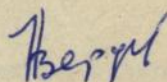


АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

ЗЕРДЕВ НИКОЛАЙ ГЕОРГИЕВИЧ



УДК 621.371.332

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СВЧ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ

01.04.03 - Радиопизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Харьков - 1993

Работа выполнена в Институте радиофизики и электроники
АН Украины.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Кулежин Г.П.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,
профессор Фукс И.М.

- доктор технических наук,
профессор Зеленский А.А.

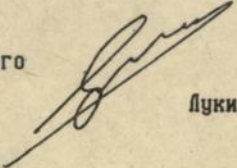
Ведущая организация - Институт ионосферы АН Украины
и Министерства образования
Украины (г. Харьков).

Защита состоится "16" ноября 1993 г. в 15 часов
на заседании специализированного совета Д 016.64.01 при
Институте радиофизики и электроники АН Украины
/ 310085, г. Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12 /.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ИРЭ АН Украины.

Автореферат разослан "15" октября 1993 г.

Ученый секретарь специализированного
совета, доктор физ.-мат. наук


Лукин К.А.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время важное значение приобретают дистанционные методы исследования Земли, направленные на решение природоохранных, мелиоративных, гидрологических и сельскохозяйственных задач. Особенно актуально изучение происходящих в составе почвенного покрова изменений культурно-технического состояния и свойств почв в условиях интенсивного земледелия, в частности динамики изменений почвенного покрова, связанных с антропогенными нарушениями почв в результате эрозии, заболачивания и т.п.

Традиционные методы и средства контактных измерений обеспечивают определение параметров, характеризующих состояние почвы, в точке или на ограниченной площади. При этом измерения на основе контактных методов с требуемой для большинства научных и практических задач частотой и детальностью в пространстве не всегда физически осуществимы и финансово выгодны.

В то же время успехи в разработке технических средств для дистанционных наблюдений, обработке и тематической интерпретации данных позволяют осуществлять регулярный и оперативный контроль за состоянием почвенного покрова. Таким образом, быстрое развитие методов и средств дистанционного зондирования обуславливает непрерывное развитие почвенного мониторинга.

Исторически наибольший объем исследований проведен в оптическом диапазоне, однако радиофизические методы с использованием активных и пассивных систем СВЧ диапазона находят все более широкое применение благодаря преимуществам, которые присущи этим методам. К числу несомненных достоинств радиофизических методов следует отнести хорошую связь радиофизических характеристик зондирующего сигнала с электрофизическими харак-

теристиками почвы, возможность подпочвенного зондирования и проведения работы в неблагоприятных погодных условиях, а также высокую оперативность получения информации и доставки ее потребителю. Высокие потенциальные возможности радиофизических методов обуславливают все возрастающий интерес к ним. Их развитие и совершенствование остается актуальной проблемой дистанционного почвенного мониторинга.

Целью диссертационной работы является:

- разработка многоканальных радиолокационных методов для определения диэлектрических и статистических характеристик непокрытых растительностью поверхностей;

- исследование динамики изменения статистических характеристик поверхности реальных сельскохозяйственных полей во времени и их влияния на величину рассеянного сигнала;

- экспериментальное исследование возможностей многоканальных радиолокационных методов для определения степени эродированности почвенного покрова и связи параметров радиолокационного сигнала с агрофизическими характеристиками почв.

Методика исследования. Теоретическую основу для решения в работе указанных задач составили модели Кирхгофа (физической и геометрической оптики - ФО и ГО) и модель малых возмущений (ММВ). Оценка возможностей разработанных многоканальных радиолокационных методов проведена на основе численного моделирования и по экспериментальным данным, полученным нами и другими авторами. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялась методами математической статистики и спектрального анализа случайных процессов. Экспериментально выяснено влияние эрозионных процессов на скорость и характер разрушения структур поверхностных неровностей во времени. На различных по степени эродированности полевых участках экс-

периментально обнаружено значительное отличие в параметрах радиолокационного сигнала, которое обусловлено агрофизическими характеристиками почвы.

Научная новизна работы заключается в теоретической разработке многоканальных радиолокационных методов оценки диэлектрической проницаемости и статистических характеристик почвы, их моделировании и экспериментальной проверке возможностей разработанных методов для определения степени эродированности почвенного покрова.

