

На правах рукописи



Шулятьев Аркадий Андреевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ МЕТОДОВ  
РАДИОМОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОКРОВОВ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе  
системы и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Владимир 2015 г.

Работа выполнена на кафедре радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Научный руководитель: **Никитин Олег Рафаилович**  
доктор технических наук, заслуженный  
деятель науки РФ, профессор, заведующий  
кафедрой радиотехники и радиосистем ВлГУ

Официальные оппоненты: **Орлов Игорь Яковлевич**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
радиотехники Нижегородского  
государственного университета им. Н.И. Ло-  
бачевского, Национальный исследователь-  
ский университет

**Прохоров Иван Сергеевич**  
кандидат технических наук,  
начальник сектора ОАО «Владимирское КБ  
радиосвязи»

Ведущая организация: Ковровская государственная  
технологическая академия  
им. В. А. Дегтярёва

Защита диссертации состоится «23» декабря 2015 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета Д212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корп. 3, ФРЭМТ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://diss.vlsu.ru/>.

Автореферат разослан «15» октября 2015 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ, г. Владимир, 600000, учёному секретарю.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



А. Г. Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** 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 интенсивно развивающиеся методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Сфера применения результатов ДЗЗ очень широка; в частности, одним из основных потребителей услуг ДЗЗ является лесное хозяйство, где остро стоят вопросы кадастрового учёта, контроля незаконных рубок леса, предупреждения лесных пожаров и заражения лесов вредителями, оценки качества древесины.

Основным источником данных ДЗЗ, используемых в целях решения указанных задач, являются спутниковые снимки земной поверхности в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, а также радиолокационные снимки в диапазонах сантиметровых и дециметровых волн. Перспективными с точки зрения получения дополнительной информации о зондируемой поверхности являются диапазоны миллиметровых и субмиллиметровых волн. К достоинствам исследований в этих диапазонах относится возможность проведения мониторинга в сложных метеорологических условиях, возможность извлечения информации о ряде свойств подстилающей поверхности, не обнаруживаемых в других диапазонах. Ввиду сильного поглощения излучения атмосферой в диапазонах сантиметровых (СМВ) и миллиметровых волн (ММВ) измерения с достаточной для практических целей разрешающей способностью могут вестись только с низколетящих аппаратов. В течение долгого времени этот факт препятствовал проведению исследований ввиду их низкой экономической оправданности.

В настоящее время благодаря удешевлению и развитию малой авиации и бортовых радиолокационных систем интерес к измерениям в указанных диапазонах вновь возрастает. В свете этого создание математических моделей, позволяющих адекватно интерпретировать результаты измерения параметров электромагнитного излучения лесной растительности применительно к задаче оценки её биометрических параметров, является весьма актуальной на сегодняшний день научно-технической задачей.

**Состояние проблемы.** Значительный вклад в развитие теории радиотехнических систем дистанционного зондирования внесли отечественные учёные Н. А. Арманд, А. М. Шутко, Г. А. Андреев, В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко и др. и зарубежные учёные: С. Чандрасекар, Т. Джексон, Е. Уилсон и др. Исследованиями в области дистанционного зондирования лесных покровов занимались А. Е. Башаринов, А. А. Мильшин, А. Г. Гранков, М. Добсон, Ф. Улаби и др. В нашей стране основной объём исследований в данном направлении ведётся Институтом радиоэлектроники и Институтом космических исследований Российской академии наук.

Исследования, выполненные в последние годы, свидетельствуют о значительной перспективности освоения диапазонов сантиметровых и миллиметровых волн для решения задач дистанционного зондирования лесных покровов. Ввиду сопоставимости линейных размеров рассеивателей растительных покровов с длиной волны свойства отражённого от рас-

тельности СВВ- и ММВ-радиоизлучения хорошо коррелируют с её геометрическими и биологическими параметрами.

**Целью работы** является разработка алгоритма классификации типа и состояния лесного покрова по данным активного СВЧ-зондирования в сантиметровом и миллиметровом диапазонах и его реализация в виде программно-аппаратного комплекса.

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

- Анализ существующих методов моделирования рассеяния электромагнитного излучения на физических объектах.
- Разработка компьютерной модели рассеяния электромагнитного излучения на лесном покрове различных видов и её реализация в виде программы для ЭВМ.
- Разработка математического и алгоритмического инструментария для решения задачи распознавания типов лесного покрова на радиолокационном снимке.
- Калибровка и оценка адекватности разработанного инструментария по результатам экспериментальных измерений.
- Разработка структурной схемы программно-аппаратного комплекса распознавания типов лесного покрова.
- 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, геометрической теории дифракции, геометрической оптики, теории электромагнитного поля.

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

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

**Научная новизна** заключается в том, что:

- Разработана фацетная модель рассеяния электромагнитного излучения на лесном покрове.
- Разработана методика выделения фрагмента диаграммы рассеяния электромагнитного излучения из радиолокационного снимка с коррекцией атмосферного поглощения.
- Разработана и апробирована методика оценки состояния лесного покрова путём сопоставления диаграммы рассеяния, полученной в результате активной радиолокации, с банком образцовых диаграмм рассеяния электромагнитного излучения на лесных покровах различных типов.

Результаты работы, имеющие **практическую ценность**:

- Разработана и реализована в виде программы для ЭВМ компьютерная модель рассеяния электромагнитного излучения СВВ- и ММВ-диапазонов на лесном покрове различных типов, позволяющая существенно (в 6–8 раз) сократить объём экспериментальных исследований путём их замены компьютерным моделированием.

