

На правах рукописи

ЗАХАРОВА Людмила Николаевна



**МЕТОДЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
В ИССЛЕДОВАНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ**

Специальность 01.04.03 — «Радиофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Фрязино – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
(Фрязинский филиал)

Научный руководитель: кандидат технических наук
Захаров Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Неронский Леон Богуславович

кандидат технических наук
Павельев Александр Геннадьевич

Ведущая организация: Учреждение РАН Институт
космических исследований РАН

Защита диссертации состоится «14» октября 2011 года, в 10-00
на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 при Учреждении
Российской академии наук Институте радиотехники и электроники
им. В.А.Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая,
д.11, к.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им.
В.А. Котельникова РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 года.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



А.А.Потапов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Радиолокационная интерферометрия — активно развивающаяся в последние два десятилетия отрасль дистанционного зондирования Земли. В её возможности входит топографическое картирование местности, оценка динамики нестабильной поверхности за определённый период, оценка временной декорреляции поверхности, выявление доминирующих механизмов рассеяния, классификация земных покровов. В работе охарактеризовано современное положение исследований в этой области, систематизированы существующие достижения, а также предложены некоторые новые методы исследования земных покровов, касающиеся радиолокационной интерферометрии и поляриметрии.

Актуальность исследований

Исследования Земли с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой, расположенного на борту самолета или спутника — это современный высокопроизводительный метод дистанционного зондирования, позволяющий получать двумерные распределения интенсивности отраженного сигнала, а также изучать отражательные свойства и структуры рельефа поверхности. Преимуществами радиолокаторов перед оптическими сенсорами является возможность съёмки независимо от солнечного освещения и от наличия/отсутствия облачности. Прием отраженного сигнала на две антенны на борту носителя (или же, в схеме с одной антенной, съёмка выбранного участка поверхности с близких траекторий носителя) и дальнейшая совместная обработка позволяют при помощи анализа фазовой составляющей эхосигнала добавить третье измерение к двумерным радиолокационным изображениям, выявляя, в зависимости от поставленной задачи и начальных условий, относительные высоты рельефа, степень декорреляции или изменение положения отражающей поверхности.

Преимущества интерферометрии перед привычными методами анализа только амплитудной информации заключаются в дополнительных возможностях, позволяющих проводить:

- извлечение информации о рельефе поверхности Земли;
- детектирование площадных подвижек поверхности;
- обнаружение изменений поверхности за время между съёмками;

- оценку скорости движущихся целей.

Возможность получать высокодетальные карты рельефа для любой территории дистанционным методом является значимой альтернативой геодезической съёмке, что особенно актуально для труднодоступных местностей. Спутниковый мониторинг активных динамических процессов (оползней, карстовых явлений, опусканий почвы в районах нефтегазодобычи и прочих подземных работ, выпучиваний в результате мерзлотных процессов, и т.д.), особенно вблизи населённых пунктов и объектов инфраструктуры, имеет важное хозяйственное значение. Исследование растительных сред с помощью методов поляриметрической интерферометрии важно для оценки биомассы лесных массивов, их участия в газообменных процессах и влияния на климат.

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является исследование возможностей радиолокационной интерферометрии в изучении характеристик земных покровов при дистанционном зондировании Земли из космоса, демонстрация существующих методик обработки, а также их развитие: предложение модификации одного из методов двумерной развёртки фазы на интерферограмме, представление нового метода классификации естественных покровов на основе данных поляриметрической интерферометрии, введение и обоснование нового способа регистрации полной матрицы рассеяния при интерферометрической схеме съёмки. Для достижения поставленной цели выполнены следующие этапы:

1. Проведён анализ геометрических характеристик интерферометрической съёмки, рассмотрены различные варианты организации интерферометрической съёмки, в том числе, конфигурации космических аппаратов.
2. Проанализированы этапы интерферометрической обработки для получения карт рельефа, обнаружения смещений поверхности и анализа декорреляции изображений.
3. Показаны измеряемые величины и приведены точности их оценки.
4. Проведён сравнительный анализ методов развёртки фазы на интерферограмме, предложена модификация метода вычетов для двумерной развёртки фазы и продемонстрированы результаты его работы в сравнении с двумя другими методами.

5. Изложены основы поляриметрической интерферометрии и проанализированы существующие на текущий момент её приложения.
6. Введён в рассмотрение новый метод классификации естественных покровов по поляриметрико-интерферометрическим данным на основе анализа поляриметрических сигнатур когерентности.
7. Предложен метод квази-поляриметрической съёмки с повторяющихся орбит, проведено моделирование искажений получаемой таким образом матрицы рассеяния, обработаны экспериментальные данные двух частотных диапазонов, показана работоспособность метода, проведён сравнительный анализ источников декорреляции.

Научная новизна

- Проведено оригинальное сравнительное исследование различных методов двумерной развёртки фазы на радиолокационных интерферограммах.
- Предложена модификация одного из методов развёртки фазы, адаптирующая его для условий пересечённого рельефа на снимаемой местности.
- Предложен метод построения поляриметрических сигнатур когерентности и способ классификации на его основе. Проведён сравнительный анализ возможностей такой классификаций для данных L- и C-диапазона, а также для различных интервалов между съёмками.
- Предложен метод получения полной матрицы за два прохода носителя в схеме интерферометрической съёмки; промоделированы возможные искажения и предложен способ их коррекции.

Достоверность

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием методов и подходов, апробированных в научной литературе и зарекомендовавших себя как надёжные, для новых предлагаемых методов — сравнением с результатами работы других методов, а также с наземными данными.