Практическая значимость. Приведение в диссертационной работе результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы для разработки нового поколения радиолокационных средств дистанционного зондирования почв, позволяющих на основе применения многоканальных методов получать информации об их диэлектрической проницаемости, статистических характеристиках и эрозионных свойствах. Эти методы целесообразно использовать при разработке аэрокосмических радиолокационных систем, предназначенных для изучения почвенных ресурсов, что позволяет расширить возможности систем дистанционного почвенного мониторинга.

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты:

1. Впервые показано, что в случае рассеяния непокрытой растительностью земной поверхности диэлектрические функции в моделях Кирхгофа и малых возмущений обладают незначительной частотно-влажностной зависимостью в СВЧ диапазоне.

2. На основе ММВ и моделей Кирхгофа разработаны два многоканальных метода оценки диэлектрической проницаемости и статистических характеристик непокрытых растительностью поверхностей. При этом впервые в ММВ рассмотрено использование фрак-

тальных спектров поверхностных неровностей в целях интерпретации данных экспериментальных измерений удельной ЭПР.

3. На основе проведенного анализа и обработки полученных экспериментальных результатов показано, что:

- второй разработанный многоканальный метод, основанный на незначительной частотно-влажностной зависимости диэлектрических функций, пригоден для практической оценки диэлектрической проницаемости и статистических характеристик поверхности;

- использование фрактальной аппроксимации для спектра поверхностных неровностей в ММВ позволяет повысить точность модельной оценки влияния эффекта шероховатости поверхности на интенсивность обратного рассеяния и получить лучшее согласование между теоретически рассчитанными значениями для удельной ЭПР шероховатых поверхностей и экспериментально полученными для них данными по сравнению с обычно применяемыми гауссовской и экспоненциальной аппроксимациями, особенно в случаях, когда статистические характеристики поверхности рассеяния не отвечают критериям применимости ММВ;

- значительные отличия в агрегатно - механических составах подверженных эрозии почв приводят к различной скорости разрушения структуры поверхностных неровностей полей при одинаковой агрообработке почвы и атмосферных условиях, таким образом, изменение статистических характеристик поверхности поля во времени сильно зависит от степени его эродированности.

- в условиях высокой влажности через несколько недель после стандартной агрообработки эталонного сельскохозяйственного поля для различных по степени своей эродированности участков наблюдаются значительные отличия в интенсивности обратного рассеяния на волнах $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3.2$ см при горизонтальной и вертикальной поляризациях, которые обусловле-

ни разными скоростями протекания заимития и разрушения продольной и поперечной структуры борозды поля для слабо-, средне-, сильно-, и незеродированных почв, этим подтверждены возможности использования многоканальных СВЧ радиолокационных методов для выявления эрозионных процессов и определения их динамики.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- II-ой Всесоюзной научно-технической конференции "Методы представления и обработки случайных сигналов и полей", Туапсе, 1991 г.;

- Международной конференции Спектр-92 "Методы и средства аэрокосмического и наземного экологического мониторинга", Минск, 1992 г.;

- Научно-технической конференции "Приборы, техника и распространение ММ и СВМ волн", Харьков, 1992г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано семь научных работ, из них 4 статьи, 3 тезиса докладов, подготовлено три научно-технических отчета.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 153 страницы, в том числе 97 страниц основного текста, 17 таблиц, 42 рисунка, библиография содержит 76 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность развития активных методов дистанционного почвенного мониторинга. Сформулирована цель работы, указана ее практическая значимость и научная новизна. Описана структура диссертации и резюмировано содержание глав, а также изложены основные результаты диссертационной

работы.

В первой главе сделано краткое рассмотрение физических основ и исторического развития радиолокационного метода определения влажности почв, его преимуществ и недостатков. Критически проанализированы лучшие экспериментальные результаты и представлены наиболее подходящие физические модели диэлектрической проницаемости почвы (ϵ_s). Показано, что для выбора той или иной модели при решении прикладных задач дистанционного почвенного мониторинга следует прежде всего учитывать инструментальную точность определения удельной ЭПР и имеющееся наземное обеспечение. С этой точки зрения выделена эмпирическая модель зависимости диэлектрической проницаемости почв от влажности (разработанная Халликайненом и др.), на основе которой численно промоделированы возможности разработанных многоканальных методов оценки характеристик почвы. Отмечено, что корректное разделение и оценка влияния влажности и шероховатости на интенсивность рассеянного непокрытой растительностью поверхность радиолокационного сигнала является основной проблемой при интерпретации данных зондирования в микроволновом диапазоне. В главе подчеркнута, что в настоящее время отсутствуют детально разработанные и опробованные многоканальные прикладные методы, позволяющие надежно и эффективно решать эту задачу. Далее рассмотрены окончательные выражения для основных теоретических моделей поверхностного рассеяния (ГО, Ф0 и ММВ) и приведены их модельные уравнения, в соответствии с которыми общим объединяющим модели моментом становится представление σ° как произведения двух функций:

$$\sigma^\circ(\theta_i, f) = D_{pp}(\epsilon_s(f), \theta_i) \cdot S(\text{шероховатость}(\theta_i, f)). \quad (1)$$