- Разработан алгоритм распознавания типов лесного покрова по данным СВЧ-зондирования в СМВ- и ММВ-диапазонах, позволяющая повысить достоверность распознавания различных типов лесного покрова на 9% по сравнению с использованием данных инфракрасного зондирования.
- 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 на радиолокационных снимках СМВ- и ММВ-диапазонов по результатам активной радиолокации.
3. Структура программно-аппаратного радиотехнического комплекса распознавания типов лесного покрова.

**Результаты работы внедрены** в учебный процесс кафедры радиотехники и радиосистем Владимирского государственного университета по направлению «Радиотехника», а также на предприятии ЗАО «Конструкторское опытное бюро радиоэлектронной аппаратуры» (г. Владимир).

**Личный вклад автора** заключается в разработке 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:

- Пятой научно-технической конференции аспирантов и молодых учёных «Вооружение. Технология. Безопасность. Управление» (Ковров, 2010 г.)
- Девятой и десятой международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (Владимир-Суздаль, 2011 и 2013 гг.)
- Десятой международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (Владимир-Суздаль, 2012 г.)
- Третьей Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники» (Владимир, 2012 г.)
- Всероссийской молодёжной научной конференции «Научный потенциал молодёжи – будущее России»: Четвёртые Всероссийские научные Зворыкинские чтения (Муром, 2012 г.)
- Двадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков (г. Ижевск, 2014 г.)

**Публикации по теме работы.** По тематике исследования опубликовано 25 научных статей, из них 8 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получено два патента на полезную модель и один – на изобретение.

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность рассматриваемой темы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** подробно рассмотрены существующие подходы к моделированию процессов излучения и отражения электромагнитного излучения различными объектами, проведён сравнительный анализ данных подходов как по отдельности, так и в комплексе для целей разработки модели рассеяния электромагнитного излучения сантиметрового (СМВ) и миллиметрового (ММВ) диапазонов на лесном массиве.

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 пассивных спутниковых наблюдений в видимом и ближнем ИК диапазонах.

До недавнего времени изучение леса в ММВ- и СМВ-диапазонах было затруднено, в частности, по причине высокой стоимости. В последние 10–15 лет развитие и удешевление малой авиации и средств бортовой радиолокации привело к появлению на рынке дешёвых средств мониторинга с воздуха, что поспособствовало усилению исследований в данном направлении. В последние годы благодаря развитию средств вычислительной техники модельные методы дешифрирования результатов ДЗЗ вышли на новый виток развития. Это привело к появлению комбинированных моделей, в которых задача дешифрирования решается при помощи сложной модели с привлечением базы данных измерений для определения ряда ключевых параметров.

В ходе работы был рассмотрен вопрос об использовании в ММВ- и субмиллиметровом диапазонах существующих моделей рассеяния радиоизлучения на лесном покрове, рассчитанных на работу в МВ- и ДМВ-диапазонах. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало значительное расхождение, подтверждая тем самым высказанные в работах В. К. Волосюка предположения о несостоятельности существующих моделей в ММВ- и СМВ-диапазонах.

Также был рассмотрен вопрос использования существующих пакетов программ электродинамического моделирования (в частности, CST Studio и FEKO). К достоинствам данных пакетов программ следует отнести высокую степень адекватности создаваемых с их помощью моделей. Тем не менее, для целей настоящей работы данные пакеты программ были признаны ограниченно пригодными по причине высокой сложности вычислений, затрудняющей их эксплуатацию. Поэтому было принято решение о создании оригинальной компьютерной модели и использовании существующих программ для её проверки.

За основу для разработки модели рассеяния был выбран метод факетного моделирования. В основе этого метода лежит представление моделируемого объекта в виде множества дискретных рассеивателей (фаце-

тов), на каждом из которых параметры рассеяния ЭМВ могут быть вычислены точно. При этом считается, что электромагнитное излучение распространяется по законам геометрической оптики. Кроме того, для учёта дифракционных явлений используются элементы геометрической теории дифракции.

**Вторая глава** посвящена разработке компьютерной фацетной модели рассеяния электромагнитного излучения на лесном покрове. Глава включает в себя рассмотрение лесного покрова в виде совокупности фацетов, классификацию различных типов лесного покрова с точки зрения геометрии сцены, математическое моделирование процесса рассеяния радиоизлучения на фацетах различной формы, разработку алгоритма компьютерного моделирования процесса рассеяния и реализацию его в виде программы для ЭВМ.

Направление отражённой волны при фацетном моделировании вычисляется в соответствии с законом Снеллиуса. Направление преломлённой волны (т.н. истинный угол преломления) с учётом комплексного характера диэлектрической проницаемости сред может быть вычислено по формуле

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \varphi}{\operatorname{Re} \left[ \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} - \sin^2 \varphi} \right]};$$

В процессе преломления энергия горизонтальной (индекс  $h$ ) и вертикальной (индекс  $v$ ) поляризационных компонент падающей волны распределяется между отражённой и преломлённой волнами следующим образом:

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

где  $K_f$  – коэффициенты Френеля.

Лучи, не пересёкшиеся в ходе трассировки ни с одним фацетом (отражённые «в небо»), отбрасываются; при этом фиксируется их направление и мощность на двух поляризациях, на основании чего и происходит построение двумерных гистограмм рассеяния излучения (т.н. двумерной функции освещённости сцены – ДФОС). При этом азимут и угол места луча квантуются с определённым шагом, т.е. цифровое представление ДФОС фактически является гистограммой.

