерений радиолокационных характеристик земных покровов и объектов. В данном классе можно отметить: американский AIRSAR (Airborne Synthetic Aperture Radar; диапазоны P, L и C) с полной поляризацией и однопроходной интерферометрией в C-диапазоне, немецкий F-SAR (диапазоны X, C, S, L и P) с реализацией однопроходной интерферометрии в X- и S-диапазонах, французский RAMSES с 8 частотными диапазонами — от P-диапазона до W-диапазона [26]. Также нельзя не упомянуть о разработках в области создания радаров на основе сверхширокополосных сигналов. Данные устройства позволяют выполнять поиск объектов, скрытых под различными видами подстилающей поверхности или под слоем почвы.

На основании анализа литературы и публикаций по теме разработки бортовых РЛС [17], [46], [23], [19], [34], а также информации от производителей подобных систем, собранной в сети Интернет, были сформулированы следующие замечания:

1. Проектирование РЛС авиационного базирования существенно осложняется наличием противоречий между инженерными потребностями разработчиков антенной техники и специфическими техническими требованиями к массогабаритным и геометрическим характеристикам устройств, выдвигаемыми авиаконструкторами. Неизбежной платой за технические компромиссы между двумя указанными областями является ухудшение эксплуатационных характеристик бортовых РЛС по сравнению с наземными аналогами. Обстоятельство ограниченности технических возможностей авиационных радиолокаторов необходимо учитывать при проектировании систем ДЗЗ самолётного базирования.

2. Существующие системы активного ДЗЗ авиационного базирования за редким исключением являются совмещёнными. Данная особенность объясняется тем, что создание распределённой системы (приёмник и излучатель разнесены в пространстве на значительное расстояние) означает

удвоение стоимости эксплуатации радиотехнического комплекса и требует решения ряда новых эксплуатационных вопросов, многие из которых являются специфическими для малой авиации (точный контроль взаимного расположения приёмника и передатчика, обеспечение стабилизации обеих антенных систем при неустойчивости крена летательных аппаратов и т.д.).

3. Для целей ДЗЗ с малой высоты наиболее востребованы, как и в случае с космическими средствами, радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА). Разрешающая способность данных устройств достаточна для решения практических задач, а интенсивное развитие теории РСА в последние десятилетия вкупе с развитием и миниатюризацией вычислительной техники привело к созданию относительно дешёвых и удобных в эксплуатации систем аэро радиосъёмки с автоматической коррекцией типовых искажений.

4.3. Рекомендации по построению беспилотной системы радиомониторинга

Беспилотные летательные аппараты, функционирующие аналогично самолётам, развиваются на протяжении последних нескольких десятков лет. В последние годы появились серийные модели БПЛА, устройство и комплектация которых оптимизированы для решения задач дистанционного зондирования. Данные летательные аппараты могут комплектоваться средствами видео- и ИК-съёмки, бортовыми радиолокаторами, системами спутниковой и инерциальной навигации. На сегодняшний день на рынке представлено большое количество беспилотных летательных аппаратов самолётного типа. Целесообразно рассмотреть их возможности на примере нескольких серийных моделей.

БПЛА ZALA 421-04M2Ф¹⁶ ГК «ZALA AERO» представляет собой беспилотный самолёт средней дальности с системой автоматического управления (автопилот), навигационной системой с инерциальной

¹⁶ <http://zala.aero/zala-421-04m2f/>

коррекцией (GPS/ГЛОНАСС), встроенной цифровой системой телеметрии, навигационными огнями, встроенным трёхосевым магнитометром, радиомодемом с приемником спутниковых навигационных систем «Диагональ ВОЗДУХ» с возможностью работы без спутникового сигнала (радиодальномер), системой самодиагностики, датчиком влажности, датчиком температуры, датчиком тока, датчиком температуры двигательной установки, отцепом парашюта, защитным элементом (козырек) целевой нагрузки и поисковым передатчиком. Основным предназначением устройства, по заявлению разработчика, является мониторинг растительных покровов. С этой целью устройство комплектуется набором сменных гиросtabilизированных нагрузок, включающих в себя системы видеосъёмки и мультиспектральной ИК-съёмки. Устройство может находиться в воздухе до 2,5 часов и нести полезную нагрузку до 1 кг, максимальная взлётная масса – 6,5 кг. Запуск устройства осуществляется при помощи катапульты, посадка – уловом в сеть или при помощи парашюта.

