

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
ВВЕДЕНИЕ	8
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ	13
1.1. Методы анализа СВЧ-устройств.....	13
1.2. Волновые матрицы рассеяния СВЧ-устройств и их свойства.....	16
1.3. Алгоритм объединения блоков декомпозиционных схем СВЧ матричным методом	23
1.4. Метод направленных графов и его использование для объединения блоков декомпозиционных схем СВЧ	25
Контрольные вопросы.....	33
2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАКТ СВЧ	35
2.1. Назначение и структура измерительного тракта СВЧ.....	35
2.2. Измерительный тракт для определения коэффициентов отражения	38
2.3. Измерительный тракт для определения коэффициентов передачи	43
2.4. Коаксиальный измерительный тракт СВЧ	46
2.5. Волноводный измерительный тракт СВЧ	54
Контрольные вопросы.....	60
3. ЭЛЕМЕНТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ СВЧ	61
3.1. Однопортовые элементы (СВЧ-нагрузки)	61
3.2. Двухпортовые СВЧ-элементы измерительных трактов	64
3.3. Трехпортовые узлы измерительных трактов СВЧ	76
3.4. Четырехпортовые СВЧ-элементы измерительных трактов	79
3.5. Детекторы СВЧ-сигналов.....	87
3.6. Преобразователи частоты измерительных СВЧ-сигналов	90
Контрольные вопросы.....	94
4. СКАЛЯРНЫЕ И ВЕКТОРНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ ЦЕПЕЙ СВЧ	96
4.1. Классификация измерителей параметров СВЧ-цепей	96
4.2. Метод разделения волн.....	97
4.3. Погрешности векторных анализаторов цепей и методы их калибровки	99
4.4. Скалярные анализаторы цепей СВЧ. Измерители КСВН и ослабления.....	111
4.5. Векторные анализаторы цепей СВЧ. Измерители комплексных коэффициентов матрицы рассеяния	120
4.6. Автоматизированные вычислительные анализаторы цепей СВЧ	122
4.7. Тенденции развития векторных анализаторов цепей СВЧ.....	133
Контрольные вопросы.....	133
5. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ НА ФИКСИРОВАННЫХ ЧАСТОТАХ	135
5.1. Измерительная линия.....	135

5.2. Измерители полных сопротивлений поляризационного типа.....	146
5.3. Четырехзондовый датчик полных сопротивлений	150
5.4. Метод калибруемого многополосника (Six-Port)	152
5.5. Реализации схем широкополосного калибруемого многополосника.....	155
5.6. Измерение коэффициентов передачи методом калибруемого многополосника	159
5.7. Мостовые методы измерения полных сопротивлений	162
5.8. Измерение ослабления на СВЧ.....	164
5.9. Измерение фазовых сдвигов на СВЧ	168
5.10. Измерение группового времени запаздывания	173
Контрольные вопросы.....	175
6. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА СВЧ	177
6.1. Общие вопросы измерения параметров СВЧ-диэлектриков	177
6.2. Резонаторный метод.....	178
6.3. Метод линии передачи.....	184
6.4. Волноводный метод измерения параметров диэлектриков	186
6.5. Измерение параметров диэлектриков в свободном пространстве.....	189
6.6. Метод торцевого коаксиального датчика	192
Контрольные вопросы.....	198
7. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ СВЧ	199
7.1. Принципы построения измерительных генераторов СВЧ	199
7.2. Аналоговые измерительные генераторы СВЧ	201
7.3. Генераторы шумовых сигналов СВЧ-диапазона	206
7.4. Аналоговые и цифровые синтезаторы частоты	211
7.5. Векторные генераторы СВЧ.....	219
Контрольные вопросы.....	221
8. СКОРОСТНЫЕ И СТРОБОСКОПИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ	222
8.1. Классификация осциллографов	222
8.2. Универсальные и скоростные осциллографы	223
8.3. Принцип действия стробоскопического осциллографа	231
8.4. Структурная схема стробоскопического осциллографа	234
8.5. Особенности применения стробоскопических осциллографов	237
Контрольные вопросы.....	240
9. ЦИФРОВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ СВЧ	242
9.1. Принцип действия и структурная схема цифрового осциллографа.....	242
9.2. Режимы работы цифрового осциллографа	251
9.3. Особенности применения цифровых осциллографов	258
9.4. Измерение джиттера в цифровых системах с помощью ЦО	260
9.5. Обнаружение редких аномалий цифровых сигналов с помощью ЦО	261
Контрольные вопросы.....	264

