

Е. И. НЕФЁДОВ

УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ

Рекомендовано

*Государственным образовательным учреждением
высшего профессионального образования*

«Московский технический университет связи и информатики»

*в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальностям направления подготовки «Радиотехника»*

Регистрационный номер рецензии 360

от 18.11.2008 ФИРО



Москва

Издательский центр «Академия»

2009

УДК 621.37(075.8)
ББК 32.845я73
Н58

Рецензенты:

чл.-кор. РАН, зав. кафедрой МИРЭА, проф. *А. П. Реутов*;
Заслуженный деятель науки, д-р техн. наук, проф. МИРЭА *В. И. Каганов*;
зав. кафедрой радиоэлектронных и телекоммуникационных устройств и систем
МГИЭМ, д-р техн. наук, проф. *Л. Н. Кечиев*;
д-р техн. наук, проф. МГИЭМ *А. С. Петров*

Нефёдов Е. И.

Н58 Устройства СВЧ и антенны : учеб. пособие для студ. высш.
учеб. заведений / Е. И. Нефёдов. — М. : Издательский центр
«Академия», 2009. — 384 с.
ISBN 978-5-7695-4710-2

Изложены основы функционирования устройств СВЧ и антенн, описаны аналитические и численные методы их расчета и проектирования. Главное внимание уделено физическим принципам работы устройств и протекающих в них процессов. Рассмотрены типовые линии передачи, базовые элементы и функциональные узлы антенно-волноводных систем, их физические, математические и электрические модели.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 621.37(075.8)
ББК 32.845я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Нефёдов Е.И., 2009
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2009
ISBN 978-5-7695-4710-2 © Оформление. Издательский центр «Академия», 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых сокращений	3
Предисловие	6

ЧАСТЬ 1. ВВЕДЕНИЕ В КУРС «УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ»

Глава 1. Общие сведения	9
1.1. Диапазоны электромагнитных волн	9
1.2. Проблемы развития систем сверхбыстрой обработки информации	13
1.3. Перспективы интегральных схем и объемных интегральных схем СВЧ	14
Глава 2. Физические основы устройств СВЧ и антенн	16
2.1. Основные определения	16
2.2. Законы электродинамики. Источники электромагнитного поля	17
2.3. Энергия электромагнитного поля. Вектор Умова. Уравнение баланса энергии	19
2.4. Уравнения Максвелла в интегральной форме	21
2.5. Классификация сред	22
2.6. Уравнения Максвелла в комплексной форме. Принцип перестановочной двойственности	26
2.7. Граничные условия	27
2.8. Теорема единственности решения задач электродинамики	34
2.9. Классификация электромагнитных явлений. Области геометрической оптики. Зоны Френеля и Фраунгофера	36
2.10. Лемма Лоренца. Теорема взаимности	39
2.11. Волновое уравнение и электродинамические потенциалы	40

ЧАСТЬ 2. ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Глава 3. Классификация линий передачи краткая характеристика свойств распространяющихся в них волн	43
3.1. Общие сведения о линиях передачи	43
3.2. Линии передачи с поперечными волнами	43
3.3. Линии передачи (волноводы) с поперечно-магнитными (Е) и поперечно-электрическими (Н) волнами	45
3.4. Линии передачи открытого (полуоткрытого) типа с поверхностными волнами	47