Первая из них, так называемая диэлектрическая функция D , отражает диэлектрические свойства рассеивающих сред и зависит

от поляризации ($pp = ГГ, ВВ$) и угла облучения (θ_i) помимо зависимости от \mathcal{E}_s . Во всех моделях с единственным исключением - ММВ на вертикальной поляризации - она равна френелевскому коэффициенту зеркального отражения по мощности. Вторая функция S учитывает влияние шероховатости на величину σ° .

Во второй главе исследована частотно-влажностная зависимость диэлектрических функций в моделях Кирхгофа и ММВ. На основе численного моделирования с применением эмпирической модели диэлектрической проницаемости почв и по экспериментальным данным, полученным многими авторами, показано, что при решении задачи определения влажности в рамках этих моделей все частоты в микроволновом диапазоне обладают практически одинаковой потенциальной влажностной чувствительностью. Далее предложены два многоканальных метода оценки диэлектрических и статистических характеристик поверхности. Характерной особенностью первого, полученного в рамках ММВ, является то, что для оценки диэлектрической проницаемости (и, соответственно, влажности, так как она оказывает доминирующее влияние на величину \mathcal{E}_s) поверхности знание ее статистических характеристик обязательно. Этот подход основан на теоретически существующей в ММВ возможности получить одинаковый по величине вклад от шероховатости поверхности в интенсивность обратно рассеянного сигнала за счет специфических угловых измерений на двух частотах облучения. В ММВ функция шероховатости равна:

$$S(\theta_i, f) = A (k \cdot \cos \theta_i)^4 \cdot W(2k \cdot \sin \theta_i, 0). \quad (2)$$

Здесь A - константа, W - пространственный спектр поверхностных неровностей, k - волновое число, θ_i - угол падения. В самом простом варианте двухчастотного зондирования можно выбрать частоты f_1, f_2 и углы облучения θ_1, θ_2 таким образом, чтобы соотношение соответствующих функций шероховатости не за-

висело бы от статистических параметров рассеивающей поверхности. Для МВВ, согласно (2), условием такой независимости является равенство

$$k_1 \cdot \sin \theta_1 = k_2 \cdot \sin \theta_2. \quad (3)$$

Тогда, если рассматривается случай обратного рассеяния на частотах и углах, удовлетворяющих условию (3), соотношение удельных ЭПР

$$\frac{\sigma_{pp,1}^{\circ}}{\sigma_{qq,2}^{\circ}} = \frac{(k_1 \cdot \cos \theta_1)^4 \cdot D_{pp}(\varepsilon_1, \theta_1)}{(k_2 \cdot \cos \theta_2)^4 \cdot D_{qq}(\varepsilon_2, \theta_2)}, \quad (4)$$

где $pp, qq = ГГ$ или $ВВ$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_s(f_1)$ и $\varepsilon_2 = \varepsilon_s(f_2)$ является функцией диэлектрической проницаемости, углов и длин волн. Оно не зависит от статистических характеристик поверхности. Задача дистанционного определения влажности может быть решена исходя из (4), где неизвестны только величины диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, связанные с объемным влагосодержанием ($m_v, г.см^{-3}$) поверхностного слоя. Из (4) возможно получить пять поляризационных соотношений:

$$\begin{aligned} R_1 &= \sigma_{ГГ,1}^{\circ} / \sigma_{ГГ,2}^{\circ}; \quad R_2 = \sigma_{ГГ,1}^{\circ} / \sigma_{ВВ,2}^{\circ}; \\ R_3 &= \sigma_{ВВ,1}^{\circ} / \sigma_{ГГ,2}^{\circ}; \quad R_4 = \sigma_{ВВ,1}^{\circ} / \sigma_{ВВ,2}^{\circ}; \\ R_5 &= \sigma_{ГГ}^{\circ} / \sigma_{ВВ}^{\circ}. \end{aligned} \quad (5)$$