10. АНАЛИЗАТОРЫ СПЕКТРА СВЧ-ДИАПАЗОНА	265
10.1. Общие вопросы измерения спектра радиосигналов	265
10.2. Принцип действия аналоговых анализаторов спектра последовательного типа.....	270
10.3. Измерение параметров спектральных составляющих сигналов.....	277
10.4. Основные параметры анализаторов спектра	279
10.5. Вычислительные анализаторы спектра	288
10.6. Векторные анализаторы сигналов и измерительные приёмники.....	296
Контрольные вопросы.....	297
11. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ СВЧ-РАДИОСИГНАЛОВ.....	299
11.1. Классификация методов измерения мощности на СВЧ	299
11.2. Терморезисторные преобразователи мощности СВЧ-сигналов	303
11.3. Термоэлектрические датчики мощности	307
11.4. Диодные преобразователи мощности СВЧ	309
11.5. Калометрические СВЧ-ваттметры.....	312
11.6. СВЧ-ваттметры проходящей мощности	316
Контрольные вопросы.....	320
12. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ РАДИОСИГНАЛОВ НА СВЧ	321
12.1. Классификация методов измерения частоты	321
12.2. Аналоговые методы измерения частоты СВЧ-сигналов	323
12.3. Цифровые методы измерения частоты в СВЧ-диапазоне	328
12.4. Преобразователи и переносчики частоты СВЧ-диапазона.....	332
Контрольные вопросы.....	335
ПРИЛОЖЕНИЯ	337
Приложение 1. Список сокращений и их англоязычные эквиваленты.....	337
Приложение 2. Условные обозначения на структурных схемах.....	339
ЛИТЕРАТУРА	344

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современная радиоизмерительная техника высоких и сверхвысоких частот в настоящее время находится в стадии бурного развития. Каждый год появляются новые и модернизированные измерительные приборы и комплексы, модульные системы, виртуальные приборы и пр. Ведущие приборостроительные предприятия и фирмы постоянно улучшают метрологические и эксплуатационные параметры своей продукции. Широкое использование микропроцессорных и вычислительных приборов существенно расширило область использования СВЧ измерительной техники, позволило совместить измерения с процедурой обработки их результатов, автоматизировать их проведение. Однако учебной литературы, в которой рассматриваются вопросы применения современной радиоизмерительной техники СВЧ-диапазона, в настоящее время явно не хватает. Настоящее пособие призвано ликвидировать этот пробел. Его цель — используя материал, изучаемый в дисциплинах «Электромагнитные поля и волны», «Устройства СВЧ», «Техническая электродинамика», «Основы метрологии и радиоизмерений» и подобных им, обеспечить студентов информацией о современных средствах и методах измерений параметров радиоустройств СВЧ-диапазона.

Настоящее учебное пособие посвящено в основном стандартным методам и средствам измерений на СВЧ. Главное внимание уделено современным методам измерений параметров СВЧ-устройств, автоматизированным анализаторам цепей СВЧ, принципам их работы и особенностям использования (главы 1...4). Достаточно подробно рассмотрены традиционные методы с использованием измерительных линий, мостовых схем и методов замещения (гл. 5). Описаны специфические методы и средства измерения параметров диэлектриков на СВЧ (гл. 6). Выделены в отдельную главу 7 вопросы, связанные с принципами построения измерительных генераторов и синтезаторов СВЧ-диапазона. Рассмотрены основные методы и средства измерения параметров СВЧ-сигналов — быстродействующие осциллографы и спектроанализаторы СВЧ, измерители мощности и частоты радиосигналов СВЧ (гл. 8...12).

Данное учебное пособие написано в предположении, что студенты имеют достаточную теоретическую и практическую подготовку по математике, физике, теории электрических цепей, изучали дисциплины «Электромагнитные поля и волны», «Устройства СВЧ и антенны», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Основы метрологии и радиоизмерений» в рамках стандартов направлений «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Оно может быть использовано при изучении курсов «Метрология и радиоизмерения», а также ряда специальных курсов профильной подготовки радиоинженеров по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы», бакалавров и магистров по направлениям «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Материал учебного пособия базируется на курсах лекций и лабораторных работ по дисциплинам «Приборы и техника радиоизмерений» и «Измерения на СВЧ», читаемых в течение многих лет на факультете радиотехники и телеком-

муникаций Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Пособие может быть основой подготовки специалистов в области современной радиоэлектроники в части измерений и тестирования радиоустройств и систем телекоммуникаций СВЧ-диапазона. Автор надеется, что учебное пособие также может быть полезно студентам, аспирантам, научным работникам и инженерам смежных специальностей.