3.5. Квазиоптические линии передачи и некоторые элементы квазиоптического тракта	49
3.6. Основные характеристики линии передачи и волн в ней	51
3.7. Классификация электродинамических структур	53
Глава 4. Полые волноводы	57
4.1. Вводные замечания	57
4.2. Основные свойства электромагнитных волн в волноводах	57
4.3. Собственные волны волновода. Метод разделения переменных	59
4.4. Электрические волны прямоугольного волновода	62
4.5. Магнитные волны прямоугольного волновода	64
4.6. Плоский волновод. Модель прямоугольного волновода с электрическими и магнитными стенками	66
4.7. Разложение волноводных волн на плоские волны	67
4.8. Коаксиальный цилиндрический волновод	68
4.9. Круглый волновод	74
4.10. Эллиптические волноводы	78
4.11. Понятие о волновом сопротивлении линии передачи	79
Глава 5. Полосковые линии передачи	83
5.1. Вводные замечания	83
5.2. Симметричная полосковая линия	84
5.3. Несимметричная полосковая линия	86
Глава 6. Щелевые линии передачи	96
6.1. Вводные замечания	96
6.2. Симметричная щелевая линия	96
6.3. Несимметричная щелевая линия	102
6.4. Копланарная линия передачи	108
6.5. Реберно-диэлектрическая линия передачи	111
Глава 7. Периодические направляющие структуры	116
7.1. Общие сведения. Теорема Флоке	116
7.2. Эквивалентная схема бесконечной периодической структуры	119
7.3. Периодические структуры конечной длины	120
7.4. Периодические волноведущие структуры на щелевых линиях	121
7.5. Гофрированно-щелевые линии передачи	123
7.6. Проволочные решетки	126
Глава 8. Диэлектрические волноводы и световоды	130
8.1. Плоский диэлектрический волновод	130
8.2. Оптические волноводы. Диэлектрические интегральные структуры	136
8.3. Квазиоптические волноводы	141
8.4. Схемы возбуждения диэлектрических волноводов	145
8.5. Базовые элементы устройств интегральной оптики и световодной техники	148

ЧАСТЬ 3. РЕЗОНАНСНЫЕ СТРУКТУРЫ

Глава 9. Объемные закрытые резонаторы	154
9.1. Общие свойства объемных резонаторов	154
9.2. Общая теория электромагнитных резонаторов	157
9.3. Прямоугольный, цилиндрический и сферический резонаторы с металлическими стенками	160
9.4. Расчет резонатора методом возмущений	165
Глава 10. Открытые резонаторы	168
10.1. Принцип действия и свойства открытых резонаторов	168
10.2. Открытые резонаторы с плоскими зеркалами	172
10.3. Открытые резонаторы с неплоскими зеркалами	177
Глава 11. Возбуждение волноводов и резонаторов. Вынужденные волны и колебания	182
11.1. Общие сведения	182
11.2. Некоторые устройства возбуждения	184

ЧАСТЬ 4. БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВ СВЧ И АНТЕНН

Глава 12. Переходы между различными типами направляющих структур	187
12.1. Классификация переходов и их основные функции	187
12.2. Сверхширокополосные переходы, или переходы с непосредственным гальваническим контактом	188
12.3. Широкополосные шлейфные переходы	191
12.4. Узкополосные резонансные переходы щелевого типа	194
Глава 13. Базовые элементы согласования	200
13.1. Вводные замечания	200
13.2. Несинхронный трансформатор	202
13.3. Шлейфный трансформатор	202
13.4. Подстройка шлейфов согласующих трансформаторов	203
Глава 14. Делители (сумматоры) мощности	204
14.1. Общие сведения	204
14.2. Волноводные тройники	204
14.3. Полосковые делители (сумматоры) мощности	206
14.4. «Золотые» резистивные делители	210
Глава 15. Кольцевые мостовые устройства	212
15.1. Общие сведения	212
15.2. Полосково-щелевые мосты	213
15.3. Гибридный кольцевой мост с обращением фазы	214
15.4. «Магические» Т-соединения	217

Глава 16. Направленные ответвители	219
16.1. Шлейфные направленные ответвители	219
16.2. Квадратурные направленные ответвители	223
Глава 17. Фильтры СВЧ и КВЧ	229
17.1. Общие сведения о фильтрах и их классификация	229
17.2. Методика проектирования фильтров	231
17.3. Фильтры на основе полосковых и полосково-щелевых резонаторов	232
17.4. Фильтры на основе диэлектрических резонаторов	233
17.5. Фильтры на объемных интегральных схемах	234
17.6. Полосовые фильтры с осемиволновой связью	238

