

На правах рукописи



Атутов Евгений Борисович

**ОТРАЖАЮЩИЕ И ОСЛАБЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА ЛЕСНЫХ СРЕД
В МЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН**

01.04.03 - радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск - 2009

Работа выполнена в лаборатории радиофизики Отдела физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра Сибирского Отделения РАН, г. Улан-Удэ

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор, Ломухин Юрий Лупонович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Тельпуховский Евгений Дмитриевич

доктор физико-математических наук,
профессор, Сажин Виктор Иванович

Ведущая организация: Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
(ТУСУР), г. Томск

Защита диссертации состоится 17 декабря 2009 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.074.04 при Иркутском государственном университете по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Иркутского государственного университета.

Автореферат разослан 16 ноября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент



Мангазеев Б.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Леса являются важнейшим компонентом биосферы, продуцентом биомассы и кислорода. Очевидно, что для сохранения экологической роли лесов требуется обширная, всеобъемлющая, постоянно обновляющаяся информация о лесном фонде, на основе которой должны вырабатываться и приниматься оптимальные решения в частности по многоцелевому использованию лесных ресурсов. Одним из важнейших методов получения информации о состоянии леса является дистанционное радиозондирование.

Использование дистанционного зондирования направлено на решение двух основных задач: изучение статики лесов, т.е. закономерностей сложения современных лесных ландшафтов; изучение динамических процессов, протекающих в лесах, в целях контроля и управления лесными ресурсами.

В настоящее время установлена высокая информативность и сезонная независимость радиолокационного изображения леса в метровом диапазоне волн вследствие того что, волны данного диапазона обладают большей проникающей способностью, чем волны сантиметрового и оптического диапазонов [1].

Существующие в настоящее время теоретические модели, описывающие процессы распространения электромагнитных волн в лесных средах, можно разбить условно на два типа: приближение сплошных сред, и подходы, представляющие лес в виде набора случайно расположенных рассеивателей.

Приближение сплошной среды или системы слоев с некоторой эффективной комплексной диэлектрической проницаемостью сводится к представлению поля в лесу в виде многолучевой структуры, описывающей прямое прохождение через лес, отражение от границ земля – лес, лес – атмосфера и т.д.

Представление леса как системы сплошных слоев наиболее адекватно в длинноволновой части УКВ диапазона (приблизительно до 200МГц), когда влияние лесного слоя сводится к привнесению некоторой поправки к ослаблению, вызванной земной поверхностью; либо в случае плотного леса и когда характерный размер неоднородностей больше длины волны, а флуктуирующая часть диэлектрической проницаемости мала по сравнению с регулярной составляющей, т.е. при условиях применимости геометрикооптического приближения.

В случае, когда длина волны сопоставима с расстояниями между рассеивающими элементами, лесную среду нельзя считать сплошной. Второй тип теоретических моделей учитывает дискретность и неоднородность, образованную стволами, ветвями, расположение которых и ориентация суть величины случайные, как в пространстве, так и во времени. Помимо этого на ослабление волн в лесной растительности сказывается присутствие

подстилающей поверхности. Как правило, эта поверхность шероховатая и многослойная, состоящая из подлеска, валежника, листвы, корневой системы деревьев и самой почвы.

Одним из способов описания взаимодействия электромагнитных волн с лесным пологом как набором случайно расположенных рассеивающих элементов является метод передаточных матриц [2].

Классическим подходом описания в случайных дискретных средах (СДС) является решение волнового уравнения в приближении ряда многократного рассеяния [3]. Поскольку электромагнитные поля являются случайными величинами, исследователи рассчитывают их различные статистические характеристики. Данные модели применимы при любых соотношениях между длиной волны и плотностью структуры. Кроме того, в них может быть снято ограничение на величину флуктуирующей составляющей диэлектрической проницаемости. Однако отсутствие замкнутых аналитических представлений полей в рамках этих моделей: во-первых, делают анализ механизмов распространения весьма затруднительным; во-вторых, изучение особенностей распространения волн ограничивается относительно близкими расстояниями между корреспондирующими пунктами из-за громоздких численных расчетов (в основном, вследствие усреднения по ансамблям) [4].

Таким образом, исследования, направленные на получение аналитических выражений, описывающих процессы взаимодействия электромагнитных волн метрового диапазона с лесной растительностью, а также исследования связанные с экспериментальным получением знаний о электродинамических свойствах лесных покровов, являются актуальными как с практической, так и с теоретической точки зрения.

Целью работы является исследование ослабляющих и отражающих свойств лесных сред в метровом диапазоне электромагнитных волн.

Для достижения цели ставятся следующие **задачи**:

1. Определить среднее поле в СДС, состоящей из цилиндрических рассеивателей, расположенных случайным образом на границе изотропных полупространств.
2. Исследовать дистанционную зависимость ослабления среднего поля в лесных средах.
3. Исследовать отражение и преломление электромагнитных волн на границах лесных сред.

Методы исследования. При решении поставленных в работе задач использовались: статистическая теория распространения волн в случайно-неоднородных средах; асимптотические методы математической физики.

Экспериментальные исследования сводились к измерению уровня поля, излучаемого источником, как в лесу, так и на открытой местности.

В работе, при интерпретации результатов численного моделирования также привлекались экспериментальные данные, опубликованные другими авторами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. В работе впервые предложена электродинамическая модель леса, в основе которой лежит решение волнового уравнения в приближении однократного рассеяния с использованием условия погружения в плотноупакованную среду. Вследствие, чего было получено, аналитическое выражение, позволяющее рассчитывать среднее поле при любых удалениях от источника с учетом электрофизических и геометрических параметров деревьев и присутствия подстилающей поверхности.

3. Установлено явление увеличения амплитуды пространственных флуктуаций в переходной области дистанционной зависимости среднего поля.

4. Обнаружено, что ослабление среднего поля в СДС в зависимости от плотности носит квазипериодический характер.