Поляризационное соотношение R_5 представляет частный случай, когда $f = f_1 = f_2$, (отсюда, $\theta_i = \theta_1 = \theta_2$), $pp = ГГ$, $qq = ВВ$ и $R_5 = D_{ГГ}(\varepsilon_s, \theta_i) / D_{ВВ}(\varepsilon_s, \theta_i)$. Это соотношение - однозначная функция одной диэлектрической проницаемости ε_s . Оно хорошо известно и в настоящее время успешно используется многими авторами для оценки влагосодержания поверхностного почвенного слоя. Из равенств (5) видно, что по своей структуре поляризационные соотношения R_2 и R_3 похожи на R_5 . В граничном случае, когда $f_1 \approx f_2$, они превращаются соответственно

в R_5 и $1/R_5$. Потенциальная влажностная чувствительность поляризационных соотношений R_1-R_5 численно промоделирована с применением уже указанной эмпирической модели зависимости ϵ_s от влажности. При этом рассматривался однородный по влажности поверхностный почвенный слой. На самом деле влажностная чувствительность поляризационных соотношений R_1-R_4 дифференциальна. Она получается как разница в поляризационных влажностных чувствительностях на двух различных углах: θ_1 и θ_2 . Надо сказать, что в R_1-R_4 влажностно-угловая чувствительность скорее всего косвенно зависит от выбранных частот f_1 и f_2 , поскольку из равенства (3) автоматически определяется второй угол облучения θ_2 для каждого заданного угла θ_1 . НМВ желательно применять на углах 20-60°. Отсюда, согласно равенству (3), оба угла θ_1 и θ_2 попадут в этот диапазон, если частоты зондирования удовлетворяют неравенству

$$f_2 / f_1 < 2-3, \quad (6)$$

если $f_2 > f_1$ и соответственно $\theta_1 > \theta_2$. Результаты расчетов поляризационных соотношений R_1-R_5 показывают что:

1. Все соотношения R_1-R_5 обладают нелинейным характером изменения с влажностью. Приблизительно 80-90% величины их потенциального влажностного динамического диапазона изменения получаются для объемного влагосодержания в интервале 0-0.25 г.см⁻³.

2. Влажностная чувствительность соотношений R_1-R_5 возрастает с увеличением углов облучения. На одинаковых углах и частотах она является максимальной в R_5 , уменьшаясь далее в R_2, R_3, R_4 и R_1 . Для влажностного диапазона 0-0.25 г.см⁻³ лучшая расчетная чувствительность соотношений лежит в пределах 0.12-0.24 дБ / 0.01 г.см⁻³.

3. Когда дистанционное зондирование проводится на частотах

f_1 и f_2 таких, что $f_2/f_1 = 2.5-3$ (типичный случай зондирования в L и C -диапазонах), максимальные относительные изменения в R_1-R_4 в зависимости от влагосодержания не слишком отличаются. Минимальный влажностный динамический диапазон (для соотношения R_4) порядка 3.5 дБ, а максимальный (для соотношения R_2) - не превышает 4.5 дБ. Следовательно, все четыре соотношения R_1-R_4 равноценны. Когда частоты зондирования близки (критерием может служить неравенство $f_2/f_1 < 1.5$), ожидаемая влажностная чувствительность соотношений R_1, R_4 становится незначительной (меньше 0.5-0.8 дБ / 0.01 г.см^{-3}). Поэтому формирование влажностных оценок из R_1, R_4 проблематично. В промежуточном варианте, когда $f_2/f_1 = 1.2-2.5$, потенциальная влажностная чувствительность соотношения R_1 (в отличие от R_4) превышает $0.1 \text{ дБ} / 0.01 \text{ г.см}^{-3}$, что приемлемо в практических целях.

Подробное исследование этого многоканального радиолокационного метода оценки диэлектрических характеристик поверхности рассеяния показало, что в практических целях желательно выбирать рабочие частоты, удовлетворяющие соотношению $f_2/f_1 < 1.5$. В этом случае, если θ_1 изменяется в диапазоне $20-60^\circ$ с шагом 10° , минимальный шаг изменения для второго угла θ_2 составит приблизительно 5° . Это приемлемо в экспериментальных исследованиях с учетом модельной точности и инструментальной погрешности измерения. В заключение представления этого метода отмечено, что в настоящее время его практическое применение затруднено высокими требованиями к измерительной аппаратуре и необходимостью характерных рабочих частот.