ЧАСТЬ 5. УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА СВЧ

Глава 18. Фазовращатели	240
18.1. Общие сведения о фазовращателях и их классификация	240
18.2. Фазовращатели на основе волноводов	241
18.3. Фазовращатели на полосково-щелевых линиях	242
18.4. Многофункциональность конструкций фазовращателей	244
Глава 19. Двухканальные переключатели	249
19.1. Общие сведения	249
19.2. Базовые схемы двухканальных переключателей	251
19.3. Подход к моделированию диодных переключателей	254
19.4. Расширение полосы рабочих частот	255

ЧАСТЬ 6. АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АНТЕНН

Глава 20. Излучение и прием радиоволн	258
20.1. Общие сведения об антеннах	258
20.2. Понятие о функции Грина	262
20.3. Принцип Гюйгенса—Френеля—Кирхгофа в теории дифракции	264
20.4. Простые антенны	266
20.5. Ближнее поле антенны	270
20.6. Понятие о корректирующем сигнале	272
Глава 21. Основные характеристики и классы антенных систем	274
21.1. Немного истории	274
21.2. Основные характеристики и параметры антенн	275
21.3. Основные классы антенных систем	280
21.4. Фазированные антенные решетки	290
21.5. Многолучевые антенны и их диаграммообразующие устройства	294

Глава 22. Антенны децимиллиметровых, миллиметровых и сантиметровых волн	300
22.1. Общие сведения	300
22.2. Зеркальные антенны	300
22.3. Линзовые антенны	306
22.4. Антенны поверхностных волн	310
22.5. Волноводные и рупорные излучатели и их системы	314
Глава 23. Микрополосковые и щелевые антенны и антенные решетки	323
23.1. Вводные замечания	323
23.2. Элементарные двумерные микрополосковые излучатели	325
23.3. Методы анализа МПА	330
23.4. Конструкции МПА	331
Глава 24. Антенны дециметровых, метровых и декаметровых волн	350
24.1. Общие сведения	350
24.2. Простейшие вибраторные антенны	351
24.3. Антенны в виде длинных проводов	357
Заключение	361
Список литературы	363
Предметный указатель	368

ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге изложены основы функционирования широкого класса устройств СВЧ и антенн, описаны аналитические и численные методы их расчета и проектирования. Основное внимание уделено физическим принципам работы линии передачи (ЛП), базового элемента (БЭ) и функционального узла (ФУ), состоящего из нескольких БЭ. Рассмотрены типовые ЛП, БЭ и ФУ, их физические, математические и электрические модели, эквивалентные схемы и конструкции, приведен широкий набор алгоритмов для автоматизированного проектирования устройств СВЧ и антенн.

В книге кратко изложены основные законы высокочастотной электродинамики, статические и стационарные поля рассмотрены как частные случаи электромагнитного поля (ЭМП). За основу принят дедуктивный способ изложения (от общего к частному): вначале постулируются общие законы электродинамики — уравнения Максвелла, а потом исследуются их частные случаи. Такой подход позволяет, во-первых, кратчайшим путем получить искомое решение (иногда с оценкой его погрешности), а во-вторых, наиболее наглядно представить особенности физического содержания задачи. Последнее обстоятельство является, по мнению автора, главным и решающим в системе подготовки инженера и научного сотрудника. В особенности это важно в период всеобщей компьютеризации, когда кажется, что, располагая достаточно мощной персональной электронной вычислительной машиной (ПЭВМ), можно решить любую задачу. Однако это далеко не так. Только имея достаточно ясное понимание физики задачи, можно приступить к ее анализу и (или) синтезу.