Практическая значимость

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- предложенная модификация метода вычетов использует более эффективную обработку данных на этапе развёртки фазы благодаря площадному маскированию областей низкой интерферометрической когерентности;
- введённые поляриметрические сигнатуры интерферометрической когерентности являются новым признаком, позволяющим выполнять классификацию земных покровов на основе совместного анализа поляриметрической и интерферометрической информации;
- предложенный метод формирования полной матрицы рассеяния по частичным поляризационным измерениям расширяет возможности поляриметрических систем наблюдения поверхности Земли.

Положения, выносимые на защиту

1. Система критериев, обеспечивающая эффективное использование и сравнение методов устранения 2π -неоднозначности на интерферограммах.
2. Модифицированный метод вычетов, устраняющий 2π -неоднозначность на интерферограмме при условии пересечённого рельефа на снимаемой местности.
3. Поляриметрические сигнатуры интерферометрической когерентности как новый классификационный признак типов земных покровов.
4. Метод формирования полной матрицы рассеяния зондируемых сред по частичным поляризационным измерениям, выполняемым в двух-проходной интерферометрической схеме съёмки.

Апробация работы

Результаты работы, изложенные в диссертации, обсуждались и докладывались на научных семинарах Фрязинского филиала ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, конкурсах молодых учёных им. И.В. Анисимкина в ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, а также на 13 отечественных и 11 международных научных конференциях и симпозиумах в 2003–2010 гг.

Публикации

Основные результаты были опубликованы в 35 работах: из них 8 статей, в том числе 7 статей в журналах из рекомендованного перечня ВАК, 27 докладов на отечественных и международных конференциях.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 213 страницах, содержит 51 рисунок, 6 таблиц и библиографический список из 182 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** содержится общая информация о работе, а также приводится обзор литературы, иллюстрирующий историческую перспективу и современное состояние исследований в области радиолокационной интерферометрии.

В **главе 1** собраны сведения об организации интерферометрической съёмки поверхности Земли из космоса, приведены соотношения, показывающие связь орбитальных параметров и измеряемых величин, проанализированы различные конфигурации космических аппаратов для реализации интерферометрической съёмки.

Глава 2 посвящена описанию этапов и последовательности интерферометрической обработки, в ней отмечена взаимосвязь этапов и упомянуты трудности, возникающие при их реализации на практике, а также приведены теоретические оценки точностей измеряемых величин и результаты таких измерений, достигнутые в ходе экспериментов, по материалам публикаций в научной печати.

В **главе 3** подробно рассмотрен один из наиболее сложных при реализации этапов интерферометрической обработки — устранение фазовой 2π -неоднозначности на двумерном изображении («развёртка фазы»).

Приведена классификация существующих методов развёртки в рамках традиционного разделения на два класса: локальные и глобальные методы. Для каждого из классов предложена оригинальная система критериев оценки характеристик методов и их применимости к задаче развёртки фазы при определённых условиях на исходные данные. Для локальных методов это следующие характеристики:

- Самая вычислительно ёмкая операция помимо интегрирования
- Независимость от фрагментации
- Тип маски
- Необходимость предварительная фильтрация
- Индивидуальные особенности

- Положительные стороны
- Отрицательные стороны
- Возможные модификации

Для сравнения были выбраны следующие локальные методы:

1. Метод вычетов
2. Поточковый метод разворота фазы
3. Частотный метод анализа фазовой неоднозначности интерферограммы
4. Метод восстановленных значений
5. Метод, основанный на локальной фильтрации интерферограммы
6. Метод определения граничных линий

Для одного из локальных методов, участвующих в сравнении (метода вычетов), была предложена модификация. Суть исходного метода состоит в следующем: на изображении разности фаз (интерферограмме), вообще говоря, присутствуют «особые» точки, названные, по аналогии с особыми точками в теории функций комплексного переменного, «вычетами». Замкнутый путь интегрирования, окружающий такую точку, приводит к ненулевому результату, что нарушает условие однозначности интегрирования по путям, проходящим через неё. В зависимости от знака результата интегрирования по минимальному замкнутому пути вокруг точки она называется «положительным» или «отрицательным» вычетом. В исходном методе ближайшие друг к другу отрицательный и положительный вычеты предлагается соединять «разрезом»: линией, которую не должны пересекать пути интегрирования. После построения всех разрезов интерферограмма становится однозначно интегрируемой. Модификация, предложенная автором диссертации, заключается в дополнительном использовании информации о степени декорреляции (интерферометрической когерентности), что позволяет более рационально использовать строить маску точек, запрещённых для путей интегрирования. Помимо вычисления вычетов, предлагается строить маску бракованных точек на основе анализа значений амплитуды комплексной интерферограммы, показывающей меру декорреляции отражённого сигнала (интерферометрическую когерентность). Затем подсчитывается алгебраическая сумма значений вычетов в связных компонентах этой маски («заряд» компоненты), и, при необходимости, компоненты с зарядами противоположных знаков соединяются друг с другом линиями разрезов, с тем чтобы итоговый баланс зарядов стал нулевым. Таким образом, маска становится распределённой по

площади, и отпадает необходимость вычисления разрезов в областях, густо покрытых вычетами, так как они, как правило, имеют низкую когерентность и покрываются маской целиком, образуя единую связную компоненту. Это заметно сокращает время работы алгоритма в случае, например, водных поверхностей, для которых при двухпроходной схеме съёмки интерферометрическая разность фаз имеет случайное распределение.