Другим типовым примером может служить БПЛА Supercam S-240¹⁷ компании «Беспилотные системы» (г. Ижевск). В комплект поставки входит БПЛА и наземная станция управления на базе портативного ПК с набором специализированного программного обеспечения. БПЛА может проводить в воздухе до 2 часов. Запуск осуществляется при помощи катапульты, посадка – на парашюте. Время развёртывания комплекса составляет 10 минут.

Помимо летательных аппаратов самолётного типа, в последние годы активно развиваются устройства, функционирующие по вертолётному принципу (единая терминология их именования ещё не устоялась; чаще всего можно встретить термины *мультикоптер*, *дрон*, *мультироторный БПЛА*, *БПЛА вентиляторного типа*). Достоинством данных устройств является отсутствие необходимости в специальных средствах запуска и посадки летательного аппарата – взлётно-посадочной полосы, катапульты,

¹⁷ <http://unmanned.ru/uav/supercam-240.htm>

посадочной сети и т.д. В настоящее время отрасль создания подобных устройств переживает этап бурного роста. Регламенты использования воздушного пространства многих стран, в том числе и России, корректируются с учётом этих обстоятельств. Мультикоптеры находят широкое применение для решения гражданских и бытовых задач – аэромониторинга дорожных пробок, отслеживания преступников, курьерской доставки товаров, причём в большинстве своём подобные задачи хорошо поддаются автоматизации и почти не требуют участия человека.

Информация о практическом использовании мультикоптеров в задачах экологического мониторинга представлена в открытой печати весьма скудно, что объясняется относительной новизной массовой эксплуатации данных летательных аппаратов. Вместе с тем, нет сомнения, что в будущем последние найдут широкое применение в различных прикладных отраслях науки, в т.ч. и в экомониторинге.

Для примера рассмотрим характеристики аэрофотосъёмочного комплекса Геоскан-401 на базе мультироторного БПЛА¹⁸. Данное устройство имеет массу 5 кг (без учёта нагрузки) и может нести до 1,5 кг полезной нагрузки. Устройство приводится в движение электродвигателем и может находиться в воздухе до 1 часа, двигаясь с крейсерской скоростью 30 км/ч. В состав нагрузки в базовой комплектации входит фотокамера и приёмник системы спутниковой навигации; опционально возможно использование тепловизора, видеокамеры, инерциальной навигационной системы. Устройство программируется перед полётом при помощи прикладного ПО, выполняющего расчёт полётного задания на основе сведений, предоставляемых оператором. По окончании полёта и приземлении БПЛА бортовое запоминающее устройство подключается к ПК, и специализированное ПО выполняет сшивку фотографий, построение высотной карты местности, расчёт трёхмерной модели земной поверхности в виде облака точек и его сшивку в полигональную модель.

¹⁸ <http://съемкасвоздуха.рф/eshop/bpla/geoscan-401.html>

По результатам выполненного обзора был сделан вывод о целесообразности использования готовых БПЛА в качестве основы для создания программно-аппаратного комплекса радиомониторинга лесных массивов. Фактически разработка подобного комплекса сводится к выбору состава полезной нагрузки БПЛА и структуры специализированного ПО, выполняющего обработку РЛИ.

4.4. Разработка структурной организации программно-аппаратного комплекса радиомониторинга лесных покровов

На основании изложенных в главе 3 настоящей работы соображений по оптимизации состава измерительных приборов, а также по результатам рассмотрения серийных рыночных предложений, выполненного в разд. 4.1–4.3 настоящей работы, была составлена структурная схема программно-аппаратного комплекса диагностики лесопатологий на основе беспилотного летательного аппарата. Данная схема приведена на рис. 4.1.