Наряду с традиционными темами, рассматриваемыми при изучении курса «Устройства СВЧ и антенны», в настоящей книге освещен ряд вопросов, касающихся, в частности, теории и техники интегральных схем (ИС) сверхвысоких (СВЧ) и крайне высоких (КВЧ) частот и их высшей стадии развития — объемных интегральных схем (ОИС), описаны два фундаментальных принципа ОИС — оптимальности базового элемента и конструкционного соответствия. Этому кругу вопросов уделено повышенное внимание не только потому, что автор имел непосредственное отношение к разработке и внедрению ОИС на практике, но и в связи с тем, что использование ОИС приводит к потрясающим успехам

в построении систем сверхбыстрой обработки информации (ССОИ), работающих (ведущих обработку информации) непосредственно на частотах радиосигнала в диапазонах СВЧ и КВЧ. Так, быстродействие ССОИ на ОИС увеличивается на 1—3 порядка, а массогабаритные параметры СВЧ-КВЧ блока (модуля) на столько же уменьшаются. Преимущества ОИС наиболее наглядно проявляются при конструировании диаграммообразующих матриц (ДОМ), фазированных антенных решеток (ФАР), активных ФАР (АФАР), приспособляющихся (адаптивных) ФАР, фильтров для пространственно-временной обработки сигналов и многих других устройств и систем.

Довольно большая часть книги посвящена регулярным ЛП. Внимание читателей акцентируется, во-первых, на новых типах ЛП, появившихся в связи с внедрением ОИС СВЧ и не всегда описываемых в учебной литературе даже последних лет выпуска, во-вторых, на классических ЛП, у которых удалось обнаружить новые свойства. Нередко случается так, что хорошо изученная и широко используемая на практике направляющая структура обладает рядом замечательных свойств, которые до поры до времени не находят применения. Так, например, коаксиальная линия передачи обычно работает исключительно на основной поперечной волне, или так называемой T -волне. Вместе с тем использование одного из высших типов магнитных волн позволяет строить на базе коаксиальных волноводов открытые резонаторы с уникально редким, равномерным (как у струны) спектром собственных колебаний. Аналогичными возможностями обладает и ряд других ЛП.

Активное освоение материала книги позволит читателю перейти к знакомству с работами, указанными в списке литературы, а также к изучению других предметов по избранной специальности. Под активным освоением материала автор понимает не только внимательное изучение каждого подраздела, но и обязательные ответы на приведенные в конце глав контрольные вопросы, творческое отношение к выполнению курсовых и дипломных проектов, участие в научно-исследовательской работе кафедры и т. д. К каждой лекции нужно готовиться заранее. В этом случае эффективность освоения и усвоения нового материала повысится многократно, придет глубокое его понимание, а значит, появится возможность использовать данный материал на практике.

В основу настоящей книги положены лекции, которые автор на протяжении более 40 лет читал в Таганрогском радиотехническом институте (1957—1961 гг.), фрязинских филиалах Московского энергетического института (1966—1971 гг.) и Московского института (технического университета) радиотехники, электроники и автоматики (с 1972 г. по настоящее время). Часть материала излагалась в преддипломном курсе лекций на радиофакультете МГТУ им. Баумана, лекциях для инженеров и аспирантов Цент-

рального научно-исследовательского института связи (ЦНИИС), НИИ точного приборостроения, лекциях и докладах, прочитанных автором в ФРГ, Польше, США, Франции, Чехии и ряде других стран.

Более плавное и естественное вхождение в круг рассматриваемых задач, идей, методов читатель может осуществить, ознакомившись с небольшой книгой автора [48].

Отечественная школа электродинамики, антенн и теории распространения волн во все времена отличалась высочайшим классом результатов, признанных во всем мире. Невозможно перечислить всех наших ученых, внесших заметный вклад в это научное направление. Вот лишь некоторые из них: Г. А. Гринберг, Г. И. Веселов, Г. В. Кисунько, М. И. Конторович, Л. М. Мандельштам, В. А. Фок, А. Н. Шукин.