Для сравнения глобальных методов были предложены следующие критерии, учитывающие специфику этого класса методов:

- Основа метода
- Необходимость взвешивания
- Наличие итераций
- Вычислительные особенности
- Ограничения на размеры обрабатываемого фрагмента
- Положительные стороны
- Отрицательные стороны
- Модифицируемые параметры метода

По этим параметрам было проведено сравнение четырёх глобальных методов:

1. Метод наименьших квадратов
2. Метод конечных элементов
3. Метод кусочно-линейного моделирования
4. Метод рекурсивного сглаживания

Помимо теоретической части, в рамках сравнения методов развёртки была проведена обработка экспериментальных данных. Для сравнения были выбраны три метода: модифицированный метод вычетов, метод частотного анализа и метод наименьших квадратов. На равнинной части все три метода работают одинаково хорошо: анализ разворота фазы по Баргузинской долине показал их согласованную работу: на квадратном участке изображения со стороной 512 элементов (около 10 км) средняя разности двух фазовых функций, развёрнутых двумя любыми методами, составляет 0.01 радиан при среднеквадратичном отклонении 0.05 радиан. В условиях пересечённого рельефа разница более заметна: в случае часто следующих интерференционных полос метод наименьших квадратов показал наихудшую работу, максимальная ошибка составила более 8 радиан. Вместе с тем, метод наименьших квадратов лишён главного недостатка локальных методов: в них маскированные области остаются «белыми пятнами», тогда как глобальные методы дают

решение задачи по всему полю изображения, без пропусков. Интересный результат показал спектральный анализ развёрнутой фазы (рис. 1).

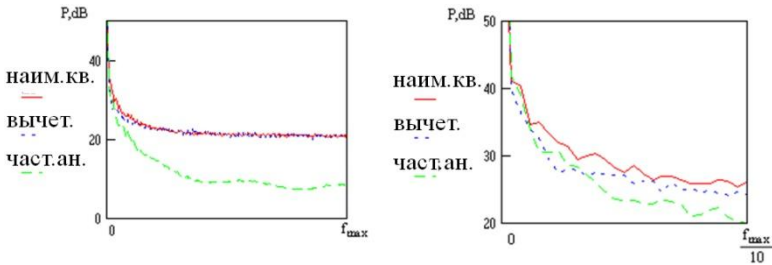


Рис. 1. Спектральные характеристики интерферометрической фазы, развёрнутой тремя алгоритмами.

Следует отметить заметное подавление шумов на частотах более $f_{\max}/10$ (где f_{\max} — частота следования отсчётов на интерферограмме) при предварительном сглаживании неразвёрнутой интерферограммы скользящим окном 5×5 и дальнейшем прямом интегрировании фазы с использованием маски недостоверных точек по методу частотного анализа. Ослабление шумов в данном случае достигает 6–12 дБ по сравнению с другими методами (рис. 1, левый график). Уровень шумов для метода наименьших квадратов и метода вычетов на высоких частотах совпадает с точностью до долей децибела. Это значит, что метод наименьших квадратов не обладает свойствами низкочастотного фильтра. Для этого же метода на низких частотах видно превышение мощности спектральных компонент до 3 дБ (рис. 1, правый график). Это говорит о наличии крупномасштабных отклонений аппроксимации фазы, развёрнутой этим методом, от истинной.

Таким образом, показано, что устранение 2π -неоднозначности — один из наиболее сложных при реализации этапов интерферометрической обработки. Не существует универсального метода решения этой задачи: при выборе метода, оптимального для данных условий, следует учитывать особенности интерферограммы — характер распределения по изображению особых точек, их плотность, степень связности регулярных областей, — а также особенности постановки задачи: допустимость «белых пятен», допустимость локальных искажений с целью получения глобальной картины, и т.д.

Глава 4 посвящена обзору методов возникшей чуть более десяти лет назад отрасли интерферометрии — поляриметрической интерферометрии.

Глава носит справочный характер, представляя собой основу для следующего за ней материала глав 5 и 6: в ней введены понятия и величины, с которыми оперирует поляриметрическая интерферометрия, охарактеризованы используемые модели рассеяния, очерчен круг решаемых задач, проиллюстрированы основные направления исследований.

Глава 5 вводит в рассмотрение поляриметрические сигнатуры интерферометрической когерентности, сочетающие в себе информацию о рассеивающей поверхности/среде одновременно с интерферометрической и поляриметрической точки зрения. Сигнатуры когерентности имеют в качестве предшественника широко используемые в радиолокационной поляриметрии поляризационные сигнатуры. В современных публикациях поляризационная сигнатура — это графически представленная зависимость эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) сигнала от параметров эллипса поляризации.

По аналогии с поляризационными сигнатурами можно рассмотреть сигнатуры когерентности, показывающие зависимость модуля комплексной интерферометрической когерентности γ от тех же параметров. Интерферометрическая когерентность определяется следующей формулой:

В интерферометрических работах принято вычислять когерентность по формуле

$$\gamma = \frac{|E(z_1, z_2^*)|}{\sqrt{E(z_1, z_1^*)E(z_2, z_2^*)}}, \text{ где} \quad (1)$$

z_1, z_2 — значения коэффициента обратного рассеяния на первом и втором изображении;

$E()$ — операция взятия среднего по пространственной выборке;

$*$ — операция комплексного сопряжения.

Графическое представление значений γ для разных вариантов поляризации дают согласованную (для совпадающих поляризаций на излучении и приёме) или перекрёстную (для ортогональных поляризаций) сигнатуру интерферометрической когерентности.

Примеры сигнатур когерентности для согласованной и перекрестной комбинации поляризаций приведены на рис. 2. Вертикальная ось соответствует среднему значению (по некоторому пространственному ансамблю — в настоящей работе использовано скользящее окно усреднения размером 5×5 элементов разрешения) модуля интерферометрической когерентности, две горизонтальные оси — угол ориентации (ось направлена слева направо) и угол эллиптичности (ось трансверсальна плоскости страницы).