5. Определены коэффициенты Френеля при отражении от границы «вакуум-анизотропная СДС». Обнаружено их квазипериодическая зависимость от плотности среды.

6. Обнаружено явление, аналогичное эффекту Брюстера, на границе «вакуум – анизотропная СДС».

Практическая значимость. Развита в работе методика расчета среднего поля в СДС и выявленные при этом механизмы распространения и рассеяния электромагнитных волн, могут быть использованы при разработке методов дистанционного зондирования природных сред, при оценке эффективности работы радиотехнических систем в лесных средах.

Результаты работы могут оказаться полезными при разработке электродинамических устройств на основе дискретных структур.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Решение волнового уравнения, записанного для СДС в приближении однократного рассеяния с использованием условия погружения в сплошную среду.

2. В дистанционной зависимости ослабления среднего поля точечного источника, находящегося в СДС, существует область, в которой возможно усиление пространственных флуктуаций среднего поля. Данная область является переходной между зоной экспоненциального ослабления поля и зоной со слабой зависимостью от дистанции.

3. Ослабление среднего поля точечного источника, находящегося в СДС, состоящей из цилиндров, в зависимости от плотности среды носит квазипериодический характер. При определенных соотношениях между плотностью и длиной волны среднее поле в среде может быть больше, чем в свободном пространстве.

4. Коэффициенты отражения в случае падения плоской электромагнитной волны на границу «вакуум - СДС» зависят от плотности среды по периодическому закону.

Достоверность результатов работы обеспечивается:

1. Согласием полученных теоретических и экспериментальных результатов с фундаментальными положениями теории распространения радиоволн в неоднородных средах.

2. Сравнением полученных результатов с независимыми экспериментальными данными, их соответствием и согласованностью.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации докладывались на: V Всероссийской конференции молодых ученых (Томск, 2005 г.); Научной сессии ТУСУР-2006 (Томск, 2006 г.); Научной сессии ТУСУР-2007 (Томск, 2007 г.); XIV Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Бурятия, 2007); Актуальные проблемы радиофизики-2008 (Томск, 2008).

Связь с плановыми работами. Основные результаты были получены при выполнении плановых работ, проводившихся в Отделе физических проблем БНЦ СО РАН. Исследования выполнялись в рамках плановых тем «Отражающие и поглощающие свойства природных сред Байкальского региона» и «Электродинамика лесных сред». Экспериментальные данные по ослаблению УКВ в лесу были получены при поддержке грантов РФФИ: №05-02-97205 «Исследование радиофизических свойств растительных сред Байкальского региона»; №08-02-98003-р-Сибирь_a «Радиозондирование земной поверхности в Байкальском регионе».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 18 работ. Пять работ опубликованы в изданиях рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора. Совместно с научным руководителем диссертационной работы был определен план, обсуждались и анализировались результаты исследований. Совместными усилиями были получены теоретические выкладки. Непосредственно автором проведены расчеты, эксперименты, обработка данных и их сравнение.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 105 страницах листа машинописного текста, иллюстрируется 38 рисунками и графиками, состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы из 94 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы её цель и задачи. Перечислены положения, выносимые на защиту. Приводится краткое содержание работы.

В первой главе приведен обзор работ по ослаблению и рассеянию радиоволн в лесных средах. Рассмотрены работы, в которых предложены модели лесных сред, проанализированы их недостатки. В частности, установлено, что в настоящее время отсутствуют работы, в которых даются выражения для функций ослабления поля диполя в лесной среде, описывающие дистанционные зависимости при любых расстояниях от источника, учитывающие наличие подстилающей поверхности, плотность частотную дисперсию и анизотропию лесной среды. Кроме того выясняется, что не достаточно детально изучены механизмы формирования поля вблизи границы «вакуум – анизотропная СДС». На основе проведенного обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе решена задача о среднем поле точечного источника в СДС (рис.1).

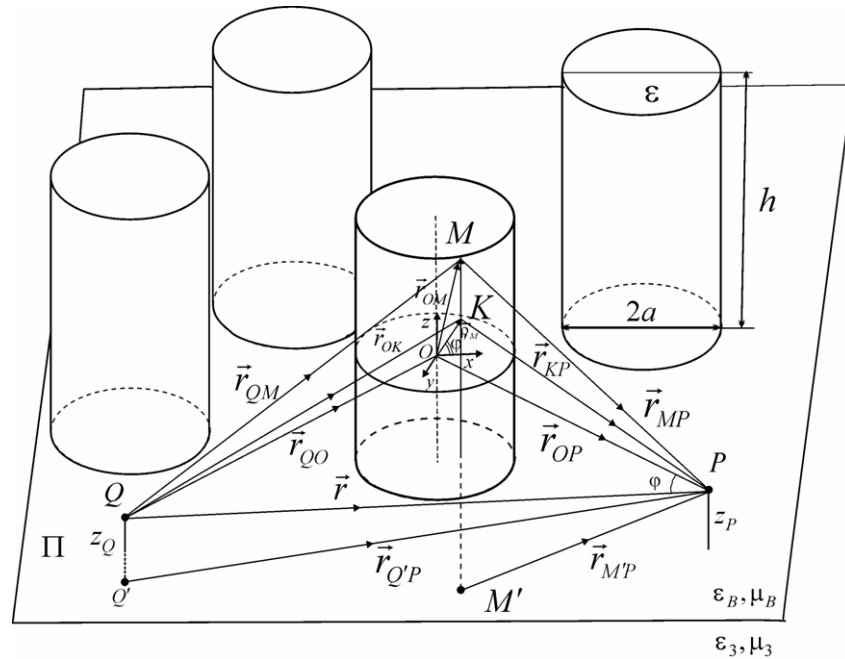


Рис.1. Модель СДС.