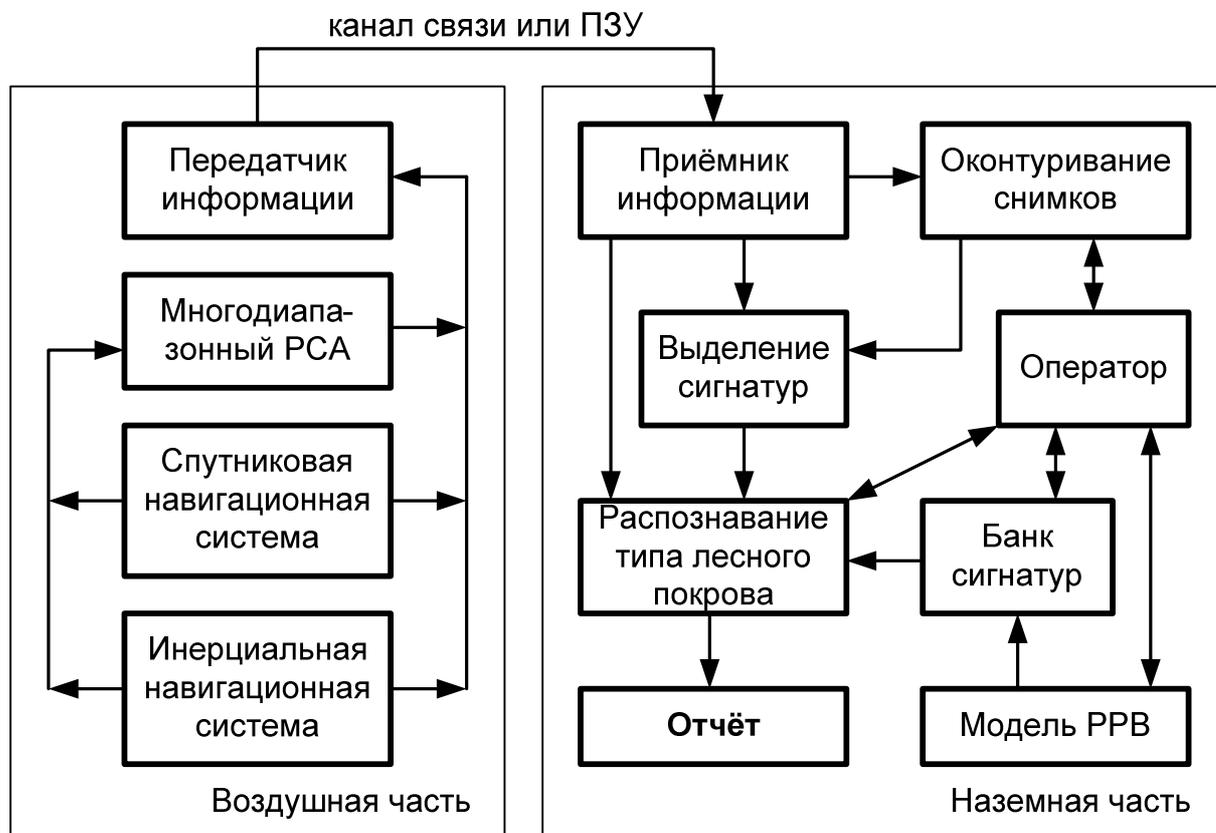


Рис. 4.1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса диагностики лесопатологий

Рассмотрим данную схему подробнее. Основным измерительным элементом комплекса выступает многодиапазонный РСА, выполняющий радиолокационную съёмку местности на различных длинах волн и поляризациях. Географическая и высотная привязка снимков выполняется при помощи спутниковой и инерциальной навигационных систем, входящих в состав БПЛА. Кроме того, навигационные системы являются источниками информации о скорости движения летательного аппарата, необходимой для работы РСА.

Радиолокационные снимки вкуче с навигационной информацией поступают в блок, обозначенный на схеме как передатчик информации. Аналогично, наземная часть содержит блок, обозначенный как приёмник информации. Следует пояснить, что данная схема иллюстрирует лишь факт необходимости передачи информации от воздушной части к наземной, но не оговаривает способ передачи. Возможны следующие варианты организации доставки данных на наземную часть комплекса: передача данных в реальном времени по радиоканалу (требует радиосвязи с землёй на протяжении всего времени выполнения полётного задания); запись данных на ПЗУ и считывание их после посадки БПЛА; комбинированный вариант, когда ПЗУ играет роль временного буфера для собираемых данных, а информация передаётся на наземный пункт по мере возможности либо считывается по окончании полёта.