Для проведения фацетного моделирования рассеяния электромагнитной волны на некотором объекте необходимо располагать описанием геометрической формы этого объекта и диэлектрических свойств тех или иных его составных частей, а также информацией о самой волне (поляризация, направление, длина волны). Лесной покров представляет собой физическую среду сложной геометрии. Тем не менее, отдельные составные части лесного покрова (слой почвы, стволы деревьев, листья и т.д.) могут быть представлены в виде геометрических фигур типовой формы. Размеры этих фигур, расположение их относительно друг друга и ориентация в пространстве также являются типовыми (распределёнными случайно, но с ма-

лым среднеквадратическим отклонением). Это позволяет описывать геометрию лесного массива набором статистических параметров – матожиданий и СКО высоты стволов, диаметра стволов, размера листьев и т.д.

По результатам анализа геометрических особенностей лесного покрова для реализации модели были выбраны следующие типовые формы фацетов:

- 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.
- 2) круговой цилиндр. Выраженную цилиндрическую форму имеют пни, а также спиленные стволы и ветви деревьев; листья также можно представить в виде цилиндров, диаметр которых много больше высоты.
- 3) круговой конус. Форму, близкую к конической, имеют стволы и ветви деревьев.

Как было сказано выше, многие параметры лесного покрова могут быть описаны статистически. Поэтому, помимо модуля трассировки лучей, в программе необходим генератор сцены, осуществляющий формирование набора фацетов, имитирующих моделируемый лесной покров, по исходному статистическому описанию. Структурная схема программного комплекса представлена на рис. 1.

В соответствии с данной структурной схемой автором была разработана программа для ЭВМ. В качестве ускоряющей структуры в процессе трассировки лучей используется  $kD$ -дерево, построение которого выполняется с использованием эвристики площадей поверхности (SAH). Разработан формат статистического описания сцены на основе подмножества языка XML.

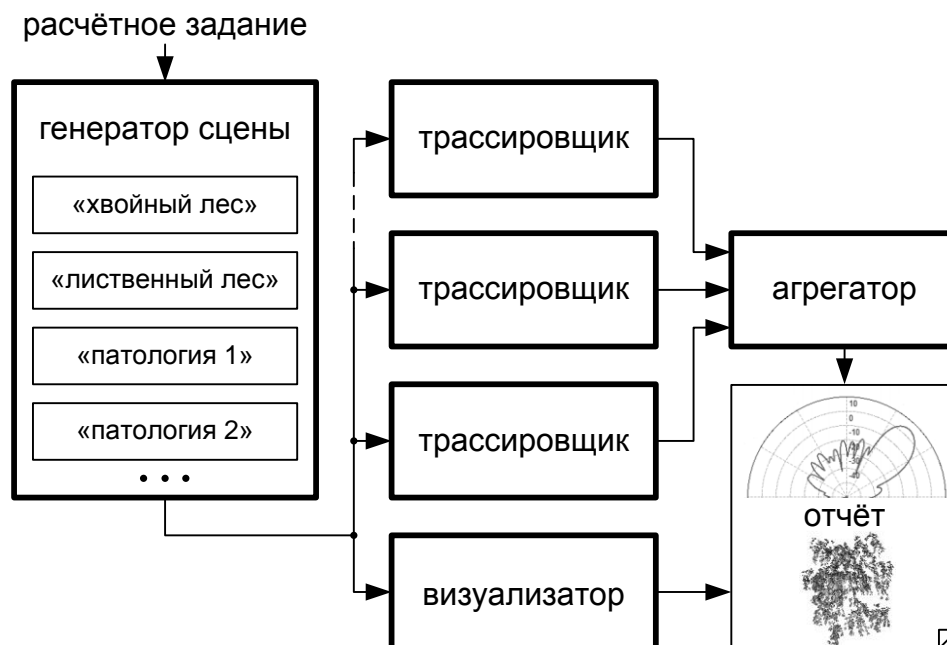


Рисунок 1. Структурная схема программного комплекса, реализующего фацетную модель рассеяния электромагнитного излучения на лесном покрове



Модули генерации сцены, трассировки лучей и формирования отчётов выполнены в виде отдельных приложений, что позволяет запускать несколько экземпляров трассировщика на нескольких компьютерах и затем агрегировать результаты их работы, а также даёт возможность создания различных версий генератора сцены для различных состояний растительного покрова. Дополнительно в целях отладки и визуального контроля качества генерации был разработан модуль визуализации, задействующий бóльшую часть компонентов фацетной модели в процессе формирования ложноцветного фотореалистичного изображения сцены.

В качестве примера на рис. 2 приведено изображение сцены листового лесного массива, сгенерированной и визуализированной при помощи разработанного автором программного комплекса.

