

А. Ю. Виноградов
Р. В. Кабетов
А. М. Сомов

Устройства СВЧ и малогабаритные антенны

*Допущено УМО по информационной безопасности
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по специализациям специальностей
090302 – «Информационная безопасность
телекоммуникационных систем»
и 090201 – «Противодействие техническим разведкам»*

Москва
Горячая линия - Телеком
2012

УДК 621.396.946
ББК 32.884.1
В49

Виноградов А. Ю., Кабетов Р. В., Сомов А. М.
В49 Устройства СВЧ и малогабаритные антенны Учебное пособие
для вузов / Под ред. А. М. Сомова. – М.: Горячая линия–Телеком,
2012. – 440 с.: ил.
ISBN 978-5-9912-0255-8.

Изложены общие положения теории электромагнитных волн и устройств СВЧ, рассмотрены различные линии передачи, включая волноводы прямоугольного и круглого сечения, коаксиальные и микрополосковые линии, указаны способы согласования их сопротивлений. Также рассмотрены объемные резонаторы, построенные на основе линий питания, и элементы СВЧ. В завершении рассмотрены различные виды малогабаритных микрополосковых антенн СВЧ.

Для студентов, обучающихся по специальностям «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», «Противодействие техническим разведкам», направлению подготовки «Информационная безопасность» (профиль «Безопасность телекоммуникационных систем»), аспирантов и специалистов в области инфокоммуникаций и защиты информации.

ББК 32.884.1

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Учебное издание

Виноградов Алексей Юрьевич
Кабетов Роман Владимирович
Сомов Анатолий Михайлович

Устройства СВЧ и малогабаритные антенны
Учебное пособие

*Книга подготовлена при поддержке грантов Президента Российской Федерации
НШ-24.2010.10 и МК-1.2011.10*

Редактор Ю. Н. Чернышов
Компьютерная верстка Ю. Н. Чернышова
Обложка художника В. Г. Ситникова

Подписано в печать 25.11.2011. Печать офсетная. Формат 60×88/16. Уч. изд. л. 27,5. Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-9912-0255-8

© А. Ю. Виноградов, А. М. Сомов,
Р. В. Кабетов, 2012

© Издательство Горячая линия–Телеком, 2012

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время социальное, научно-техническое, культурное и общее экономическое развитие невозможно без систем и сетей передачи информации. Получили широкое практическое применение системы связи диапазонов СВЧ, включая телевидение, радиовещание, сотовую и мобильную связь с использованием спутниковых и наземных сегментов, в состав которых входят малогабаритные элементы и устройства соответствующих диапазонов частот. В связи с этим возникает необходимость в подготовке специалистов радиотехнического профиля и углублении базовых знаний этого направления. Всё это делает востребованной подготовку учебного пособия, посвящённого вопросам разработки малогабаритных антенн и устройств СВЧ. Многие из этих устройств предназначены для применения в сугубо профессиональных целях, однако они востребованы во всё возрастающих объёмах в многочисленных приборах, применяемых в быту.

Разделы, охваченные учебным пособием, необходимы, прежде всего, студентам и аспирантам соответствующего профиля обучения, а также инженерам и специалистам научных и проектных организаций, занимающихся разработкой и проектированием систем связи СВЧ диапазона.

Современные технологии проектирования сложных малогабаритных СВЧ антенн и узлов основаны на широком использовании систем автоматизированного проектирования и программ электродинамического моделирования. Однако все эти приёмы основываются на известных положениях и основах теории электромагнитных волн, без понимания которых невозможно освоить физические основы функционирования тех или иных устройств.

По этой причине в первой главе приведены общие положения теории электромагнитных волн, включающие описание векторов этого поля, параметров среды, в которой распространяется поле, принципа суперпозиции полей, особенностей поля электрического диполя, закона электромагнитной индукции, основополагающей системы уравнений Максвелла, граничных условий для векторов поля на разделе двух сред и особенностей решения волновых уравнений в случае монохроматического поля.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Общие положения теории электромагнитных волн .	5
1.1. Векторы электромагнитного поля. Макроскопические параметры среды. Уравнение непрерывности	5
1.1.1. Поле электрического заряда	5
1.1.2. Теорема Гаусса	7
1.1.3. Принцип суперпозиции и поле системы точечных за- рядов	8
1.1.4. Поле электрического диполя	9
1.1.5. Электрическое поле объемных зарядов	10
1.1.6. Электрическое поле в диэлектрике	11
1.1.7. Электрическое поле в проводящей среде	14
1.1.8. Энергия электростатического поля	15
1.1.9. Магнитное поле постоянного тока	16
1.1.10. Закон полного тока	18
1.1.11. Электромагнитная индукция	19
1.1.12. Энергия магнитного поля	20
1.2. Система уравнений Максвелла	21
1.3. Граничные условия для векторов поля	26
1.3.1. Граничные условия на разделе двух сред	26
1.3.2. Граничные условия на поверхности идеального про- водника	29
1.4. Электрическая и магнитная энергия. Баланс энергии электромагнитного поля	31
1.5. Метод комплексных амплитуд. Комплексная проница- емость. Уравнения монохроматического поля.....	34
1.6. Решение волновых уравнений при заданных источниках возбуждения поля	39
1.7. Эквивалентные источники электромагнитного поля. Принцип Гюйгенса-Френеля.....	43
1.8. Лемма Лоренца. Теорема взаимности	47
1.8.1. Лемма Лоренца для ограниченных и неограниченных объемов	48
1.8.2. Теорема взаимности для элементарных вибраторов ..	50