Слой образован диэлектрическими цилиндрическими элементами радиуса a , высотой h с абсолютной комплексной диэлектрической проницаемостью

(КДП) $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$. Неоднородности расположены в соответствии законом Пуассона на границе изотропных полупространств с КДП ε_B и $\varepsilon_3 = \varepsilon'_3 - i\varepsilon''_3$.

Решение волнового уравнения в СДС будем искать в виде ряда многократного рассеяния [3]. Ограничиваясь однократным рассеянием, но, введя множитель α , получим выражение для среднего поля

$$\langle U(\vec{r}, \delta) \rangle = U_0(\vec{r}) + \alpha \int_0^\infty f_1(r_{OP}, \delta) \int_0^{2\pi} f_2(\varphi) \int_{V_n} U_0(\vec{r}_{QM}) G(\vec{r}_{QM} - \vec{r}) dV_n d\varphi dr_{OP}. \quad (1)$$

Здесь \vec{r} - радиус-вектор точки наблюдения, \vec{r}_{QM} - радиус-вектор точки интегрирования, $U_0(\vec{r})$ - поле первичной волны, $U_0(\vec{r}_{QM})$ - поле первичной волны в точке \vec{r}_{QM} , $f_1(r_{OP}, \delta)$ - плотность вероятности распределения расстояний r_{OP} , δ - плотность среды, $f_2(\varphi)$ - плотность вероятности распределения углов между \vec{r} и \vec{r}_{OP} , $G(\vec{r}_{QM} - \vec{r})$ - функция Грина.

Выберем в (1) в качестве $U_0(\vec{r})$, $U_0(\vec{r}_{QM})$ и $G(\vec{r}_{QM} - \vec{r})$ следующие выражения:

$$U_0(\vec{r}) = \exp(i\omega t) \frac{\exp(-ik_0 |\vec{r}|)}{|\vec{r}|} \psi_0(\vec{r}, z_Q, z_P, k_0),$$

$$U_0(\vec{r}_{QM}) = \exp(i\omega t) \frac{\exp(-ik_0 |\vec{r}_{QM}|)}{|\vec{r}_{QM}|} \psi_1(\vec{r}_{QM}, z_Q, z_M, k_0),$$

$$G(\vec{r}_{QM} - \vec{r}) = -\frac{1}{4\pi} \frac{\exp(-ik_0 |\vec{r}_{QM} - \vec{r}|)}{|\vec{r}_{QM} - \vec{r}|} \psi_2(\vec{r}_{QM} - \vec{r}, z_M, z_P, k_0),$$

$$k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_B \mu_0}.$$

Здесь z_Q , z_P - высоты точек наблюдения и излучения над подстилающей поверхностью, z_M - высота точки интегрирования, функции ψ_0 , ψ_1 , ψ_2 - множители ослабления поля подстилающей поверхностью [5].

Для определения неизвестного множителя α положим в (1) $\delta = \delta_{np} = 1/(2a)^2$, $h \rightarrow \infty$, что соответствует бесконечно протяженной предельно упакованной среде. Такую среду можно считать сплошной с КДП ε . Тогда можем записать

$$U_{np}(\vec{r}) = \langle U(\vec{r}, \delta_{np}) \rangle, \quad (2)$$

где $U_{np}(\vec{r}) = \exp(i\omega t) \frac{\exp(-ik|\vec{r}|)}{|\vec{r}|} \psi_{np}(\vec{r}, z_Q, z_P, k)$, $k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu_0}$, $\delta_{np} = 1/(2a)^2$.

Здесь и далее индексом « np » будут обозначаться параметры предельно упакованной среды.

Из условия (2) определяем α . В результате имеем окончательное выражение для среднего поля:

$$\langle U(\vec{r}, \delta) \rangle = U_0(\vec{r})(1 - \beta) + \beta U_{np}(\vec{r}), \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\int_0^\infty f_1(r_{OP}, \delta) \int_0^{2\pi} f_2(\varphi) \int_{V_n} U_0(\vec{r}_{QM}) G(\vec{r}_{QM} - \vec{r}) dV_n d\varphi dr_{OP}}{\int_0^\infty f_1(r_{OP}, \delta) \int_0^{2\pi} f_2(\varphi) \int_{V_n} U_0(\vec{r}_{QM}) G(\vec{r}_{QM} - \vec{r}) dV_n d\varphi dr_{OP} \Big|_{\delta=\delta_{np}}^{\delta \rightarrow \infty}}.$$

Формула (3) благодаря условию (2) является непрерывной и равномерной по всем параметрам: КДП неоднородностей и подстилающей поверхности, геометрическим размерам цилиндрических рассеивателей, плотности среды, расстояния от источника до точки наблюдения.

Проводя приближенное интегрирование с учетом особенностей подынтегральной функции, окончательно имеем:

$$\langle U(\vec{r}) \rangle = \exp(i\omega t) \frac{\exp(-ik_0|\vec{r}|)}{|\vec{r}|} W,$$

где

$$W = \psi_0(\vec{r}, z_Q, z_P, k_0) B, \quad B = 1 + \left[\exp(i(k_0 - k)r) \frac{\psi_{np}(\vec{r}, z_Q, z_P, k)}{\psi_0(\vec{r}, z_Q, z_P, k_0)} - 1 \right] \beta, \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\Phi}{\Phi_{np}} \beta_0, \quad \beta_0 = \sqrt{\left(\frac{p_{np}}{p}\right)^3} \exp(-i(p - p_{np})) \frac{\sum_{n=0}^{\infty} i^{-n} J_n(p)}{\sum_{n=0}^{\infty} i^{-n} J_n(p_{np})},$$

$$\Phi = \left[\frac{F(\infty, \xi_1) - F(\infty, \xi_2)}{\sqrt{r^2 - \tilde{r}^2}} + \frac{F(\infty, \xi_3) - F(\infty, \xi_4)}{r + \tilde{r}} \right], \quad \Phi_{np} = \left[\frac{F(\infty, \xi_5)}{\sqrt{r^2 - \tilde{r}_{np}^2}} + \frac{F(\infty, \xi_6)}{r + \tilde{r}_{np}} \right],$$