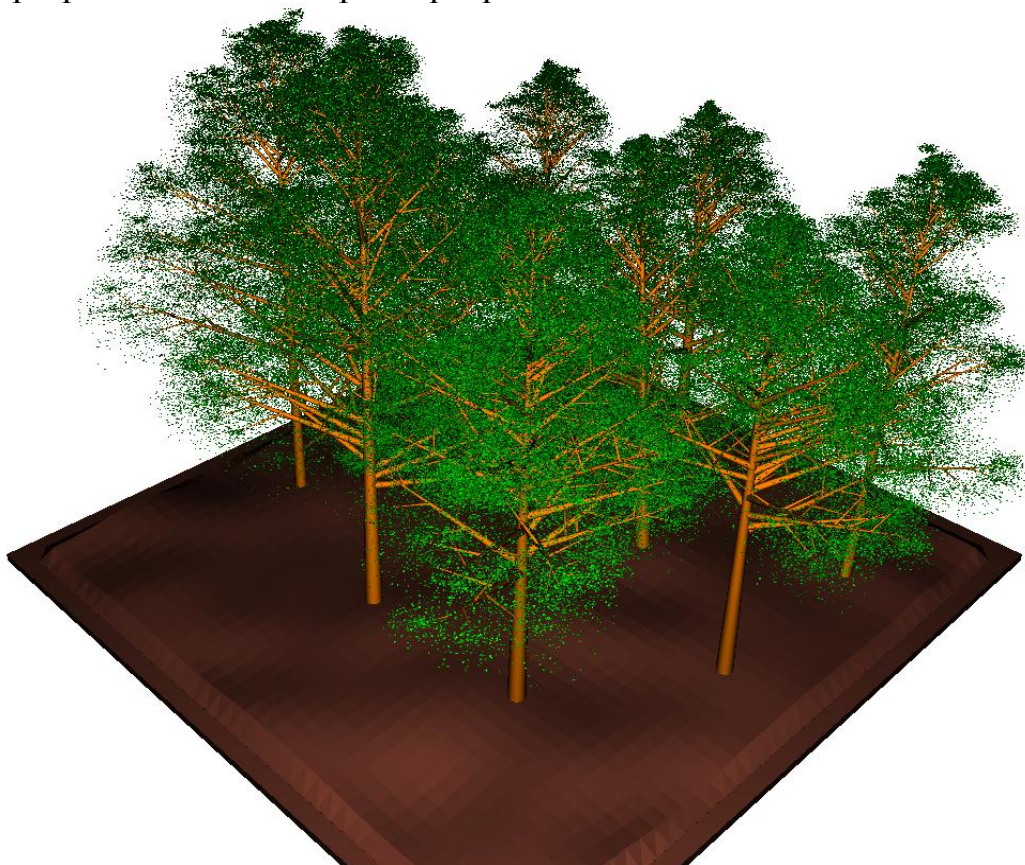


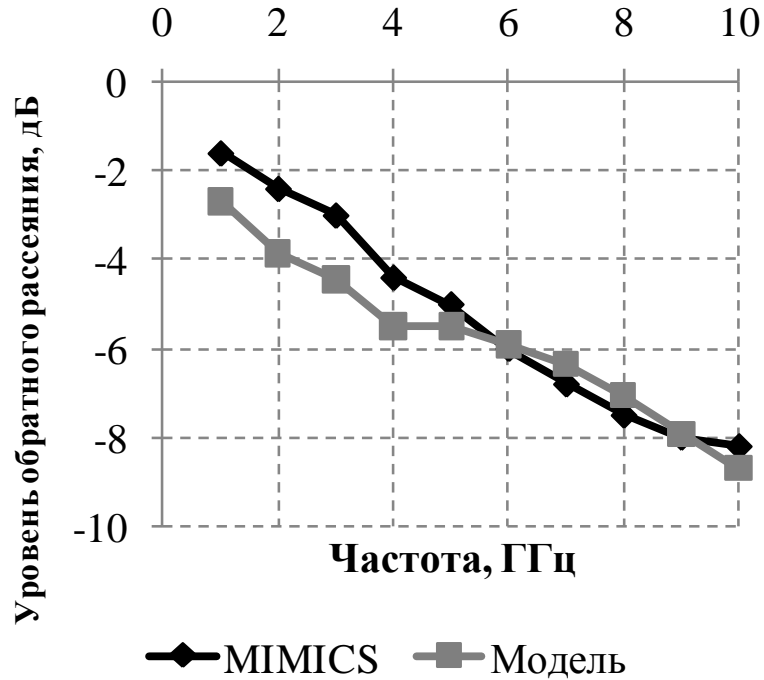
Рисунок 2. Визуализация участка листового лесного массива

Заключительным этапом работы над программой стала проверка адекватности результатов её работы. Вначале было осуществлено моделирование рассеяния излучения на некоторых простых геометрических объектах и сопоставление результатов моделирования с аналогичными результатами, полученными при помощи программы FEKO. В результате был сделан вывод о высокой достоверности работы созданной модели. Затем была осуществлена генерация ряда сцен, подробно рассмотренных в литературе, и моделирование рассеяния электромагнитного излучения. Результаты моделирования были сопоставлены с опубликованными экспериментальными данными.