Вопросы к главе 1	52
2. Основы теории устройств СВЧ	53
2.1. Направляющие системы. Классификация направляемых волн	53
2.2. Волновые числа. Фазовая и групповая скорость. Дисперсия	62
2.3. Типы волн в волноведущих линиях СВЧ	68
2.4. Концепция парциальных волн	75
2.5. Теорема Флоке	89
2.6. Пространственные гармоники	80
2.7. Бегущая волна. Быстрые и медленные волны	85
2.7.1. Бегущая волна	85
2.7.2. Быстрые и медленные волны	86
2.8. Импедансные граничные условия	91
2.8.1. Приближенные граничные условия Леонтовича	91
2.8.2. Применение импедансных граничных условий в теории поверхностных волн	93
2.8.3. Усредненные граничные условия	98
2.8.4. Двусторонние граничные условия импедансного типа	99
2.9. Затухание направляемых волн	103
2.9.1. Затухание, обусловленное потерями в заполняющей линии среде	104
2.9.2. Затухание, вызванное потерями в металлических элементах линии передачи	105
2.10. Теория эквивалентных линий	107
2.10.1. Эквивалентные токи и напряжение	107
2.10.2. Волновое сопротивление волноводных элементов	110
2.10.3. Четные и нечетные свойства входного сопротивления	116
2.11. Теорема Фостера	117
2.12. Матрица волновых сопротивлений многополюсника ..	120
2.12.1. Симметрия матрицы волновых сопротивлений	123
2.12.2. Реактивная природа матрицы волновых сопротивлений для случая многополюсника без потерь	124
2.12.3. Нормированные матрицы волновых сопротивлений и проводимостей	125
2.13. Матрица рассеяния многополюсника	126
2.13.1. Симметричная матрица рассеяния	129
2.13.2. Матрица рассеяния многополюсника в случае отсутствия потерь	130
2.13.3. Матрица рассеяния четырехполюсника	133
2.14. Матрица передачи многополюсника	136

2.14.1. Матрица передачи по напряжению и току	137
2.14.2. Матрица передачи по амплитуде	138
2.14.3. Обобщенная матрица рассеяния для волн мощности	139
2.15. Связанные контуры	148
2.15.1. Понятие связанного контура. Виды связанных контуров	148
2.15.2. Схемы замещения связанных контуров	151
2.15.3. Настройка связанных контуров	153
2.15.4. Частотные характеристики связанных контуров	158
Вопросы к главе 2	160
3. Линии передачи СВЧ	162
3.1. Основные параметры линий СВЧ	162
3.2. Коаксиальные линии	166
3.2.1. Конструкция и виды коаксиальных линий	166
3.2.2. T -волна в коаксиальной линии	167
3.2.3. Другие волны в коаксиальной линии	169
3.3. Конструкция и виды волноводов	170
3.4. Волноводы прямоугольного поперечного сечения	171
3.4.1. Волны типа H в прямоугольных волноводах	171
3.4.2. Волна H_{10} в прямоугольном волноводе	174
3.4.3. Мощность, переносимая волной H_{10}	176
3.4.4. Токи на стенках прямоугольного волновода с волной H_{10}	178
3.4.5. Эквивалентная длинная линия	180
3.4.6. Излучающие и неизлучающие щели в прямоугольном волноводе с волной H_{10}	181
3.4.7. Волны типа E в прямоугольных волноводах	182
3.5. Волноводы круглого поперечного сечения	184
3.5.1. E -волны в волноводах круглого сечения	185
3.5.2. H -волны в волноводах круглого сечения	190
3.5.3. Применение круглых волноводов	194
3.6. Радиальные волноводы	196
3.7. Энергетические потери в волноводах	199
3.8. Возбуждение электромагнитных волн в волноводах ..	203
3.8.1. Возбуждение прямоугольного и круглого волноводов	203
3.8.2. Возбуждение радиального волновода элементом Гюйгенса	206
3.8.3. Возбуждение радиального волновода рупорным облучателем	216
3.9. Планарные линии с неоднородным заполнением	223
3.9.1. Квазистатический метод	226