Автор с искренней признательностью вспоминает своих учителей Л. А. Вайнштейна, Б. З. Каценеленбаума, М. И. Конторовича, Г. Д. Малюжинца, А. Г. Свешникова, Я. Н. Фельда, много сделавших для его становления как научного работника и преподавателя. Об этих и некоторых других людях, повлиявших на формирование научных взглядов автора, можно прочитать в его книге [52].

В работе над книгой автору оказали содействие профессора А. С. Петров, Б. М. Петров, Г. С. Макеева, В. А. Неганов, С. Б. Раевский, д-р философии А. Соловей (США), д-р естественных наук Цзи Ушен (КНР). Их пожелания и замечания были с благодарностью приняты и учтены.

С особой признательностью автор вспоминает недавно ушедшего профессора Юрия Вадимовича Пименова, с которым ему посчастливилось участвовать в некоторых отечественных и зарубежных научных программах. Замечания Ю. В. Пименова по материалу книги были глубоки и во многом способствовали улучшению ее качества.

Большую помощь в подготовке рукописи книги оказали С. Б. Клюев, С. В. Лебедев, Е. В. Межекова и Р. С. Попов. Всем им автор выражает глубокую благодарность.

**ВВЕДЕНИЕ В КУРС «УСТРОЙСТВА СВЧ
И АНТЕННЫ»**

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Диапазоны электромагнитных волн

По рекомендации Международного консультативного комитета по радио (МККР) диапазоны электромагнитных волн (ЭМВ) в герцах определяются выражением $(0,3 \dots 3) \cdot 10^N$, где N — порядковый номер диапазона. Для радиосвязи используются диапазоны с $N = 4 \dots 12$.

Диапазоны частот и волн для $N = 8 \dots 12$ приведены в табл. 1.1. В скобках даны русские и международные сокращенные наименования частот.

По рекомендациям МККР к СВЧ относят только диапазон с $N = 10$. Однако ввиду большой общности принципов, которые лежат в основе построения приборов и устройств, работающих в пределах 9... 11-го диапазонов, данные диапазоны в настоящее время как у нас в стране, так и зарубежом считают единым диапазоном СВЧ.

Таблица 1.1. **Восьмой—двенадцатый диапазоны электромагнитных волн**

N	Наименование частот	Частота f	Наименование волн	Длина волны λ_0
8	Очень высокие (ОВЧ, VHF)	30...300 МГц	Метровые	10...1 м
9	Ультравысокие (УВЧ, UHF)	0,3...3 ГГц	Дециметровые	10...1 дм
10	Сверхвысокие (СВЧ, SHF)	3...30 ГГц	Сантиметровые	10...1 см
11	Крайне высокие (КВЧ, EHF)	30...300 ГГц	Миллиметровые	10...1 мм
12	Гипервысокие (ГВЧ, HNF)	0,3...3 ТГц	Децимиллиметровые	1...0,1 мм

К особенностям диапазона СВЧ относятся:

широкополосность — наиболее ценное качество диапазона СВЧ. В трех диапазонах ($N = 9 \dots 11$) с полосой $\Delta f = 300$ ГГц можно передать за одно и то же время в 10^4 раз больше информации, чем в пяти других диапазонах ($N = 4 \dots 8$). Широкополосность позволяет применять помехоустойчивые частотную и фазовую модуляции, при которых уровень сигнала на выходе приемника в определенных пределах не зависит от уровня входного сигнала;

хорошие условия для создания антенн, размеры которых намного превышают длину волны, в связи с чем данные антенны обладают остронаправленным излучением;

беспрепятственное прохождение волн СВЧ через слои ионосферы, позволяющие осуществлять связь земных станций с искусственными спутниками Земли (ИСЗ) и космическими аппаратами. При распространении волн СВЧ вблизи поверхности Земли их дифракция и рефракция малы;

низкий уровень атмосферных и промышленных помех, отсутствие влияния на условия распространения волн времени суток и сезонов года;