Радиолокационные снимки, собранные в ходе полёта БПЛА по проложенному маршруту, подвергаются оконтуриванию. Данный процесс, как было сказано в главе 3, требует участия оператора для коррекции результатов автоматического оконтуривания. Для осуществления данной процедуры может использоваться существующее ПО, например, программный комплекс ENVI (см. [26]).

Оконтуренные снимки подвергаются процедуре выделения сигнатур, описанной в главе 3. Далее полученные сигнатуры вместе с информацией о географической привязке снимка поступают в прикладную программу,

выполняющую их распознавание при помощи банка данных. В процесс распознавания может вмешиваться оператор, корректируя те или иные настройки или исключая из рассмотрения заведомо отсутствующие на снимках виды растительности для повышения точности классификации.

Формирование банка данных осуществляется заранее (возможно, на этапе разработки комплекса) при помощи модели распространения радиоволн (РРВ), в роли которой выступает фацетная модель, описанная в главе 2. Кроме того, у оператора существует возможность пополнять банк сигнатур вручную на основании, к примеру, эмпирических данных, собранных в ходе реальных облётов местности с тем или иным типами растительности.

Результат распознавания снимков используется для составления отчёта о выполнении полётного задания. Поскольку прикладное ПО дистанционного зондирования, как правило, поддерживает возможность автоматической сшивки снимков в единое полотно, данной функцией можно воспользоваться для составления геопривязанной карты лесопатологий на исследованной территории.

Выводы к главе 4

1. Результаты практической проверки разработанной методики распознавания типов подстилающей поверхности на наборе тестовых участков местности показывают, что по сравнению с существующей методикой распознавания ИК-снимков разработанная методика обеспечивает на 9% меньше ложных срабатываний.

2. Существующие беспилотные системы малой авиации и компактные бортовые радиолокаторы позволяют реализовать программно-аппаратный комплекс маловысотного радиомониторинга лесных покровов на основе разработанной методики классификации.

3. Разработана структурная организация программно-аппаратного комплекса распознавания типов лесного покрова.

Заключение

Диссертационная работа посвящена созданию программного комплекса классификации типа и состояния лесного покрова по данным дистанционного СВЧ-зондирования в СМВ- и ММВ-диапазонах. Основные результаты, достигнутые в работе, заключаются в следующем:

1. Разработана и реализована в виде программы для ЭВМ компьютерная модель рассеяния электромагнитного излучения на лесном покрове различных видов. Адекватность модели проверена при помощи сравнения полученных с её помощью результатов с экспериментальными данными.

2. Разработана методика выделения фрагмента диаграммы рассеяния электромагнитного излучения из радиолокационного снимка с коррекцией атмосферного поглощения.

3. Разработан алгоритм оценки состояния лесного покрова путём сопоставления диаграммы рассеяния, полученной в результате активной радиолокации, с банком образцовых эмпирических моделей рассеяния электромагнитного излучения. Установлено, что с точки зрения различимости типов лесного покрова наибольшую информативность имеют частотные поддиапазоны 5, 8, 14 мм на поляризации НН и 50 мм на поляризации VН.

4. Разработана структурная схема программно-аппаратного комплекса распознавания типов лесного покрова.

5. Алгоритм распознавания типов лесного покрова проверен на наборе тестовых радиолокационных снимков. Результаты проверки показывают, что достоверность распознавания различных типов лесного покрова по данным зондирования в СМВ- и ММВ-диапазонах на 12% выше, чем при использовании видимого и ИК-диапазонов.

