



М И Р электроники

А.И. Белоус, М.К. Мерданов,
С.В. Шведов

**СВЧ-электроника
в системах радиолокации
и связи.**

Техническая энциклопедия

В 2-х книгах

Книга 1

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2016

УДК 621.38

ББК 32.85

Б43

Б43 Белоус А.И., Мерданов М. К., Шведов С.В.

СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи.

Техническая энциклопедия

В 2-х книгах

Книга 1

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 688 с. ISBN 978-5-94836-444-5

Впервые в отечественной научно-технической литературе в объеме одной книги детально рассмотрены теоретические основы, физические механизмы и принципы работы всех известных СВЧ-приборов и типовых устройств на их основе, методы расчета и конструирования, базовые технологические, схемотехнические и конструктивные особенности каждого класса СВЧ-приборов, а также наиболее распространенных технических решений радиоэлектронных систем на их основе от РЛС и телекоммуникационных устройств различного назначения до СВЧ-оружия наземного и космического применения.

Энциклопедия оформлена в двух книгах и содержит 17 глав.

В книге 1 последовательно рассматриваются следующие вопросы: теоретические основы радиолокации; основные этапы истории развития радиолокационной техники и СВЧ-радиосвязи; особенности построения систем цифровой обработки радиолокационных сигналов на микропроцессорных комплексах; радары подповерхностного зондирования; антенны и антенные устройства для радиолокации и связи; особенности процесса проектирования микросхем для РЛС; теоретические основы и типовые технические решения как полупроводниковой, так и вакуумной СВЧ-электроники; СВЧ-оружие наземного и космического назначения (включая СВЧ-комплексы по противодействию высокоточному оружию и использование СВЧ-импульсов в задачах защиты от этого оружия).

В книге 2 проведен анализ базовых технологий полупроводниковой СВЧ-электроники; рассмотрены специализированные полупроводниковые СВЧ-приборы для РЛС; ВЧ и СВЧ комплектующие компоненты для РЛС; методы и средства обеспечения надежности РЛС и систем связи; радиофотоника и ее приложения в радиолокационных и телекоммуникационных системах; особенности измерений и анализа СВЧ-устройств; методики измерения электрофизических параметров материалов СВЧ-электроники; радиационная стойкость СВЧ-устройств; особенности проектирования радиационно-стойкой элементной базы СВЧ-устройств (кремний-германиевые, КМОП и КНИ микросхемы).

Материалы энциклопедии содержат ссылки на 1216 основных и более 170 дополнительных использованных авторами источников информации. Данный труд также может служить универсальным справочным пособием для студентов, преподавателей, ученых и инженеров, специализирующихся в области СВЧ-электроники и ее многочисленных применений.

УДК 621.38

ББК 32.85

© 2016 Белоус А.И., Мерданов М. К., Шведов С.В.

© 2016, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-444-5

«На самом деле, цель энциклопедии — собрать знания, рассеянные по свету, привести их в систему, понятную для людей ныне живущих, и передать тем, кто придет после нас, с тем, чтобы труд предшествующих веков не стал бесполезным для веков последующих, и чтобы наши потомки, обогащенные знаниями, стали добрее и счастливее, и чтобы мы не канули в вечность, не сумев послужить грядущим поколениям...»

Дени Дидро

Содержание

Предисловие	11
Введение	17
Глава 1. Теоретические основы радиолокации	25
1.1. Введение	25
1.2. Развитие техники миллиметровых и субмиллиметровых волн	26
1.3. Области применения миллиметровых и субмиллиметровых волн в науке и технике и основные направления разработок	30
1.4. Линии передачи миллиметровых и субмиллиметровых волн	33
1.5. Теоретические основы функционирования радиолокационных устройств	39
1.5.1. Хронология событий, связанных с созданием первых РЛС	39
1.5.2. Базовые принципы функционирования радара	40
1.5.3. Алгоритм обработки сигнала	41
1.5.4. Основная функция радара – измерение расстояния	43
1.5.5. Угол возвышения цели	45
1.5.6. Разрешение радара по цели.....	47
1.5.7. Усиление антенны радара	50
1.5.8. Апертура антенны.....	51
1.5.9. Эффективная площадь рассеяния цели	51
1.5.10. Шумы и эхо-сигналы	54
1.5.11. Радар с разнесением частот	57
1.6. Общие сведения о радиолокационных системах	58
1.6.1. Классификация радиолокационных устройств	59
1.6.2. Первичные радары (Primary Radars)	59
1.6.3. Вторичные радары (Secondary Radars).....	61
1.6.4. Радар непрерывной волны (Continuous Wave Radar)	62
1.6.5. Классификация и принципиальные особенности военных радаров	64
1.6.6. Частотные диапазоны работы радаров	70
1.7. Физические основы радиолокации	74
1.8. Основные тактико-технические параметры РЛС	78
1.9. Классификация радиолокационных устройств и систем	80
1.10. Сравнительный анализ зон действия пассивных разностно- дальномерных систем обнаружения источников радиоизлучения	81
1.10.1. Пассивная разностно-дальномерная система обнаружения ИРИ с минимизацией интервала обзора по разности хода	82
1.10.2. Сравнительный анализ пространственных и энергетических характеристик различных вариантов реализации алгоритмов разностно-дальномерной взаимнокорреляционной обработки	84
1.11. Основные принципы построения программных комплексов моделирования радиолокационных сигналов.....	88

1.11.1. Типовой состав программного комплекса моделирования радиолокационных сигналов	88
1.11.2. Особенности реализации конструктора радиолокационных объектов	91
1.11.3. Особенности задания пространственной конфигурации объекта	92
1.11.4. Расчет проекций БТ на линию визирования	93
1.12. Повышение помехоустойчивости РЛС с использованием автокомпенсаторов мешающих излучений	96
1.12.1. Принцип когерентной компенсации активных шумовых помех	97
1.12.2. Особенности технической реализации структуры автокомпенсатора мешающих излучений	100
1.12.3. Оценка эффективности компенсации активных шумовых помех	103
1.12.3.1. Влияние конечного радиуса пространственной корреляции поля	103
1.12.3.2. Влияние собственных шумов приемных каналов	105
1.12.3.3. Влияние задержки принятых сигналов.....	106
1.12.3.4. Влияние нелинейных искажений	107
1.12.3.5. Влияние неидентичности частотных характеристик каналов.....	107
1.12.3.6. Влияние ошибок самонастройки	108

Глава 2. Основные этапы истории развития отечественной

радиолокационной техники и СВЧ-радиосвязи.....	113
2.1. Краткая история развития отечественной радиолокационной техники.....	113
2.1.1. Основные направления развития отечественной радиолокационной техники	113
2.1.2. Основные этапы становления отечественной радиолокации	114
2.2. Эволюция технических характеристик отечественных РЛС	118
2.2.1. РЛС «Енисей»	119
2.2.2. РЛС «Тропа» и ее модификации	120
2.2.3. РЛС «Терек» (П-18)	122
2.2.4. Советские радиовысотомеры.....	124
2.3. История создания РЛС дальнего обнаружения баллистических ракет и космических объектов	127
2.3.1. Система предупреждения о ракетном нападении.....	127
2.3.2. Наземный эшелон СПРН	130
2.3.3. Космический эшелон СПРН	133
2.3.4. Основные характеристики РЛС системы дальнего обнаружения	136
2.3.4.1. Центральная станция обнаружения баллистических объектов (ЦСО-П)	136