возрастание с увеличением частоты волн их затухания из-за дождя и резонансного поглощения в газах. Особенно этот эффект проявляется у миллиметровых волн (ММВ), интенсивно осваиваемых для целей связи. В диапазоне ММВ атмосфера имеет ряд окон прозрачности и пиков поглощения. Радиосвязь, как правило, осуществляется в окнах прозрачности. Большее поглощение миллиметровых волн по сравнению с сантиметровыми приводит к снижению дальности связи, что требует повышения энергетического потенциала радиолинии для компенсации затухания. Диапазон ММВ не перегружен, работающие в нем средства связи имеют хорошую электромагнитную совместимость (ЭМС) со средствами связи других диапазонов. Указанное правило нарушается, когда речь идет о распространении продольных ЭМВ (ПЭМВ), существующих в различных средах (плазма, вода, почва и т. д.). Эти волны обладают уникальными свойствами, к сожалению, недостаточно изученными и по сей день, хотя ПЭМВ в плазме (волны Х. Альфвена) были известны уже в 20-х гг. прошлого века;

повышенное затухание в пиках поглощения, позволяющее передавать информацию на СВЧ при низком уровне взаимных помех от различных служб и организовывать скрытую связь на небольших расстояниях вдоль поверхности Земли. Кроме того, частоты, соответствующие пикам поглощения в атмосфере, могут использоваться на межспутниковых линиях связи большой протяженности. В этом случае атмосфера выполняет роль заграждающего фильтра по отношению к помехам Земли. ММВ лучше проникают сквозь туман, дым, дождь, пыль, чем волны видимого и инфракрасного диапазонов. Они с небольшим затуханием прохо-

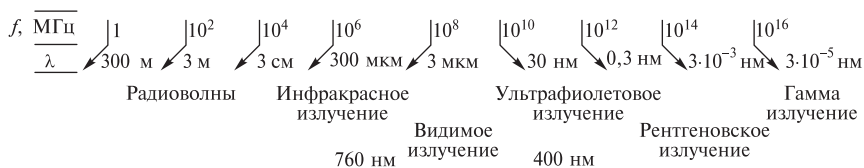


Рис. 1.1. Общая шкала электромагнитных волн

дят через плазму, поэтому применяются для связи с ракетами, преодолевающими ионизированную атмосферу. На непрозрачном участке частот радиоволны ММВ полностью поглощаются и связь невозможна, хотя она вполне осуществима на этих же частотах между двумя космическими радиотехническими аппаратами (РТА), только канал связи будет в данном случае экранирован от наблюдения с Земли;

колебания (флуктуации) на приземных линиях связи ММВ амплитуд, фаз, направлений прихода волн, вызываемые их рефракцией в атмосфере и ее неоднородностями, влиянием Земли, а также переотражением волн от поверхностей ИСЗ, самолетов и других объектов, на которых размещается аппаратура ММВ, проявление эффекта многолучевого распространения. На ММВ имеется заметный доплеровский сдвиг частоты.

Общая шкала электромагнитных волн приведена на рис. 1.1. Как видим, собственно радиодиапазон занимает на этой шкале весьма скромное место. Однако в современной радиотехнике используются как гораздо более низкие, так и более высокие частоты.

Повышение рабочей (несущей) частоты радиосигнала позволяет увеличить информационную емкость $C \sim \Delta\omega$ (где $\Delta\omega$ — полоса частот, занимаемая радиосигналом) канала связи, т.е. фактически скорость передачи (приема) информации. Это, в свою очередь, дает возможность применять комбинированные виды модуляции радиосигнала (амплитудно-фазовую, импульсно-кодировую и т.п.), что существенно увеличивает скрытность, помехозащищенность канала.