Второй многоканальный метод оценки характеристик почвы, разработанный в диссертации, основан на незначительной частотно-влажностной зависимости диэлектрических функций. В нем

первоначально формируются оценки для некоторых статистических характеристик поверхности, и после этого получаются величины для ее диэлектрической проницаемости. В этом многоканальном методе применяется соотношение

$$SR_i = \frac{G_{pp}^{\circ}(\theta_i, f_1)}{G_{pp}^{\circ}(\theta_i, f_2)} = \frac{D_{pp}(\epsilon_s(f_1), \theta_i) \cdot S(\theta_i, f_1)}{D_{pp}(\epsilon_s(f_2), \theta_i) \cdot S(\theta_i, f_2)} \quad (7)$$

Незначительная частотная зависимость диэлектрических функций D в микроволновом диапазоне, исследованная в начале этой главы, позволяет принять, что

$$D_{pp}(\epsilon_s(f_1), \theta_i) \approx D_{pp}(\epsilon_s(f_2), \theta_i), \quad (8)$$

особенно если $f_2/f_1 < 1.5$ и $(f_2 - f_1) \ll (f_1 + f_2)/2$. Даже в случаях, когда частоты, на которых происходит зондирование, значительно отличаются ($f_2/f_1 = 2-3$), это допущение вполне приемлемо в микроволновом диапазоне, поскольку отличия в величинах D не превышают инструментальной точности измерения удельной ЭПР (1-1.5 дБ). При этом на таких частотах в условиях средней и высокой влажности ($m_v > 0.2 \text{ г. см}^{-3}$) ошибка допущения (8) не будет превышать 0.5-0.7 дБ. Следует отметить, что в модели Г0 этот многоканальный метод на самом деле не имеет места, поскольку диэлектрическая функция в модели Г0 не зависит от поляризации зондирующего сигнала и угла падения - $D = |(\sqrt{\epsilon_s} - 1)/(\sqrt{\epsilon_s} + 1)|^2$, а функция шероховатости включает только один неизвестный параметр - среднеквадратический наклон поверхности (m). Поэтому при допущении о применимости модели Г0 оценку параметра m можно формировать из любых поляризационных и частотных данных как минимум для двух углов облучения:

$$m = \left[\frac{tg^2 \theta_2 - tg^2 \theta_1}{2 \ln(\cos^4 \theta_1 \cdot G_{pp}^{\circ}(\theta_1) / (\cos^4 \theta_2 \cdot G_{pp}^{\circ}(\theta_2)))} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Значительно более интересным является этот многоканальный метод оценки статистических и диэлектрических характеристик поверхности рассеяния в модели Ф0. В случае, когда считается, что корреляционная функция поверхностных неровностей имеет гауссовскую форму, равенство (7) записывается как

$$SR_i = \frac{k_1^2 \cdot \exp(-K_1) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [(K_1^n / (n!n)) \cdot \exp((-k_1 \cdot \ell \cdot \sin \theta_i)^2 / n)]}{k_2^2 \cdot \exp(-K_2) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [(K_2^n / (n!n)) \cdot \exp((-k_2 \cdot \ell \cdot \sin \theta_i)^2 / n)}, \quad (10)$$

где $K_1 = (2k_1 \cdot \sigma_h \cdot \cos \theta_i)^2$, $K_2 = (2k_2 \cdot \sigma_h \cdot \cos \theta_i)^2$. Оценки для среднеквадратичного отклонения высот поверхностных неровностей σ_h и радиуса их корреляции ℓ из (10) можно формировать по измерениям удельных ЭПР на нескольких углах облучения $\theta_i = \theta_1 - \theta_n$. Определение σ_h и ℓ из (10) сводится к задаче определения минимума функции и решению системы линейных уравнений. После получения значения для σ_h и ℓ величину диэлектрической проницаемости поверхности рассеяния можно оценить путем прямого расчета из модельного уравнения.