Пособие включает большое количество рисунков, графиков и структурных схем, таблицу условных обозначений и список рекомендуемой литературы по радиоэлектронным измерениям. Контрольные вопросы в конце каждой главы позволяют в процессе самостоятельной работы проверить уровень усвоения материала и способность студентов решать актуальные измерительные задачи.

Автор с благодарностью примет вопросы, замечания и предложения по учебному пособию по адресу: aadanelin@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Под радиоэлектроникой сверхвысоких частот (СВЧ) обычно понимают разделы радиотехники и радиоэлектроники, которые касаются вопросов анализа, синтеза и практической реализации устройств, работающих в области частот от 300 МГц и до 300 ГГц. Согласно отечественным стандартам сюда входят диапазоны ультравысоких (УВЧ: 300 МГц...3 ГГц), сверхвысоких частот (СВЧ: 3...30 ГГц) и крайне высоких частот (КВЧ: 30...300 ГГц). Это деление частотного диапазона соответствует дециметровому (ДМВ), сантиметровому (СМВ) и миллиметровому (ММВ) диапазонам длин волн. В англоязычной литературе используют более мелкое дробление диапазонов УВЧ и СВЧ согласно установленным радиолокационным диапазонам (табл. В.1).

Таблица В.1

Частотный диапазон, ГГц	Обозначение	
0.3...1.0	UHF-band	<i>Ultra High Frequency</i>
1.0...2.0	L-band	<i>Long</i>
2.0...4.0	S-band	<i>Short</i>
4.0...8.0	C-band	<i>Compromise</i>
8.0...12.4	X-band	
12.4...18.0	Ku-band	<i>under K</i>
18.0...26.5	K-band	<i>нем. kurz</i> — «короткий»
26.5...40.0	Ka-band	<i>above K</i>
40.0...75.0	V-band	
75.0...110.0	W-band	

Для обозначения всего СВЧ-диапазона (в широком смысле слова — как совокупность частот диапазонов УВЧ, СВЧ и КВЧ) в англоязычной литературе используется термин *microwaves* (микроволны). Этот термин используется и в отечественной литературе, но чаще всего применительно к технологическим областям (микроволновые печи, мощная микроволновая электроника и пр.).

Отметим особенности и преимущества использования СВЧ-диапазона в современной радиоэлектронике:

- на СВЧ более высокая информационная емкость канала связи при том же отношении сигнал/шум, что и для передачи сигналов низких частот;
- земная атмосфера имеет малое затухание в СВЧ-диапазоне, что обеспечивает более дальнюю радиосвязь;
- в диапазоне 1...10 ГГц наблюдается минимум шумов атмосферного, космического и искусственного происхождения. Это повышает отношение сигнал/шум канала связи;
- с увеличением частоты возрастает направленность антенн, так как она зависит от соотношения размера антенны к длине волны;
- ряд веществ (и прежде всего вода) эффективно поглощают СВЧ-излучение. Это позволяет использовать его в промышленности (СВЧ-нагрев, сушка и плавка);

- быстродействующие системы цифровой связи используют широкополосные сигналы, спектры которых попадают в СВЧ-диапазон.

Направления радиоэлектроники, где используется СВЧ-диапазон частот:

- радиолокация (одно из первых применений электромагнитных волн СВЧ-диапазона);
 - микроволновая радиорелейная связь, обеспечивающая многоканальную передачу аудио-, видео- и цифровой информации различного назначения;
 - кабельная и беспроводная связь (Wi-Fi, Bluetooth, сотовая телефония и др.);
 - спутниковая и космическая связь (передача больших объёмов информации через спутники связи);
 - радионавигация (навигационные системы GPS, ГЛОНАСС и др.);
 - радиоастрономия;
 - метеорология (микроволновые радиометры для исследований в области погоды и климата, а также для атмосферного мониторинга);
 - радиоразведка и радиоконтроль;
 - экспериментальная физика (нагрев и диагностика плазмы, молекулярная спектроскопия газов, жидкостей и твёрдых тел и пр.);
 - материаловедение (исследование свойств веществ в СВЧ-диапазоне);
 - медицина и биология (спектроскопия на основе электронного парамагнитного резонанса, микроволновая диатермия и пр.);
 - метрология (цезиевый и водородный эталон частоты и времени, стандарт напряжения на основе эффекта Джозефсона);
 - технологические и энергетические применения СВЧ-колебаний — нагрев и сушка, приготовление пищи, СВЧ-энергетика (генерация и передача энергии на СВЧ);
 - радиочастотные ускорители заряженных частиц.

Главной особенностью СВЧ-радиоэлектроники является соизмеримость размеров СВЧ-устройств с длиной волны. Это свойство приводит к тому, что традиционные компоненты радиоаппаратуры — соединительные проводники, резонансные контуры, конденсаторы и индуктивности — становятся распределёнными системами. В СВЧ-устройствах вместо соединительных проводников применяют линии передачи, а колебательные системы представляют собой объёмные резонаторы. Вместо сосредоточенных элементов электрических схем используют различные компоненты,ываемые в линии передачи (штыри, диафрагмы и пр.).

Основой теоретического анализа и проектирования СВЧ-устройств является *теория цепей СВЧ*. Она основана на матричном аппарате описания внешних параметров устройств, использует метод декомпозиции анализа сложных объектов и компьютерные методы их моделирования. Для расчёта параметров базовых блоков декомпозиционных схем привлекаются *методы прикладной электродинамики и численные модели* систем автоматизированного проектирования СВЧ-устройств (САПР СВЧ). При практической реализации устройств СВЧ ключевую роль играют экспериментальные методы исследования, настройки и контроля характеристик спроектированных устройств.

Измерения в радиоэлектронике СВЧ (в англоязычной литературе *microwave measurements* — микроволновые измерения) являются совокупностью методов

и средств измерения сигналов и устройств в СВЧ-диапазоне. Обычно под измерениями на СВЧ понимают экспериментальное определение параметров и характеристик закрытых, замкнутых объектов и узлов. Измерения параметров антенн СВЧ и измерения распределения поля в свободном пространстве относят, как правило, к антенной тематике. Последние имеют свою специфику и в настоящем пособии не рассматриваются. Кроме этого, свои особенности в СВЧ-диапазоне имеют методы и средства измерения параметров радиосигналов (осциллография, спектральный анализ, частотные и фазовые измерения и пр.).

Рассмотрим **особенности** измерений на СВЧ по сравнению с традиционными радиоизмерениями на более низких частотах:

- значительные проблемы вызывает подключение измерительной аппаратуры к исследуемому устройству, не нарушающее режим работы устройства. Требуется конструировать специальные элементы подключения СВЧ-датчиков и преобразователей к объекту измерения (создавать *измерительный тракт*);
- излучение электромагнитных волн из отверстий и щелей в измерительной аппаратуре приводит к потерям и искажениям сигналов. Требуется тщательное экранирование измерительных элементов и датчиков. Возникают сложности при введении измерительных датчиков в исследуемые объекты;
- при использовании линий передачи требуется обеспечивать минимальные отражения волн на соединительных элементах, на сгибах и концах линий (обеспечить «согласование» измерительного тракта);
- в волноводных линиях передачи существует неоднозначность отсчёта напряжений и токов. Поэтому в СВЧ-диапазоне для характеристики величины сигналов переходят к мощности как единице измерения их уровня;
- в технике СВЧ необходимо измерять новые параметры — коэффициент стоячей волны, коэффициент отражения, параметры рассеяния.

Кроме перечисленных особенностей, измерениям на СВЧ свойственны **ограничения** технического порядка, связанные с несовершенством существующей аппаратуры:

- на СВЧ сложно создать измерительные генераторы достаточной мощности с перестройкой в широком диапазоне частот и высокой стабильностью частоты;
- практически отсутствуют измерительные усилители со стабильными метрологическими характеристиками в широком диапазоне частот. Это приводит к необходимости работать с измерительными сигналами малого уровня в присутствии шумов и помех;
- ограниченный выбор невзаимных устройств (вентили, циркуляторы), работающих в широком диапазоне частот. Это затрудняет задачу согласования измерительных трактов СВЧ;
- частотные ограничения традиционных радиоизмерительных приборов (осциллографов, вольтметров, частотомеров и пр.) приводят к необходимости создания приборов аналогичного назначения на новых принципах работы (скоростные и стробоскопические осциллографы, переносчики частоты и пр.).