2.3.4.2. РЛС обнаружения типа «Дунай»	136
2.3.4.3. РЛС обнаружения типа «Днестр»	137
2.3.4.4. РЛС обнаружения типа «Днепр»	138
2.3.4.5. Загоризонтная РЛС обнаружения типа «Дуга»	139
2.3.4.6. РЛС обнаружения типа «Даугава»	140
2.3.4.7. РЛС обнаружения типа «Дарьял»	141
2.3.4.8. РЛС обнаружения типа «Волга»	143
2.3.4.9. Многофункциональная РЛС типа «Дон-2Н» (Pill Box)	145
2.3.5. Основные этапы создания системы дальнего обнаружения	146
2.4. Перспективные направления развития РЛС системы ПВО РФ	148
2.5. Основные направления развития отечественных систем СВЧ-радиосвязи	151
Глава 3. Особенности построения систем цифровой обработки радиолокационных сигналов на основе микропроцессорных комплектов СБИС	158
3.1. Особенности построения систем ЦОС на основе СБИС	158
3.2. Влияние технологии СБИС на структуру вычислительных систем РЛС	162
3.3. Алгоритмы ЦОС и методы их реализации	179
3.3.1. Первичная и вторичная обработка сигналов	179
3.3.2. Иерархия задач и операций ЦОС	181
3.3.3. Типовые процедуры и аппаратные структуры ЦОС	184
3.4. Общие вопросы построения микроэлектронной элементной базы для систем ЦОС	198
3.5. Особенности реализации алгоритма синтеза линейных антенных решеток с требуемой диаграммой направленности и целочисленными амплитудными коэффициентами	206
Глава 4. Радары подповерхностного зондирования	214
4.1. Особенности проектирования радаров подповерхностного зондирования	214
4.2. Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли	220
4.3. Георадары с повышенной разрешающей способностью	232
4.4. Сверхширокополосные устройства радиосистем	238
4.4.1. Основные характеристики сверхширокополосных устройств	238
4.4.2. Классификация сверхширокополосных радаров США	239
4.4.3. Анализ ситуации с развитием СШП-технологии в России	244
4.5. ЛЧМ-радиолокатор подповерхностного зондирования с повышенной разрешающей способностью	245
4.5.1. Структура радиолокатора подповерхностного зондирования со сверхширокополосным квазинепрерывным ЛЧМ-сигналом	245
4.5.2. Тракт формирования и обработки сверхширокополосных квазинепрерывных ЛЧМ-сигналов радиолокатора подповерхностного зондирования	249

4.6. Особенности применения радара подповерхностного зондирования с борта летательного аппарата.....	253
4.7. Отечественные георадары.....	256
4.7.1. Георадары серии «Лоза» для подповерхностного зондирования.....	257
4.7.2. Георадары серии «Зонд-12».....	264
4.7.3. Георадары серии «ОКО».....	265
Глава 5. Антенны и антенные устройства для радиолокации и радиосвязи	272
5.1. Основные параметры и типы антенн	272
5.1.1. Введение	272
5.1.2. Характеристики антенн РЛС	273
5.1.3. Основные типы антенн и их технические характеристики	296
5.2. Примеры конструктивных решений антенн для систем радиосвязи.....	311
5.2.1. Компактная антенна для портативных беспроводных систем стандарта WIMAX/WLAN.....	311
5.2.2. Широкополосная микрополосковая антенна с увеличенным коэффициентом усиления	314
5.2.3. Широкополосная СВЧ-антенна бегущей волны	321
5.2.4. Носимые на теле человека антенны	331
5.2.5. Многополосная ПАТЧ-антенна	334
5.2.6. Микрополосковые антенны на тонкой подложке	341
5.2.7. Плоская отражательная печатная антенна для систем сотовой связи.....	348
5.2.7.1. Принцип действия печатной антенны типа «параболическое зеркало»	348
5.2.8. Особенности проектирования зеркальной отражательной решетки антенны ФАР.....	353
5.2.9. Трехдиапазонная щелевая антенна для систем беспроводной связи	358
5.2.10. Широкополосная антенна Вивальди на керамической подложке на 60 ГГц	362
5.2.11. Методологическая основа расчета зеркальных параболических антенн с помощью современных САПР СВЧ	368
5.2.12. Широкополосная логоспиральная антенна с круговой поляризацией.....	385
5.3. Фазированные антенные решетки	392
5.3.1. Классификация, структура и особенности применения ФАР	392
5.3.2. Детализированное описание структуры и принципов функционирования ФАР без единой формулы	396
5.4. Особенности проектирования и оценка надежности систем электропитания активных фазированных антенных решеток РЛС	406
5.5. Компоненты для обеспечения механического позиционирования антенных систем РЛС и радиосвязи	415

5.5.1. Датчики положения (энкодеры).....	416
5.5.2. Вращающиеся сочленения систем позиционирования.....	422
5.6. Состояние и перспективы развития антенных устройств для радиолокации и средств связи	425
5.6.1. Анализ современного состояния развития антенных устройств РЛС	425
5.6.2. Основные направления развития антенных систем перспективных РЛС.....	428
5.6.3. Пути решения технических задач развития перспективных антенных систем РЛС	429
5.6.3.1. Технические решения для направления развития больших космических антенн	429
5.6.3.2. Основные перспективные направления исследований по созданию высокоэффективных антенн с обработкой сигналов	430
Глава 6. Особенности организации процесса проектирования радиолокационных микросхем.....	439
6.1. Особенности организации проектирования радиочастотных микросхем	439
6.2. Возможные типы технологий, используемых для изготовления радиочастотных и СВЧ-изделий.....	451
6.3. Программные средства для проектирования СВЧ ИМС.....	452
6.3.1. Анализ возможностей и преимуществ программных продуктов фирмы Cadence Design Systems, Inc.	452
6.3.2. Перечень необходимых библиотек проектирования, их функциональное назначение, описание	456
6.3.3. Особенности преподавания методов проектирования цифровых систем на языке VHDL	458
6.3.4. Детальное описание процесса проектирования ИМС	461
6.3.5. Программа моделирования радиоэлектронных устройств Multisim Blue	461
6.4. Особенности схемотехнического проектирования фазовращателей для РЛС	481
6.4.1. Основные параметры стандартного фазовращателя	481
6.4.2. Проектирование фазовращателя с использованием средств САПР.....	482
6.5. Примеры эффективных дизайн-центров, работающих в области СВЧ МИС и их применения	489
6.5.1. Российские дизайн-центры	489
6.5.2. Типовые примеры эффективного зарубежного фаблесс дизайн-центра в сфере проектирования СВЧ МИС	491
Глава 7. Основы полупроводниковой СВЧ-электроники	494
7.1. Краткая история развития СВЧ-электроники	494
7.2. Строение и свойства арсенида галлия	502

7.3. Полупроводниковые приборы на основе GaAs	505
7.3.1. Диоды на основе GaAs	505
7.3.2. Полевые транзисторы	508
7.3.3. Биполярные транзисторы с гетеропереходами	512
7.3.4. Новые приборы на GaAs	513
7.4. Состояние и перспективы развития монолитных интегральных схем СВЧ	515
7.4.1. Основные сферы применения монолитных интегральных схем СВЧ	515
7.4.2. Основные материалы для изготовления МИС СВЧ	517
7.4.3. Активные элементы МИС и их надежность	518
7.4.4. Перспективные конструктивно-технологические решения МИС СВЧ	523
7.5. Основные сферы и особенности применения GaAs СВЧ МИС	529
7.6. Краткий сравнительный обзор разработок лидеров мирового рынка СВЧ МИС	537
7.7. Основные направления использования технологии GaAs-монолитных схем СВЧ в зарубежной космической и военной технике	545
7.7.1. Программа MIMIC и ее роль в развитии технологии МИС СВЧ	546
7.7.2. Системы вооружения на основе СВЧ-МИС	547
Глава 8. Вакуумная электроника	557
8.1. Принцип действия, классификация и технологические особенности приборов вакуумной электроники	557
8.2. Применение приборов вакуумной электроники в военной технике США	559
8.3. Основные значения достигнутых параметров ЭВП на 2000 г.	563
8.4. СВЧ-интегральная вакуумная электроника	565
8.5. Мощные СВЧ-модули	573
8.6. Вакуумные СВЧ-приборы сантиметрового, миллиметрового и терагерцевого диапазонов	578
8.6.1. Вакуумные СВЧ-приборы сантиметрового диапазона	578
8.6.2. Вакуумные СВЧ-приборы миллиметрового и терагерцевого диапазона	580
Глава 9. СВЧ-оружие наземного и космического применения	586
9.1. Некоторые научно-технические и военно-стратегические аспекты построения и использования средств поражения космического эшелона противоракетной обороны	586
9.1.1. Технические возможности и ограничения потенциальных средств поражения баллистических ракет	586
9.1.2. Проблемы обеспечения надежности функционирования средств космического эшелона системы ПРО	593
9.1.3. Европейская безопасность и европейская СПРО	599