Список литературы

1. *Michael Abrash*. Graphics Programming Black Book. / The Corolis Group, 1997. ISBN 1-576-10174-6
2. *Balanis, C.A.* Advanced engineering electromagnetics / Hamilton Printing Company, 1989 – 537 с.
3. *Piotr Danilewski*. Binned SAH *k*D-tree construction on a GPU. / Piotr Danilewski, Stefan Popov, Philip Slusallek. Saarland University, Saarbrücken, Germany, 2010. – 15 с.
4. *John Andrew Fozard*. Diffraction and Scattering of High Frequency Waves. PhD. Dissertation thesis. / Jesus College, University of Oxford, 2005. – 216 с.
5. *Vlastimil Havran*. Heuristic Ray Shooting Algorithms. PhD Dissertation Thesis. / Czech Technical University, Prague, 2001. – 220 с.
6. *Honda H.* Description of the form of trees by the parameters of the tree-like body: Effects of the branching angle and the branch length on the shape of the tree-like body / Journal of Theoretical Biology 31 (1971), 331–338.
7. *Josef Kittler*. On Combining Classifiers. / Josef Kittler, Mohamad Hatef, Robert P.W. Duin, Jiri Matas. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 20, no. 3, March 1998. – 14 с.
8. *Kulemin, G.P.* Millimeter-Wave Radar Targets and Clutter / Artech House Radar Library, 2003 – 342 с.
9. *Link, T.E.* A deterministic method to characterize canopy radiative transfer properties / Timothy E. Link, Danny Marks, Janet P. Hardy – Hydrol. Process. 18, 3583–3594 (2004) – 12 с.
10. *McGuire, M.J.* Modeling Directional Thermal Radiance from a Forest Canopy / Mark J. McGuire, Lee K. Balick, James A. Smith, B.A. Hutchison / SWOE Report 89-6, New Hampshire, 1989 – 22 с.
11. *Geoffry J. McLachlan*. Discriminant Analysis and Statistical Pattern

Recognition / Wiley and Sons, 2004 – 526 с.

12. *Mironov, V.L.* Effect of Antireflective Surface at the Radiobrightness Observations for the Topsoil Covered with Coniferous Litter / Mironov V. L., Bobrov P. P., Yashchenko A. S., Savin I. V., Repin A. V. – PIERS Proceedings, Moscow, Russia, August 18–21, 2009, p. 966-970

13. *Pomeroy, J.W.* The impact of coniferous forest temperature on incoming longwave radiation to melting snow / John W. Pomeroy, Danny Marks, Tim Link, Chad Ellis, Janet Hardy, Aled Rowlands, Raoul Granger – Hydrol. Process. (2009) – 13 с.

14. *John Richards.* Remote Sensing Digital Image Analysis. 4th ed. / John A. Richards, Jia Xiuping. Canberra, 2006. – 454 с.

15. *Ingo Wald.* Realtime Ray Tracing and Interactive Global Illumination. Dissertation zur Erlangung des Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.). / Max-Planck-Institut für Informatik, 2004. – 310 с.

16. *Ingo Wald.* On building fast kD -Trees for Ray Tracing, and on doing that in $O(M \log N)$. / Ingo Wald, Vlastimil Havran, 2006. – 9 с.

17. *Аванесов, Г. А.* Цифровые авиационные съёмочные системы на линейных ПЗС-детекторах. / Г.А. Аванесов, А.С. Василейский, Я.Л. Зиман, И.В. Полянский. / ИКИ РАН – 7 с.

18. *Айвазян С.А. и др.* Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин; под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

19. *Бердышев, В.П.* Радиолокационные системы. Учебник / Бердышев В. П., Гарин Е. Н. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – 400 с. ISBN 978-5-7638 2479-7

20. *Боровиков, В. А.* Геометрическая теория дифракции / Боровиков В. А., Кинбер Б. Е. – М.: Связь – 248 с.

21. *Бронштейн, И.Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. / Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. М.: Наука, 1980. – 976 с.

22. *Виноградов, Б. В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. / М.:

Наука, 1984. – 320 с.

23. *Волкеедов, А.П.* Радиолокационное оборудование самолётов: Учебное пособие для авиационных техникумов. – М.: Машиностроение, 1984. – 152 с.

24. *Волосюк, В.К.* Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации. / Волосюк В.К., Кравченко В.Ф. – М.: Физматлит, 2008. – 704 с. ISBN 978-5-9221-0895-9

25. *Гаврилов, В.М.* Исследование поверхности и недр Земли электромагнитными методами: в 3 ч. / Гаврилов В.М., Никитин О.Р. Под ред. О.Р. Никитина – Владимир: ВлГУ, 2009 – 232 с. ISBN 978-5-904527-03-7

26. Геоматика, №3/2011 / М.: Совзонд, 2001 – 112 с.