Для решения каждой конкретной измерительной задачи в СВЧ-диапазоне приходится индивидуально подбирать методику и средства измерений, а в ряде

случаев даже разрабатывать уникальную измерительную аппаратуру. Часто требуется выполнять предварительный теоретический и расчётный анализ измерительной схемы, особенно для оценки погрешностей. Поэтому к основным этапам традиционного измерительного процесса (постановка задачи и планирование измерений, выполнение эксперимента и обработка его данных) добавляют этап оценочных измерений. С их помощью приблизительно определяют отдельные характеристики исследуемого устройства, оценивают его работоспособность, возможность работать в штатном режиме. Затем (в случае необходимости) проводят оптимизацию измерительной схемы для получения наилучших результатов (например, добавление вспомогательного усилителя, включение развязывающего устройства, изменение частотного диапазона измерений и пр.). Далее во многих случаях проводят «калибровку» СВЧ измерительного тракта с целью исключения систематических погрешностей, порождённых его несовершенством. Результаты калибровки затем используют при обработке итоговых опытных данных («коррекция ошибок»). Процедура калибровки позволяет получить наивысшую точность результатов.

Какие **виды измерений** в СВЧ-диапазоне имеют существенные отличия от радиоизмерений на более низких частотах? Это прежде всего измерения *внешних параметров* СВЧ-устройств (чаще всего элементов матрицы рассеяния), исследование высокодобротных резонансных структур СВЧ-диапазона, измерение параметров различных материалов в широком диапазоне частот. Эти виды измерений выполняют различными приборами — скалярными и векторными анализаторами цепей СВЧ, измерительными линиями, рефлектометрами на основе калибруемого многополосника и др.

Вид и характеристики *радиосигналов* на СВЧ измеряются более привычными для радиоинженера методами:

- исследование формы сигналов СВЧ-диапазона проводят с помощью быстродействующих цифровых, стробоскопических или — реже — скоростных осциллографов;
- анализ спектров в СВЧ-диапазоне осуществляют спектроанализаторами последовательного типа и анализаторами сигналов СВЧ;
- измерение частоты СВЧ-сигналов проводят резонансным способом или методом дискретного счета с преобразованием частоты (электронно-счётными СВЧ частотомерами);
- измерение фазового сдвига и фазочастотных характеристик СВЧ-устройств выполняют фазометрами с преобразованием частоты или фазовыми детекторами СВЧ;
- измерение значений средней и импульсной мощности СВЧ-сигналов проводят широкополосными ваттметрами с терморезисторными, термоэлектрическими и диодными датчиками.

Какие **стандартные** средства измерения применяют в диапазоне СВЧ? Согласно ГОСТ 15094-86 отечественные средства радиоизмерений классифицируют по функциональному назначению. Радиоизмерительные приборы в зависимости от измеряемых величин и основной измерительной функции делят на подгруппы и виды, которым присваиваются буквенно-цифровые обозначе-

ния. Рассмотрим те подгруппы радиоизмерительных приборов, которые применяются в СВЧ-диапазоне.

Подгруппа Р — приборы для измерений параметров устройств и приборов с распределёнными параметрами. Виды и назначение приборов:

- Р1 — измерительные линии — измерение параметров стоячих волн в линии передачи;
- Р2 — измерители КСВ и ослабления — измерение модулей коэффициентов передачи и отражения;
- Р3 — измерители комплексных коэффициентов отражения и полных сопротивлений нагрузок СВЧ;
- Р4 — измерители параметров матрицы рассеяния — комплексных коэффициентов передачи и коэффициентов отражения.

Кроме этого, для измерения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств применяют комбинированные фазометры вида ФК2, ФК3, которые имеют режимы измерения как фазового сдвига, так и ослабления (коэффициента передачи).

Измерение мощности в СВЧ-диапазоне проводят ваттметрами, входящими в подгруппу М. Виды ваттметров:

- М2 — ваттметры проходящей мощности в линии передачи;
- М3 — ваттметры мощности, поглощаемой нагрузкой линии передачи;
- М5 — измерительные преобразователи, входящие в состав ваттметров (болометрические, термисторные или детекторные датчики).