$$p = \frac{k_0 \chi}{2\sqrt{\delta}}, \quad p_{np} = \frac{k_0 \chi_{np}}{2\sqrt{\delta_{np}}}, \quad \chi = \sqrt{1 + \left(\frac{z_Q - z_P}{r + \tilde{r}}\right)^2}, \quad \chi_{np} = \sqrt{1 + \left(\frac{z_Q - z_P}{r + \tilde{r}_{np}}\right)^2},$$

$$F(\infty, \xi_i) = \int_{-\infty}^{\xi_i} \exp\left(-i \frac{\pi}{2} t^2\right) dt,$$

$$\xi_1 = \sqrt{\frac{k_0 \chi}{\pi} \frac{r}{(r-\tilde{r})\tilde{r}}} \left(h - \frac{\tilde{r}z_Q + (r-\tilde{r})z_P}{r} \right), \xi_2 = -\sqrt{\frac{k_0 \chi}{\pi} \frac{r}{(r-\tilde{r})\tilde{r}}} \frac{\tilde{r}z_Q + (r-\tilde{r})z_P}{r},$$

$$\xi_3 = \sqrt{\frac{k_0 \chi}{\pi} \frac{(r+2\tilde{r})}{(r+\tilde{r})\tilde{r}}} \left(h - \frac{\tilde{r}z_Q + (r+\tilde{r})z_P}{r+2\tilde{r}} \right), \xi_4 = -\sqrt{\frac{k_0 \chi}{\pi} \frac{(r+2\tilde{r})}{(r+\tilde{r})\tilde{r}}} \frac{\tilde{r}z_Q + (r+\tilde{r})z_P}{r+2\tilde{r}},$$

$$\xi_5 = -\sqrt{\frac{k_0 \chi r}{\pi (r-\tilde{r}_{np})\tilde{r}_{np}}} \frac{\tilde{r}_{np}z_Q + (r-\tilde{r}_{np})z_P}{r}, \xi_6 = -\sqrt{\frac{k_0 \chi (r+2\tilde{r}_{np})}{\pi (r+\tilde{r}_{np})\tilde{r}_{np}}} \frac{\tilde{r}_{np}z_Q + (r+\tilde{r}_{np})z_P}{r+2\tilde{r}_{np}},$$

$\tilde{r} = 1/(2\sqrt{\delta})$ - среднее расстояние между рассеивающими элементами,
 $\tilde{r}_{np} = 1/(2\sqrt{\delta_{np}})$ - расстояние между рассеивающими элементами при плотной упаковке, $J_n(p)$ - функция Бесселя.

В §2.2 работы проводится анализ (4), который показывает, что среднее поле в СДС представляет собой суперпозицию прямой волны, полей рассеянных неоднородностями и дифракционных волн от верхних и нижних концов цилиндров. При этом наибольший вклад в точке приема вносят элементы, расположенные на линии «источник - приемник» в ближайшей окрестности корреспондирующих пунктов.

В §.2.3 и §.2.4 рассматривается поведение множителя дополнительного ослабления точечного источника в зависимости от плотности СДС и дистанции.

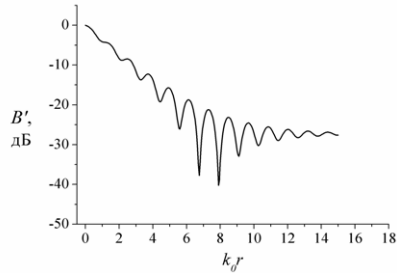


Рис. 2. Дистанционная зависимость дополнительного ослабления среднего поля в СДС.

На рис.2 представлена расчетная зависимость $B' = 20 \lg |B|$ от $k_0 r$ - расстояния между источником и приемником, для случая когда $f = 10 \text{ ГГц}$, $a = 5 \times 10^{-4} \text{ м}$, $\delta = 3 \times 10^6 \text{ м}^{-2}$, $h = \infty$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_0$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(40 - i \frac{3}{2\pi f \varepsilon_0} \right).$$

Из рисунка видно, что в дистанционной зависимости среднего поля в СДС выделяется

3 зоны: $0 < k_0 r < 4$ - зона экспоненциального затухания; область $4 < k_0 r < 13$ - переходная зона с пространственными флуктуациями; $k_0 r > 13$ - зона рассеянного поля со слабой зависимостью ослабления от расстояния.

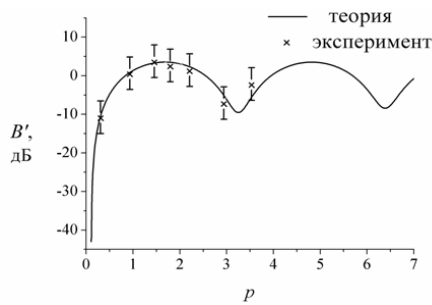


Рис.3. Дополнительное ослабление среднего поля в зависимости от плотности СДС.

На рис.3 представлены теоретические и экспериментальные зависимости B' от параметра ρ в случае бесконечной проводимости включений при $f = 10 \Gamma\Gamma\text{ц}$, $a = 5 \times 10^{-4} \text{ м}$, $h = \infty$, $k_0 r = 23$.

Видно, что ослабление среднего поля в зависимости от плотности носит квазипериодический характер. При этом B' может быть больше нуля, т.е. СДС обладает фокусирующим

действием.

Третья глава посвящена исследованию ослабления среднего поля в лесных средах.

В §3.1 предлагается модель лесного покрова, которая учитывает наличие подстилающей земной поверхности, таксационные параметры леса.

Деревья моделируются двумя областями: ствол и крона. Ствол - это цилиндр радиуса a_1 , высотой h_1 с КДП ε_1 . Крона - композитная структура, состоящая из внешнего цилиндра радиуса a_2 , высотой $h - h_1$ с ε_2 и внутреннего цилиндра радиуса a_1 с ε_1 такой же высоты что и крона.