27. *Голованов, Н.Н.* Геометрическое моделирование. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2002. – 472 с. ISBN 5-94052-048-0

28. *Гонсалес, Р.* Цифровая обработка изображений. / Гонсалес Р., Вудс Р. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с. ISBN 5-94836-028-8

29. *Горелик, А.Л.* Селекция и распознавание на основе локационной информации / Горелик А.Л., Барабаш Ю.Л., Кривошеев О.В., Эпштейн С.С. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с., ил. – ISBN 5-256-00721-1

30. *Горячкин, О.В.* Формирование изображений в цифровых РЛС с синтезированной апертурой антенны. Методические указания к лабораторной работе по курсу «Радиотехнические системы». / Поволжская гос. академия телекоммуникаций и информатики, 2005. – 15 с.

31. *Иванов, В.П.* Трёхмерная компьютерная графика. / Иванов В.П., Батраков А.С. Под ред. Г.М. Полищука. М.: Радио и связь, 1995. – 224 с.

32. *Калинкевич, А. А.* О механизме обратного рассеяния электромагнитных волн сосновым лесом в метровом диапазоне длин волн / Калинкевич А.А., Манаков В.Ю., Арманд Н.А., Крылова М.С. – Радиотехника и электроника, 2008, т. 53, №10, с. 1223-1235

33. *Кацнельсон, В.З.* Основы радиолокации и импульсной техники. / Кацнельсон В.З., Тимченко Н.И., Волков В.В. – М.: Гидрометеиздат, 1985. –

334 с.

34. *Кочержевский, Г.Н.* Антенно-фидерные устройства. / Г.Н. Кочержевский, Г.А. Ерохин, Н.Д. Козырев. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.: ил.

35. *Кочеткова, Т. Д.* Диэлектрическая проницаемость хвойных пород древесины в диапазоне частот 3–12 ГГц. / Т.Д. Кочеткова, В.И. Суслев, С.И. Волчков / Томск: Вестник СибГАУ, №5 (51), 2013. – 4 с.

36. *Кочеткова, Т. Д.* Комплексная диэлектрическая проницаемость древесины в терагерцовом диапазоне. / Т.Д. Кочеткова, В.И. Суслев, К.В. Дорожкин / Известия высших учебных заведений: физика, т. 56, №8/3, 2013 г. – 3 с.

37. *Кравцов, Ю. А.* Приближение геометрической оптики и примыкающие к нему асимптотические методы. / М.: Изд-во АН СССР, 1968. – 108 с.

38. *Лотова, Л. И.* Морфология и анатомия высших растений. / М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 528 с.

39. *Магазинникова, А.Л.* Статистические методы расчёта УКВ полей в лесных районах. Диссертация на соискание учёной степени к.ф.-м.н. Томск, 1998. – 130 с.

40. *Мильшин, А. А.* Некоторые результаты экспериментальных исследований радиотеплового излучения леса в L-диапазоне / А. А. Мильшин, А. Г. Гранков. Исследование Земли из космоса, 2000, №3, с. 50-57.

41. *Неронский, Л.Б.* Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Ч. 2. Радиолокаторы с синтезированной апертурой (учебное пособие) / Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. СПбГУАП. СПб, 1999. – 228 с.

42. *Пийк, У.* Теория радиолокационных отражений от земной поверхности. / Зарубежная радиоэлектроника, 1960, №3, с. 3-15

43. *Сойфер, В.А.* Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с. ISBN 5-9221-0270-2

44. *Уфимцев, П. Я.* Метод краевых волн в физической теории дифракции. / М.: Советское радио, 1962. – 243 с.

45. *Фальковский, О.И.* Техническая электродинамика: Учебник. – СПб: Издательство «Лань», 2009. – 432 с.

46. *Шовенгердт, Р. А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. / М.: Техносфера, 2010. – 560 с.