В качестве универсального регулятора уровня СВЧ-сигналов используют измерительные аттенюаторы, сведённые в подгруппу Д:

- Д2 — фиксированные или дискретные аттенюаторы поглощающего типа;
- Д3 — аттенюаторы поляризационного типа;
- Д4 — предельные аттенюаторы;
- Д5 — поглощающие аттенюаторы с плавной регулировкой.

Измерение частоты проводят приборами подгруппы Ч. Виды частотомеров СВЧ:

- Ч2 — резонансные частотомеры (волномеры);
- Ч3 — электронно-счётные частотомеры с преобразователями частоты.

Осциллографы, используемые в СВЧ-диапазоне, должны иметь широкую рабочую полосу и высокое быстродействие. Этим требованиям удовлетворяют приборы вида С7 — стробоскопические и скоростные осциллографы. Современные цифровые осциллографы (вид С9) также обеспечивают достаточно высокое быстродействие и могут применяться в СВЧ-диапазоне и даже в нижней части КВЧ-диапазона. Анализаторы спектра СВЧ-сигналов отнесены к виду С4. Источниками тестовых радиосигналов в СВЧ-диапазоне являются измерительные генераторы ВЧ и СВЧ — вид Г4 и синтезаторы частоты — вид Г7.

Измерительные приборы зарубежного производства имеют другие, как правило, менее удобные обозначения. Обычно они включают наименование фирмы-производителя и порядковый номер марки прибора.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

1.1. Методы анализа СВЧ-устройств

Главной особенностью СВЧ-устройств является соизмеримость их размеров с длиной волны СВЧ-сигналов. Поэтому анализ и синтез СВЧ-устройств наиболее точно проводится с использованием методов *классической электродинамики*. Практическое использование этих методов в радиоэлектронике называют *техникой СВЧ*. Она включает разработку и применение различных методов анализа и синтеза *СВЧ-устройств с распределёнными постоянными*, то есть устройств, размеры которых соизмеримы с длиной волны. К ним относят различные пассивные и активные блоки радиоэлектронной аппаратуры, соединённые между собой линиями передачи. Особую группу представляют собой антенные СВЧ-устройства, которые предназначены для приёма и передачи сигналов в свободном пространстве.

Применение методов классической электродинамики к анализу реальных СВЧ-устройств вызывает большие сложности в практических задачах. Строгая постановка и аналитическое решение краевых задач электродинамики возможны только для очень простых конструкций. Некоторые задачи могут быть решены с помощью численных методов прикладной электродинамики, реализованных в компьютерных средах проектирования СВЧ-устройств. Однако их применение ограничено мощностью используемых вычислительных средств и требуемым временем анализа.

В настоящее время основой теоретического анализа и проектирования реальных СВЧ-устройств является *теория цепей СВЧ*. Она основана на матричном аппарате описания внешних параметров устройств и методе *декомпозиции* — разбиении сложных объектов на более простые блоки (*базовые элементы*). Глубину декомпозиции (степень разбиения) задают исходя из возможности относительно простого определения параметров отдельных блоков. Для этого применяют как расчётные методы теории цепей, электродинамический анализ и численные методы электродинамики, так и экспериментальные способы. Постановка и решение электродинамических задач для отдельных блоков схемы обычно существенно проще, чем для всего устройства в целом. Используя решение электродинамической задачи или результаты экспериментального исследования (если теоретическое решение не удаётся получить) для каждого блока декомпозиционной схемы, получают их параметры, позволяющие описать процесс преобразования сигналов в каждом блоке. Обычно параметры блоков декомпозиционной схемы СВЧ-устройства описывают с помощью матриц специального вида (*матриц рассеяния*) либо в виде эквивалентной схемы замещения, состоящей из отрезков эквивалентной линии передачи, сосредоточенных элементов L , C , R и трансформаторов. Характеристики всего исследуемого устройства затем рассчитывают методами *теории цепей СВЧ* с использованием алгоритмов матричного объединения блоков.

При практической реализации метода декомпозиции ключевую роль играют экспериментальные методы исследования, алгоритмы настройки и контроля характеристик и параметров спроектированных устройств. Результаты

измерений используют также в случаях, когда для моделирования отдельных узлов и блоков нет достоверных теоретических данных.

