

ПРЕДИСЛОВИЕ

*Нет конца лесным тропинкам.
Только встретить до звезды
Чуть заметные следы...
Внемлет слух лесным былинкам.*

А. Блок

Проблема распространения радиоволн (РРВ) в лесах (лесных массивах) в последние годы не только не потеряла своей актуальности, но и становится все более важной в таких областях науки и техники, как беспроводные системы связи, дистанционное зондирование и обнаружение объектов.

Леса как живые растительные среды представляют собой гетерогенные системы, состоящие из несущей среды — воздуха и из случайно распределенных в пространстве и имеющих различную форму, размеры и пространственную ориентацию растительных элементов (стволов, ветвей, листьев, игл и пр.). Как известно, свойства лесных массивов зависят от их возраста, времен года, погодных условий, ветровых нагрузок и пр., т. е. меняются случайным образом в пространстве и во времени. Это приводит к тому, что за счет механизмов РРВ в лесах, таких как многократное рассеяние, дифракция и поглощение электромагнитных волн (ЭМВ) элементами лесной растительности, амплитуды и фазы распространяющихся в них радиоволн претерпевают пространственно-временные флуктуации, причем с повышением рабочих частот глубина этих флуктуаций возрастает.

Указанные особенности РРВ в лесах играют важную роль в таких областях, как:

- системы мобильной связи (любому пользователю сотовой сети мобильной связи известно, что в лесу часто прекращается связь, и поэтому антенны базовых станций в районах лесных насаждений обычно подняты на высоту примерно 100 м);
- системы радиорелейной связи (когда требуется, чтобы антенные системы были подняты на такую высоту, чтобы полог лесных насаждений не попадал в первую зону Френеля);
- радиолокационные системы (особенно радиолокационные системы обнаружения низколетящих целей, в главные лепестки диаграмм направленности их антенн не должны попадать области лесной растительности);
- космические системы связи (навигационной, мобильной и телевизионной радиосвязи).

Достаточно активно развивается область СВЧ радиометрического дистанционного зондирования лесных насаждений, которая, ис-

пользуя флуктуации амплитуды и фазы отраженных от лесных массивов ЭМВ, позволяет определить таксационные и биометрические показатели лесов.

Следует отметить еще одну из интересных и перспективных областей — это радиоинтроскопия объектов в лесных массивах.

В данной книге делается попытка дать единое и систематическое изложение основных проблем распространения радиоволн в лесных массивах.

Первая глава книги посвящена растительному миру Земли, лесам России, структурам лесных насаждений и их основным лесотехническим характеристикам. Задача этой главы состоит в том, чтобы в сжатом виде описать особенности лесов, их типов, таксационных и биометрических показателей, которые в конечном счете влияют на электродинамические характеристики лесных массивов.

Как показывает практика, структуру электромагнитных волн, распространяющихся в лесных массивах, в общем случае описать невозможно. Поэтому построить строгую математическую модель РРВ в лесах не представляется возможным и, естественно, в последующих четырех главах будут рассматриваться различные приближенные математические модели.

Во *второй главе* исследуются электрофизические характеристики лесных массивов как линейных гетерогенных диэлектрических сред. Рассматриваются приближенные математические модели, на основе которых предлагаются аналитические выражения для расчетов эффективной относительной диэлектрической проницаемости как элементов лесной растительности, так и всей их совокупности.

В *третьей главе*, небольшой по объему, дается классификация математических моделей (детерминированных, статистических, полудетерминированных, полустатистических, полуэмпирических и эмпирических) распространения радиоволн в лесах и пределы их применимости.

Четвертая глава посвящена рассмотрению детерминированных математических моделей при сквозном и наклонном распространении радиоволн в лесных массивах. В основу ряда из этих моделей (при сквозном распространении) положены методы приближенных решений уравнений Максвелла для монохроматических электромагнитных волн при различных структурах лесного массива и в различных диапазонах рабочих частот. Другая часть детерминированных моделей базируется на следующих методах: на методе конечных разностей во временной области (FDTD), на методе решения параболического уравнения (PE) и (при наклонном падении) на дифракционных методах (GTD, UTD и др.).

В пятой главе рассматриваются статистические математические модели SMM/T/R (T — through, R — reflection) распространения радиоволн в лесных массивах, которые можно условно разделить на две основные группы:

Первая группа — SMM/T объединяет модели SMM1, SMM7, SMM8, SMM10, SMM11, SMM12, SMM14, SMM15, SMM16, SMM17, SMM18. Эти модели можно отнести к беспроводным системам связи (сотовым сетям мобильной связи, WiFi, WiMAX, радиорелейным системам), в которых рассматривается сквозное (T — through) и наклонное распространение радиоволн в лесных массивах и учитываются такие явления, как затухание, рассеяние, отражение и дифракция ЭМВ:

- в SMM1 модели получено аналитическое выражение для мощности монохроматического радиосигнала в точке приема при отражении от лесного массива, как случайно-неоднородной квазисплошной среды определенной конфигурации и объема;
- в SMM7 модели, в приближении Рытова, получены выражения для когерентной составляющей эмв распространяющейся в случайно-неоднородной диэлектрической среде, при случайных флуктуациях диэлектрической проницаемости первого порядка малости, т. е. приближение Рытова позволяет оценить когерентную составляющую радиосигнала, распространяющегося в лесных массивах при их малых плотностях, когда флуктуации эффективного значения показателя преломления являются величинами первого порядка малости, а сам лесной массив является неоднородной слабодисперсной средой со статистически расположенными неоднородностями (деревьями и их элементами);
- в SMM8 модели использование теории многократного рассеяния Тверского для решения электродинамической задачи по распространению радиоволн в лесных массивах в конечном счете приводит к выражениям, подтверждающим детерминированный подход к оценке затухания радиоволн в лесу, так как когерентная интенсивность радиоволны экспоненциально меняется в зависимости от концентрации деревьев и их сечения поглощения при вариациях глубины распространения. Вся сложность задачи по определению среднего значения квадрата когерентной составляющей напряженности электрического поля состоит в четком знании эффективной площади рассеяния, которая меняется в зависимости от структуры, формы и влажности деревьев;
- в SMM10 модели рассматривается распространение эмв из воздушного полупространства падающих на плоскую границу полупространства лесного массива, так как базовое уравнение (RET) модели выражается в терминах удельной интенсивности,

то результирующая интенсивность в точке пространства, окружающей лесной растительностью, определяется как сумма когерентной составляющей (убывающей за счет поглощения и рассеяния падающей ЭМВ) и некогерентной составляющей (за счет случайного рассеяния эмв множеством рассеивателей);

- в *SMM11* и *SMM12* моделях используется квазистатическая аппроксимация и материальные уравнения для неоднородной лесной среды усредняются по ансамблю рассеивателей (модель *SMM11*), а в *SMM12* вводится допущение о пренебрежимости отличия электромагнитного поля в неоднородной среде и усредненного ЭМП по ансамблям. Эти модели позволяют определять эффективную комплексную диэлектрическую проницаемость лесного массива и в конечном счете оценивать уровень принимаемого радиосигнала;
- в *SMM14* модели используется геометрия фракталов для описания реальной структуры деревьев, моделирование взаимодействия ЭМВ с растительностью, используя метод DBA, определяется когерентная составляющая электромагнитного поля, ее затухание и изменение фазы под влиянием лесной растительности, при этом метод Монте-Карло необходим для определения статистического распределения электромагнитных полей при большом числе реализаций;
- в *SMM15* модели использование метода Монте-Карло позволяет моделировать эффекты многократного рассеяния от большого числа лесных рассеивателей с последующей интерференцией в точке приема рассеянных ЭМВ и боковой электромагнитной волны;
- в *SMM16* модели рассматривается распространение радиоволн для смешанной трассы в сельской местности, представляющей собой строения и деревья (при этом здания представляются в виде блоков, а деревья — в виде цилиндров, а вся среда распространения полагается средой со случайно ориентированными шероховатостями на земной поверхности) и реализованы приближенные оценки полной интенсивности электромагнитного поля в точке приема, рассеянного на неоднородностях среды типа деревьев и зданий;
- *SMM17* модель базируется на теории Френеля–Кирхгофа, при этом для систем мобильной связи, помимо расчета когерентной составляющей ЭМП в точке приема, для более точного учета допустимых потерь в лесной растительности включают некогерентную составляющую (т. е. среднее ЭМП в деревьях полагают находят с использованием теории многократного рассеяния

Фолди–Лакса, а некогерентную составляющую, вызванную рассеянием деревьев полога, — с использованием приближения Борна);

- в *SMM18 модели* используются численные решения интегральных уравнений с разбиением поверхностей (произвольной формы) и определением электромагнитного поля, рассеянного многослойными диэлектрическими средами с помощью специальных функций Грина.

Вторая группа — **SMM/R** объединяет модели *SMM2, SMM3, SMM4, SMM5, SMM6, SMM9, SMM13, SMM18*. Эти модели можно отнести к моделям, в которых рассматривается отражение (**R** — reflection) радиоволн от лесных массивов при СВЧ радиометрии растительных покровов и также учитываются такие явления, как затухание, рассеяние и отражение ЭМВ:

- в *группе SMM2, SMM3, SMM4, SMM5 моделей*, используемых в радиолокационных методах зондирования земных покровов, определяются эффективные площади рассеивания отражателей распределенных по случайному закону;
- в *SMM6 модели* для протяженных отражателей, размеры которых значительно превышают размеры индивидуальных, отраженные сигналы подчиняются распределению Райсса–Накагами и, в зависимости от параметра m , это распределение $W_1(p)dp$ изменяется от показательного до нормального законов распределения;
- в *SMM9 моделях* рассмотрены статистические модели СВЧ радиометрии растительных покровов, в том числе и лесных массивов, которые представляют собой либо слой сплошной среды со случайным значением диэлектрической проницаемости, либо совокупность случайно расположенных поглощающих рассеивателей (дискретная модель), при этом оцениваются эффективные диэлектрические проницаемости для различных форм растительных элементов, сечения рассеяния и поглощения, а также коэффициент экстинкции для лесных массивов как поглощающих и отражающих сред;
- в *SMM13 модели*, базирующейся на волновой теории (аппроксимации решений уравнений Максвелла) и рассматривающей случаи падения на лесной массив ЭМВ с относительно длинными волнами и их когерентное обратное рассеяние, используются следующие принципы приближенных решений:
 - дисторсионное борновское приближение как теория рассеяния первого порядка;
 - рассеянное электромагнитное поле от растительных элементов ищется при допущении, что ЭМВ, падающие на каждого рассе-

ивателя, представляют собой среднее электромагнитное поле в пределах растительного слоя. Используется «встраивание» рассеивателей в эквивалентную (в среднем) среду и рассчитывается электромагнитное поле рассеяния;

- математически среднее электромагнитное поле получается путем итерации самосогласованных уравнений многократного рассеяния, использующих аппроксимацию Фолди–Лакса, которое справедливо при малых объемных концентрациях лесной растительности, что обычно соблюдается на практике;
- используется понятие эквивалентной среды как смеси воздуха (несущая среда), в котором случайным образом распределены элементы лесной растительности — рассеиватели, при этом учитывается, что падающая и рассеянные ЭМВ затухают, распространяясь в такой среде;
- определение рассеянного ЭМВ от рассеивателей, встроенных в эквивалентную лесную среду, реализуется путем решения уравнений многократного рассеяния при повторной итерации в интервале, определяемом первым порядком приближения Борна, которое используется при условии, если рассеиватели имеют малое значение альбеда (для лесных растений это справедливо до частот менее 10 ГГц);
- коэффициент обратного рассеяния от лесной среды определяется путем вычисления корреляции рассеянных электромагнитных полей.

В этой модели не учитывается взаимодействие между различными растительными элементами при многократном рассеянии ЭМВ.

Шестая глава посвящена рассмотрению полудетерминированных, полустатистических, полужемпирических и жемпирических моделей

сквозного и наклонного падений радиоволн на лесной массив. Практическое использование рассмотренных в шестой главе моделей можно условно разделить на две основные группы, связанные со сквозным и наклонным распространением радиоволн от передающей к приемной радиостанциям.

В первой группе математических моделей: SDMM1-1, SDMM1-2, SDMM1-3, SDMM2, SSMM1, SEMM1 (NZG), SEMM2 (DG), EMM1 (ITU-R), EMM2 (FITU-R), SEMM3 (COST235), EMM4 (MED), EMM5 (MA) определяют потери при сквозном распространении радиоволн в тракте передачи, при этом:

- для моделей SDMM1-1, SDMM1-2, SDMM1-3, SDMM2, SSMM1 потери мощности при распространении определяются при известных (или найденных из экспериментов) значений эффективного погонного коэффициента затухания, параметров пере-

дающих и приемных систем (в том числе высот поднятия передающей и приемной антенн относительно лесной подстилки) и, в конечном счете, оценке устойчивости радиосвязи в условиях лесной растительности;

- для моделей SEMM1 (NZG), SEMM2 (DG), потери мощности в тракте определяются при известных (или найденных из экспериментов) значениях погонного коэффициента затухания (и его градиента), параметров передающих и приемных систем (в том числе высот поднятия передающей и приемной антенн относительно лесной подстилки), расстояния между передающим и приемным пунктами и, в конечном счете, оценке устойчивости радиосвязи в условиях лесной растительности;
- для моделей EMM1 (ITU-R), EMM2 (FITU-R), SEMM3 (COST 235), EMM4 (MED), EMM5 (MA) потери мощности в тракте определяются на используемой рабочей частоте и при данном расстоянии между передающим и приемным пунктами, при известных (или найденных из экспериментов) значениях корректирующих констант.

Во второй группе эмпирических моделей (EMM8, EMM9, EMM10 и EMM11) формулы для потерь мощности в тракте сконструированы так, что могут применяться лишь в ограниченном диапазоне радиочастот, при этом с их помощью невозможно оценить влияние расстояния между передающим и приемным пунктами и меняющимися свойствами лесной растительности.

В **седьмой главе** обобщаются результаты экспериментальных исследований эффективной относительной комплексной диэлектрической проницаемости лесных массивов, эффективного погонного коэффициента затухания радиоволн и потерь при распространении в лесных массивах, отражения и рассеяния радиоволн на лесных массивах и пр. Сопоставляются результаты численных расчетов на основе математических моделей и результатов экспериментальных исследований по распространению радиоволн на лесных массивах.

Книга получилась достаточно объемной, несмотря на то, что автор стремился найти компромисс между относительной полнотой рассмотрения данной проблемы и, к сожалению, невозможностью более подробного изложения многих разделов при сохранении простоты и доступности.

Естественно, в представленном виде, книга не может не иметь недостатков как по полноте охвата, так и методике изложения и фактическому содержанию. Поэтому автор будет чрезвычайно признателен за любые критические замечания, содержащие конкретные пожелания и предложения по адресу popovs@latnet.lv.