КДП объема, содержащего как ствол, так и кроны рассчитывается как результирующая:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{V_1 \varepsilon_1 + V_2 \varepsilon_2}{V_1 + V_2}.$$

Крона в свою очередь будет представлять собой композит воздуха - ε_B и ветвей - $\varepsilon_{\text{вт}}$, поэтому считаем ε_2 также как результирующую. Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\text{вт}}$ - это композит голой ветви и хвои или листьев.

В метровом диапазоне КДП древесины описывается формулой

$$\varepsilon_1 \approx \varepsilon_0 \left(20 \div 40 - i \left(\frac{1.5}{f_{\Gamma\Gamma\text{ц}}} + 2 f_{\Gamma\Gamma\text{ц}} \right) \right),$$

где $f_{\Gamma\Gamma\text{ц}}$ - частота в гигагерцах [6].

В §3.2 в связи с выбранной моделью дерева проведено обобщение метода расчета среднего поля на случай двухслойного лесного покрова путем введения двух условий погружений в плотноупакованную среду.

В §3.4 представлены экспериментальные и расчетные дистанционные зависимости ослабления среднего поля для различных типов лесов. В результате исследований установлено, что вид дистанционных зависимостей в каждом типе лесов различен. Это определяется многими факторами: плотностью, состоянием подстилающей поверхности, таксационными параметрами деревьев и т.д. Анализируя полученные результаты можно установить общие свойства. Так если плотность лесов близка к предельной (кроны деревьев касаются друг друга), то дистанционные зависимости среднего поля характеризуются следующими особенностями: выделяется зона, где ослабление носит экспоненциальный характер, с увеличением расстояния наблюдается замедление скорости ослабления и пространственные возмущения – зона существенного интерференционного взаимодействия прямой волны и волн рассеянных деревьями; при дальнейшем увеличении расстояния ослабление слабо зависит от дистанции – зона, где прямая волна значительно слабее рассеянных компонент.

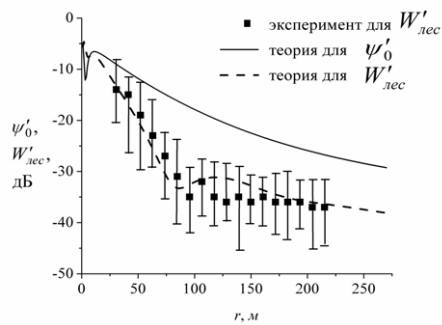


Рис. 4. Дистанционная зависимость ослабления среднего поля в смешанном лесу.

На рис.4 для примера приведены экспериментальные и теоретические данные ослабления среднего поля с дистанцией в смешанном лесу состоящего из берез, сосен, осин. Расчетные зависимости $\psi'_0 = 20 \log_{10} |\psi_0|$ и $W'_{лес} = 20 \log_{10} |W_{лес}|$ от r , выполнены для следующих параметров леса: средняя высота деревьев - $h = 11 м$, высота стволов - $h_1 = 0.2 м$, радиус стволов - $a_1 = 0.065 м$, радиус кроны -

$$a_2 = 1.58 м, \quad \text{плотность} - \delta_1 = 0.09 м^{-2}, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_0 \left(30 - i \frac{0.051}{2\pi f \varepsilon_0} \right), \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_0,$$

$\varepsilon_3 = \varepsilon_0 \left(2.2 - i \frac{0.099}{2\pi f \varepsilon_0} \right)$. Высота источника и точки наблюдения над подстилающей поверхностью $z_Q = z_P = 2 м$, частота излучения $f = 110 МГц$, поляризация вертикальная.

Из рис.4 видно, что в дистанционной зависимости среднего поля выделяются три характерные области. В области $0 м < r < 75 м$ наблюдается быстрое затухание; для $r > 120 м$ - скорость затухания значительно замедляется; и в переходной области $75 м < r < 120 м$ имеют место пространственные флуктуации поля.

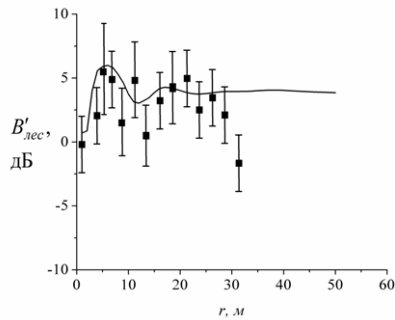


Рис. 5. Дистанционная зависимость множителя дополнительного ослабления среднего поля в редком лесу.

На рис.5 показана экспериментальная и теоретическая дистанционная зависимость множителя дополнительного ослабления в случае лесного массива состоящего из берез и осин с параметрами: $h = 17 м$, $\delta_1 = 0.05 м^{-2}$, $a_1 = 0.2 м$, $\epsilon_2 = \epsilon_0$, $\epsilon_3 = \epsilon_0 \left(10 - i \frac{0.3}{2\pi f \epsilon_0} \right)$. Измерения проводились при $f = 152 МГц$, $z_Q = z_P = 2 м$ и поляризации, когда

вектор \vec{E} параллелен стволам. Каждая экспериментальная точка это результат усреднения 24 реализаций.

Из графика следует, что большая часть теоретических и экспериментальных значений $B'_{лес} > 0$, т.е. наблюдается фокусировка волн в лесной среде. Это явление аналогично эффекту увеличения когерентности [7].

Четвертая глава посвящена исследованию особенностей отражения и преломления среднего электромагнитного поля на границе «вакуум – анизотропная СДС».

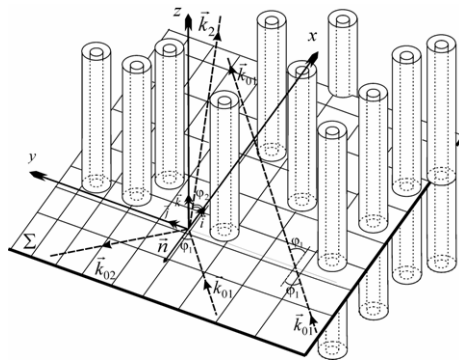


Рис.6. Падение плоской волны на СДС.