Публикации соискателя по теме работы

Статьи в журналах ВАК:

47. *Шулятьев А. А.* Компьютерное моделирование и экспериментальная проверка математических моделей радиотеплового излучения природных сред / О. Р. Никитин, А. В. Никитин, А. А. Шулятьев // Успехи современной радиоэлектроники №7/2010 (соискатель – 33%)

48. *Шулятьев А. А.* Комплексирование данных многоспектрального дистанционного зондирования лесных массивов / О. Р. Никитин, А. Н. Кисляков, А. А. Шулятьев // Проектирование и технология электронных средств. – Владимир. – №2/2010 (соискатель – 33%)

49. *Шулятьев А. А.* Моделирование работы алгоритма комплексирования многоспектральных изображений земной поверхности / О. Р. Никитин, А. Н. Кисляков, А. А. Шулятьев // Проектирование и технология электронных средств. – Владимир. – №2/2011 (соискатель – 33%)

50. *Шулятьев А. А.* Фацетное моделирование рассеяния падающего электромагнитного излучения на листовном покрове леса / О. Р. Никитин, А. А. Шулятьев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, №4/2013. Изд. МИ ВлГУ, Муром, 2013 (соискатель – 50%)

Материалы российских и международных конференций:

51. *Шулятьев А. А.* Компьютерное моделирование и экспериментальная проверка математических моделей радиотеплового излучения природных сред // Материалы 9-й Международной научно-

технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии», ВлГУ, 2010 г.

52. Шулятьев А. А. Математическое моделирование радиотеплового излучения природных сред // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции аспирантов и молодых учёных, КГТА, 2010 г.

53. Шулятьев А. А. Моделирование естественного радиотеплового излучения слоистых природных сред // Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике [Электронный ресурс]: Всероссийские радиофизические научные чтения-конференции памяти Н.А. Арманда. Сб. тез. докладов II научно-практического семинара (Муром, 28 июня – 1 июля 2010 г.). – Муром: Изд. полиграфический центр МИ ВлГУ, 2010

54. Шулятьев А. А. Математическая модель радиотеплового излучения лесного массива // Материалы конференции «Дни науки студентов и аспирантов», Владимирский государственный университет, 2012 г.

55. Шулятьев А. А. Математическое моделирование радиотеплового излучения системы почва-растительность // Материалы XXXI Всероссийской НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем», ч. 3., г. Серпухов, 2012. – 6 с.

56. Шулятьев А. А. Обнаружение объектов, скрытых в лесном массиве, с помощью методов дистанционного зондирования в миллиметровом диапазоне // Материалы III Всероссийской НТК «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники», 2012

57. Шулятьев А. А. Математическое моделирование радиотеплового излучения системы почва-растительность // Материалы X Международной НТК «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии», 2012. – 4 с.

58. Шулятьев А. А. Разработка и экспериментальная проверка фацетной модели рассеяния радиоизлучения на листовном лесном покрове // Материалы V Всероссийской межвузовской конференции «Наука и образование в сфере промышленной, социальной и экономической сфер

регионов России», Муром, 2014

59. *Шулятьев А. А.* Компьютерное моделирование рассеяния миллиметровых волн на лесном покрове // *Материалы XX Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных*, Ижевск, 2014

Статьи в прочих научных изданиях:

60. *Шулятьев А. А.* Моделирование радиотеплового электромагнитного поля в слоистых средах / Шулятьев А.А., Никитин О.Р., Никитин А.В. // *Вестник РГРТУ №2 (выпуск 32)*, Рязань, 2010 г.

61. *Шулятьев А. А.* Мониторинг лесных массивов методом многоспектрального дистанционного зондирования / Шулятьев А.А., Никитин О.Р., Кисляков А.Н. // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы №1/2011 / Изд. МИ ВлГУ*, 2011 г.

62. *Шулятьев А. А.* Метод микроволнового многоспектрального дистанционного зондирования в задаче мониторинга лесных массивов / Никитин О.Р., Кисляков А.Н., Шулятьев А.А. // *Труды Владимирского государственного университета, выпуск 7 / Изд. Владимирского государственного университета*, 2010 г.