В ММВ второй многоканальный метод оценки характеристик почвы, основанный на соотношении (7) и допущении (8), приводит к выражению

$$SR_i = (k_1/k_2)^4 \cdot W(2k_1 \cdot \sin \theta_i, 0) / W(2k_2 \cdot \sin \theta_i, 0). \quad (11)$$

В большинстве случаев для корреляционной функции поверхностных неровностей предполагается гауссовская $W(\lambda) = \pi \cdot \sigma_h^2 \cdot \ell^2 \cdot \exp(-\lambda \ell / 2)$ или экспоненциальная $W(\lambda) = 4 \cdot \sigma_h^2 \cdot \ell^2 / (1 + \lambda^2 \ell^2)$ форма. Если в целях упрощения дальнейших записей принять

$$SK_i = SR_i \cdot (k_2/k_1)^4; \quad \Lambda_{1,i} = 2k_1 \cdot \sin \theta_i; \quad \Lambda_{2,i} = 2k_2 \cdot \sin \theta_i, \quad (12)$$

а через ℓ_1 и ℓ_2 обозначить радиус корреляции поверхностных неровностей при предположении о гауссовской и экспоненциальной

формах корреляционных функций поверхности, то из (11) можно записать следующие выражения для оценки ℓ .

$$\hat{\ell}_T = (4 \cdot \ln(SK_i)) / (\Lambda_{2,i}^2 - \Lambda_{1,i}^2)^{1/2}, \quad (13)$$

$$\hat{\ell}_3 = ((SK_i - 1) / (\Lambda_{2,i}^2 - SK_i \cdot \Lambda_{1,i}^2))^{1/2}. \quad (14)$$

Из равенства (13) и (14) можно легко получить линейную парную регрессию модели $y_i = ax_i + b$ и на основе метода наименьших квадратов оптимальным образом оценить ℓ . Понятно, что этот многоканальный метод можно рассматривать и при выборе корреляционной функции любой формы. В связи с этим надо отметить, что статистически изотропные поверхности, на которых не выделяется какой-либо масштаб, обладают спектром фрактального вида

$$W(Q) = C/Q^\alpha. \quad (15)$$

Константа C называется "изрезанностью" и предполагается, что она однозначно определяет статистические геометрические свойства случайных компонент изотропной поверхности. Найдено, что наилучшие аппроксимационные значения степенного показателя α заключены в пределах от 1.07 до 3.03. Из (11) и (15) оценка параметра α на основе многоканальных измерений дается выражением

$$\alpha = \ln(SK_i) / \ln(\Lambda_{2,i} / \Lambda_{1,i}). \quad (16)$$

После оценки параметра ℓ (или α) величину диэлектрической проницаемости поверхности рассеяния возможно определить исходя из соотношения

$$\frac{\sigma_{pp}^0(\theta_i)}{\sigma_{pp}^0(\theta_j)} = \frac{\cos^2 \theta_i \cdot D_{pp}(\epsilon_s, \theta_i) \cdot W(2k \cdot \sin \theta_i, 0)}{\cos^2 \theta_j \cdot D_{pp}(\epsilon_s, \theta_j) \cdot W(2k \cdot \sin \theta_j, 0)}, \quad (17)$$

где $\theta_i \neq \theta_j$ и $\theta_i, \theta_j = \theta_1 - \theta_n$. Равенство (17) является однозначной функцией ϵ_s . Однако надо отметить, что соотношение

(17) не следует применять для оценки ϵ_s по данным на вертикальной поляризации. Это обусловлено тем, что угловые зависимости диэлектрической функции ММВ на вертикальной поляризации незначительно отличаются при различных влажностных условиях. Таким образом, даже минимальная инструментальная погрешность измерения удельной ЭПР в пределах ± 1 дБ приведет к большим различиям в оценках ϵ_s для всех угловых комбинаций. В этом случае предпочтительнее оценивать ϵ_s по данным для горизонтальной поляризации. После того как сформированы оценки для ϵ_s , можно легко получить значения и для второго неизвестного параметра шероховатости - σ_h или C из модельного уравнения.

В третьей главе исследованы экспериментальные статистические характеристики реальных сельскохозяйственных полей и их изменение во времени. Контактные измерения геометрических профилей проводились на сельскохозяйственных полях с черноземными почвами как вдоль, так и перпендикулярно визуально наблюдаемым бороздам обработки почвы. Использованный профилометр позволял описывать изменения высоты поверхности с точностью до 5 мм при шаге 10 мм. С целью попытки типизации и выявления характерных статистических закономерностей данные измерения подвергались классическому и авторегрессионному методам спектрального оценивания, получены аппроксимирующие выражения для соответствующих автокорреляционных функций. Анализ показал, что двумерные спектры поверхностных неровностей в самом общем виде можно рассматривать как

$$W(\lambda_x, \lambda_y) = \frac{I}{[1 + (\lambda_x/\lambda_0)^\alpha][1 + (\lambda_y/\lambda_0)^\alpha]} \quad (18)$$

где λ_0 является какой-то частотой нормировки, связанной с крупным масштабом поверхностных неровностей ($\lambda_0 \ll \lambda_x, \lambda_y$).