Другим обстоятельством, диктующим потребность резкого повышения рабочей частоты f (уменьшения длины волны λ), является необходимость увеличения разрешающей способности радиотехнической системы (РТС), т.е. ширины ее диаграммы направленности θ , которая определяется прежде всего размером поверхности раскрытия антенны D и входными устройствами для пространственно-временной обработки радиосигнала. При ограниченном размере D выигрыш в θ достигается за счет уменьшения λ , так как $\theta \approx \lambda/D$.

Более подробные сведения о диапазонах ЭВМ содержит табл. 1.2.

Таблица 1.2. Характеристики диапазонов ЭМВ

Наименование диапазона	Длина волны λ	Частота f	Назначение, примеры использования
Декамегаметровый	$10^5 \dots 10^4$ км	3 ... 30 Гц	—
Мегаметровый	$10^4 \dots 10^3$ км	30 ... 300 Гц	—
Гектокилометровый	$10^3 \dots 10^2$ км	300 ... 3 000 Гц	—
Мириаметровый (сверхдлинные волны)	100 ... 10 км	3 ... 30 кГц	Дальняя радионавигация
Километровый (длинные волны)	10 ... 1 км	30 ... 300 кГц	Радиовещание
Гектометровый (средние волны)	1 000 ... 100 м	0,3 ... 3 МГц	Радиовещание, морская связь, радионавигация
Декаметровые (короткие волны)	100 ... 10 м	3 ... 30 МГц	Радиовещание, мобильная радиосвязь, любительская радиосвязь (27 МГц)
Метровый (ультракороткие волны — УКВ)	10 ... 1 м	30 ... 300 МГц	УКВ ЧМ вещание, телевизионное вещание, мобильная радиосвязь, самолетная радиосвязь
Дециметровый (L-, S-диапазоны)	1 ... 0,1 м	0,3 ... 3 ГГц	Телевизионное вещание, космическая радиосвязь и радионавигация, сотовая радиосвязь, радиолокация
Сантиметровый (C-, X-, K-диапазоны)	10 ... 1 см	3 ... 30 ГГц	Космическая радиосвязь, радиолокация, радионавигация, радиоастрономия
Миллиметровый	10 ... 1 мм	30 ... 300 ГГц	Космическая радиосвязь, радиолокация, радиоастрономия, медицина, биология
Децимиллиметровый (субмиллиметровый)	1 ... 0,1 мм	300 ... 3 000 ГГц	То же

1.2. Проблемы развития систем сверхбыстрой обработки информации

Динамику развития радиотехники можно представить в виде некоторой восходящей ступенчатой кривой. Начало ее относится к периоду Второй мировой войны, когда были созданы металло-керамические электронные лампы и началось применение печатного монтажа для головок наведения зенитных снарядов. Первые ступеньки этой кривой определялись заметными достижениями в радиотехнике на основе открытий в радиофизике и физике твердого тела (создание транзисторов, полосковых ЛП и т. п.) Последние же ступеньки связаны с новейшими достижениями в области тонко- и толстопленочной гибридной, а также монолитной (полупроводниковой) технологий и их разновидностей, новыми подходами к обработке информации с использованием нелинейных волн и уединенных волн (солитонов). Теперь эти разнородные на первый взгляд направления объединены общей целью создания ССОИ непосредственно на СВЧ и (или) КВЧ, а также на частотах оптического диапазона.

На современном этапе развития общества ССОИ имеют перво-степенное, стратегическое значение. Перефразируя старую истину, можно сказать, что тот, кто владеет всем или почти всем объемом информации, тот владеет миром. К началу XXI в. — века информации — чрезвычайно обострилась борьба за обладание объемами (банками) данных, системами их обработки, хранения, перемещения (передачи), защиты и т. п. Каждая развитая страна стремится владеть возможно бóльшим объемом мирового информационного пространства.

Процесс передела (а попросту — захвата) информационного пространства начался не сегодня. Наиболее серьезным успехом наших противников в этом отношении возможно следует считать тщательно спланированную и блестяще проведенную «операцию» по дискредитации и последующему уничтожению весьма перспективных и обладавших гигантскими потенциальными возможностями ЭВМ семейства БЭСМ, выпускавшихся в СССР с 1953 по 1982 г. После этого наша страна начала сначала медленно, а потом все быстрее отставать от уровня развития передовых ССОИ.