63. *Шулятьев А. А.* Применение комплексных систем многоспектрального дистанционного зондирования в задачах экологического мониторинга / Никитин О.Р., Кисляков А.Н., Шулятьев А.А. // *Методы и устройства передачи и обработки информации*, 2011, вып. 13 / Изд. МИ ВлГУ

64. *Шулятьев А. А.* Комплексирование данных многоканального мониторинга земной поверхности / Никитин О.Р., Кисляков А.Н., Шулятьев А.А. // *Методы и устройства передачи и обработки информации*, 2011, вып. 13 / Изд. МИ ВлГУ

65. *Шулятьев А. А.* Алгоритм радиометрического комплексирования данных многоканального мониторинга земной поверхности / Никитин О.Р., Кисляков А.Н., Шулятьев А.А. // *Межвузовский научно-технический журнал «Радиотехнические и телекоммуникационные системы» – изд. МИ ВлГУ*, 2011

66. Шулятьев А. А. Радиометрическое комплексирование многоспектральных изображений земной поверхности / Никитин О.Р., Кисляков А.Н., Шулятьев А.А. // Межвузовский научно-технический журнал «Радиотехнические и телекоммуникационные системы» – изд. МИ ВлГУ №1(2) 2012. С. 54-58.

67. Шулятьев А. А. Морфологическое комплексирование многоспектральных изображений земной поверхности / Никитин О.Р., Кисляков А.Н., Шулятьев А.А. // Межвузовский научно-технический журнал «Радиотехнические и телекоммуникационные системы» – изд. МИ ВлГУ №1(2) 2012. С. 36-39.

68. Шулятьев А. А. Алгоритм радиометрического комплексирования данных многоканального мониторинга земной поверхности / Никитин О.Р., Кисляков А.Н., Шулятьев А.А. // IV Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. IV Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 3 февр. 2012 г. – [Электронный ресурс] .– Муром: Изд. полиграфический центр МИ ВлГУ, 2012.

Патенты на полезные модели:

69. Шулятьев А. А. Устройство для дистанционной идентификации типов растительности / Никитин О. Р., Кисляков А. Н., Шулятьев А. А. // Патент на полезную модель №108837 от 11.05.2011 (соискатель – 33%)

70. Шулятьев А. А. Устройство радиометрического комплексирования цифровых многоспектральных изображений земной поверхности / Никитин О. Р., Кисляков А. Н., Шулятьев А. А. // Патент на полезную модель №115884 от 22.11.2011 (соискатель – 33%)

Патенты на изобретения:

71. Шулятьев А. А. Способ комплексирования цифровых многоспектральных изображений земной поверхности. / Никитин О. Р., Кисляков А. Н., Шулятьев А. А. // Патент на изобретение №2520424 от 11.07.2012 (соискатель – 33%)



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Шулятьева А. А. на тему «Моделирование активных методов радиомониторинга лесных покровов».

Настоящий акт составлен о том, что материалы диссертационной работы Шулятьева А. А., представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, внедрены в учебный процесс на кафедре радиотехники и радиосистем ВлГУ и используются в лабораторном практикуме по дисциплине «Радиофизические методы диагностики природных сред». Поставлено три исследовательские лабораторные работы:

1. Моделирование процесса рассеяния электромагнитного излучения на лесном покрове.
2. Определение зависимости радиояркостной температуры растительного покрова от его вегетативного состояния.
3. Классификация типов лесного покрова по данным дистанционного зондирования.

Заведующий кафедрой
радиотехники и радиосистем
д.т.н., профессор

О.Р. Никитин

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «Конструкторское опытное
бюро радиоаппаратуры»

Р. В. Коноплев

«20» сентября 2015 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов кандидатской диссертационной работы

Шулятьева Аркадия Андреевича

на тему «Моделирование активных методов

радиомониторинга лесных покровов»

Настоящий акт подтверждает, что АО «Конструкторское опытное бюро радиоаппаратуры» (АО «КОБРА») использует разработанные в диссертационной работе Шулятьева А.А. методы и алгоритмы компьютерного моделирования распространения радиоволн при создании новой радиоэлектронной аппаратуры. Разработки Шулятьева А.А. позволяют эффективно оценивать характеристики прохождения радиосигнала через лесной покров и иные качественные показатели разрабатываемых радиопередающих устройств.

Ведущий специалист

АО «Конструкторское опытное

бюро радиоаппаратуры»,

кандидат технических наук

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'С. И. Кучин', is written over the text of the specialist's name.

С. И. Кучин