9.1.4. Космический эшелон СПРН	603
9.1.5. Военно-разведывательные спутники	609
9.2. Основные поражающие факторы и методы воздействия СВЧ-излучений на системы управления радиоэлектронных средств.....	619
9.3. Оружие несмертельного действия наземного применения.....	625
9.3.1. СВЧ-оружие «Система активного отбрасывания».....	626
9.3.2. Лазерное устройство PHASR для временного ослепления и дезориентации противника	631
9.3.3. «Бесшумный страж» (Silent Guardian)	632
9.3.4. Наиболее известные системы нелетального оружия из арсенала Министерства обороны США.....	633
9.3.4.1. «Глушитель речи»	633
9.3.4.2. The Incapacitating Flashlight	634
9.3.4.3. Суперзловонный артиллерийский снаряд	634
9.3.4.4. «Гей-бомба» — оружие на мощных афродизиаках	634
9.3.4.5. Генератор грома	636
9.3.4.6. Перцовая граната.....	636
9.3.4.7. Электрошокер «Taser Shotgun»	636
9.3.5. Проблемы безопасности применения нелетального оружия	637
9.4. СВЧ-оружие атмосферного и космического применения	639
9.4.1. Радиочастотное космическое оружие.....	639
9.4.2. Космическое оружие на основе новых физических принципов.....	642
9.4.3. Системы перехвата МБР на основе плазменного СВЧ-оружия.....	644
9.4.4. Лазерное оружие.....	646
9.4.5. Пучковое СВЧ-оружие.....	648
9.5. СВЧ-комплексы по противодействию высокоточному оружию	649
9.5.1. Классификация, способы применения и типовые цели систем высокоточного оружия	649
9.5.2. Типовой состав и принцип работы комплекса защиты от ВТО	653
9.6. Использование СВЧ-импульсов в задачах защиты от элементов высокоточного оружия	656
9.7. Американская программа высокочастотных активных исследований HAARP	668
9.7.1. Теоретические механизмы возможного использования HAARP для управления погодой планеты Земля	668
9.7.1.1. Эксперименты Николы Теслы	668
9.7.1.2. Возможности использования HAARP в качестве атмосферного оружия	672
9.7.1.3. Управление погодой — побочный продукт работ по ПРО.....	674
9.7.2. Сравнение предполагаемых функции систем типа HAARP, созданных в мире (США, Европа, СССР)	675
9.7.3. Хемоакустические волны — основа сейсмического оружия.....	679

Предисловие

Современная радиоэлектроника представляет собой обширную отрасль науки и техники, которая стремительно развивается, проникая в новые сферы и охватывая все новые области знаний, определяя в современном мире прогресс науки и техники в целом и охватывая все более широкие сферы обеспечения жизнедеятельности человечества.

Ее развитие уже сейчас привело к созданию весьма сложных технических систем, а учитывая все возрастающие требования к этим системам и тенденции развития теоретической и элементной базы радиоэлектроники, в самом ближайшем будущем следует ожидать их дальнейшего усложнения.

Основные области применения современной радиоэлектроники — радионавигация, радиосвязь, радиолокация, радиоастрономия, телекоммуникации, радиометрия, космические и информационные технологии, медицина, метеорология и геология, системы управления вооружением, военной техникой, включая средства радиоэлектронной борьбы и управления высокоточным оружием и средства защиты от него.

Современные радиоэлектронные устройства и системы используют чрезвычайно широкий диапазон частот электромагнитных волн, где нижние частоты лежат около нуля герц, а высшие вплотную подошли к световым волнам.

Наиболее широко в современных радиоэлектронных системах (РЭС) используются так называемые сверхвысокие частоты (СВЧ), включая диапазоны миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Например, к числу основных РЭС только миллиметрового диапазона можно отнести следующие:

- радиолокационные станции (РЛС) с высокой разрешающей способностью, в том числе РЛС опознавания и локации космических объектов с Земли и со спутников, РЛС обнаружения и сопровождения низколетящих целей для зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) и кораблей, бортовые самолетные РЛС и др.;
- различные системы связи, в том числе связь «Земля-космос», межспутниковая связь (например, на частотах в области 60 ГГц вследствие наличия пика в атмосфере до 20 дБ/км в космосе может быть обеспечена дальняя связь между коммерческими и военными спутниками, скрытая от наземных наблюдений), системы сверхдальней связи, скрытая оперативно-тактическая связь для наземного театра боевых действий, опять-таки на частотах полос непрозрачности и др.;
- интеллектуальные средства наведения, в том числе системы активного и пассивного наведения стратегических, тактических, оперативно-тактических ракет, головки самонаведения реактивных снарядов и т.п.;
- радионавигационные системы различного назначения, в том числе самолетные, вертолетные, спутниковые, морские и др., которые охватывают навигацию и опознавание;
- системы радиопротиводействия, широко используемые в современной электронной разведке, связной, сигнальной радиоразведке и т.п.;
- широкий спектр медицинской аппаратуры, включая аппараты магнитно-резонансной терапии (МРТ);

- специальная научная СВЧ-аппаратура для мощных ускорителей элементарных частиц;
- ряд других систем, среди которых особое место занимают системы управления и контроля космической, мобильной наземной, морской и подводной военной техникой.

Технической основой любой подобной РЭС являются различные средства генерирования, преобразования и усиления электрических ВЧ- и СВЧ-колебаний, причем к этим средствам предъявляются весьма высокие требования по стабильности генерируемой частоты.

Поэтому современная радиоэлектроника охватывает исключительно широкий спектр областей знаний — от теории электромагнитных колебаний и распространения волн до закономерностей движения электронов и ионов в различных материалах и средах.

Очевидно, что в связи с непрерывным усложнением решаемых РЭС задач постоянно увеличивается и объем радиоэлектронной аппаратуры, однако простое увеличение количества элементов всегда неизбежно приводило к снижению надежности работы, увеличению габаритов, веса, потребляемой мощности и стоимости, усложнению эксплуатации. Прогресс в области современной полупроводниковой и вакуумной электроники позволяет создавать все более сложные РЭС при существенном снижении их габаритно-весовых характеристик, потребляемой мощности и стоимости, при этом позволяя обеспечить повышение производительности. Поэтому прежде всего именно стремительное развитие радиоэлектроники ставит перед разработчиками и изготовителями задачу миниатюризации аппаратуры путем получения целого ряда новых материалов с совершенно новыми свойствами, и прежде всего приборов электроники (микро-, наноэлектроники, СВЧ полупроводниковой и вакуумной электроники, оптоэлектроники).

Чтобы кратко охарактеризовать всю широту спектра научно-технических направлений современной радиоэлектроники, можно привести только такой факт. Англо-русский словарь по «современной» радиоэлектронике (2013 г.) содержит более двадцати тысяч терминов и включает в себя термины по квантовой радиоэлектронике, радиолокации, теории распространения радиоволн, антенно-фидерным устройствам (АФУ), технике СВЧ, теории надежности, физике и технологии изготовления вакуумных и полупроводниковых приборов, интегральных схем, вычислительной технике и др.

Эта предлагаемая читателям книга ориентирована на очень широкий круг читателей-ученых, инженеров, инженерно-технических работников, студентов и преподавателей колледжей и высших учебных заведений, разработчиков радиоэлектронной аппаратуры коммерческого и военного назначения, специалистов по измерению параметров, регламентному обслуживанию современных и перспективных РЭС, ремонту и эксплуатации.