3.9.2. Высокочастотный способ расчета или полноволновый метод	229
3.10. Полосковые линии	230
3.10.1. Симметричная полосковая линия	231
3.10.2. Расчет микрополосковых линий	235
3.10.3. Потери в микрополосковой линии	248
3.10.4. Частотные свойства микрополосковой линии	251
3.10.5. Другие типы микрополосковых линий	252
3.11. Копланарные и связанные линии	257
3.11.1. Копланарные линии	257
3.11.2. Связанные линии	259
3.12. Линии щелевого типа	265
3.13. Замедляющие системы	267
3.13.1. Общие свойства замедляющих систем	269
3.13.2. Коэффициент замедления и длина замедленной волны	272
3.13.3. Сопротивление связи замедляющей системы	273
3.13.4. Энергия поля в ячейке замедляющей системы	275
Вопросы к главе 3	278
4. Объёмные резонаторы	279
4.1. Простые объёмные резонаторы	280
4.1.1. Прямоугольный объёмный резонатор	280
4.1.2. Цилиндрический объёмный резонатор	283
4.1.3. Коаксиальный объёмный резонатор	284
4.2. Добротность объёмных резонаторов	285
4.2.1. Собственная добротность объёмного резонатора	285
4.2.2. Добротность нагруженного объёмного резонатора	286
4.2.3. Влияние добротности на свойства резонатора	287
4.3. Эквивалентные параметры объёмных резонаторов	288
4.4. Объёмные резонаторы сложной формы	288
4.5. Возбуждение объёмных резонаторов	289
Вопросы к главе 4	290
5. Элементы СВЧ и вопросы согласования сопротивлений	291
5.1. Элементы цепей СВЧ с распределенными параметрами	291
5.1.1. Микрополосковая линия, разомкнутая на конце	292
5.1.2. Щель	293
5.1.3. Ступенька	294
5.1.4. Крестообразное соединение шлейфов	297
5.1.5. Другие виды неоднородностей	298
5.2. Виды соединений линий СВЧ	299

5.2.1. Изгиб	299
5.2.2. Т-образное соединение	301
5.3. Вопросы согласования и трансформации волновых сопротивлений в цепях СВЧ. Виды согласующих элементов	304
5.3.1. Четвертьволновый трансформатор	304
5.3.2. Теория малых отражений	307
5.3.3. Приближенная теория многосекционных четвертьволновых трансформаторов	309
5.3.4. Биноминальный трансформатор	310
5.3.5. Чебышевский трансформатор	313
5.3.6. Метод точного расчета трансформатора Чебышева ..	315
5.3.7. Плавные переходы	318
5.4. Элементы волноводных трактов	325
5.4.1. Волноводные поляризаторы	325
5.4.2. Волноводные селекторы поляризации	326
5.4.3. Согласованные нагрузки	327
5.5. Устройства разделения диапазонов частот	328
5.6. Делители и сумматоры мощности	332
5.7. Направленные ответвители	342
5.7.1. Ответвители на связанных линиях	344
5.7.2. Шлейфный направленный ответвитель	353
5.7.3. Направленный ответвитель Ланге	355
5.7.4. Кольцевой гибридный направленный ответвитель ...	357
5.8. Примеры построения волноводных трактов антенных решеток	362
Вопросы к главе 5	366
6. Микрополосковые антенны	367
6.1. Общие сведения о микрополосковых антеннах	367
6.2. Узкополосные микрополосковые антенны	371
6.2.1. Ленточный микрополосковый вибратор	371
6.2.2. Щелевая микрополосковая антенна	377
6.2.3. Двумерные микрополосковые излучатели	381
6.2.4. Микрополосковые антенны круговой поляризации ..	387
6.3. Широкополосные микрополосковые антенны	390
6.3.1. Расширение рабочей полосы частот микрополосковых антенн	390
6.3.2. Антенна Вивальди	392
6.4. Микрополосковые антенны вытекающих волн	397
6.4.1. Типы волн в микрополосковых антеннах вытекающих волн	399

6.4.2. Режимы распространения в микрополосковых антен- нах вытекающих волн	401
6.4.3. Методы расчета импедансных структур периодичес- ких микрополосковых антенн вытекающих волн	403
6.4.4. Примеры микрополосковых антенн вытекающих волн	406
6.5. Одно- и многоканальные микрополосковые антенны ..	412
Вопросы к главе 6	414
Приложение 1. Коаксиальные кабели	416
Приложение 2. СВЧ волноводы	422
П2.1. Волноводы жёсткой конструкции	422
П2.2. Гибкие волноводы	422
Список обозначений	427
Список сокращений	430
Литература	431