

# Оглавление

Предисловие.....	4
От автора.....	10
<b>Глава 1. Лесные массивы.....</b>	<b>12</b>
Введение. Растительный мир. Леса Земли. Леса России.....	12
1.1. Классификация лесов.....	20
1.2. Структура лесных массивов.....	22
1.3. Типы лесов.....	24
1.4. Полнота и густота лесных массивов.....	30
1.5. Влажность лесных массивов.....	36
1.6. Лесные массивы и ветровые нагрузки на них.....	37
1.7. Выводы.....	38
Литература к 1-й главе.....	39
<b>Глава 2. Электрофизические параметры лесных массивов.....</b>	<b>40</b>
2.1. Особенности уравнений Максвелла для лесных массивов как сплошных гетерогенных диэлектрических сред.....	41
2.2. Эффективная диэлектрическая проницаемость линейной гетерогенной среды.....	45
2.2.1. Эффективная диэлектрическая проницаемость неоднородной среды в электростатическом приближении.....	47
2.2.2. Эффективная диэлектрическая проницаемость бинарных систем (другие модели).....	54
2.3. Электрофизические параметры лесных массивов. Эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость (ЭКДП) лесных массивов.....	57
2.3.1. Эффективная относительная комплексная диэлектрическая проницаемость деревьев и их элементов.....	58
2.3.2. Эффективная относительная комплексная диэлектрическая проницаемость лесной подстилки.....	71
2.3.3. Эффективная относительная комплексная диэлектрическая проницаемость лесных массивов.....	71
2.3.4. Эффективная относительная комплексная диэлектрическая проницаемость лесного массива (АТА и СРА математические модели).....	78

2.3.5. Эффективная относительная комплексная диэлектрическая проницаемость лесного массива (математические модели для леса как случайно-неоднородной квазисплошной рассеивающей среды) .....	84
2.3.6. Эффективная относительная комплексная диэлектрическая проницаемость лесного массива (математическая модель для леса как трехслойной среды) .....	87
2.4. Выводы .....	88
Литература к 2-й главе .....	88
<b>Глава 3. Классификация математических моделей распространения радиоволн в лесных массивах....</b>	<b>92</b>
3.1. Детерминированные математические модели распространения радиоволн в лесных массивах .....	95
3.2. Статистические математические модели распространения радиоволн в лесных массивах .....	97
3.3. Полудетерминированные математические модели распространения радиоволн в лесных массивах .....	100
3.4. Полуэмпирические математические модели распространения радиоволн в лесных массивах .....	101
3.5. Полуэмпирические математические модели распространения радиоволн в лесных массивах .....	101
3.6. Эмпирические математические модели распространения радиоволн в лесных массивах .....	102
3.7. Выводы .....	103
Литература к 3-й главе .....	105
<b>Глава 4. Детерминированные математические модели распространения радиоволн в лесных массивах</b>	<b>110</b>
4.1. Распространение радиоволн в однородной изотропной среде (одно- и двухлучевые модели) .....	110
4.2. Детерминированные математические модели распространения радиоволн в лесных массивах .....	117
4.2.1. DMM1 модель. Простейшая модель для слабодисперсной лесной среды .....	119
4.2.2. DMM2 модель. Модель вертикальной слоистой структуры .....	121
4.2.3. DMM3 модель. Модель вертикальных квазисферических деревьев .....	122
4.2.4. DMM4 модель. Трехслойная модель на основе метода диадиков функции Грина .....	123
4.2.5. DMM5 модель. Четырехслойная модель на основе метода диадиков функции Грина .....	125
4.2.6. DMM6 модель. Модель на основе метода FDTD .....	127
4.2.7. DMM7 модель. Модель на основе метода PE .....	131