Рассматривается случай падения плоской электромагнитной волны (рис.6). Рассеивающие элементы конечной высоты предполагаются анизотропными структурами типа одноосных кристаллов. Оптическая ось направлена по оси цилиндров.

В §4.1 используя метод погружения в предельно упакованную среду, определяется поле плоской электромагнитной волны в СДС рассеивающие элементы которой, анизотропные:

$$\langle \vec{E}(\vec{r}) \rangle = \vec{E}_0(k_0\vec{r})(1 - \beta_3) + \beta_3[\vec{E}_{1c}(k_1\vec{r}) + i\vec{E}_{2c}(k_2\vec{r})], \quad (5)$$

$\vec{E}_{1c}(k_1\vec{r})$, $\vec{E}_{2c}(k_2\vec{r})$ - собственные (нормальные) плоские волны в сплошной анизотропной среде,

$$\beta_3 = \sqrt{\left(\frac{p_{np.3}}{p_3}\right)^3} \exp(-i(p_3 - p_{np.3})) \frac{\sum_{n=0}^{\infty} i^{-n} J_n(p_3)}{\sum_{n=0}^{\infty} i^{-n} J_n(p_{np.3})} \sqrt{2} \exp\left(-i\frac{\pi}{4}\right) \int_0^C \exp\left(-i\frac{\pi}{2}t^2\right) dt,$$

$$C = \sqrt{\frac{1}{\pi p_3}} k_0 h, \quad p_3 = \frac{k_0}{2\sqrt{\delta_3}}, \quad p_{np.3} = \frac{k_0}{2\sqrt{\delta_{np.3}}}.$$

Дисперсионные законы: $k_1 = f(\hat{\varepsilon}(\omega))$ и $k_2 = f(\hat{\varepsilon}(\omega))$ определяются из решения задачи на собственные поля в сплошной анизотропной среде.

КДП неоднородностей представляется как

$$\hat{\varepsilon}_{\varepsilon\phi} = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2 (\hat{\varepsilon}_1 - \hat{\varepsilon}_2) + \hat{\varepsilon}_2, \quad \hat{\varepsilon}_1 = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} \varepsilon_1^\perp & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_1^\perp & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_1^\parallel \end{pmatrix}, \quad \hat{\varepsilon}_2 = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} \varepsilon_2^\perp & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2^\perp & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_2^\parallel \end{pmatrix},$$

$\hat{\varepsilon}_1, \hat{\varepsilon}_2$ - диагональные тензоры.

В §4.2 работы определяются коэффициенты отражения, и прохождения по среднему полю на границе «вакуум - анизотропная СДС». Рассматриваются две поляризации: вертикальная, когда $\vec{E} = \{0, 0, E_z\}$, $\vec{H} = \{H_x, H_y, 0\}$ и горизонтальная - когда $\vec{E} = \{E_x, E_y, 0\}$, $\vec{H} = \{0, 0, H_z\}$. Волна падает перпендикулярно оптической оси.

В результате для вертикальной поляризации получены коэффициенты отражения и прохождения в виде

$$V_\perp = \beta_3 \frac{k_0 \cos(\varphi_1) - k_2^\perp \cos(\varphi_{2,\perp})}{2k_0 \cos(\varphi_1) + \beta_3(k_2^\perp \cos(\varphi_{2,\perp}) - k_0 \cos(\varphi_1))}, \quad T_\perp = 1 - V_\perp, \quad (6)$$

$$k_2^\perp = \omega \sqrt{\varepsilon_{\varepsilon\phi}^\parallel \mu_0}, \quad \cos(\varphi_{2,\perp}) = \sqrt{1 - \left(\frac{k_0}{k_2^\perp}\right)^2 \sin^2(\varphi_1)}, \quad \varphi_1 - \text{угол падения.}$$

Для горизонтальной поляризации:

$$V_\parallel = \beta_3 \frac{k_0 \cos(\varphi_1) - k_1^\parallel \cos(\varphi_{2,\parallel})}{2k_0 \cos(\varphi_1) + \beta_3(k_1^\parallel \cos(\varphi_{2,\parallel}) - k_0 \cos(\varphi_1))}, \quad T_\parallel = 1 - V_\parallel, \quad (7)$$

$$k_{\parallel}^{\perp} = \omega \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}^{\perp} \mu_0}, \quad \cos(\varphi_{2,\parallel}) = \sqrt{1 - \left(\frac{k_0}{k_{\parallel}^{\perp}}\right)^2 \sin^2(\varphi_1)}.$$

В §4.3 и §4.4 исследуется зависимость коэффициентов отражения от плотности среды и от угла падения. На рис.7 и 8 показаны зависимости величины $V'_{\perp} = 20 \lg |V'_{\perp}|$, $V'_{\parallel} = 20 \lg |V'_{\parallel}|$, от параметра p_3 и от угла падения, для $f = 110 \text{ МГц}$, $a_1 = 0.09 \text{ м}$, $a_2 = 1.42 \text{ м}$,

$$\hat{\varepsilon}_1 = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} 20 - i \frac{0.055}{2\pi f \varepsilon_0} & 0 & 0 \\ 0 & 20 - i \frac{0.055}{2\pi f \varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 40 - i \frac{0.024}{2\pi f \varepsilon_0} \end{pmatrix}, \quad \hat{\varepsilon}_2 = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

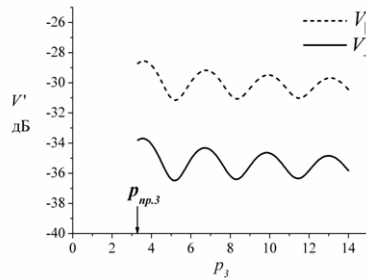


Рис.7. Зависимость коэффициентов отражения от плотности при $\varphi_i=0$.