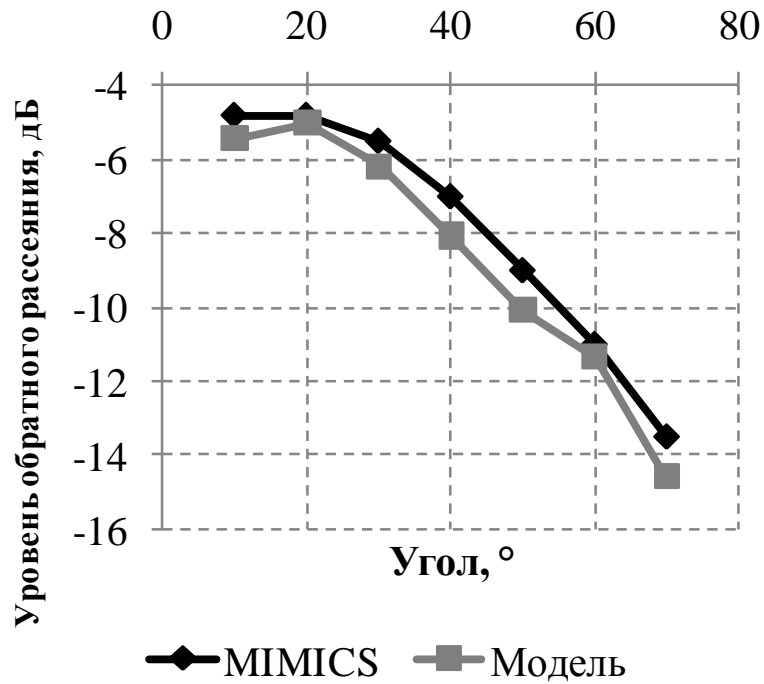
В качестве примера приведём результаты моделирования рассеяния ЭМВ на листовом лесном массиве для различных вариантов поляризации излучения в нижней части рабочего диапазона разработанной модели. Параметры моделируемой сцены сведены в табл. 1.

Табл. 1. Исходные данные для моделирования случая рис. 3

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



а)



б)

Рисунок 3. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

Результаты моделирования и экспериментальные данные представлены на рис. 3. Для графика *б* рабочая частота равна 8 ГГц. Поляризация – НН. Линия «MIMICS» обозначает экспериментальную кривую, «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.

**Третья глава** работы посвящена выработке алгоритма решения обратной задачи ДЗЗ. Для этого прежде всего было необходимо составить модель радиолокационного отклика зондируемой поверхности при радиолокации с пассивным ответом. Решение обратной задачи ДЗЗ в данном случае состоит в том, чтобы по результатам нескольких измерений уровня мощности пассивного отклика восстановить соответствующие им точки диаграммы рассеяния лесного покрова, после чего, опираясь на смоделированный банк диаграмм рассеяния лесных покровов различных типов, определить тип лесного покрова, которому могут соответствовать данные измерения, при помощи инструментария распознавания образов.

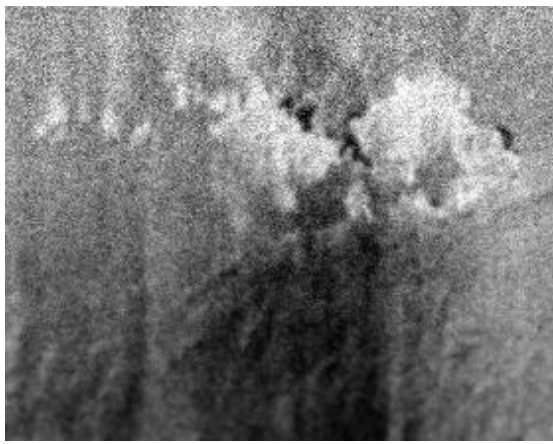
Мощность монохроматического сигнала, отражённого от земного покрова и принятого антенной, с учётом ослабления по дальности и атмосферного поглощения может быть выражена формулой

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

В процессе решения задачи создания методики распознавания типа лесного покрова, наблюдаемого на снимке, необходимо принять во внимание несколько факторов. Во-первых, радиолокационный снимок неизбежно оказывается поражён помехами даже после компенсации атмосферного поглощения, что выдвигает к алгоритму распознавания требование устойчивости к данному виду помех. Во-вторых, на снимке могут присутствовать различные объекты, что требует сегментации изображения и осуществления раздельной обработки каждого сегмента.

Задача дешифрирования объектов на снимке достаточно хорошо исследована. Существует большое количество высокоэффективных программных решений, предназначенных для распознавания границ объектов на снимках. Благодаря этому задачу оконтуривания объектов на снимках можно исключить из рассмотрения, делегировав её существующим решениям, и сконцентрироваться на другом аспекте обратной задачи ДЗЗ – идентификации объектов с установленными границами, т.е. определения их принадлежности к тому или иному классу.

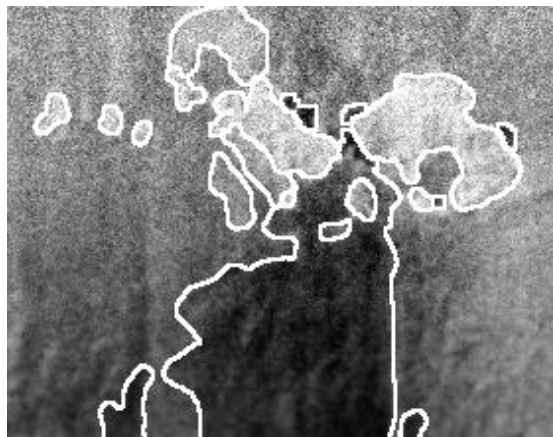
Каждый пиксель радиолокационного снимка после коррекции, рассмотренной выше, соответствует участку земной поверхности, зондируемому под определённым углом. Как было сказано выше, отклик лесного покрова можно считать не зависящим от азимута. Таким образом, яркость каждого пикселя радиолокационного изображения после коррекции зависит от угла места данного пикселя, длины волны, поляризации. Усредняя яркость пикселей по азимуту и квантуя её по углу места подобно тому, как квантуется угол места в ходе моделирования диаграммы рассеяния, получим образ объекта на снимке в виде многомерного вектора, зависящего от наборов дискретных значений угла места, длины волны и поляризации.