В данной работе основное внимание уделяется согласованным сигнатурам, которые соответствуют ситуации, в которой поляризации приёмника и источника совпадают. Везде далее слово «сигнатура» означает именно согласованную сигнатуру когерентности.

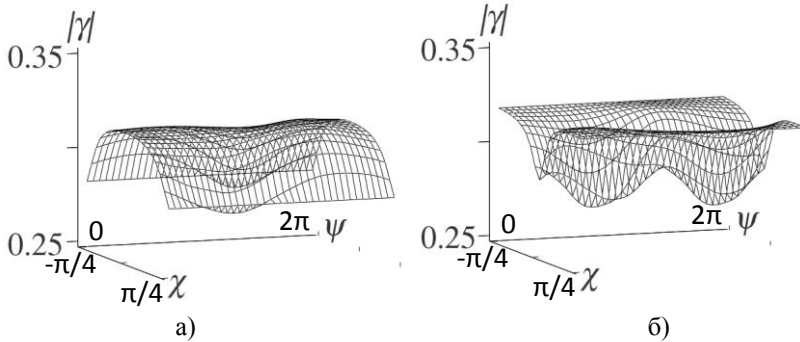


Рис. 2. Согласованная (а) и перекрёстная (б)

сигнатуры когерентности для открытой поверхности (поле) в С-диапазоне.

Для иллюстрации свойств поляризационных сигнатур когерентности и классификации земных покровов, основанной на них, в настоящей работе использованы данные полнополяризметрического PCA SIR-C по территории юго-восточного Прибайкалья. Два повторяющихся прохода 7.10.1994 и 9.10.1994 позволяют вести интерферометрическую обработку, а два частотных диапазона (С-диапазон с длиной волны 5.6 см и L-диапазон с длиной волны 23 см) — видеть зависимость сигнатур от несущей частоты сигнала локатора. В пределах сцены расположены часть акватории Байкала, дельта реки Селенги и прилегающие районы. Характер подстилающих покровов достаточно разнообразен: имеется прибрежная полоса, культивируемые территории (поля), леса двух типов (смешанные и хвойные), необрабатываемые открытые пространства (луга, болота, пойменные земли).

Как правило, общий вид сигнатуры когерентности таков, что профили графиков при круговой поляризации ($\chi = \pm\pi/4$) проходят ниже профиля линейной поляризации ($\chi = 0$), что хорошо видно на рис. 2. Глобальный максимум сигнатуры обыкновенно располагается также приблизительно на линии $\chi = 0$, чаще всего на вертикальной ($\psi = \pi/2$) или горизонтальной ($\psi = 0$ и $\psi = \pi$) поляризации. Что касается глобального минимума, то он может быть как на профиле графика, соответствующем линейной поляриза-

ции ($\chi = 0$), так и на краю сигнатуры (на профилях, соответствующих круговым поляризациям $\chi = \pm\pi/4$). Кроме случая точечных максимумов и минимумов, возможен вариант максимальной (или минимальной) линии, как на рис. 2а. Выделяется также случай хаотического распределения максимумов и минимумов; это бывает при сниженном среднем значении модуля когерентности по сигнатуре. Нулевая или околонулевая интерферометрическая когерентность свидетельствует о полной или почти полной декорреляции двух изображений, поэтому и сигнатура перестаёт иметь сколько-нибудь правильную форму.

Варьируя количество элементов разрешения, по которым происходит усреднение в формуле (1), можно убедиться в том, что для конкретного типа поверхности форма сигнатуры не зависит от площади, по которой происходит усреднение. С увеличением площади усреднения наблюдается выглаживание графика из-за снижения флуктуаций шумовой компоненты.

Безлесные территории

Пример сигнатур на рис. 2 представляет именно этот тип поверхности. Среднее значение модуля когерентности по различным безлесным участкам для С-диапазоне составляет около 0.3, а для L-диапазона около 0.8.

Как было упомянуто выше, декорреляция изображений происходит по причинам различной природы. Мы не принимаем в рассмотрение так называемую «пространственную декорреляцию», которая возникает из-за различия в углах обзора для двух траекторий носителя, во-первых, потому что в данном случае эта составляющая несущественна, а во-вторых, потому что она медленно меняется от одного края сцены к другому, и для выбранных размеров тестовых участков не сказывается. Относительно декорреляции из-за соотношения сигнал-шум можно заметить следующее. График имеет максимальную прямую при нулевой эллиптичности. При этом традиционная поляризационная сигнатура, построенная по тому же участку изображения, имеет чётко выраженный минимум посередине сигнатуры ($\chi = 0, \psi = \pi/2$), что соответствует вертикальной поляризации. В естественном предположении одинаковой шумовой составляющей для всех углов ориентации получаем, что соотношение сигнал-шум для нулевой эллиптичности зависит от угла ориентации, а модуль когерентности — нет. Таким образом, декорреляция из-за соотношения сигнал-шум не вносит заметного вклада в значение модуля когерентности на линии $\chi = 0$. Напротив, падение величины когерентности от линии нулевой эллиптичности к краям, то есть к линиям круговых по-