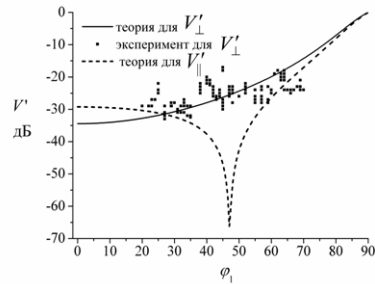


Рис.8. Зависимость коэффициентов отражения от угла падения при $p_3=7$.

Из рис.7 видно, что коэффициенты отражения от СДС с изменением плотности носят осциллирующий характер. Объясняется это тем, что среднее поле есть результат интерференции прямых волн и волн, рассеянных дискретными неоднородностями. При этом случайная среда с данной плотностью будет эквивалентна некоторой квазипериодической структуре со средним расстоянием между элементами равными $1/(2\sqrt{\delta_3})$. Из (6) и (7) следует, что если $p_3 - p_{np,3} \approx \pi n$, то при $n=1,3,5\dots$ будут наблюдаться максимумы коэффициентов отражения и, соответственно, при $n=2,4,6\dots$ - минимумы. Эти условия аналогичны условию Вульфа - Брэггов.

На рис.8 видна хорошая сходимость расчетной зависимости и экспериментальных данных для вертикальной поляризации заимствованных

из [8]. В случае горизонтальной поляризации в угловой зависимости коэффициента отражения при $\varphi_1 = 47^\circ$ наблюдается минимум - явление аналогичное эффекту Брюстера.

В §4.5 приводятся данные о поведении среднего поля вблизи границы «воздух – реальная лесная среда» при нормальном падении к границе плоской электромагнитной волны.

На рис. 9 представлены поведения полей $B'_y = 20 \lg \langle \langle E_y \rangle \rangle / E_0$, $B'_z = 20 \lg \langle \langle E_z \rangle \rangle / E_0$ вблизи границы свободного пространства и лесного массива. Расчеты выполнены для случая: $f = 152 \text{ МГц}$, $a_1 = 0.09 \text{ м}$, $a_2 = 1.42 \text{ м}$, $p_3 = 4.3$,

$$\hat{\varepsilon}_1 = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} 30 - i \frac{0.091}{2\pi f \varepsilon_0} & 0 & 0 \\ 0 & 30 - i \frac{0.091}{2\pi f \varepsilon_0} & 0 \\ 0 & 0 & 20 - i \frac{0.085}{2\pi f \varepsilon_0} \end{pmatrix}, \quad \hat{\varepsilon}_2 = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

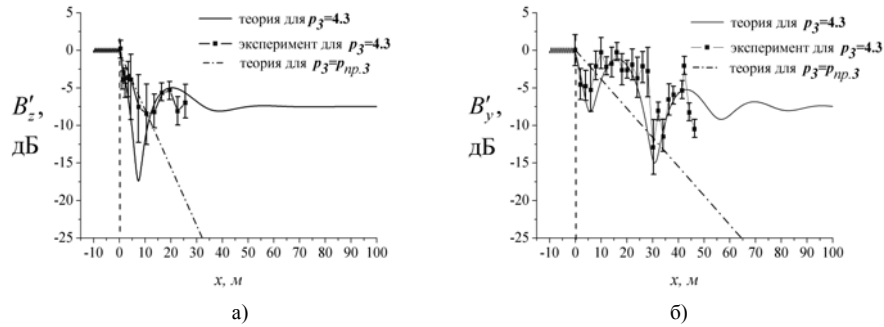


Рис. 9. Дистанционная зависимость дополнительного ослабления среднего поля вблизи границы «воздух- лес».

Здесь вертикальные пунктирные линии показывают границу раздела сред. Каждая экспериментальная точка на рис. 9а получена усреднением по 22 реализациям, на рис. 9б - по 18 реализациям.

Видно, что среднее поле в СДС вблизи границы испытывает пространственные флуктуации, затухающие по мере углубления в среду. В дальней зоне ($x > 80 \text{ м}$) уровень полей при обеих поляризациях становится одинаковым. Таким образом, имеет место существенное отличие поведения

среднего поля вблизи границы СДС от его поведения в случае границы со сплошной средой.

Основные результаты и выводы

1. Предложен модифицированный метод расчета среднего поля в СДС, в приближении однократного рассеяния и применения условия погружения в предельно упакованную структуру. Данный подход позволил получить аналитическое выражение, позволяющее рассчитывать средние поля при любых удалениях от источника.

2. Предложена модель лесной среды, как совокупность случайно расположенных по закону Пуассона композитных цилиндрических элементов на подстилающей земной поверхности. Внутренние цилиндры соответствуют стволам деревьев, внешняя оболочка - кроне. Диэлектрическая проницаемость композитных элементов среды определяется как результирующая. На основе данной модели проведены расчеты дистанционной зависимости ослабления среднего поля в реальном лесном слое, которые подтверждаются экспериментальными данными.

3. Установлено, что поле в таких средах представляет собой суперпозицию двух типов волн: прямых и рассеянных с различными характерами дистанционной зависимости. Прямая компонента затухает с расстоянием по экспоненциальному закону, уменьшение по амплитуде рассеянной компоненты описывается степенной зависимостью от расстояния. Между данными областями существует переходная зона, где прямая и рассеянная компоненты сравниваются и в результате интерференции этих волн усиливаются пространственные флуктуации поля.

4. Показана возможность проявления фокусировки волн в реальном лесу. На примере модели СДС установлено, что ослабление среднего поля в зависимости от плотности среды носит квазипериодический характер. При этом имеет место как ослабляющее, так фокусирующее и действие СДС.

5. Установлено что коэффициенты отражения в случае падения плоской электромагнитной волны на границу СДС зависят от плотности среды по периодическому закону.