Столь широкий круг потенциальных читателей книги обусловлен действительно уникальным объектом исследований — СВЧ-электроникой и ее различными применениями в современных радиоэлектронных системах — радиолокации, связи, космической и военной техники.

При написании этой книги авторы использовали концепцию изложения материала, позаимствованную ими из блестящей фундаментальной работы по силовой электронике — «Semiconductor Technical Information technologies and characteristics date», впервые опубликованной Pallisic Corporate Publishing в Германии в 2000 г. и многократно переиздаваемой. Это издание было подготовлено штаб-квартирой одного из мировых лидеров в области полупроводниковой технологии — фирмы Infineon Technologies AG и сегодня, после внесения многочисленных дополнений и уточнений, представляет собой фактически универсальное справочное пособие для ученых и инженеров, специализирующихся в области проектирования и применения широкого спектра современных полупроводниковых изделий и устройств на их основе.

Несомненным достоинством этой книги является то, что авторам в пределах одной монографии талантливо удалось изложить все современные тенденции развития и достижения в области полупроводниковых технологий изготовления прежде всего силовых приборов.

Как и авторы цитируемой работы, при написании этой технической энциклопедии авторы исходили из двух основных постулатов. Во-первых, будущим инженерам-электронщикам, преподавателям и студентам всегда нужно иметь под рукой сборник справочных материалов по современной СВЧ-электронике и различных РЭС на ее основе. Во-вторых, чтобы стать популярным среди широкого круга ученых и специалистов, это издание должно выполнять функции и классического учебника, и надежного краткого справочника, да и просто увлекательной книги.

В многочисленной зарубежной и даже в не столь многочисленной отечественной литературе существует множество публикаций (статьи, монографии, описания патентов, справочники и руководства по применению), рассматривающих некоторые частные аспекты СВЧ-электроники в ее приложениях к задачам радиолокации и связи, — теоретические исследования, методы расчета и проектирования конкретных СВЧ-устройств и систем и др.

Авторы представляемой читателю новой книги поставили перед собой достаточно амбициозную задачу — впервые в отечественной научно-технической литературе попытаться обобщить многочисленную информацию по этой проблеме (как зарубежную, так и отечественную) и в рамках ограниченного объема одной книги как рассмотреть основные физические механизмы и принципы работы наиболее известных СВЧ-приборов и устройств, так и дать конкретные детализированные примеры и рекомендации по применению полупроводниковых и вакуумных СВЧ-приборов и устройств в самых различных технических системах, решающих прежде всего различные задачи радиолокации и связи, и не только.

Еще один из основополагающих принципов принятой авторами концепции изложения материала в этой книге — представление как достаточного объема необходимой справочной информации собственно по принципам работы и составу элементной базы СВЧ-устройств, так и, в отличие от классических учебников с изобилием математических выкладок и физических формул, попытаться по возможности максимально простым языком изложить как основные аспекты проектирования и изготовления базовых элементов СВЧ-устройств (физические принципы их работы, основные апробированные на практике схемотехнические решения,

технологии изготовления), так и важнейшие аспекты основных этапов расчета и конструирования СВЧ-приборов и СВЧ-систем на уровне, доступном для понимания даже слабоподготовленным читателем. Для более углубленного изучения этой проблемы заинтересованному читателю можно обратиться к приведенным в книге многочисленным ссылкам на литературные и интернет-источники.

Насколько авторам удалось в рамках данной книги реализовать эту концепцию — судить читателям.

Такой широкий круг необходимых исследований требует, например, только в области СВЧ-электроники для их проведения привлечения ученых и специалистов по широкому спектру специальностей, таких как: физика конденсированного состояния (01.04.07); физика полупроводников (01.04.10); технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники (05.27.06); вакуумная и плазменная электроника (05.27.02); квантовая электроника (05.27.03); твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах (05.27.01); физическая электроника (01.04.04); оптика (01.04.05); кристаллография, физика кристаллов (01.04.18); физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника (01.04.20); силовая электроника (05.09.12); органическая химия (02.00.03); неорганическая химия (02.00.01); аналитическая химия (02.00.02); электрохимия (02.00.05); физическая химия (02.00.04); химия и технология высокочистых веществ; химия твердого тела (02.00.21); лазерная физика (01.04.21); оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (05.11.07); автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (05.13.06); системы автоматизации проектирования (05.13.12); метрология и метрологическое обеспечение (05.11.15); информационно-измерительные и управляющие системы (05.11.16).

Однако общим для всех этих различных групп и специализаций инженеров является то, что все они должны глубоко понимать суть выполняемых процессов, знать физические принципы построения и особенности работы многочисленного оборудования, хорошо разбираться в аналитическом оборудовании и современных методах анализа, хорошо знать и использовать в своей работе основные физические модели многочисленных технологических операций.

Не является секретом, что в развитие мировой полупроводниковой промышленности в целом и в убедительные достижения ведущих мировых фирм-лидеров огромный вклад внесли (и вносят до сих пор) инженеры-технологи с дипломами российских и белорусских вузов, прошедшие хорошую школу практической подготовки на отечественных предприятиях. Все эти поколения отечественных специалистов-электронщиков изучали азы микроэлектронной технологии в основном по пользовавшимся огромной и заслуженной популярностью и многократно переиздаваемым в СССР переводным изданиям книги «Физика полупроводниковых приборов» ставшего «классиком» великого популяризатора микроэлектроники профессора С.М. Зи и коллективной монографии «Технология СБИС» под его же редакцией, многие положения которых справедливы и для современных субмикронных технологий микроэлектроники. В частности, можно привести фундаментальную монографию «Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов» (Г. Я. Красников 2-е изд., испр. М.: Техносфера,

2011. — 800 с.), в которой детально рассмотрены особенности работы субмикронных МОП-транзисторов, особенности технологии формирования подзатворных диэлектриков, механизмы влияния технологических процессов изготовления (ионного легирования, плазменной обработки, переноса изображения) на деградацию подзатворного диэлектрика, различные конструкции современных субмикронных МОП-транзисторов.

При написании книги авторам оказали существенную помощь многие ведущие специалисты современных НИИ и заводов, специализирующиеся в области исследований, разработки и организации производства различных СВЧ-приборов, устройств и систем на их основе, ученые академических институтов, преподаватели вузов, занимающиеся подготовкой студентов, аспирантов и магистрантов.

Книга представляет собой универсальное справочное пособие и адресована широкому кругу читателей — студентам, преподавателям, инженерам-технологам полупроводниковых производств, инженерам-разработчикам СВЧ-приборов, систем радиолокации и связи, инженерам по проектированию и эксплуатации сложного радиоэлектронного оборудования, ученым и аспирантам, специализирующимся в области СВЧ-электроники и ее приложений.

Авторы хотели бы выразить искреннюю благодарность следующим ученым и специалистам, оказавшим наиболее существенную помощь авторам при написании этой книги (материалами, советами и практическими замечаниями), это: Чернявский А.Ф., академик НАН Беларуси, Казак Н.С., директор Института физики НАН Беларуси, академик НАН Беларуси, Витязь П.А., академик НАН Беларуси, Чижик С.А., академик НАН Беларуси, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси, Корзюк В.И., академик НАН Беларуси, профессор кафедры Института математики НАН Беларуси, Пилипенко В.А., член-корр. НАН Беларуси, Муравьев В.В., член-корр. НАН Беларуси, Комаров Ф.Ф., член-корр. НАН Беларуси, Федосюк В.М., член-корр. НАН Беларуси, Костромицкий С.М., член-корр. НАН Беларуси, директор ОАО «КБ Радар», Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, ректор БГУ (Минск, Беларусь), Гусев О.К., д.т.н., профессор, проректор БНТУ (Минск, Беларусь), Чернуха Б.Н., к.т.н., Заместитель директора по научной работе НИРУП «Геоинформационные системы» НАН Беларуси, Витер В.В., к.т.н., главный конструктор ГП «Ремонтный завод радиоэлектронного оборудования», Телец В.А., д.т.н., профессор, директор Института экстремальной прикладной электроники НИЯУ МИФИ, Залесский В.Б., к.ф.-м.н., заведующий лабораторией Института физики НАН Беларуси, Шиллер В.А., к.т.н., главный специалист ОАО «НИИМА «Прогресс», Лобанович Э.Ф., к.ф.-м.н., заместитель директора РНЦ «Курчатовский институт», Яшин Г.Ю., к.ф.-м.н., начальник НИЛ-723 ФГУП «НИИ «Вектор», Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор БГУИР (Минск, Беларусь), Хвощ С.Т., д.т.н., профессор, генеральный директор ЗАО «Электронная компании «ЭЛКУС» (Санкт-Петербург, Россия), Кернасовский Ю.М. директор ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», Горовой В.В., к.т.н., Борисенко В.Е., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой нано- и микроэлектроники БГУИР (Минск, Беларусь), Кучинский П.В., д.ф.-м.н., профессор, директор НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ (Минск, Беларусь), Никифоров А.Ю., д.т.н., профессор, директор ОАО «СПЭЛС», Толочко Н.К., д.ф.-м.н., профессор, Бибило П.Н., д.т.н.,