В случае обратного рассеяния спектр поверхностных неровностей (18) записывается как

$$W(\lambda, 0) = C / (\Lambda_0^\alpha + \lambda^\alpha) \approx C / \lambda^\alpha, \quad (19)$$

где $C = I \cdot \Lambda_0^\alpha$ (а это спектр фрактального вида). Стоит отметить частный случай, когда степенной показатель спектра $\alpha = 2$ (зачастую он таким и принимается). Тогда спектр (19) превращается в экспоненциальный, если $\Lambda_0 = 1/\ell_3$ и $C = 4 \cdot G_n^2$.

В главе проанализирован процесс "сглаживания" поверхности обработанного поля, обусловленный замыванием и разрушением структуры почвенного покрова под воздействием атмосферных условий. Рассмотрено и влияние степени эродированности почвы на характер и интенсивность этих процессов. Наблюдения показали, что динамика изменений шероховатости полей, когда они не подвергаются дополнительной обработке, целиком зависит от агрегатного и механического состава почв. Процентное содержание физической глины в почве является тем основным фактором, который определяет степень шероховатости полей после разрушения борозд и крупных комьев со временем под воздействием природных условий. На эродированных полях механический и агрегатный составы почвы, ее водно-физические свойства отличаются от аналогичных для незэродированных почв. Таким образом, в границах одних и тех же площадей, подверженных эрозии, после одинаковой обработки почвы со временем устанавливается различная по степени шероховатости. Ее корректная оценка позволяет выделить характер эрозионных процессов и динамику их развития. Результаты экспериментального исследования степени эродированности почвенного покрова, проведенного на эталонном участке (совхоз "Лесная стенка" Харьковской области) с использованием активной двухчастотной радиолокационной системы сантиметрового (3.2 см) и миллиметрового (8 мм) диапазонов,

подтвердили возможность применения многоканальных РЛ методов для выяснения характера и интенсивности эрозионных процессов. Для различных по степени эродированности участков поля, после одинаковой агрообработки в условиях высокого и приблизительно одинакового влагосодержания поверхностного почвенного слоя, получены значительные отличия в интенсивности рассеянного радиолокационного сигнала на обеих частотах и поляризациях. Значения σ° на горизонтальной поляризации по незэродированному участку превышали на несколько децибел аналогичные величины по слабо- и среднезэродированному, а по сильнозэродированному - в среднем на 7-8 дБ при $\lambda_i = 8$ мм и 2.5-3 дБ при $\lambda_i = 3.2$ см. На вертикальной поляризации тоже наблюдалась сильно выраженная зависимость удельной ЭПР от степени эродированности при $\lambda_i = 8$ мм и более слабая при $\lambda_i = 3.2$ см. Однако здесь, в отличие от горизонтальной поляризации, величины удельных ЭПР по сильнозэродированному участку превышают значения σ° средне- и слабозэродированных, которые, со своей стороны, выше удельных ЭПР для незэродированного участка. В среднем величины удельных ЭПР незэродированного участка поля на длинах волн $\lambda_i = 8$ мм и $\lambda_i = 3.2$ см были на 8-10 дБ ниже значения σ° по сильнозэродированному участку. Эти эффекты обусловлены различной скоростью протекания процессов замятия и разрушения продольной и поперечной (она имеет заметное влияние при рассеянии на вертикальной поляризации) структуры борозды поля на различных эродированных участках.

На основе различных экспериментальных данных для удельной ЭПР шероховатых поверхностей в третьей главе проверена практическая применимость и эффективность разработанных и теоретически обоснованных в диссертации многоканальных методов оценки диэлектрических и статистических характеристик поверхности.

При обработке результатов измерения удельных ЗПР проведено сравнение возможности фрактальной аппроксимации и чаще всего применяющихся в моделях рассеяния гауссовской и экспоненциальной для спектра поверхностных неровностей. Показано, что интерпретация данных измерения σ° на основе ММВ с использованием спектров фрактального вида позволяет повысить точность модельных оценок. При этом отмечено, что фрактальная аппроксимация особенно удобна и корректна, когда статистические характеристики поверхности рассеяния в значительной степени не отвечают модельным требованиям.