а)



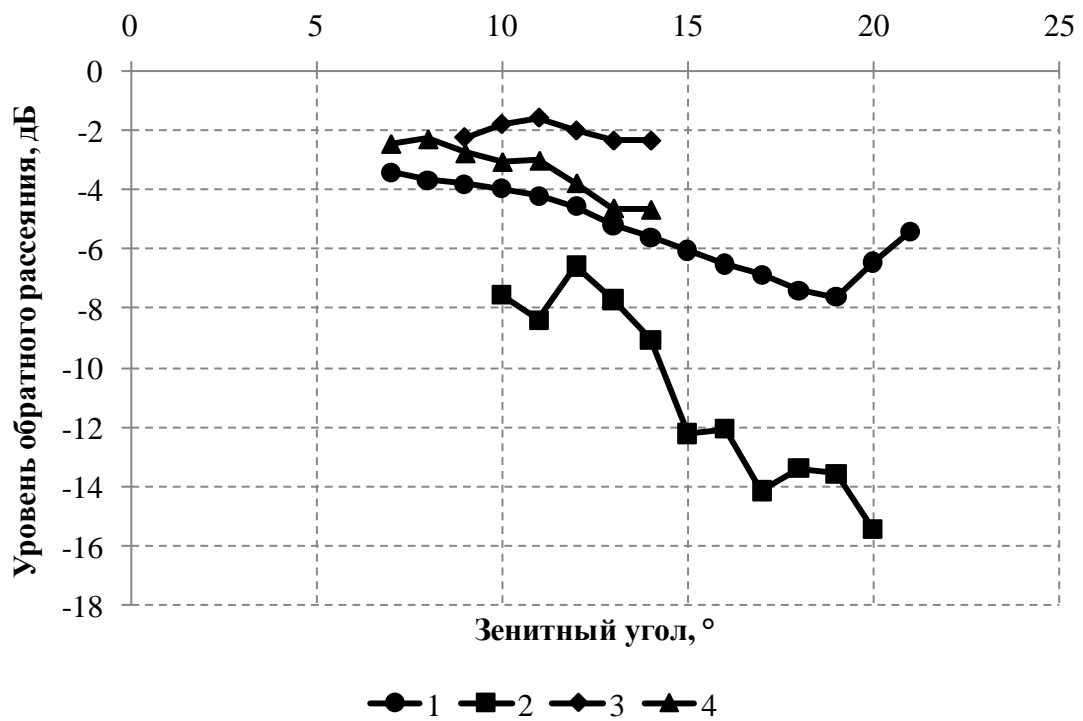
б)



в)



г)



д)

Рисунок 4. Процесс выделения фрагментов диаграммы обратного рассеяния по оконтуренному радиолокационному снимку

Процесс сегментирования снимка, усреднения яркости по сегменту, азимуту и квантования по углу места иллюстрируется рис. 4. Исходный снимок (а) подвергается полуавтоматическому оконтуриванию (б), выделяющему на нём несколько сегментов (отмечены номерами и различной штриховкой). Для наглядности приведены границы сегментов, наложенные на исходный снимок (в). Далее в пределах каждого сегмента пиксели изображения, соответствующие одному и тому же углу места, осредняются (г). Получается несколько (по числу сегментов) фрагментов диаграммы обратного рассеяния (д).

Идентификацию типа растительности можно выполнить, сравнивая вектор измерений с соответствующей выборкой из банка диаграмм рассеяния. В качестве метрики для различения классов было выбрано нормированное Евклидово расстояние. Выбор данного метода обусловлен следующими соображениями. Во-первых, вышеуказанные преобразования радиолокационного снимка приводят к нормировке наблюдаемого на нём уровня рассеяния от поверхности, что позволяет непосредственно сравнивать значения пикселей с соответствующими значениями диаграммы рассеяния. Во-вторых, вычисление ковариаций между выборками различных классов показало, что применение расстояния Махаланобиса вместо его вырожденного случая – нормализованного Евклидова расстояния – не обеспечивает бóльшей точности распознавания ввиду близости свойств некоторых классов в пространстве признаков.

С целью испытания выработанного способа распознавания при помощи факетной модели, описанной выше, был осуществлён синтез диаграмм рассеяния для шести типов подстилающей поверхности (гарь; вырубка; лиственный сухостой; здоровый лиственный лес; здоровый хвойный лес; лиственный лес, поражённый короедом) в шести диапазонах длин волн (5, 8, 14, 20, 50, 80 мм) для четырёх вариантов поляризации (HH, HV, VH, VV). Примеры результатов моделирования приведены на рис. 5–6. По горизонтали на графиках отмечен угол от надира, по вертикали – интенсивность излучения в дБ/ср.