профессор, Эннс В.И., к.т.н., заместитель генерального директора ОАО «НИИМЭ и Микрон» (Зеленоград, Россия), Лыньков Л.М., д.т.н., профессор БГУИР (Минск, Беларусь), Оджаев В.Б., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой БГУ (Минск, Беларусь), Осипов М.С., к.т.н., начальник отдела военного и оборонного сотрудничества Департамента оборонной промышленности и военно-технического сотрудничества ПК Союзного государства, к.т.н., Машевич П.Р., к.т.н, ОАО «Ангстрем», Гамкрелидзе С.А., главный научный сотрудник ИСВЧПЭ РАН, д.т.н., профессор.

Авторы выражают благодарность Гордиенко С.В. за работу по техническому оформлению рукописи для публикации и Сизову Ю.В. за помощь в переводе с английского языка материалов, использованных в гл. 1.

Особую благодарность авторы высказывают основным рецензентам этой книги — директору федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), заслуженному деятелю науки Российской Федерации, д.т.н., профессору Мальцеву П.П. и академику НАН Б Лабунову В.А., чьи критические замечания во многом способствовали появлению книги именно в этом формате, а также академику РАН Велихову Е.П., предоставившего авторам ряд уникальных материалов, использованных в гл. 9, Гусинскому А.В., д.т.н. и его сотрудникам, за материалы, положенные в основу гл. 15.

Введение

Глава 1 посвящена краткому изложению теоретических основ радиолокации. Здесь в сжатом виде представлены теоретические основы функционирования радиолокационных устройств, начиная с хронологии исторических событий, связанных с созданием первых РЛС, описания базовых принципов функционирования радаров, типовых алгоритмов обработки сигналов (расстояние до цели, зона однозначного определения дальности цели), характеристики антенных устройств (усиление сигнала, апертура антенны, зона однозначного определения цели, шумы и эхо-сигналы), а также общие сведения о РЛС (классификация, частотные диапазоны работы, основные тактико-технические параметры, сравнение зон действия пассивных разностно-дальномерных систем обнаружения различных источников радиоизлучения, различия между военными, гражданскими радарными).

Отдельные параграфы главы посвящены изучению основных принципов построения различных программных комплексов, предназначенных для моделирования радиолокационных сигналов, типовые составы таких комплексов, особенности работы инженеров-разработчиков РЛС с «конструкторами радиолокационных объектов», особенности задания пространственной конфигурации объекта, повышение помехоустойчивости современных РЛС с использованием автокомпенсаторов, мешающих излучению, на основе использования принципов когерентности компенсации активных шумовых помех, включая особенности технической реализации таких автокомпенсаторов и методики оценки эффективности применяемых методов компенсации активных шумовых помех современных РЛС.

Глава 2 посвящена краткому анализу основных этапов истории развития отечественной (советской и российской) радиолокационной техники за весь обозримый исторический период ее развития.

Здесь рассмотрены основные этапы становления отечественной радиолокационной техники на конкретных примерах РЛС — «Енисей», «Тропа» и ее модификации «Терек» (П-18), а также отечественных радиовысотометров.

Кратко изложены основные этапы истории создания советских РЛС дальнего обнаружения баллистических ракет и различных космических объектов, в частности отечественной системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН), включая этапы создания как наземных, так и космических эшелонов этой СПРН.

Приведены основные характеристики отечественной РЛС системы дальнего обнаружения, основные технические проблемы, успехи и неудачи этапов создания элементов комплексной системы дальнего обнаружения, а также перспективного направления развития РЛС систем противовоздушной обороны.

Отдельно рассмотрены основные направления развития и технические характеристики современных отечественных систем СВЧ-радиосвязи.

Глава 3 посвящена изучению особенностей построения систем цифровой обработки радиолокационных сигналов на основе микроэлектронной элементной базы — специализированных микропроцессорных комплексов сверхбольших интегральных микросхем (СБИС).

Здесь рассмотрены основные тенденции и аспекты влияния современных развивающихся технологий СБИС на информационные и управляющие структуры современных РЛС (стандартные алгоритмы ЦОС и методы их практической реализации, в том числе как для первичной обработки сигналов (что особенно важно для современного театра военных действий), так и для элементов вторичной обработки сигналов, определяющих как быстродействие, так и точность определения целей современных РЛС наземного и космического эшелонов СПРО).

Основной интерес для инженеров-разработчиков (электронщиков и программистов) современных РЛС представляет иерархия задач «операций» ЦОС применительно к задачам современных РЛС, а также типовые процедуры и оптимальные аппаратные структуры систем ЦОС применительно к конкретным задачам РЛС.

В качестве конкретного примера рассмотрены структуры микросхем отечественного микропроцессорного комплекта РЛС серии 1815, на базе которого спроектирована АФАР РЛС «Волга».

Завершает эту главу анализ общих вопросов в методологических подходах к построению специализированной микроэлектронной базы для систем ЦОС вообще и для задач радиолокации и связи в частности.

Глава 4 посвящена рассмотрению такого специфического самостоятельного направления радиолокационных устройств, как радары подповерхностного зондирования.

Здесь рассматриваются как все известные РЛС дистанционного зондирования Земли, так и специфические георадары с повышенной разрешающей способностью, георадары для поиска мин, фугасов и несанкционированно заложенных взрывных устройств в зданиях, сооружениях, на автомобильных и железных дорогах и путях следования военных колонн в различных условиях окружающей среды.

Заслуживают особого внимания читателей разделы, посвященные анализу современного состояния и тенденций развития сверхширокополосных устройств радиосистем различного (гражданского и военного) назначения. Здесь приведены результаты анализа ситуации с развитием сверхширокополосной технологии радарной техники в мире и в России, в том числе приведены основные характеристики и технические решения построения радиолокаторов подповерхностного зондирования с повышенной разрешающей способностью (структура, особенности проектирования, способы формирования и обработки сверхширокополосных частотно-модулированных сигналов и пр.).

Впервые в открытой научно-технической печати здесь детально рассмотрены особенности применения радаров подповерхностного зондирования с борта летального аппарата (самолета, вертолета, дирижабля, воздушного шара и т.п.).

В заключение главы приведены основные технические характеристики наиболее широко известных отечественных георадаров (серии «Лоза», «ОКО», «Зонд» и др.).

Глава 5 посвящена вопросам проектирования, изготовления и применения различных антенн и антенных устройств для систем радиолокации и связи. Здесь приведены основные параметры и типы производимых в мире и в России систем, примеры наиболее эффективных конструктивных решений (в том числе антенны

для портативных беспроводных систем стандарта WIMAX/WLAN), широкополосных микрополосковых антенн — с увеличенным коэффициентом усиления, широкополосных СВЧ-антенн бегущей волны, носимых непосредственно на одежде и даже на теле человека, многополосных ПАТ — антенн, микрополосковых антенн на тонкой подложке, плоских отражательных печатных антенн для систем сотовой связи, трехдиапазонных щелевых антенн для систем бесперебойной связи, широкополосных антенн на керамической подложке, широкополосных многоспиральных антенн с поляризацией и т.п., в том числе рассмотрены методы расчета этих антенн и антенных устройств с помощью современных средств автоматизированного проектирования.