В четвертой главе приведены основные технические характеристики разработанной в Институте радиофизики и электроники АН Украины двухчастотной измерительной системы с непрерывным сигналом, работающей на длинах волн $\lambda_1 = 3.2$ см и $\lambda_2 = 8$ мм. Представлена методика калибровки аппаратуры методом сравнения и получены оценки точности определения удельной ЗПР поверхности. Рассмотрены основные методологические и аппаратурные требования к проведению измерений σ° для формирования точных и состоятельных оценок.

В заключении изложены основные выводы и результаты работы:

1. Анализ радиофизических методов СВЧ зондирования почв показал, что надежное и успешное решение задач почвенного мониторинга возможно при использовании совместной обработки данных многоканальных измерений. При этом дальнейшее совершенствование радиолокационных методов требует развития как строгих подходов, основанных на применении общей теории, так и экспериментальных исследований особенностей рассеяния сигналов почвами.

2. В рамках моделей Кирхгофа (геометрической и физической оптики) и модели малых возмущений, которые в настоящее

время имеет реальное практическое применение, разработаны два многоканальных метода оценки диэлектрических и статистических характеристик непокрытых растительностью поверхностей рассеяния.

3. Исследована частотно-влажностная зависимость диэлектрических функций в моделях Кирхгофа и ММВ и показано, что она является незначительной в микроволновом диапазоне.

4. При обработке экспериментальных данных для удельной ЭП шероховатых поверхностей доказана эффективность многоканального РЛ метода оценки характеристик поверхности, основанного на незначительной частотно-влажностной зависимости диэлектрических функций.

5. Показано, что использование спектров фрактального вида в ММВ дает лучшее согласование между экспериментальными данными удельных ЭП и соответствующими теоретическими оценками по сравнению с чаще всего применяющимися в практике гауссовской и экспоненциальной аппроксимациями для спектра поверхностных неровностей. При этом получены хорошие результаты даже в случаях, когда параметры поверхности в большой степени не отвечают требованиям модели.

6. Исследована динамика разрушения структур поверхности полей во времени и обнаружена связь скорости заматия почвенных неровностей и разрушения продольной и поперечной структуры борозды пашни от степени эродированности почвы.

7. Экспериментально доказаны возможности многоканальных радиолокационных методов для выявления процессов эрозии почвы.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Зердев Н.Г., Кулемин Г.П. Определение влажности почв многоканальными радиолокационными методами // Исследование Земли из космоса. - 1993. - № 1. - С. 90-98.

2. Зердев Н.Г., Кулемин Г.П. Радиолокационный метод определения влажности почв. - Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. - Сб. науч. тр. / АН УССР, ИРЭ. - Харьков. - 1990. - С. 5-8.
3. Зердев Н.Г., Кулемин Г.П., Харченко Т.Н. Определение пространственных статистических характеристик пашни. // Вс. научно-техн. конф. (Туапсе, сент. 1991 г.): Тез. докл. - Харьков. - 1991. - С. 196.
4. Зердев Н.Г., Кулемин Г.П. Определение статистических характеристик поверхности многоканальными радиолокационными методами. - Научное приборостроение в миллиметровых и субмиллиметровых диапазонах радиоволн. - Сб. науч. тр. / АН УССР, ИРЭ. - Харьков. - 1992. - С. 130-142.
5. Зердев Н.Г., Кулемин Г.П. Изучение характеристик почвенного покрова многочастотными радиолокационными методами. // Межд. конф. Спектр'92. (Минск, май 1992 г.): Тез. докл. - Харьков. - 1991. - С. 55-56.
6. Зердев Н.Г., Кулемин Г.П. Оценка влажности почв многочастотными радиолокационными системами. / Bulgarian Jour. of Physics. - Sofia, - 1993. - № 1.
7. Зердев Н.Г., Кулемин Г.П. Определение статистических характеристик поверхности многоканальными радиолокационными методами. // Научно-техн. конф. Приборы, техника и распространение ММ, СВМ волн (Харьков, 30.06-3.07.1992 г.): Тез. докл. - Харьков. - 1992. - С. 115.

Подп.в печ.10.07.93. Формат 60x84/16
Бум.офс. Офс.печ. Усл.-печ.л. 1,3
Уч.-изд.л.1,5 Тираж 100 экз. Заказ 106.
Бесплатно

Ротапринт ИРЭ АН Украины
Харьков-85, ул.Академика Проскуры, 12.

464058

AB 28.385

AB 28.385