ляризации, напрямую связано именно с соотношением сигнал-шум, поскольку традиционная поляризационная сигнатура показывает сильный спад ЭПР при перемещении от линейной поляризации к круговым при каждом фиксированном значении угла ориентации. Третий важный источник декорреляции — так называемая объёмная декорреляция, происходящая при наличии на освещаемой поверхности отражающего слоя ненулевой высоты (рассеивающего объёма). Такой слой отсутствует, поскольку даже травянистая растительность, характерная для полей, в октябре или полностью убрана, или совершенно незначительна. Оставшаяся причина декорреляции — временная, возникающая благодаря изменениям микрорельефа и электрических свойств поверхности, произошедшим за время между съёмками пары изображений (в данном случае этот промежуток равен двум суткам). Мы видим, что график поверхности, представленной на сигнатуре, является почти линейчатым, то есть для фиксированного значения угла эллиптичности отсутствует зависимость модуля когерентности от угла ориентации. Из отсутствия зависимости временной декорреляции от угла ориентации можно заключить, что степень изменений, произошедших за два дня, не зависит от ориентации элементарных отражателей, следовательно, на отражающей поверхности нет выделенного направления. Это позволяет сделать вывод о равномерном распределении ориентации отражателей и о поверхностном характере рассеяния, который действительно характерен для полей и других безлесных земель, что подтверждает поляриметрический анализ любого из изображений, составляющих пару.

Водные поверхности

В схеме съёмки с повторяющихся орбит водные поверхности в силу их постоянной изменчивости, а также слабой мощности обратного сигнала являются полностью декоррелированными. Среднее значение когерентности близко к нулю. Что касается формы сигнатуры когерентности, она имеет хаотический вид, максимумы и минимумы распределены самым неожиданным образом.

Леса

Леса являются одними из наиболее интересных объектов изучения поляриметрической интерферометрии благодаря наличию объёмного отражающего слоя. Тестовым в данной работе послужил лес у села Истомино. Это смешанный лес с неравномерным распределением пород деревьев. Из хвойных преобладают сосны, лиственницы и (более редкие) ели, из листвен-

ных — берёзы и осины. Богатый подлесок формирует нижний объёмный отражающий слой.

В отличие от предыдущего типа поверхности, сигнатуры когерентности леса для L- и C-диапазонов не всегда имеют совпадающую форму для одного и того же участка леса. Близкие формы сигнатур показаны на рис. 3. Максимум соответствует линейной горизонтальной поляризации. Разница в среднем значении и вариации: и то, и другое в C-диапазоне снижено по сравнению с L-диапазоном. К этому типу можно отнести участки леса со множеством крепких горизонтальных ветвей, на которые не действуют ветровые колебания.

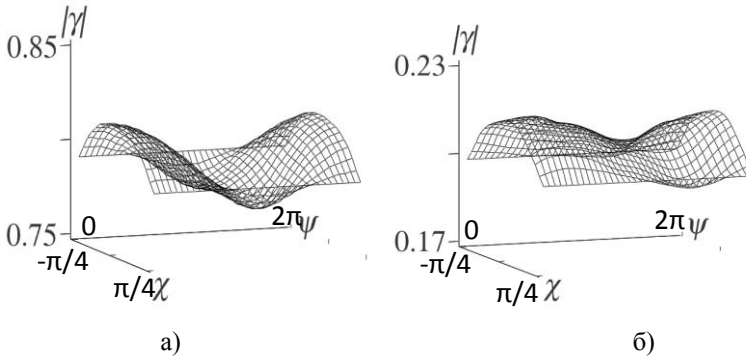


Рис. 3. Сигнатуры когерентности леса в L-диапазоне (а) и в C-диапазоне (б)

Однако в C-диапазоне возникают и совсем другие сигнатуры: одни имеют максимум на вертикальной поляризации (рис. 4а), другие имеют максимумы на обеих согласованных поляризациях (рис. 4б). Картины когерентности, показанную на рис. 3а), могут дать участки молодого леса с параллельными стволами и тонкими ветками. Тип сигнатуры, показанный на рис. 3б), скорее всего, соответствует густой чаще, изобилующей стабильными отражателями и вертикальной, и горизонтальной ориентации. В соответствии с распределением максимумов сигнатуры можно выделить три типа леса. Каждый из них характеризуется определённой ориентацией наиболее стабильных отражателей в C-диапазоне. Среднее значение когерентности для всех трёх типов леса примерно одинаково и составляет около 0.2.

Кроме названных типов сигнатур когерентности, попадают и другие — смешанные. Например, сигнатура, напоминающая поле, но с плавным максимумом (или двумя) на линии $\chi = 0$. Чаще всего это означает, что в

данный прямоугольник попал как участок поля, так и участок лета одного из трёх первых типов. Дробление таких смешанных прямоугольников на более мелкие позволяет более точно увидеть границу леса.

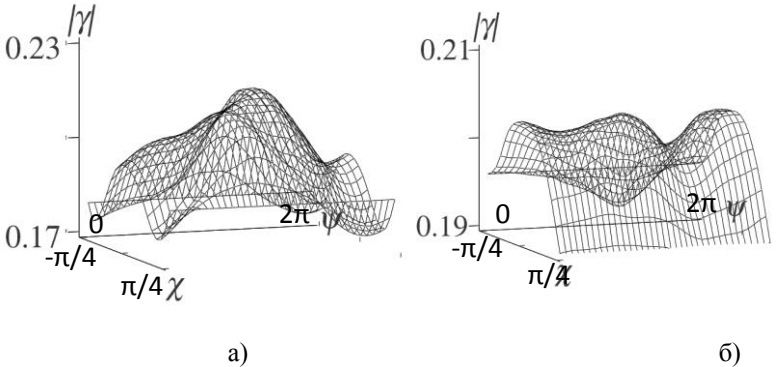


Рис. 4. Сигнатура когерентности леса второго (а) и третьего (б) типов в С-диапазоне

Сравнение с картой лесных пород не дало основания считать, что три выделенные типа леса соответствуют определённым видам деревьев. Например, к типу 2 относится как участок сосен в центре леса, так и опушка, состоящая из берёз и осин. Общее свойство этих двух участков — частые стволы, тонкие горизонтальные ветви, неразвитый подлесок. К типу 1 относятся, как правило, участки смешанного леса, состоящие из деревьев разного возраста. Следует отметить также, что съёмка производилась в октябре, когда большинство лиственных деревьев теряет листву. Возможно, в летний период распределение сигнатур по площади леса имеет другой характер.