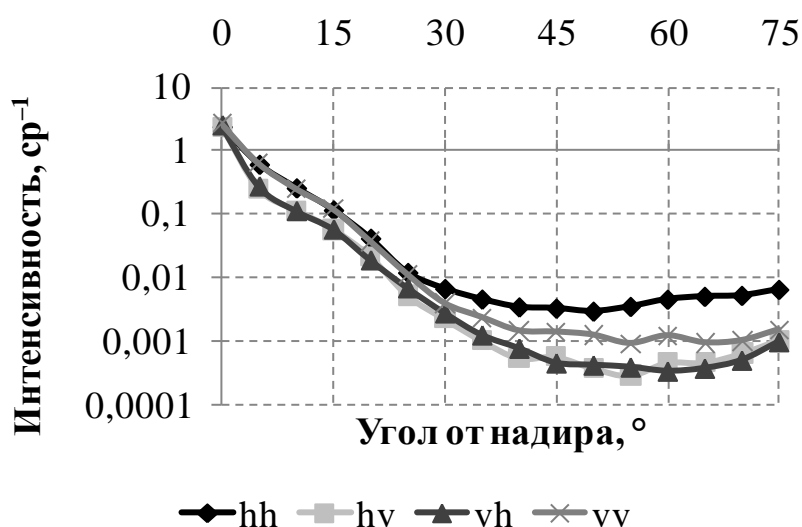


Рисунок 5. Диаграмма обратного рассеяния здорового лиственного леса на длине волны 5 мм при различных поляризациях

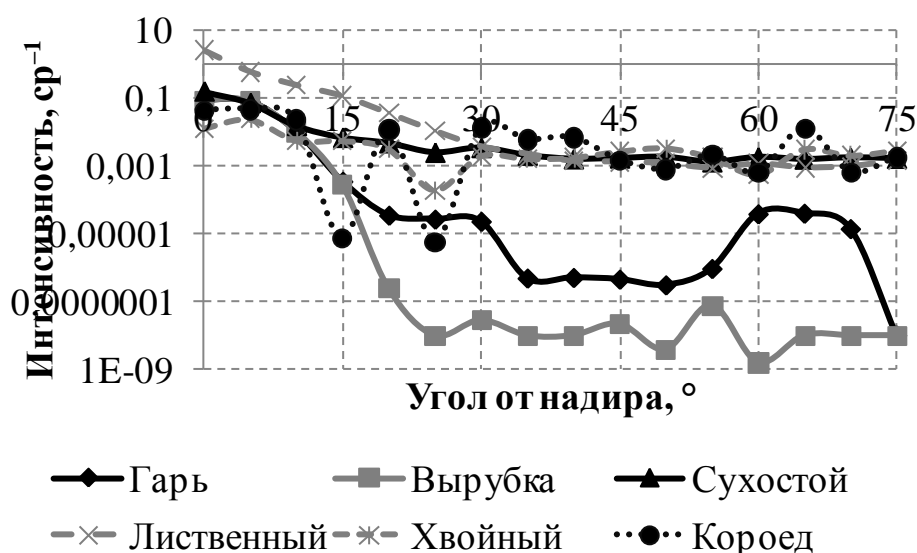


Рисунок 6. Диаграмма обратного рассеяния различных видов подстилающей поверхности на длине волны 5 мм при поляризации VV

Следующим этапом работы стало изучение вклада того или иного спектрально-поляризационного канала и выявление наиболее информативных каналов с целью уменьшения количества сенсоров, требуемых для проведения распознавания. По итогам исследования сделан вывод о том, что наиболее информативными являются более коротковолновые участки спектра на поляризации НН, а также спектральный канал 5 см на поляризации VH. Высокий уровень информативности миллиметровых каналов может быть объяснён близостью линейных размеров рассеивающих элементов длине волны зондирующего излучения и их преимущественно горизонтальной ориентации, мало изменяющей поляризацию излучения при его отражении. Высокий уровень информативности сантиметрового канала на перекрёстной поляризации объясняется отражением сигнала преимущественно от ветвей, наклонённых к плоскости поляризации излучения. На основании этого в качестве основного измерительного устройства предложено использовать многодиапазонный однополяризационный радиолокатор. Также сформулирован ряд практических рекомендаций по проектированию системы распознавания типов лесного покрова.

Заключительным этапом работы, рассмотрению которого посвящена **четвёртая глава**, стала выработка структурной схемы программно-аппаратного комплекса распознавания типов лесного покрова на базе беспилотного летательного аппарата и испытание процедуры распознавания на реальных радиолокационных снимках. Выполнен обзор существующих серийных беспилотных летательных аппаратов и бортовых радиолокаторов, что позволило уточнить набор рекомендаций по проектированию системы распознавания. На основании этого была разработана структурная схема программно-аппаратного комплекса распознавания типов лесного покрова (рис. 7). Комплекс состоит из воздушной части, представленной БПЛА с комплектом измерительной, навигационной и связной аппаратуры, и наземной части на базе персонального компьютера, где принятые данные подвергаются процедуре программной обработки и распознавания.