Для преодоления огромного разрыва в возможностях зарубежных и отечественных ССОИ нужны кардинальные научно-технические идеи и организационные мероприятия на государственном уровне, подкрепленные сильной политической волей.

Основной задачей ближайшего будущего в развитии ССОИ является достижение рубежа «трех Т» (скорость действия 1 терафлоп, скорость передачи информации 1 терабайт/с, объем оперативной памяти 1 терабайт). Возможным выходом из создавшейся и совершенно неприемлемой для России ситуации является резкое

(на несколько порядков) повышение тактовой частоты в ССОИ, т.е. переход в диапазоны СВЧ и КВЧ. На этом пути может быть осуществлен «скачок» в качественном улучшении характеристик отечественных ССОИ.

1.3. Перспективы интегральных схем и объемных интегральных схем СВЧ

Переход к ИС и ОИС в СВЧ- и антенно-волноводной технике вполне естественен. По оценкам специалистов необходимое на сегодня быстродействие ССОИ составляет $10^{12} \dots 10^{15}$ бит/с, что, конечно, весьма далеко от известного рубежа «трех Т». Техническая реализация устройств микроэлектроники с такими показателями возможна только с использованием технологии ОИС, в которых базовые элементы неразрывно связаны, т.е. объединены в плоскости подложки конструктивно, технологически и электрически. По способу объединения базовых элементов ИС подразделяются на монолитные и гибридные.

К настоящему времени плоскостные ИС достигли фундаментальных пределов по надежности, возможности межсоединений, массогабаритным параметрам, но самое главное — по полосе рабочих частот, которая определяет скородействие систем обработки информации. Для решения этой проблемы в последние десятилетия разрабатывались большие ИС (БИС) и сверхбольшие ИС (СБИС).

Детальное математическое и физическое моделирование большого набора новых типов СВЧ ЛП позволили по-другому взглянуть на проектирование устройств СВЧ радиотехники и электроники. Историческое развитие ИС СВЧ и сама природа формирования информационных биологических систем подсказывает наилучший вариант: использование третьей координаты в топологии ИС СВЧ, т.е. переход к ОИС СВЧ и КВЧ при обязательном учете особенностей представления и обработки информации.

Идея ОИС пригодна для любой существующей (и тем более для перспективной, например, $2^{1/2}$ -мерной) технологии. Разумеется, гибридная интегральная технология для ОИС не является естественной из-за навесного монтажа активных, нелинейных и других приборов. При таком варианте конструкции приходится устраивать навесные панели или отводить для них более высокие «потолки» в специальных этажах ОИС и т.д. Повсеместное освоение, например, монолитных и полупроводниковых ИС откроет перед ССОИ на ОИС огромные перспективы в плане уменьшения массогабаритных параметров, увеличения быстродействия, повышения надежности и т.п. Особенно наглядно это видно на примерах БИС и СБИС. История развития радио- и вычислительной

техники убеждает в неизбежности перехода к ССОИ на ОИС. Очевидно, что модули ОИС для ССОИ на СВЧ и КВЧ будут развиваться в некотором смысле параллельно БИС и СБИС. Это естественный ход развития радиотехники.

Контрольные вопросы

1. Какие диапазоны ЭМВ применяются для радиосвязи?
2. Какие радиотехнические системы преимущественно используют четвертый — двенадцатый диапазоны и почему?
3. Какими особенностями обладают приземные линии связи на миллиметровых волнах?
4. Что такое рубеж «трех Т»?
5. Какими физическими свойствами определяются информационная емкость и разрешающая способность радиотехнических систем?
6. В чем состоит преимущество трехмерной (объемной) технологии при конструировании антенно-волноводных систем СВЧ?