

Оглавление

Предисловие	3
I. Теоретические основы анализа СВЧ цепей	6
1. Характеристики отражения и затухания в СВЧ линиях передачи	11
1.1. Определение понятия «коэффициент отражения в линии»	11
1.2. Связь коэффициента отражения в линии с коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН), входным импедансом линии, коэффициентом отражения нагрузки	14
1.3. Круговая диаграмма линии передачи (диаграмма Смита)	15
1.4. Согласование линий передачи	23
1.5. О некоторых соотношениях между потерями на отражение и передачу для регулярных линий передачи ...	24
1.6. Линии передачи с потерями	25
1.7. Единицы измерения затухания (децибелы и неперы) .	26
2. Представление и описание устройств и цепей СВЧ в обобщённом виде	29
2.1. Эквивалентные многополюсники	29
2.2. Напряжения и токи на входе многополюсника и их связь с падающими и отражёнными волнами	32
2.3. Матричное описание СВЧ многополюсников. Матрица рассеяния	35
2.4. Некоторые свойства многополюсников	41
2.5. Переход от многополюсника к производному четырёхполюснику	46
2.6. Четырёхполюсники СВЧ	47
3. Применение метода ориентированных графов к анализу СВЧ-цепей	56
3.1. Основные определения	56
3.2. Составление графов для СВЧ цепей	58
3.3. Нахождение решений для графов по правилу Мэсона .	62
3.4. Инверсия пути в ориентированных графах	65
3.5. Методы упрощения ориентированных графов	68

3.6. Ориентированные графы матриц	72
II. Инструментальный анализ СВЧ цепей	74
4. Измерительные задачи анализа	74
4.1. Измеряемые «цепные» параметры СВЧ устройств	74
4.2. Измерительные задачи анализа СВЧ цепей	76
4.3. Особенности измерений и анализа цепей в миллимет- ровом диапазоне волн	80
4.4. Некоторые общие требования к измерителям парамет- ров цепей миллиметрового диапазона волн	82
5. Ретроспективный анализ методов и средств измере- ний параметров СВЧ цепей	85
5.1. Зондовые методы измерений	85
5.2. Рефлектометрические методы измерений параметров СВЧ цепей	87
5.3. Методы точного измерения фазы	96
5.4. Методы измерения параметров СВЧ цепей на основе двенадцатиполюсников	101
5.5. Временные методы измерений <i>S</i> -параметров СВЧ цепей	105
5.6. Векторные анализаторы цепей P4-62/P4-63	108
6. Классификация и принципы построения векторных анализаторов цепей	110
6.1. Типы и классификация векторных анализаторов цепей	110
6.2. Гомодинные ВАЦ. Методы измерений в зависимости от модуляции опорного и измерительного сигналов	113
6.3. Структурные схемы автоматических анализаторов це- пей гомодинного типа	126
6.4. Гетеродинные ВАЦ	132
III. Сигнальные процессы и устройства, используемые в ВАЦ	135
7. Модулирование и детектирование сигналов	139
7.1. Амплитудная модуляция	139
7.2. Балансная и однополосная модуляция	143
7.3. О демодуляции АМ сигналов	146
7.4. Угловая модуляция сигналов	148
7.5. Частотная модуляция	148
7.6. Спектр ЧМ сигнала	151
7.7. Фазовая модуляция	154
7.8. Спектр колебания при тональной ФМ	157

7.9. Многотональная угловая модуляция.....	160
7.10. О демодуляции УМ сигналов.....	161
7.11. Квадратурная модуляция.....	162
7.12. Спектры некоторых сигналов с фазовой и частотной модуляцией.....	164
7.13. Детектирование ЧМ сигналов.....	181
7.14. Детектирование ФМ сигналов.....	184
7.15. Импульсная модуляция. Модуляторы и демодуляторы импульсных последовательностей.....	186
8. Преобразование частоты и смесительные устройства	193
8.1. Общие сведения о преобразовании частоты.....	193
8.2. Анализ процесса преобразования.....	196
8.3. Параметры преобразования диодных преобразователей	199
8.4. Диоды с барьером Шоттки.....	202
8.5. Параметры смесителей.....	208
8.6. Схемы балансных смесителей.....	213
8.7. Конструкции балансных смесителей.....	217
9. Формирование квадратурных сигналов измерительной информации	225
9.1. Аппаратурные методы формирования квадратурных сигналов на основе волноводных схем и квадратурных мостов.....	225
9.2. Формирование квадратурных сигналов на основе схем с фазовращателями (ФВ).....	235
9.3. Аппаратурно-программные способы формирования квадратурных сигналов.....	239
9.4. Схемно-цифровые методы формирования квадратурных сигналов измерительной информации.....	244
IV. Частотно-временные преобразования в ВАЦ. Измерения во временной области	247
10. Анализ Фурье. Измерения во временной области..	249
10.1. О частотных и временных характеристиках цепей....	249
10.2. Свёртка функций.....	253
10.3. Анализ Фурье непрерывных сигналов.....	257
10.4. Преобразование Лапласа.....	265
10.5. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ).....	268
10.6. Измерения во временной области.....	278
11. Оконная обработка сигналов. Весовые окна	288
11.1. О применении окон (кадрирования) при измерениях на основе БПФ. Некоторые общие соображения.....	288

11.2. О спектральных утечках.....	290
11.3. Методы оценки спектральных плотностей.....	293
11.4. Спектральная плотность дискретных сигналов. Сглаживающая косинусоидальная функция.....	296
11.5. Некоторые семейства временных окон.....	298
11.6. Основные характеристики временных и спектральных окон.....	307
11.7. Стратегия выбора весовых функций (весовых окон) ..	309
12. Дисперсионные искажения в волноводных линиях передачи и их коррекция.....	313
12.1. Общие представления о влиянии дисперсионных свойств линий на передачу радиосигналов.....	313
12.2. Коррекция дисперсионных искажений	316
V. Моделирование погрешностей и калибровка ВАЦ..	319
13. Моделирование погрешностей в векторных анализаторах цепей. уравнения калибровки и восстановления	319
13.1. Точность измерительных систем и измерительная калибровка	319
13.2. Типы и источники измерительных погрешностей в ВАЦ.....	323
13.3. Моделирование погрешностей двухполюсников	329
13.4. Моделирование погрешностей при измерении параметров четырёхполюсников	333
13.5. Вывод матричных уравнений калибровки и восстановления для 16-параметрической модели восьмиполюсника погрешности	351
13.6. Уравнения калибровки для 16-параметрической модели погрешности	358
13.7. Уравнения восстановления истинных параметров S_{ija} испытуемого устройства по измеренным значениям S_{ijm} для 16-параметрической модели погрешностей... ..	361
13.8. Обобщённая модель погрешности и уравнения калибровки и восстановления при измерении параметров устройств, представляемых $2n$ -полюсниками	364
13.9. Моделирование погрешностей переключения (коммутации) ВАЦ	377
13.10. Использование уравнений калибровки и восстановления при различных видах измерений	380
Приложение А. Выражения некоторых миноров матрицы $[E]$	385

Приложение Б. Выражения для миноров матрицы $[T]$ многополюсника погрешностей	385
14. Методы и средства калибровки векторных анализаторов цепей	388
14.1. Общие сведения о калибрационных мерах (стандартах)	388
14.2. Калибровка ВАЦ по отражению при измерении параметров двухполюсников (или S_{ij} параметров $2m$ -полюсников)	391
14.3. Калибровка ВАЦ при измерении параметров четырёхполюсников	408
14.4. О способах оценки качества калибровки. Поверка (верификация) ВАЦ	413
14.5. О некоторых типах верификационных устройств	418
14.6. Волноводные фланцы калибрационных стандартов и верификационных устройств миллиметрового диапазона волн	428
14.7. Калибровка векторных анализаторов цепей при использовании 16-параметрической модели погрешностей	441
14.8. О калибровке коаксиальных ВАЦ	453
14.9. О дистанционной калибровке ВАЦ с использованием локальных сетей и возможностей глобальной сети Интернет	464
15. Оценка точности измерений ВАЦ	469
15.1. Основные представления математической статистики, используемые в метрологии	469
15.2. О двух подходах к определению и выражению точности измерений	475
15.3. Определение понятия «неопределённость». Источники неопределённости	478
15.4. Измеряемая величина и неопределённость	480
15.5. Классификация неопределённости	482
15.6. Зависимость предельных значений неопределённости измерения рефлектометром обратных потерь нагрузки от направленности ответвителя и согласования источника	483
15.7. Измерение отражений при однопортовой калибровке ..	492
15.8. Калибровка характеристики передачи	495
15.9. Расширенная калибровка АЧХ	496
15.10. Полная 4-полюсная калибровка ВАЦ	498

VI. Реализация векторных анализаторов цепей в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн	500
16. Основные компоненты измерительных схем векторного анализа СВЧ цепей	501
16.1. Генераторы качающейся частоты на ЛОВ	502
16.2. Генераторы с синтезированным источником сигнала ..	505
16.3. Волноводные направленные ответвители и делители мощности	512
16.4. Волноводные ферритовые вентили	534
16.5. Детекторные головки миллиметрового диапазона длин волн	538
16.6. Волноводные аттенюаторы	540
17. Современные модели векторных анализаторов цепей миллиметрового диапазона волн	542
17.1. Векторный анализатор цепей P4-MVM-118 (ВГУИР) ..	542
17.2. Векторные анализаторы цепей ЗАО Elmika (г. Вильнюс, Литва)	546
17.3. Анализаторы цепей миллиметрового диапазона фирмы Keysight Technologies (США)	553
17.4. Модули частотного расширения фирмы Oleson Microwave Labs. Inc. (США) для работы в диапазоне частот до 500 ГГц	560
17.5. Модули источников миллиметрового диапазона волн компании Virginia Diodes Inc. (США)	574
17.6. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн фирмы Anritsu (Япония)	576
18. Тенденции развития и области применения векторных анализаторов цепей	593
18.1. Основные тенденции развития ВАЦ	593
18.2. Новые частотные диапазоны и измерительные среды .	594
18.3. Повышение точности измерений ВАЦ и дальнейшее совершенствование методов и средств их метрологического обеспечения	599
18.4. Расширение функциональных возможностей ВАЦ, применение анализаторов цепей для измерений параметров активных и нелинейных СВЧ устройств	603
18.5. Создание на базе ВАЦ автоматизированных технологических систем, предназначенных для измерений параметров интегральных схем на полупроводниковых пластинах в миллиметровом диапазоне волн	608

18.6. Измерения антенных устройств и эффективной площади рассеяния.....	619
Заключение	628
Приложения	630
1. Связь КСВН в линии передачи с потерями на отражение и передачу.....	630
2. Основные виды матриц. Связь между матрицами $2n$ -полюсника.....	632
3. Соответствие значений отношения мощностей в разгах отношению мощностей в децибелах.....	639
4. Стандартные сечения волноводов и их рабочие диапазоны частот.....	640
5. Параметры прямоугольных волноводов (по версии МЭК).....	641
Используемые аббревиатуры и обозначения	642
Литература	645