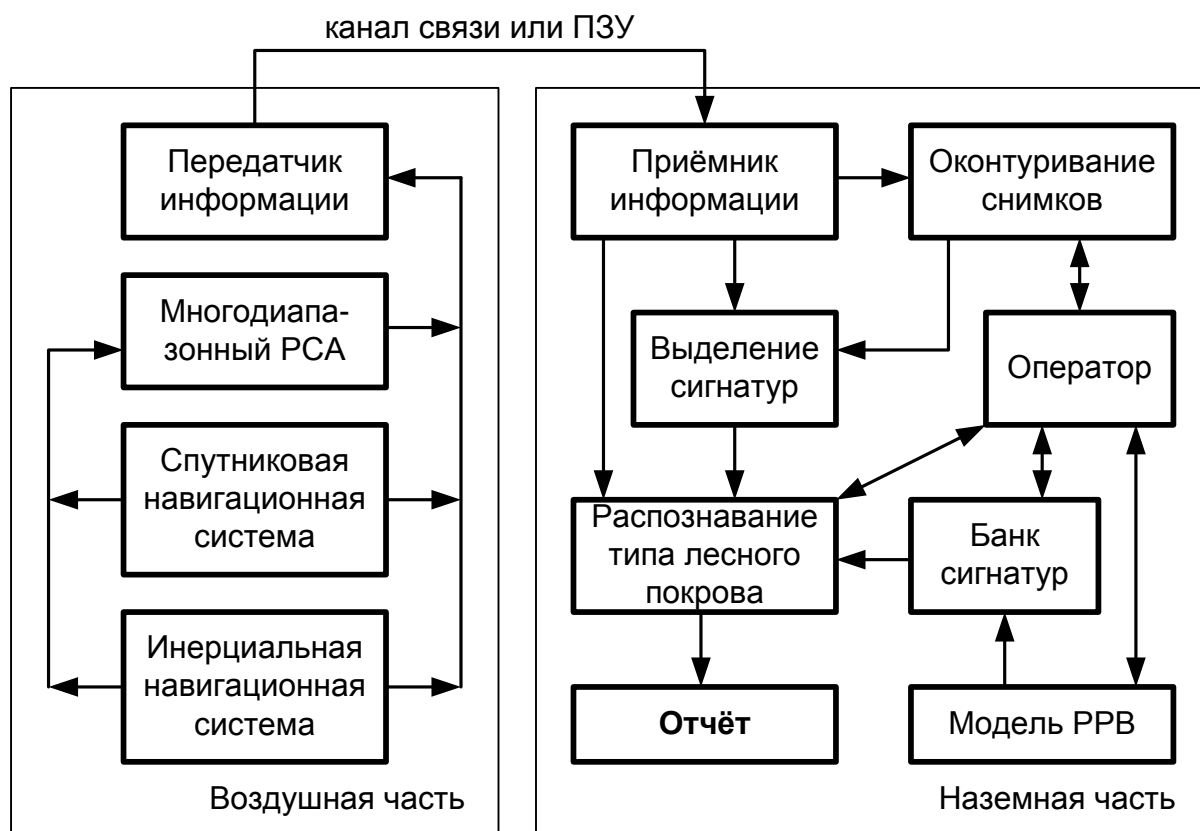


Рисунок 7. Структурная схема программно-аппаратного комплекса распознавания типов лесного покрова

С целью проверки разработанной схемы обработки радиометрических данных в литературе и открытых источниках были найдены описания 18 участков земной поверхности, содержащих различные виды лесных покровов (в общей сложности 47 видов подстилающей поверхности), и их радиолокационные снимки, а также снимки в ИК- и видимом диапазонах. Затем при помощи разработанной компьютерной модели было выполнено моделирование соответствующих диаграмм обратного рассеяния для длин волн 5, 8, 14 и 50 мм. По сравнению с существующими моделями разработанная модель потребовала в 9-11,5 раз меньше машинного времени на расчёт. Затем радиолокационные снимки были подвергнуты описанной выше процедуре оконтуривания и распознавания. Разработанная методика обеспечила на 9% меньше ложных срабатываний, чем описанная в литературе аналогичная методика, основанная на использовании снимков инфракрасного и видимого диапазонов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен подробный анализ существующих методов моделирования рассеяния электромагнитного излучения на физических объектах различной геометрии и физических свойств. Обосновано использование методики фацетного моделирования для расчёта рассеяния электромагнитных волн на лесном покрове.
2. Разработана и реализована в виде программы для ЭВМ компьютерная модель рассеяния электромагнитного излучения на лесном покрове различных видов. Адекватность модели проверена при помощи сравне-

- ния полученных с её помощью результатов с экспериментальными данными.
3. Разработана методика выделения фрагмента диаграммы рассеяния электромагнитного излучения из радиолокационного снимка с коррекцией атмосферного поглощения. Разработан алгоритм оценки состояния лесного покрова путём сопоставления диаграммы рассеяния, полученной в результате активной радиолокации, с банком образцовых эмпирических моделей рассеяния электромагнитного излучения.
  4. Установлено, что с точки зрения различимости типов лесного покрова наибольшую информативность имеют частотные поддиапазоны 5, 8, 14 мм на поляризации HH и 50 мм на поляризации VH.
  5. Разработана структурная схема программно-аппаратного комплекса распознавания типов лесного покрова.
  6. 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 СВВ- и ММВ-диапазонах на 9% выше, чем при использовании видимого и ИК-диапазонов.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах по списку ВАК**

1. 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%)
2. 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%)
3. 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.
4. 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%)
5. 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
6. 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.
7. 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.

8. 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%)

#### **Публикации на российских и международных конференциях**

1. 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.
2. Шулятьев А. А. Математическое моделирование радиотеплового излучения природных сред // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции аспирантов и молодых учёных, КГТА, 2010 г.
3. 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
4. Шулятьев А. А. Математическая модель радиотеплового излучения лесного массива // Материалы конференции «Дни науки студентов и аспирантов», Владимирский государственный университет, 2012 г.
5. 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.
6. 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
7. Шулятьев А. А. Математическое моделирование радиотеплового излучения системы почва-растительность // Материалы X Международной НТК «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии», 2012. – 4 с.
8. 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
9. Шулятьев А. А. Компьютерное моделирование рассеяния миллиметровых волн на листовном покрове // Материалы XX Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных, Ижевск, 2014

### **Статьи в других научных изданиях**

1. 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.
2. 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.
3. 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
4. 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
5. 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**

1. 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%)
2. 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**

1. 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%)

Подписано в печать «9» октября 2015 г.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз.  
Заказ \_\_\_\_\_

Издательство  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87