4.2.8. DMM8 модель. Модель на основе метода оптической дифракции Френеля на клине .....	133
4.2.9. DMM9 модель. Дифракционная модель РРВ для смешанной трассы .....	136
4.2.10. DMM10 модель. Модель на основе метода GTD ....	139
4.2.11. DMM11 модель. Модель на основе метода UTD ....	141
4.3. Влияние высоты подъема антенн базовых радиостанций на условия распространения радиоволн в лесных массивах для систем мобильной связи .....	142
4.4. Выводы .....	146
Литература к 4-й главе.....	148
<b>Глава 5. Статистические математические модели распространения радиоволн в лесных массивах....</b>	<b>152</b>
5.1. Рассеяние и поглощение электромагнитных волн диэлектрическими неоднородностями. Основные параметры рассеяния и поглощения .....	152
5.2. Эффективная площадь рассеяния одиночных деревьев .....	159
5.3. SMM1 модель. Математическая модель рассеяния радиоволн на лесных массивах для систем мобильной связи (в приближении однократного рассеяния) .....	164
5.4. SMM2–SMM6 модели. Математические модели отражения и рассеяния ЭМВ при радиолокационном зондировании земной поверхности.....	167
5.4.1. Модель MM1 для гладкой ровной отражающей поверхности и диэлектрической слоистой структуры .....	168
5.4.2. SMM2 модель для мелкошероховатой отражающей поверхности .....	170
5.4.3. SMM3 модель отражающей поверхности с крупномасштабными неровностями.....	173
5.4.4. SMM4 модель отражающей поверхности со сложной шероховатостью .....	176
5.4.5. SMM5 статистическая модель отражения ЭМВ от множества линейных отражателей.....	181
5.4.6. SMM6 статистическая математическая модель отражения ЭМВ от «множественных» отражателей.....	187
5.5. SMM7 статистическая математическая модель распространения радиоволн в лесных массивах с использованием приближения Рытова .....	189
5.6. SMM8 модели. Статистические математические модели распространения радиоволн в лесных массивах с использованием теории Тверского .....	195
5.6.1. Математическая модель многократного рассеяния электромагнитных волн в лесных массивах (Приближение теории многократного рассеяния Тверского) .....	195

5.6.2. Модель статистического усреднения для дискретных рассеивателей .....	200
5.6.3. Интегральное уравнение Тверского для второго момента (функции корреляции) рассеивающегося поля .....	204
5.6.4. Определение когерентного электромагнитного поля для слоистой случайно-неоднородной среды конечной толщины .....	206
5.6.5. Определение полной интенсивности поля плоско поляризованной электромагнитной волны в случайно-неоднородной среде .....	210
5.7. SMM9 модели. Статистические математические модели отражения радиоволн от лесных массивов при СВЧ радиометрии растительных покровов .....	214
5.8. SMM10 модель. Особенности статистической математической модели распространения радиоволн в лесных массивах с использованием RET модели .....	225
5.9. SMM13 модель. Особенности когерентной статистической математической модели рассеяния радиоволн от лесных массивов с использованием метода DBA ..	227
5.10. SMM14 модель. Особенности статистической математической модели распространения радиоволн в лесных массивах с использованием FCSM модели .....	230
5.11. SMM15 модель. Особенности статистической математической модели распространения радиоволн в лесных массивах с использованием теории FWS .....	231
5.12. SMM16 модель. Особенности статистической математической модели распространения радиоволн в смешанной трассе с использованием 3D-стохастической модели .....	231
5.13. SMM17 модель. Особенности статистической математической модели распространения радиоволн в лесных массивах с использованием PO модели .....	233
5.14. SDMM18 модель. Особенности статистической математической модели, основанной на методе MoM .....	233
5.15. Влияние ветровой нагрузки на условия распространения радиосигналов в лесных массивах .....	237
5.15.1. Распределение ветровой нагрузки в пространстве лесного массива .....	237
5.15.2. Изменение спектра радиосигнала при распространении в лесном массиве под влиянием ветровых нагрузок .....	238
5.15.3. Статистические законы, определяющие распределение затухания радиоволн в лесной растительности под влиянием ветровой нагрузки в диапазоне частот 1...20 ГГц .....	239

5.16. Удельная эффективная площадь рассеяния при радиолокационном зондировании леса в сантиметровом диапазоне волн с учетом ветровой нагрузки .....	241
5.17. Выводы .....	243
Литература к 5-й главе .....	247
<b>Глава 6. Эмпирические математические модели распространения радиоволн в лесных массивах .....</b>	<b>253</b>
6.1. Полудетерминированные математические модели распространения радиоволн в лесных массивах .....	254
6.1.1. SDMM1 модели .....	254
6.1.2. SDMM2 модель .....	255
6.2. Полустатистическая математическая модель распространения радиоволн в лесных массивах .....	256
6.3. Полуэмпирические математические модели распространения радиоволн в лесных массивах .....	257
6.3.1. SEMM1 модель .....	257
6.3.2. SEMM2 модель .....	258
6.4. Эмпирические математические модели распространения радиоволн в лесных массивах .....	259
6.4.1. EMM1 модель .....	260
6.4.2. EMM2 модель .....	260
6.4.3. EMM3 модель .....	261
6.4.4. EMM4 модель .....	261
6.4.5. EMM5 модель .....	262
6.4.6. EMM6 модель .....	263
6.4.7. EMM7 модель .....	264
6.4.8. EMM8 модель .....	264
6.4.9. EMM9 модель .....	264
6.4.10. EMM10 модель .....	264
6.4.11. EMM11 модель .....	265
6.5. Выводы .....	265
Литература к 6-й главе .....	266
<b>Глава 7. Экспериментальные исследования распространения радиоволн в лесных массивах .....</b>	<b>268</b>
7.1. Экспериментальные исследования эффективной относительной комплексной диэлектрической проницаемости лесных массивов .....	269
7.1.1. Методы и результаты измерений ЭОКДП элементов лесной растительности (стволов, ветвей и листьев/игл) и отдельных деревьев .....	270
7.1.2. Методы и результаты измерений ЭОКДП лесных массивов .....	274

7.2. Экспериментальные исследования эффективного погонного коэффициента затухания радиоволн в лесных массивах .....	279
7.2.1. Диапазон частот от 5 до 100 МГц .....	281
7.2.2. Диапазон частот от 100 до 1000 МГц .....	284
7.2.3. Диапазон частот от 1,0 до 10,0 ГГц .....	287
7.2.4. Диапазон частот от 10 до 100 ГГц .....	299
7.3. Экспериментальные исследования потерь при распространении в лесных массивах .....	303
7.3.1. Диапазон частот от 5 до 100 МГц .....	303
7.3.2. Диапазон частот от 100 до 1000 МГц .....	307
7.3.3. Диапазон частот от 1,0 до 10,0 ГГц .....	313
7.3.4. Диапазон частот от 10 до 100 ГГц .....	326
7.4. Экспериментальные исследования отражения радиоволн от лесных массивов .....	329
7.4.1. Рассеяние радиоволн на элементах лесной растительности .....	329
7.4.2. Отражение от лесного массива, как сплошной неоднородной среды .....	339
7.4.3. Экспериментальные исследования отражения и рассеяния радиоволн при вертикальном и наклонном зондировании .....	344
7.5. Экспериментальные исследования эффекта кроссполяризации при распространении радиоволн в лесных массивах .....	352
7.5.1. Эффект кроссполяризации при распространении радиоволн в лесных массивах. Кроссполяризационные параметры .....	352
7.5.2. Экспериментальные исследования величины XPD при распространении радиоволн в лесных массивах .....	356
7.6. Сопоставление результатов численных расчетов на основе математических моделей и результатов экспериментальных исследований по распространению радиоволн на лесных массивах .....	365
7.6.1. Сопоставительные результаты по ЭОКДП лесных массивов в диапазоне частот от 10 МГц до 100 ГГц .....	365
7.6.2. Сопоставительные результаты по эффективному коэффициенту затухания $\alpha_{mF}(f)$ в диапазоне частот от 10 МГц до 100 ГГц .....	365
7.6.3. Сопоставительные результаты по потерям при распространении в диапазоне частот от 10 МГц до 100 ГГц .....	367
7.7. Выводы .....	370
Литература к 7-й главе .....	373
Заключение .....	379

UDC 621.371

**Popov V.I.** Radio Wave Propagation in Forests. — M.: Gorjatchaja linija — Telecom, 2015. — 390 p. (Russian)

The book covers fundamentals of the radio wave propagation (RWP) theory with application to the forest environments. The emphasis is given to the deterministic and statistical mathematical models as well as to the semi-statistical, semi-deterministic, semi-empirical, and empirical model variants. The book generalizes results of the experimental investigations of the effective complex dielectric permeability of forests, the effective attenuation per unit distance, propagation losses, the effective differential cross-section of scattering and absorption, the effective backscattering area.

The wide-spread use of mobile and satellite communication systems as well as applications of the remote sensing of Earth surface and the radio-introspecty of objects inside the forestlands highlight the importance of sophisticated studies which are dedicated to RWP in forests. The solutions of the forest effects on RWP should cover a variety of frequency bands.

Therefore, the book, which is to some extent the second part of the book: Popov V.I. Fundamentals of cellular mobile communications of GSM standard, designed for professionals in the field of wireless communications systems (including in the field of cellular mobile communication systems generations G2-G7), and for post-graduate students of universities specializing in the field of radio communications systems.

ISBN .

©Popov V.I., 2015

# CONTENTS

Preface.....	1
From author .....	10
<b>Chapter 1. Forests</b> .....	12
Introduction. Vegetation kingdom. Earth forests .....	12
1.1. Forest classification .....	20
1.2. Forests structure .....	22
1.3. Types of forests .....	24
1.4. Integrity and density of forests .....	30
1.5. Humidity of forests .....	36
1.6. Forests and wind loads of them .....	37
1.7. Conclusions .....	38
Bibliography for Chapter 1 .....	39
<b>Chapter 2. Electrophysical parameters of forests</b> .....	40
2.1. Maxwell equations for the forests as a continuous heterogeneous dielectric media .....	41
2.2. Effective dielectric permeability of the linear heterogeneous media .....	45
2.3. Electrophysical parameters of forests. Effective complex dielectric permeability .....	57
2.3.1. Effective complex dielectric permeability of trees and their elements .....	58
2.3.2. Effective complex dielectric permeability of forest floor .....	71
2.3.3. Effective complex dielectric permeability of forests .....	71
2.3.4. Effective complex dielectric permeability of the forests (ATA (SMM11) and SPA (SMM12) mathematical models) ..	78
2.3.5. Effective complex dielectric permeability of the forests (mathematical models for the forest as a random-heterogeneous quasi-continuous scattering media (SMM9)) .....	84
2.3.6. Effective complex dielectric permeability of the forests (mathematical model for the forest as a three-layer media) ..	87
2.4. Conclusions .....	88
Bibliography for Chapter 2 .....	88
<b>Chapter 3. Classification of mathematical models for radio wave propagation through forests</b> .....	92
3.1. Deterministic RWP mathematical models .....	95
3.2. Statistical RWP mathematical models .....	97
3.3. Semi-deterministic RWP mathematical models .....	100
3.4. Semi-statistical RWP mathematical models .....	101
3.5. Semi-empirical RWP mathematical models .....	101
3.6. Empirical RWP mathematical models .....	102
3.7. Conclusions .....	103



Bibliography for Chapter 3 .....	105
<b>Chapter 4. Deterministic mathematical models for RWP through forests</b> .....	<b>110</b>
4.1. RWP in homogeneous isotropic medium (single- and two- ray models) .....	110
4.2. Deterministic rwp mathematical models for forests ....	117
4.2.1. DMM1 model (vertical cylinder system model) .....	119
4.2.2. DDM2 model (vertical layered structure model) .....	121
4.2.3. DDM3 model (vertical quasi-spherical trees model) ....	122
4.2.4. DDM3 model (three-layer model based on green's dyadic function method) .....	123
4.2.5. DDM5 model (four-layer model based on green's dyadic function method) .....	125
4.2.6. DDM6 model (model based on the FDTD method) ....	127
4.2.7. DDM7 model (model based on the PE method) .....	131
4.2.8. DDM8 model (model based on frenel's wedge optical diffraction method) .....	133
4.2.9. DDM9 model (diffraction model for the mixed rwp path)	136
4.2.10. DDM10 model (model based on the GTD method) ...	139
4.2.11. DDM11 model (model based on the UTD method) ...	141
4.3. Effect of the base station antenna height on the rwp con- ditions in forests for mobile communication systems ....	142
4.4. Conclusions .....	146
Bibliography for Chapter 4 .....	148
<b>Chapter 5. Statistical mathematical models for RWP through forests</b> .....	<b>152</b>
5.1. Scattering and absorption of electromagnetic waves by di- electric heterogeneities. Main scattering and absorption parameters .....	152
5.2. Effective scattering area of single trees .....	159
5.3. SMM1 model. Mathematical model of radio wave scatter- ing on forests for mobile communication systems (single- fold scattering approximation) .....	164
5.4. SMM2-SMM6 models. Mathematical models of radiowave reflection and scattering for remote sensing of the Earth surface .....	167
5.5. SMM7 model. Statistical mathematical model of RWP in forests (Rytov approximation) .....	189
5.6. SMM8 models. Statistical mathematical models of RWP in forests based on Twersky's theory .....	195
5.6.1. Mathematical model of multiple scattering of EMWs in forests (Twersky's multiple scattering theory approximation) .	195
5.6.2. Model of statistical averaging for discrete scatterers ...	200

5.6.3. Twersky's integral equation for the second moment (correlation function) of the scatter field.....	204
5.6.4. Determination of coherent electromagnetic field for the layered random-heterogeneous media of finite thickness .....	206
5.6.5. Determination of the total intensity of the linearly-polarized electromagnetic wave field in the random-heterogeneous media .....	210
5.7. SMM9 models. Statistical mathematical models of radio wave reflection of the forests using SHF radiometry of vegetation cover .....	214
5.8. SMM10 model. RET statistical modelling features for RWP through forests .....	225
5.9. SMM13 model. DBA method based coherent statistical modelling features for radio wave scattering in forests ..	227
5.10. SMM14 model. FCSM statistical modelling features for RWP through forests .....	230
5.11. SMM15 model. FWS theory based statistical modelling features for RWP through forests.....	231
5.12. SMM16 model. 3D stochastic modelling features for RWP through the mixed path .....	231
5.13. SMM17 model. PO statistical modelling features for RWP through forests .....	233
5.14. SMM18 model. MoM based statistical modelling features for RWP through forests .....	233
5.15. Wind load effect on radiosignal propagation conditions in forests .....	237
5.16. Effective unit scattering area at remote sensing of forests in the centimetre wave band, taking the wind load into account .....	241
5.17. Conclusions .....	243
Bibliography for Chapter 5 .....	247
<b>Chapter 6. Semi-deterministic, semi-statistical, semi-empirical and empirical mathematical models for RWP through forest tracts.....</b>	<b>253</b>
6.1. Semi-deterministic mathematical models for RWP through forests .....	254
6.1.1. SDMM1 models .....	254
6.1.2. SDMM2 model .....	255
6.2. Semi-statistical mathematical models for RWP through forests .....	256
6.3. Semi-empirical mathematical models for RWP through forests .....	257
6.3.1. SEMM1 model .....	257

6.3.2. SEMM2 model .....	258
6.4. Empirical mathematical models for RWP through forests.	259
6.4.1. EMM1 model (ITU-R model) .....	260
6.4.2. EMM2 model (FITU-R model) .....	260
6.4.3. EMM3 model (COST235 model) .....	261
6.4.4. EMM4 model (MED model) .....	261
6.4.5. EMM5 model (ITU-R P.833-2 model) .....	262
6.4.6. EMM6 model .....	263
6.4.7. EMM7 model (TS model) .....	264
6.4.8. EMM8 model .....	264
6.4.9. EMM9 model .....	264
6.4.10. EMM10 model .....	264
6.4.11. EMM11 model .....	265
6.5. Conclusions .....	265
Bibliography for Chapter 6 .....	266
<b>Chapter 7. Experimental investigations of RWP through forests</b> .....	<b>268</b>
7.1. Experimental investigation of the effective complex dielectric permeability of forests .....	269
7.2. Experimental investigation of the effective attenuation per unit distance for RWP through forests .....	279
7.2.1. Frequency range from 5 to 100 МГц .....	281
7.2.2. Frequency range from 100 to 1000 МГц .....	284
7.2.3. Frequency range from 1.0 to 10.0 ГГц .....	287
7.2.4. Frequency range from 10 to 100 ГГц .....	299
7.3. Experimental investigations of path losses in forests.....	303
7.3.1. Frequency range from 5 to 100 МГц .....	303
7.3.2. Frequency range from 100 to 1000 МГц .....	307
7.3.3. Frequency range from 1.0 to 10.0 ГГц .....	313
7.3.4. Frequency range from 10 to 100 ГГц .....	316
7.4. Experimental investigation of radio wave reflection of forests .....	329
7.4.1. Radio wave scattering on forest vegetation elements ...	329
7.4.2. Radio wave reflection off the forests as a continuous heterogeneous medium .....	339
7.4.3. Experimental investigation of radio wave reflection and scattering in case of vertical and angular incidence .....	344
7.5. Experimental investigation of cross-polarization effect at RWP in forests.....	352
7.5.1. Cross-polarization effect RWP in forests. Cross-polarization parameters .....	352
7.5.2. Experimental investigation of cross-polarization dispersion at RWP in forests .....	356

---

7.6. Comparison of numerical calculations based on mathematical models and results of RWP experimental investigations .....	365
7.7. Conclusions .....	270
Bibliography for Chapter 7 .....	373
CONCLUSIONS .....	379