Отдельный раздел главы посвящен фазированным антенным решеткам — классификации, структуре и особенностям применения.

Здесь с точки зрения авторов заслуживает особое внимание разд. 5.3.2 этой главы, где приведено достаточно детализированное описание структуры и основных принципов работы ФАР без использования в тексте хотя бы одной формулы. Конечно, этот раздел предназначен в первую очередь для радиолюбителей и студентов.

В качестве самостоятельного раздела этой главы выделены специфические вопросы проектирования и оценки надежности одного из важнейших компонентов ФАР — систем электропитания. Здесь также приведен анализ состояния и основных проблем развития различных компонент, необходимых для успешного решения задачи обеспечения механического позиционирования антенных систем РЛС и различных устройств и систем радиосвязи. Это датчики положения объекта (энкодеры), различные «вращающиеся» элементы систем позиционирования РЛС и другие компоненты.

Здесь же рассмотрены состояние и ближайшие перспективы развития современных системных устройств для радиолокации, систем связи, а также основные тенденции и пути решения очевидных для разработчиков конкретных технических задач развития перспективных антенных систем как РЛС, так и коммерческих систем беспроводной связи.

Глава 6 посвящена конкретным проблемам и особенностям организации процесса проектирования радиолокационных микросхем.

В начале главы рассмотрены специфические особенности проектирования радиочастотных микросхем (особенности этапов моделирования радиочастотных микросхем в составе проектируемой радиоэлектронной системы, в составе существующей радиоэлектронной системы, формирования необходимых последовательностей тестовых сигналов с приемлемыми параметрами, анализом требований к оборудованию и программным средствам, требуемым для организации рабочего места проектировщика радиочастотных схем, и др.).

Рассмотрены различные типы микроэлектронных технологий, используемых для изготовления радиочастотных изделий.

В разделе, посвященном программным средствам для проектирования СВЧ ИМС, дан детальный анализ возможностей и особенностей наиболее широко используемых на практике программных продуктов фирмы Cadance Design System, приведен детализированный перечень необходимых библиотек проектирования,

их функциональное назначение и описание, рассмотрены основные особенности методов проектирования цифровых систем на языке VHDL, приведено детальное описание маршрутов проектирования микросхем.

В качестве одного из примеров детально рассматриваются особенности схемотехнического проектирования фазовращателей для РЛС.

Глава 7 посвящена физическим основам полупроводниковой СВЧ-электроники. Изложена краткая история развития СВЧ-электроники как одной из ветвей микроэлектроники, рассмотрены строение и свойства базового полупроводникового материала — арсенида галлия, основные типы полупроводниковых приборов на его основе (диоды, полевые транзисторы, биполярные транзисторы с гетеропереходами, новые типы GaAs-приборов).

Детально рассмотрены состояние и перспективы развития сравнительно нового типа GaAs-приборов монолитных интегральных схем СВЧ (МИС СВЧ): особенности конструкции и технологии изготовления, основные используемые для их изготовления материалы, особенности конструкций активных элементов МИС СВЧ и проблемы обеспечения их надежности, перспективные конструктивно-технологические решения МИС СВЧ.

Представлен краткий сравнительный обзор разработок лидеров мирового рынка, а также основные направления использования МИС СВЧ в зарубежной и отечественной космической военной технике.

Глава 8 целиком посвящена одному из наиболее «старых» направлений СВЧ-электроники — вакуумной электронике.

Здесь в начале главы рассматриваются принципы работы, классификации и технологические особенности как «классических», так и новых типов приборов вакуумной электроники, основные значения достигнутых параметров приборов.

Более детально рассмотрены особенности конструкции, технологии и схемотехники относительно нового направления приборов вакуумной СВЧ-электроники — мощных СВЧ-модулей, вакуумных СВЧ-приборов сантиметрового, миллиметрового и терагерцового диапазонов.

Глава 9 посвящена анализу научно-технических и военно-стратегических аспектов разработки и применения различных видов современного СВЧ-оружия, разрабатываемого для условий космического и наземного применения.

Прежде всего, рассмотрены основные аспекты построения и использования средств поражения космического эшелона систем противоракетной обороны — технические возможности и ограничение потенциальных средств поражения баллистических и оперативно-тактических ракет, проблемы обеспечения надежности функционирования средств космического эшелона. В частности, показано, что из двух составляющих компонент надежности — технической надежности и оперативной (боевой) надежности — последний компонент является наиболее важным, поскольку он характеризует способность компонентов системы ПРО выполнять запрограммированные боевые функции в любых ситуациях и во всех заложенных военными заказчиками рабочих режимах и условиях.

Детально рассмотрены поражающие факторы и методы воздействия СВЧ-излучения на системы управления радиоэлектронных средств и их компонентную базу.

В рамках отдельных разделов рассмотрены все известные виды оружия «несмертельного» действия наземного применения («системы активного отбрасывания» или «луч боли», «глушитель речи», устройство для временного ослепления и дезориентации противника, «бесшумный страж» и др.). Здесь же рассмотрены наиболее известные системы «нелетального» оружия из арсеналов Пентагона и силовых структур.

Отдельно рассмотрены компоненты СВЧ-оружия наземного и космического боевого назначения. Это различные виды радиочастотного космического оружия и оружия на новых физических принципах, системы перехвата баллистических ракет на основе плазменного оружия, лазерное и пучковое СВЧ-оружие.

Здесь же рассмотрены и различные системы защиты от СВЧ-оружия.

Так, в рамках специального раздела рассматриваются технические аспекты построения и применения различных СВЧ-комплексов противодействия высокоточному оружию (ВТО), классификации, способы применения, типовые цели, типовой состав и принципы работы комплекса защиты от ВТО и др.

Завершает главу обобщенный анализ известной американской программы так называемых «высокочастотных активных исследований», более известной специалистам как система ХААРП.

Здесь рассмотрены теоретические механизмы возможности использования систем типа ХААРП для управления погодой планеты Земля, создания «метеорологического» (атмосферного) оружия, хемоакустические волны как основа создания «сейсмического» оружия.

Приведено сравнение предполагаемых выполняемых функций всех систем типа ХААРП, созданных в мире (США, Европа, СССР, Россия).

Глава 10 посвящена рассмотрению базовых технологий полупроводниковой СВЧ-электроники.

Дан анализ состояния и тенденций развития как зарубежных, так и отечественных полупроводниковых СВЧ-технологий, детально рассмотрены как традиционные, так и перспективные типы СВЧ-технологий: на основе арсенида галлия, нитрида галлия, карбида кремния, «алмазные» и другие технологии.

В частности, рассмотрены особенности отечественной технологии изготовления арсенид-галлиевых малошумящих «мощных» транзисторов СВЧ- и КВ-диапазонов, мощных СВЧ-транзисторов и СВЧ МИС на основе нитрида галлия, широкополосных транзисторных усилителей СВЧ-диапазона, особенности технологии изготовления СВЧ-усилителей для радаров АФАР и др.

Рассмотрены новые приложения СВЧ-технологии в МЭМС — особенности реализации радиочастотных МЭМС (КМОП-устройства, МЭМС-переключателей, конденсаторов, резонаторов и др.).

Завершает главу раздел, посвященный особенностям технологии конструирования полупроводниковых СВЧ-приборов и СВЧ МИС.

Глава 11 посвящена анализу полупроводниковых СВЧ-приборов, предназначенных непосредственно для комплектации современных РЛС и систем связи.

Здесь детально рассмотрена элементная база приемо-передающих модулей АФАР (аттенуаторов, фазовращателей, переключателей, предусилителей, малошумящих усилителей и усилителей мощности), а также широкий спектр помехоподавляющих приборов для АФАР.