6. Выявлен минимум в угловой зависимости коэффициента отражения при горизонтальной поляризации - явление аналогичное эффекту Брюстера.

7. Обнаружен краевой эффект заключающийся в том что среднее поле в анизотропной СДС вблизи границы испытывает пространственные флуктуации. Эти флуктуации затухают по мере углубления в среду, при этом уровень среднего поля становится одинаковым для различных поляризаций. Протяженность области с пространственными колебаниями среднего поля при горизонтальной поляризации больше чем при вертикальной поляризации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Атутов Е.Б., Ломухин Ю.Л. Пространственные флуктуации среднего поля в случайной дискретной среде // Известия высших учебных заведений. Физика. Приложение. -2006. -№ 3. -С. 88-90.
2. Ломухин Ю.Л., Атутов Е.Б. Квазипериодическая зависимость поля точечного источника от плотности случайной дискретной среды // Письма в журнал технической физики. -2007. -№3,Т.33. -С. 15-21.
3. Атутов Е.Б., Ломухин Ю.Л. Среднее поле в лесной среде // Радиотехника и электроника. -2007. -№ 11,Т. 52. -С.1360-1366.
4. Атутов Е.Б., Ломухин Ю.Л. Фокусировка волн лесными средами // Известия высших учебных заведений. Физика. -2008. -№ 9/2. -С. 88-90.
5. Ломухин Ю.Л., Атутов Е.Б. Отражение и прохождение плоских волн на границе анизотропных случайных дискретных сред // Журнал технической физики. -2009. -№ 6,Т.79. -С.135-140.
6. Lomukhin Yu.L., Atutov E.B. Electrodynamics of the forest medium // Proc. SPIE. -2007. -Vol.3. -P.393-395.
7. Ломухин Ю.Л., Атутов Е.Б. Фокусировка волн в случайных дискретных средах // XXI Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн»: Тез. докл. -Йошкар-Ола, 25-27 мая 2005 г. - Т.2. -С.365-370.
8. Ломухин Ю.Л., Атутов Е.Б. Когерентные эффекты при распространении электромагнитных волн в лесных средах // XXII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн»: Тезисы докладов. -Ростов-на-Дону, 18-22 сентября 2008 г. -Т.2. -С.365-370.
9. Atutov E.B., Vetlujskiy A.Yu., Lomukhin Yu.L. Attenuation of waves in the forest medium // International Seminar “Days of Diffraction- 2006”: Abstracts.- St. Petersburg, May 30- June 2, 2006. -P.12-13.
10. Atutov E.B., Vetlujskiy A.Yu., Lomukhin Yu.L. Localization of radiation near border of the stochastic discrete medium // International Seminar “Days of Diffraction- 2006”: Abstracts.- St. Petersburg, May 30- June 2, 2006. -P.13-14.
11. Lomukhin Yu.L., Atutov E.B. Electrodynamics of forest medium // XIV International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”: Abstracts.- Buryatia, 24-29 June 2007. -P.25-27.
12. Atutov E.B., Lomukhin Yu.L. Reflection and Refraction of plane waves on side Boundaries of the forest media// XIV International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”: Abstracts. -Buryatia, 24-29 June 2007. -P.27-28.
13. Атутов Е.Б., Ломухин Ю.Л. Погонное ослабление электромагнитных волн УКВ - диапазона в лесной среде // Научная сессия ТУСУР-2006: Сб. докл. - Томск, 4 - 7 мая 2006 г. -Ч. 1. -С.15-17.

14. Атутов Е.Б., Ломухин Ю.Л. Отражение и преломление плоских волн на границе случайных дискретных сред // Научная сессия ТУСУР-2007: Сб. докл.-Томск, 4 - 7 мая 2007 г. -Ч.1. -С.8-11.

15. Атутов Е.Б. Фотоно- кристаллический волновод // IV конференция по фундаментальным и прикладным проблемам физики (молодых ученых, аспирантов и студентов): Сб. докл.- Улан-Удэ, 2007. -С.105-109.

16. Бимбаев Д.Д., Атутов Е.Б. Радиолокационное отражение от лесного покрова земли // IV конференция по фундаментальным и прикладным проблемам физики (молодых ученых, аспирантов и студентов): Сб. докл.- Улан-Удэ, 2007. -С.109-112.

17. Дариев Б.Г., Атутов Е.Б. Прозрачность лесного полога // IV конференция по фундаментальным и прикладным проблемам физики (молодых ученых, аспирантов и студентов): Сб. докл. -Улан-Удэ, 2007. - С.112-115.

18. Атутов Е.Б., Басанов Б.В. Преломление плоских волн на границе лесных сред // Вестник Бурятского Государственного Университета. №6(52). - 2007. -С.72-73.

Список цитируемой литературы

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

2. Иванов В.К., Кучук Г.А., Стадник А.М., Яцевич С.Е. Методы многочастотного радиолокационного дистанционного зондирования лесов. // Успехи современной радиоэлектроники. -2005. -№7. -С.57-72.

3. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Случайные поля. М. : Наука, 1978. 463 с.

4. Магазинникова А.Л. Статистические методы расчета УКВ полей в лесных районах / Дисс.канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 1998.

5. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности М.: Наука, 1978. 546 с.

6. Altman G., Schneider A. Biophysical characterization of forests. //Proc. IGARSS'1987. -New-York, USA. 1987. -P. 821-826.

7. Кузьмин В.Л. Романов В.П. Когерентные эффекты при рассеянии света в неупорядоченных системах // Успехи физических наук. -1996. - №9,Т.166. -С.247-278.

8. Хомяк Е.М., Плетнев В.И., Доржиев Б.Ч. Рассеивающие свойства лесной растительности в УКВ диапазоне. // Конференция «Ультракороткие радиоволны и электромагнитная совместимость»: Тез. докл. -Улан-Удэ, 1981. -С.166-168.