В теории цепей СВЧ полагают, что базовые элементы (блоки и узлы) соединены между собой отрезками однородных линий *передачи* (коаксиальных, волноводных и пр.). При построении математической модели исследуемого СВЧ-устройства реальные линии передачи представляют отрезками эквивалентной однородной длинной линии. Вместо токов и напряжений (как в традиционной теории электрических цепей) вводят понятие волн напряжений и токов в эквивалентных линиях, отношение амплитуд которых равно волновому сопротивлению линии передачи Z_0 .

Взаимодействие между блоками в эквивалентной схеме устройства описывают двумя волнами: *падающей* волной a (поступающей на блок) и *отражённой* (рассеянной) волной b , распространяющейся от блока. Волны имеют одинаковую структуру поля, гармонический закон изменения во времени и отличаются только комплексными амплитудами и направлением распространения. Нормировку амплитуд волн выбирают так, чтобы мощности волн определялись соотношениями: $P_{nao} = \frac{1}{2}|a|^2$, $P_{omp} = \frac{1}{2}|b|^2$, где a и b — комплексные амплитуды падающей и отражённой волн. Это устраняет неоднозначность при использовании различных типов линий передачи на входах устройства. Размерность амплитуды волны в этом случае есть $[B/\sqrt{\Omega m}]$, что следует из уравнения для мощности волны:

$$P = \frac{|a|^2}{2} = \frac{1}{2Z_0} \operatorname{Re}(U \cdot U^*).$$

Таким образом, для нормировки амплитуды волны требуется знать *волновое сопротивление* линии передачи Z_0 . Волновое сопротивление зависит от типа электромагнитного поля волны, геометрии поперечного сечения и параметров материала заполнения линии. Известно, что для линий с поперечными типами волн (*T*-волны) этот параметр определяют путём расчёта разности потенциалов между проводниками и полного тока по одному из проводников. Результат не зависит от выбора точек отсчёта потенциалов и контура определения полного тока. Мощность *T*-волны равна произведению напряжения между проводниками и полного тока, что согласуется с классической теорией электрических цепей. Более сложная ситуация определения волнового сопротивления в случае волноводных линий передачи с *H*- и *E*-волнами, имеющими продольные составляющие магнитного и электрического полей. Величина волнового сопротивления волновода зависит от заранее выбранного способа определения напряжения и тока. Так, для прямоугольного волновода с размерами $a \times b$ (основная волна TE_{10}) волновое сопротивление часто определяют как отношение разности потенциалов между широкими стенками волновода в его центре к полному продольному току в широкой стенке. Электродинамический анализ тогда даёт следующее расчётное выражение для волнового сопротивления:

$$Z_0 = \frac{\pi b}{2 a} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\Lambda}{\lambda},$$

где Λ и λ — длины волн соответственно в волноводе и в свободном пространстве. Однако мощность волны, передаваемая по волноводу, в этом случае не равна произведению выбранных таким образом напряжения и тока. Поэтому в ряде случаев используют другие определения, согласно которым волновое сопротивление вводят через напряжение и мощность или через ток и мощность волны в волноводе. Все эти три определения отличаются только постоянным множителем. На практике выбор того или иного способа задания волнового сопротивления не имеет большого значения. Важно, чтобы способ был бы одинаковым для всей декомпозиционной схемы исследуемого устройства.

Другим важным параметром соединительного отрезка линии передачи является ее *электрическая длина* θ , которая равна фазовому набегу волны в этом отрезке. Она пропорциональна физической длине L и постоянной распространения волны (продольному волновому числу) k_z :

$$\theta = k_z \cdot L = \frac{2\pi}{\Lambda} L,$$

где Λ — длина волны в линии передачи.

Отрезки линий соединяют блоки декомпозиционной схемы через входы и выходы, которые в СВЧ-технике принято называть *портами*. Под портом понимают выделенную плоскость элемента связи блока и линии передачи, через которую проходят падающая и отражённая волны с заданным типом поля. Таким образом, порт блока может быть и входом, и выходом — в зависимости от места подключения источника сигнала и нагрузки. В дальнейшем для удобства будем использовать параллельно термины «порт» и «вход» как синонимы. Отметим, что в редких случаях использования многомодовых линий передачи на декомпозиционной схеме для каждой моды необходимо вводить свою эквивалентную линию и соответственно отдельные порты.