Приведена номенклатура и основные технические параметры СВЧ-приборов основных отечественных изготовителей (АО «Микроволновые системы», ЗАО «НПП «Планета-Аргалл», НПП «Пульсар» и др.), рассмотрены основные зарубежные микросхемы для приемо-передающих модулей РЛС на основе нитрида галлия, в частности изготовителей «Mini-Circuits», Hittite Microwave и др. Здесь же рассмотрены особенности выбора элементной базы для систем вторичного питания АФАР.

Глава 12 посвящена рассмотрению ВЧ и СВЧ комплектующих компонентов для РЛС – микрополосковым фильтрам, СВЧ-фильтрам на поверхностных акустических волнах (ПАВ-фильтры), кабельных гермовводов, мощных полосковых СВЧ-резисторов, высокочастотных соединителей, керамических СВЧ-компонентов для РЛС (керамических и пленочных конденсаторов, сетевых фильтров, специальных соединителей и кабельных «сборок»).

Завершает главу раздел, посвященный эволюции конструкции корпусов для устройств и блоков РЭА РЛС.

Глава 13 посвящена рассмотрению комплекса методов и средств обеспечения надежности радиолокационных систем и средств связи. Здесь детально рассмотрены физические и технические аспекты проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) (природа электромагнитных помех, типы и классификация ЭМС, нормы и стандарты, технические решения задач обеспечения электромагнитной совместимости микропроцессорных блоков управления РЛС и средств связи).

Приведены классификационные и основные технические характеристики защитных СВЧ-устройств для РЛС и систем связи.

Заслуживает особого внимания раздел, посвященный особенностям оценки ресурса СВЧ-устройств РЛС с учетом надежности механических составных частей, которые ранее не учитывались разработчиками РЛС, что приводило к искусственному завышению расчетной надежности РЛС. Детально рассмотрены особенности организации внутренних и внешних цепей электропитания СВЧ-устройств современных РЛС.

Приведены типы и основные характеристики ряда специальных ВЧ- и СВЧ-компонентов для подавления электромагнитных помех.

Завершает главу рассмотрение комплекса вопросов, посвященных методам испытания СВЧ-устройств, в том числе на устойчивость к электростатическим разрядам (стандарты испытаний как на уровне отдельного СВЧ-устройства, так и на системном уровне).

Глава 14 посвящена относительно новому и стремительно развивающемуся научно-техническому направлению – вопросам применения радиофотоники в телекоммуникационных и радиолокационных устройствах и системах.

Рассмотрены физические принципы работы, конструктивные и технологические аспекты изготовления и применения фотонных устройств на основе поверхностных излучающих лазеров с вертикальным резонатором, излучающего лазера сплавной конструкции (электрические и энергетические параметры, шумовые и малосигнальные частотно-модуляционные параметры, линейность в режиме большого сигнала, спектральные и перестроечные характеристики лазеров непрерывной (VECSEL, MEMS-VCSEL, LICSEL) и импульсной (VECSEL-SESAM, MIXSEL) генерации).

Приведены конкретные технические решения проблем применения радиофотонных устройств в радиолокационных системах (активные линии задержки, каналы передачи СВЧ-сигналов на большие расстояния, системы распределения сигналов по полотну АФАР РЛС, измерительно-калибровочные комплексы и средства для таких РЛС).

Завершает главу анализ СВЧ-фотодетекторов для систем радиофотоники, радиолокации и оптоволоконной связи.

Глава 15 по количеству представленного материала является самой объемной — содержит 12 разделов и 40 подразделов, поскольку посвящена проблемам изменений и анализа современных СВЧ-устройств. Как известно, для цифровых микроэлектронных устройств по стоимости решения задачи их тестирования уже сравнимы, а иногда даже превышают стоимость разработки и изготовления. А для СВЧ-устройств в силу специфики измеряемых устройств задача значительно усложняется.

Поэтому здесь рассмотрен по возможности весь сложный комплекс технических проблем — от теоретических аспектов до рассмотрения конкретных методик, аппаратных средств и приборов, особенностей их применений, необходимых для достоверной оценки характеристик современных СВЧ-приборов как на стадии проектирования, так и на стадиях их эксплуатации.

Глава 16 посвящена особенностям взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с фотонными структурами, включающими нанометровые металлические, диэлектрические и полупроводниковые слои.

Представлены результаты анализа современного состояния исследований в области технологий и методов контроля параметров диэлектрических и проводящих материалов (измерение электрофизических параметров волноводными, мостовыми резонаторными методами, методами волноводно-диэлектрического резонанса, методами с использованием синхронизированных генераторов СВЧ-излучения и т.д.).

Представлено описание комплексной математической модели, включающей описание и анализ результатов компьютерного моделирования зависимости спектров отражения волноводных фотонных структур от положения дефекта («нарушения») в структуре фотонного кристалла, от параметров конкретного дефекта, результаты моделирования спектров отражения волноводных фотонных структур для различных диапазонов частот.

Последний раздел главы посвящен анализу как известных ранее, так и полученных авторами результатов экспериментальных исследований взаимодействия СВЧ-излучения с одномерными волноводными фотонными структурами и результатов измерения различных параметров СВЧ-материалов с использованием волноводных фотонных структур.

Глава 17 посвящена анализу актуальных проблем обеспечения радиационной стойкости современных СВЧ-устройств.

Здесь детально рассмотрены особенности влияния различных видов ионизирующих излучений на рабочие характеристики кремний-германиевых СВЧ-приборов (гетероструктурных биполярных транзисторов, микросхем малощумящих и широкополосных СВЧ-усилителей и управляемых напряжением генераторов).

Рассмотрены особенности проектирования радиационно-стойкой библиотеки проектирования СВЧ-функциональных блоков на базе отечественных КМОП КНИ технологии (транзисторов, МОП-варикапов, R, C, L-элементов).

Завершает главу раздел, посвященный особенностям проектирования пассивных элементов для радиационно-стойких монолитных кремний-германиевых СВЧ ИМС (микрополосковые линии передачи, интегральные индуктивности, трансформаторы).

ГЛАВА I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИИ

1.1. Введение

Современная радиоэлектроника представляет обширнейшую отрасль науки и техники, которая, проникая в новые сферы и охватывая все новые области знания, стремительно развивается, определяя в существенной мере прогресс науки и техники в целом. Развитие радиоэлектроники идет по многим направлениям, в том числе это:

- создание и развитие новых технологий, новых поколений и новых типов элементной базы в широких частотных диапазонах;
- освоение новых частотных диапазонов, включая создание радиоэлектронных систем с новыми свойствами и характеристиками, а также элементной базы и средств метрологического обеспечения для них;
- все более широкое использование средств цифровой обработки сигналов в радиоэлектронных системах и средствах вооружения;
- интенсивное развитие антенно-волноводной техники, в том числе в новых осваиваемых частотных диапазонах, создание новых типов радиолокационных систем с фазированными антенными решетками и т.п.;
- использование новых физических принципов и явлений для создания более совершенных радиоэлектронных устройств, с одной стороны, и применение радиометодов при изучении и исследовании различных физических процессов и явлений (астрономия, биология, диагностика плазмы, исследование высокотемпературной сверхпроводимости и т.д.) — с другой.

Особое место в области радиоэлектроники занимают вопросы создания и применения радиоэлектронных СВЧ-систем и средств, в том числе сантиметрового, миллиметрового, а в последние годы и субмиллиметрового диапазонов волн. При создании подобных систем используют разнообразные СВЧ-устройства и их соединения. Исследование характеристик и параметров СВЧ-устройств при их создании и проверка соответствия таких устройств спецификационным требованиям при производственном выпуске, а также многие другие задачи и исследования требуют соответствующих средств инструментального анализа СВЧ-устройств и их соединений.