Шестая глава также относится одновременно к поляриметрии и интерферометрии, поскольку предлагает способ поэтапной регистрации полной матрицы рассеяния в схеме интерферометрической съёмки. Требования к орбитам носителя при этом остаются теми же, что и для обычной интерферометрической съёмки, оценка степени декорреляции проводится по формуле (1). Полученная квази-матрица рассеяния записывается в виде

$$S^q = \begin{bmatrix} S_{HH}^1 & S_{HV}^1 \\ S_{VH}^2 & S_{VV}^2 \end{bmatrix},$$

где нижние индексы указывают на поляризацию передачи/приёма, а верхние — номер сеанса съёмки.

Проведено моделирование возникающих искажений матрицы рассеяния в мультипликативном виде для четырёх базисных матриц. Отмечены искажения, возникающие вследствие амплитудной и фазовой составляющей искажающего множителя как по отдельности, так и совместно. На основании построенных искажённых базисных матриц предложен метод коррекции реальных квази-матриц, построенных по частичным поляризационным измерениям. Использован комплексный корректирующий множитель S_{HV}^1/S_{VH}^2 для второй строки матрицы. Для оценки точности проведённой коррекции результаты сравнивались с исходной полной матрицей рассеяния, полученной в первом сеансе (рис. 5, 6).

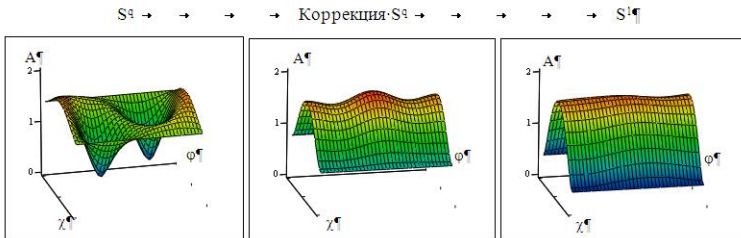


Рис. 5. Квази-матрица рассеяния, результат её коррекции и исходная полная матрица рассеяния, L-диапазон, тип поверхности: поле.

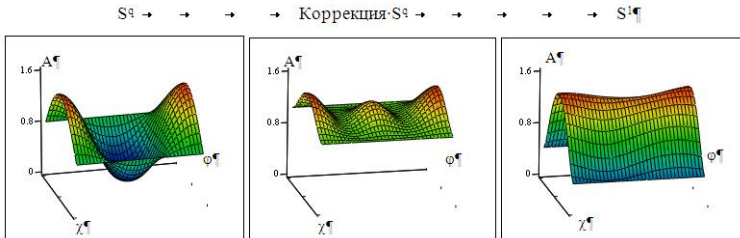


Рис. 6. Квази-матрица рассеяния, результат её коррекции и исходная полная матрица рассеяния, C-диапазон, тип поверхности: поле.

В результате обработки экспериментальных данных поляриметрического радиолокатора SIR-C продемонстрировано, что для однородных участков леса и поля (открытого пространства) — двух наиболее распространённых типов поверхности — квази-матрица рассеяния в L-диапазоне поддаётся

коррекции почти полностью (отличия в поляризационных сигнатурах составляют не более 5% полной вариации), в С-диапазоне в обоих случаях результат коррекции заметно хуже (отличия достигают 30%). Показано, что остаточный мешающий эффект связан с временной декорреляцией, которая в С-диапазоне проявляется сильнее при одном и том промежутке времени между съёмками.

В **Заключении** сформулированы результаты проделанной работы:

1. Систематизировано состояние радиолокационной интерферометрии к настоящему моменту:

а) подробно освещены такие аспекты, как организация интерферометрической съёмки, приведены геометрические соотношения, иллюстрирующие связь разности фаз сигналов с топографическими характеристиками поверхности и величиной подвижек (глава 1),

б) проанализированы этапы интерферометрической обработки радиолокационных данных, а также приведены соотношения, указывающие пределы точности измеряемых в интерферометрии величин — радиального смещение и относительных высот рельефа (глава 2);

2. Детально рассмотрены методы развёртки фазы, для одного из которых предложена модификация, ускоряющая работу алгоритма в условиях областей декорреляции и сложного рельефа на снимаемой местности; проведено сравнение в классах локальных и глобальных методов по основным характеристикам методов, а также на примере обработки экспериментальных данных (глава 3);

3. Представлены методы поляриметрической интерферометрии — возникшей чуть более десяти лет назад новой отрасли дистанционного зондирования, в рамках которой:

а) приведены базовые соотношения величин, изложены основные существующие методы (глава 4);

б) введены в рассмотрение сигнатуры когерентности — предложенная автором визуализация поляриметрико-интерферометрических данных, могущая служить основой для классификации (глава 5);

в) предложен и обоснован способ регистрации полной матрицы рассеяния по частичным поляризационным измерениям в схеме интерферометрической съёмки с повторяющихся орбит носителя (глава 6).

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Собраны и систематизированы имеющиеся в периодических изданиях сведения о радиолокационной интерферометрии, её возможностях и ограничениях, об организации съёмки, областях практического применения и направлениях новейших разработок:

показано, что радиолокационная интерферометрия — инструмент, позволяющий строить высокодетальные карты рельефа земной поверхности, а также фиксировать случаи мелкомасштабного смещения земной поверхности вплоть до миллиметровых масштабов;

рассмотрены варианты орбитальных конфигураций из космических аппаратов для интерферометрической съёмки:

проанализирована последовательность этапов интерферометрической обработки и показана их взаимосвязь;

систематизированы основные направления поляриметрической интерферометрии:

приведены классы и конкретные примеры прикладных задач, решаемых с помощью поляриметрической интерферометрии.

2. Предложена оригинальная система критериев сравнения методов устранения 2π -неоднозначности на интерферограммах, проведён сравнительный анализ на её основе.

3. Предложена и обоснована модификация одного из локальных методов устранения фазовой 2π -неоднозначности, учитывающая условия наличия областей низкой когерентности на интерферограмме.

4. Предложен метод классификации земных покровов, основанный на поляриметрических сигнатурах когерентности, показана связь параметров сигнатур с физическими характеристиками поверхности, проведено сравнение результатов классификации экспериментальных данных с результатами, полученными другими методами.

5. Предложен и обоснован метод регистрации полной матрицы рассеяния по частичным поляризационным измерениям в схеме интерферометрической съёмки с повторяющихся орбит носителя, обсуждены искажающие факторы и предложен метод их коррекции, продемонстрированы возможности метода на примере экспериментальных данных.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- статьи в журналах из рекомендованного перечня ВАК:

1. Захаров, А.И., Захарова, Л.Н. Значимость информации о фазе отражённого сигнала при радиолокационном картировании земных покровов // Радиотехника. — 2003. — №12. — С.70–73.
2. Захарова, Л.Н., Захаров, А.И. Сравнение некоторых современных методов разворота разности фаз в радиолокационной интерферометрии // Радиотехника и электроника. — 2003. — Т. 48, №10. — С. 1208—1213.
3. Захарова, Л.Н. Сигнатуры когерентности в поляриметрической интерферометрии для классификации земных покровов // Радиотехника. — 2005. — №8. — С. 45—50.
4. Захарова, Л.Н. Применение методов радиолокационной интерферометрии для исследования динамики берегов р. Волги в районе г. Ульяновска // Нелинейный мир. — 2007. — Т. 5, №5. — С. 273–274.
5. Захарова, Л.Н. Сравнение методов сигнатур когерентности и области когерентности для классификации земных покровов // Нелинейный мир. — 2008. — Т. 6, №4. — С.245–246.
6. Захарова, Л.Н.. Формирование полной матрицы рассеяния зондируемых сред по частичным поляризационным измерениям PCA // Нелинейный мир. — 2009. — Т.7, №3 — С.180–181.
7. Арманд, Н.А., Захаров, А.И., Захарова, Л. Н. Космические радары с синтезированной апертурой в дистанционном зондировании Земли — современные системы и перспективные проекты // Исследование Земли из космоса. — 2010 — № 2. — С. 3–13.

- труды и тезисы докладов, статьи в прочих журналах:

8. Захарова, Л.Н., Захаров, А.И. Проблема разворота разности фаз в радарной интерферометрии // Тр. XX и XXI Всероссийских Симп. «Радиолокационное исследование природных сред» (XXI Симпозиум, Санкт-Петербург, 15–17 апреля 2003 года). — СПб., 2003. — Вып. 3. — С. 35–47.
9. Zakharova, L. Comparison of Global and Local Approach to Phase Unwrapping For a Rugged Terrain // Proc. of Workshop on ERS SAR Interferometry (Fringe-2003), Frascati, Italy, December 1–5. — 2003.
10. Захарова, Л.Н. Дистанционное зондирование земных покровов с помощью методов поляриметрической интерферометрии // Тр. XXII Всеросс. научн. конф. «Распространение радиоволн» (РРВ-22, РР XXII), Ростов-на-Дону, п. Лoo, 22-26 сентября 2008 г. — 2008. — С.32—35.
11. M. Raimadoya, et al. ALOS-Indonesia Pol-InSAR Experiment (AIPLEX): Final Result / M. Raimadoya, B. Trissassongko, L. Zakharova, N. Sarbini // Abstract Book of the 4th Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program, Tokyo, November 15-17, 2010. — 2010. —P. 59.
12. Zakharova, L., Darizhapov, D., Kirbizhekova, I. Study of natural objects in Transbaikalia by means of polarimetry and polarimetric interferometry // Proc. of the 5th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR-2004), Ulm, Germany, May 25-27, 2004. — 2004. — Vol. 2. — P.733—736.
13. Zakharova, L. Polarimetric Coherence Signatures for Land Cover Study // Proc. of the 4th International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications, Innsbruck, Austria, November 16–19 2004. — 2004. — Электронное издание на CD.

14. Захарова, Л.Н. Классификация земных покровов по данным РСА с использованием методов поляриметрической интерферометрии // Тр. XXV^{ого} все-росс. симп. «Радиолокационное исследование природных сред», Санкт-Петербург, 17–19 апреля 2007. — СПб, 2009. — Выпуск 7. — С. 83—90.
15. Захарова, Л.Н. Новый метод анализа данных полнополяриметрического РСА при использовании интерферометрии с повторяющихся орбит носителя // Сб. докл. XIII Международной науч.-техн. Конф. «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2007), Воронеж, 17–19 апреля 2007 года. — 2007. — С. 1761—1769.
16. Захарова, Л.Н. Применение методов поляриметрической интерферометрии для исследования вертикальной структуры леса // Тр. XXII Симп. по радиолокационному зондированию природных сред, Санкт-Петербург, 18–20 апреля 2004. — 2004.
17. Zakharova, L. Polarimetric Coherence for Land Covers Classification // Proc. of the 28th General Assembly of URSI (Union Radio-Scientifique Internationale), New Delhi, India, October 22-29, 2005. — 2005.
18. Захарова Л.Н. Применение методов поляриметрической интерферометрии для исследования растительных покровов // Сб. докл. Второй всеросс. научн. конф. «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами», Санкт-Петербург, 16–18 июня 2004 года. — СПб., 2004. — Т. 1. — С. 65—69.
19. Захарова, Л.Н. Использование интерферометрической когерентности по данным полнополяриметрического РСА для классификации земных покровов // Сборник трудов Пятой Юбилейной Открытой Всероссийской Конференции «Дистанционное зондирование Земли из Космоса», Москва, ИКИ РАН, 12–16 ноября 2007 года. — 2007.
20. Zakharova, L. Land cover classification based on polarimetric coherence signatures // Abstract book of the 3rd International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry (POLINSAR-2007), Frascati, Italy, January 22–26, 2007. — 2007. — P. 47.
21. Захарова, Л.Н. Возможности применения радиолокационной поляриметрической интерферометрии для исследования земных покровов// Тезисы докладов V конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, ИКИ, 8–9 апреля 2008 года. — 2007. — С. 19.
22. Zakharova, L. Forest classification by means of two POLINSAR techniques // Proc. of the 5th Intl. Symp. on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Application (BioGeoSAR-2007), Bari, Italy, September 25–28, 2007. — 2007.
23. Zakharova, L. Polarimetric Coherence Signatures and Coherence Regions in Complex Unit Circle // Proc. of the 7th European Conf. on Synthetic Aperture Radar (EUSAR-2008), Friedrichshafen, Germany, June 2–6, 2008. — 2008. — Vol. 3. — P. 309—312.
24. Zakharova, L., Zakharov, A. Quasi-scattering matrix registration in repeat pass mode // Proc. of the 4th Intl. Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry (POLINSAR-2009), Frascati, Italy, 26–30 January 2009. — 2009.
25. Захарова, Л.Н., Захаров, А.И. Исследование подвижек почвы в районе г. Ульяновска методом радиолокационной интерферометрии // Тр. XXIV

- Симп. по радиолокационному зондированию природных сред, С.-Петербург, 18–20 апреля 2006 г. — 2006. — С. 132–138.
26. Zakharova, L. Interferometric study of Landslides Activity of Volga River Banks // Proc. of the 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR-2006), Dresden, Germany, May 16–18, 2006. — 2006.
 27. Захарова, Л.Н. Наблюдение оползневых процессов методами радиолокационной интерферометрии на примере Ульяновска // Тр. XXII Всеросс. научн. конф. «Распространение радиоволн» (РРВ-22) РР XXII, Ростов-на-Дону, п. Лео, 22-26 сентября 2008 г. — Ростов-на-Дону, 2008. — Т.3 — С.36–39.
 28. Захарова, Л.Н., Захаров, А.И. Многолетние наблюдения динамики земных покровов в Ульяновске по данным космических радиолокаторов // Тр. IV Всеросс. научн. шк. и конф. "Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред" (Муром'2009), Муром, 30 июня – 3 июля 2009 г. — 2009.
 29. Лебедева, М.А., Захарова, Л.Н., Захаров, А.И. Применение метода РСА-интерферометрии для изучения медленных смещений (на примере активных оползневых деформаций вблизи Северомуйского тоннеля БАМ)// Первая молодежн. тектонофизич. шк.-семинар, Москва, ИФЗ им. О.Ю.Шмидта РАН, 21-25 сентября 2009 г. — 2009.
 30. Захарова, Л.Н., и др. Применимость радиолокационной интерферометрии к мониторингу деформаций земной поверхности в районе Северомуйского участка БАМ // Тр. конф. «Всероссийские радиофизические научные чтения-конференции памяти Н.А. Арманда. Всероссийская научно-практическая конференция «Космическая радиолокация», Муром, 28 июня – 1 июля 2010 г. — 2010. — Электронное издание (CD).
 31. Захаров, А.И., Захарова, Л.Н., Лебедева, М.А. Применение РСА-интерферометрии для мониторинга транспортной инфраструктуры в зонах с опасной динамикой покровов// Журнал радиоэлектроники (электронный журнал) — 2010. — № 10 (приложение).— С. 32—38. — http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdffiles/c1_4.pdf
 32. Лебедева, М.А., и др. Эндеогенные и экзогенные деформации в зонах активных разломов Верхнеангарско-Муйской междувпадинной перемычки по данным дифференциальной РСА-интерферометрии / Лебедева, М.А., Саньков, В.А., Захаров, А.И., Захарова, Л.Н. // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). — 2010. — №10 (приложение). — С. 65—71. — http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdffiles/c1_7.pdf
 33. Захаров, А.И., и др. Методы космической радиолокационной интерферометрии в гляциологии / Захаров, А.И., Захарова, Л.Н., Синило, В.П, Петрова, Л.Г. // Тр. XXV^{ого} Всеросс. Симп. «Радиолокационное исследование природных сред», Санкт-Петербург, 17–19 апреля 2007 года. — СПб, 2009. — Вып. 7. — С. 91–94.
 34. Zakharova, L., et al. On the Use of ERS INSAR Data in the Ecological Monitoring of the Baikal Region // Proc. of the Intl. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'03), Toulouse, France, 21-25 July 2003. — 2003. — Vol. 4. — P. 2477—2479.
 35. Захаров, А.И., Захарова, Л.Н. Применение интерферометрии для мониторинга районов добычи и транспортировки нефти и газа / Загл. и текст парал. рус., англ. // ROGTEC: Российские нефтегазовые технологии. — 2006. — Вып. 5.— С. 58–67.