В классической теории цепей каждому входу и выходу блока приписывают пару полюсов, а его самого называют *многополосником*. В СВЧ-технике полюсы выделить в явном виде обычно не представляется возможным, однако для многопортового блока традиционное название «многополосник» часто сохраняют. Иногда используют термин « $2N$ -полюсник» для обозначения блока, содержащего N портов и соединённого с N линиями передачи. Более точное обозначение — это *многопортовое* или *N -портовое* устройство. Чаще всего блоки декомпозиционной схемы являются двухпортовыми узлами с одним входом и одним выходом (то есть являются четырехполюсниками в традиционной теории цепей). Блок с одним портом (двусполюсник) называют *СВЧ-нагрузкой*.

В качестве примера на рисунке 1.1 представлена обобщённая декомпозиционная схема СВЧ-устройства, включающая двух- и трехпортовые блоки A , B и однопортовую СВЧ-нагрузку C . Падающая волна a_1 порождает отражённые (рассеянные) волны b_1 и b_2 от блока A . Волна b_2 попадает на блок B , в свою очередь порождая рассеянные волны b_4 и b_5 . Волна b_5 частично отражается от

нагрузки C , создавая падающую на блок B волну a_5 . Два порта устройства (1 и 4) в схеме являются внешними. Они могут рассматриваться как ненагруженные входы или выходы всего устройства.

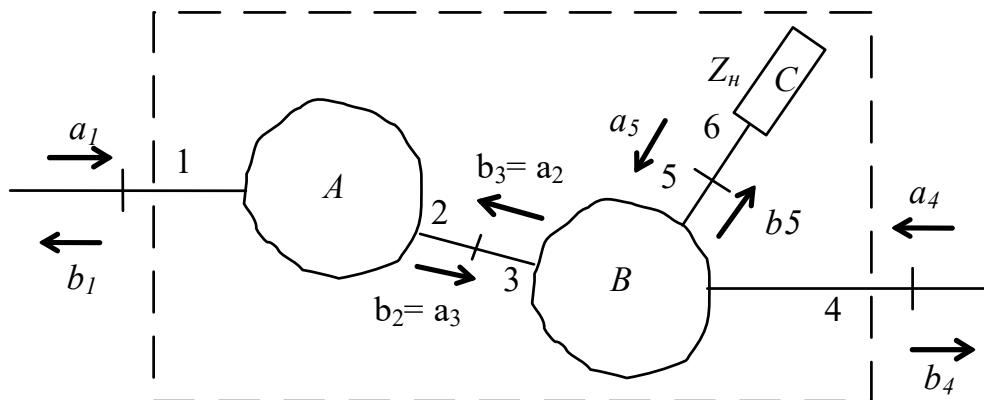


Рис. 1.1. Декомпозиционная схема СВЧ-устройства с тремя базовыми блоками

Таким образом, анализ сложного СВЧ-устройства сводится к нескольким этапам:

- составление декомпозиционной схемы и выделение базовых элементов — узлов и блоков устройства;
- определение расчётным или экспериментальным путём параметров отдельных блоков;
- расчёт общих параметров всего устройства относительно внешних портов (коэффициента передачи, коэффициента отражения от входа и пр.) методами теории цепей СВЧ с использованием алгоритмов объединения базовых блоков.

1.2. Волновые матрицы рассеяния СВЧ-устройств и их свойства

Свойства линейных и квазилинейных СВЧ-устройств чаще всего описывают в терминах *волновых матриц рассеяния (S-параметр матрица)*. Их применяют как для описания свойств декомпозиционных блоков, так и в качестве общих параметров всего устройства. Параметры рассеяния связывают комплексные амплитуды падающих и отражённых (рассеянных) волн на портах и определяют внешние параметры СВЧ-устройств. Особенности внутренней структуры и электродинамические свойства его компонентов здесь остаются скрытыми.

Матрица рассеяния многополюсника СВЧ позволяет по известному столбцу комплексных амплитуд падающих волн $[a]$ определить столбец отражённых $[b]$ волн на его входах $[b] = [S] \cdot [a]$. Так, для двухпортового узла матрица имеет размерность 2×2 . Амплитуды волн на входах связаны между собой системой линейных уравнений

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases}. \quad (1.1)$$

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru