

О. И. Яковлев, В. П. Якубов,  
В. П. Урядов, А. Г. Павельев

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

51260

Под редакцией  
доктора технических наук, профессора  
О. И. Яковлева



URSS  
МОСКВА

*Издано при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России».*

**Яковлев Олег Изосимович, Якубов Владимир Петрович,  
Урядов Валерий Павлович, Павельев Александр Геннадьевич**

**Распространение радиоволн: Учебник / Под ред. О. И. Яковлева. — М.: ЛЕНАНД, 2009. — 496 с.**

В настоящей книге изложены закономерности распространения сантиметровых, дециметровых и метровых радиоволн при космической и наземной связи. Дан анализ распространения коротких, средних и длинных радиоволн на различных трассах с учетом влияния поверхности и ионосферы. Рассмотрены закономерности отражения и рассеяния волн при радиолокации природных поверхностей и прохождения волн через сильно поглощающие среды. Описаны радиофизические методы мониторинга атмосферы и ионосферы, поверхности суши и моря.

Книга предназначена для научных сотрудников и инженеров, аспирантов и студентов радиофизической и радиотехнической специальностей; она может быть использована как учебное пособие по курсу «распространение радиоволн».

ООО «ЛЕНАНД», 117312, г. Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 11А, стр. 11.  
Формат 60×90/16. Печ. л. 31. Зак. № 1248

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО «Полиграфический комбинат «Зуральск»,  
640022, г. Курган, ул. К. Маркса, 106.

ISBN 978-5-9710-0183-6

© О. И. Яковлев, В. П. Якубов,  
В. П. Урядов, А. Г. Павельев, 2008

**ДИСТРИБЬЮТОР** НАУЧНОЙ  
И УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

 E-mail: [URSS@URSS.ru](mailto:URSS@URSS.ru)  
Тел/факс: 7 (499) 135-42-16  
Тел/факс: 7 (499) 135-42-46  
Каталог изданий в Интернете:  
<http://URSS.ru>

5513 ID 65009

  
9 785971 001836

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельцев.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

<b>Предисловие</b> .....	<b>7</b>
<b>Глава 1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В РАДИОТЕХНИКЕ И РАДИОФИЗИКЕ</b> .....	<b>11</b>
1.1. Радиоволны и их применение .....	13
1.2. Распространение радиоволн в природных средах.....	19
<b>Глава 2. ОБЩИЕ СВОЙСТВА РАДИОВОЛН</b> .....	<b>37</b>
2.1. Волновое уравнение и плоские волны в однородной среде .....	39
2.2. Сферические волны в однородной среде .....	47
2.3. Особенности поляризации радиоволн.....	52
2.4. Интегральные уравнения, метод Кирхгофа и зоны Френеля .....	57
2.5. Лучевое приближение и метод геометрической оптики .....	72
2.6. Групповая скорость и волновой пакет в среде с дисперсией .....	81
2.7. Лемма Лоренца и теорема взаимности.....	86
<b>Глава 3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕЦИМЕТРОВЫХ И САНТИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ И ИОНОСФЕРУ</b> .....	<b>91</b>
3.1. Коэффициент преломления и рефракция радиоволн .....	93
3.2. Запаздывание радиоволн в атмосфере и ионосфере .....	103
3.3. Влияние атмосферы и ионосферы на частоту радиоволн .....	110
3.4. Принципы мониторинга ионосферы с помощью сигналов космических аппаратов .....	115
3.5. Радиозатменный метод исследований атмосферы .....	125

<b>Глава 4. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ.....</b>	<b>139</b>
4.1. Статистические характеристики неоднородностей коэффициента преломления.....	141
4.2. Флуктуации фазы.....	149
4.3. Корреляционные функции флуктуаций радиоволн.....	155
4.4. Флуктуации амплитуды, фазы и частоты.....	165
<b>Глава 5. РАДИОВОЛНЫ НАД ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА СРЕД.....</b>	<b>185</b>
5.1. Распространение метровых и дециметровых радиоволн при высокоподнятых антеннах.....	187
5.2. Распространение коротких и средних радиоволн при расположении антенн у границы раздела сред.....	201
<b>Глава 6. ДИФРАКЦИЯ РАДИОВОЛН НА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ.....</b>	<b>215</b>
6.1. Теория дифракции радиоволн на поверхности Земли.....	217
6.2. Закономерности дифракции радиоволн.....	239
<b>Глава 7. ЗАГОРИЗОНТНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ РАДИОВОЛН.....</b>	<b>249</b>
7.1. Распространение радиоволн в тропосферном волноводе.....	264
7.2. Дальнее тропосферное распространение радиоволн.....	255
7.3. Дальнее ионосферное распространение метровых радиоволн.....	272
<b>Глава 8. ИОНОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН.....</b>	<b>279</b>
8.1. Характеристики ионосферной плазмы.....	281
8.2. Общие закономерности распространения радиоволн в плазме.....	289
8.3. Закономерности ионосферного распространения коротких радиоволн.....	311
8.4. Методы мониторинга ионосферы.....	335

---

<b>Глава 9. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СРЕДНИХ И ДЛИННЫХ РАДИОВОЛН .....</b>	<b>363</b>
9.1. Особенности распространения средних радиоволн.....	365
9.2. Нелинейные эффекты при распространении средних волн в ионосфере.....	375
9.3. Длинные радиоволны в волноводе «поверхность — ионосфера» .....	386
<b>Глава 10. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН ЧЕРЕЗ ПОГЛОЩАЮЩИЕ СРЕДЫ .....</b>	<b>399</b>
10.1. Поглощение волн в однородных средах.....	401
10.2. Распространение радиоволн в воде .....	404
10.3. Распространение волн в грунтах .....	412
10.4. Распространение радиоволн в лесу .....	422
10.5. Поглощение миллиметровых волн в атмосфере .....	426
<b>Глава 11. ОТРАЖЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН ПОВЕРХНОСТЯМИ.....</b>	<b>433</b>
11.1. Общие соотношения .....	435
11.2. Отражение радиоволн от сферической поверхности .....	446
11.3. Рассеяние радиоволн неровной поверхностью .....	452
11.4. Закономерности рассеяния радиоволн и методы исследований поверхностей .....	468
<b>Система единиц и размерности.....</b>	<b>483</b>
<b>Литература .....</b>	<b>485</b>
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>489</b>