Многообразие используемых в СВЧ-диапазонах типов линий передачи и устройств обуславливает многообразие параметров и характеристик, описывающих их свойства и требующих экспериментального определения. Это, в свою очередь, приводит к необходимости решения разнообразных измерительных задач, что возможно с помощью соответствующих измерительных средств. Парк существующих и создаваемых измерительных средств весьма велик, так как должен обеспечивать измерения всех параметров и характеристик СВЧ-устройств, интересующих раз-

работчиков систем и других потребителей, в различных частотных диапазонах и для разных используемых типов линий передачи.

Современные методы анализа и расчета СВЧ-устройств и их соединений в значительной мере базируются на «цепном» их представлении, когда СВЧ-устройство представляется неким эквивалентным многополюсником, описываемым определенной системой параметров. Соединение СВЧ-устройств в нужную СВЧ-схему рассматривается соответственно в виде соединения таких эквивалентных многополюсников. При исследовании таких устройств и соединений важно знать, насколько качественно и без потерь обеспечивается передача через них СВЧ-сигналов, несущих полезную информацию (насколько согласованы устройства, каковы в них потери и т.п.).

Поэтому, наряду с другими измерительными задачами (измерения мощности, частоты, спектра и т.д.), задача измерения параметров СВЧ-цепей в различных частотных диапазонах изначально была и продолжает оставаться одной из основных и актуальнейших измерительных задач.

Следует особо отметить существенный прогресс, достигнутый в последнее время, на пути промышленного освоения миллиметрового диапазона волн, включая его коротковолновую часть (с длиной волны 3 и 2 мм), что стимулировало ускоренное создание разнообразных радиолокационных систем в этом диапазоне волн.

Прогресс в области радиоэлектроники и систем вооружения в значительной мере определяется освоением новых более высокочастотных диапазонов. В этой связи у исследователей, разработчиков и заказчиков радиоэлектронных средств все больший интерес вызывает и диапазон субмиллиметровых волн, занимающих промежуточное положение между миллиметровыми и оптическими волнами.

Освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн открывает широкие перспективы перед многими областями науки и техники. Это относится в первую очередь к важнейшим областям физики, которые изучают атомное ядро, явления, происходящие при низких температурах, высокотемпературную сверхпроводимость, газовый разряд, физические свойства твердого тела, физику плазмы и связанные с ней условия осуществления управляемых термоядерных реакций, а также к таким областям техники, как радиолокация, радиосвязь, радиотелемеханика, радионавигация, высокоточное оружие и системы защиты от него и др.

Учитывая дальнейшее освоение этих частотных диапазонов, новые области их применения, особенности распространения и передачи миллиметровых и субмиллиметровых волн, а также особенности используемых технологий при создании элементов, трактов и радиосредств этих диапазонов, необходимо более подробно рассмотреть проблемы развития и использования этих областей длин волн на практике.

1.2. Развитие техники миллиметровых и субмиллиметровых волн

Рассмотрим особенности распространения и применения миллиметровых (мм) и субмиллиметровых (субмм) волн.

В последние годы одним из важнейших направлений развития коммерческой и военной СВЧ-радиоэлектроники стало продвижение в область миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн.



Рис. 1.1. Границы диапазона ближних миллиметровых волн и соседних частотных диапазонов

В соответствии с принятой классификацией диапазонов волн к миллиметровому диапазону относятся радиоволны длиной 10^{-2} – 10^{-3} м или соответственно область частот 30–300 ГГц, к субмиллиметровому, или децимиллиметровому, относятся радиоволны длиной 10^{-3} – 10^{-4} м и соответственно область частот 300–3000 ГГц.

Обычно при делении всей области электромагнитных волн на диапазоны учитываются различия в физическом прохождении, особенностях распространения, способах генерации и приема. Однако четких физических границ между диапазонами не существует, они являются в значительной мере условными.

В некоторых источниках научно-технической литературы используется термин «диапазон ближних миллиметровых волн (диапазон БММВ)», который охватывает волны длиной от 0,3 до 3,0 мм, т.е. частотный диапазон от 100 ГГц до 1 ТГц.

Поскольку на практике часто широко используется диапазон частот, лежащий в окрестности частоты 94 ГГц, то частоты 90–100 ГГц обычно также относят к диапазону БММВ.

На рис. 1.1 приведены наименования и условные границы частотных интервалов диапазона ближних миллиметровых волн и соседних с ним диапазонов.

Миллиметровые и децимиллиметровые волны занимают промежуточное положение между радиоволнами сантиметрового диапазона и инфракрасным излучением 3–400 ГГц. Граница между диапазонами радиоволн и волн инфракрасного излучения выражена нечетко. Однако техника генерации и приема миллиметровых и децимиллиметровых волн в применяемых в настоящее время способах ближе к радиотехнике, чем к инфракрасной технике.

Интенсивное освоение диапазонов миллиметровых и более коротких волн в последние годы связано с резким ростом числа радиоэлектронных устройств и систем, в связи с чем стала ощущаться нехватка свободных частот в диапазоне менее 30 ГГц ($\lambda < 1$ см). Интерес к этим диапазонам обусловлен и рядом особых свойств миллиметровых волн, отличающих их от волн сантиметрового диапазона:

- уменьшение массогабаритных характеристик устройств и систем, в частности уменьшение размеров антенн радиолокационных станций; возможность размещения на ракетах и подвижных средствах;
- расширение полосы частот и возможность увеличения информативной емкости каналов связи;
- улучшение диаграмм направленности антенн, большая разрешающая способность, возможность обнаружения малых объектов;
- лучшее проникновение через пыль и туман, чем в оптическом диапазоне и при излучении более длинноволновых СВЧ-колебаний;
- увеличение помехозащищенности линий связи, минимальные возможности подслушивания;
- меньшее затухание при прохождении через ионизированную среду по сравнению с волнами сантиметрового и дециметрового диапазонов;
- большое изменение поглощения в атмосфере при относительно малом изменении частоты.

Следует особо отметить, что интерес к диапазону коротких миллиметровых волн в значительной мере обусловлен сложностями, с которыми столкнулись при использовании оптических волн. Инфракрасные системы, способные работать как в дневных, так и в ночных условиях, часто оказываются неэффективными при наличии на трассе распространения волн облачности, тумана или дыма. В то же время излучение ближнего миллиметрового диапазона способно проникать через такие замутненные области и обеспечивать достаточное разрешение по дальности и углам.

Выбор рабочих частот в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн решающим образом определяется условиями и характеристиками распространения этих волн в атмосфере. В этой области заметно растет затухание в атмосфере из-за молекулярного поглощения, которое мало сказывается в диапазоне сантиметровых волн. Поглощение в диапазоне миллиметровых волн обусловлено главным образом взаимодействием с молекулами O_2 и водяного пара H_2O . Для молекул O_2 характерно наличие магнитного момента, для H_2O — электрического. Взаимодействие электромагнитной волны с магнитным моментом молекул O_2 приводит к появлению ряда линий поглощения в области вблизи 60 ГГц, а также линии 118,8 ГГц. Аналогично водяные пары создают линии поглощения на частотах 22,2 и 183,3 ГГц, а также на более высоких частотах. На рис. 1.2 приведены характеристики поглощения в парах воды и молекулярном кислороде в зависимости от частоты.

Первый максимум затухания (порядка 20 дБ/км) находится на частоте 60 ГГц. Наряду с пиками затухания имеется ряд полос (окон) прозрачности, в том числе на частоте 94 ГГц (затухание составляет около 0,6 дБ/км), 140–150 ГГц (затухание около 2 дБ/км), 230–240 ГГц (около 7 дБ/км), 500 ГГц (около 10 дБ/км). Далее вверх по частоте затухание растет до значения порядка 1000 дБ/км к инфракрасной области, а затем, проходя через несколько максимумов и минимумов в коротковолновой части, падает в области видимого света до величины 0,05 дБ/км.

Важными условиями распространения миллиметровых и субмиллиметровых волн являются атмосферные явления, такие как дождь различной интенсивности, туман, снег и пыль. Влияние дождя и тумана иллюстрируют кривые на рис. 1.3.

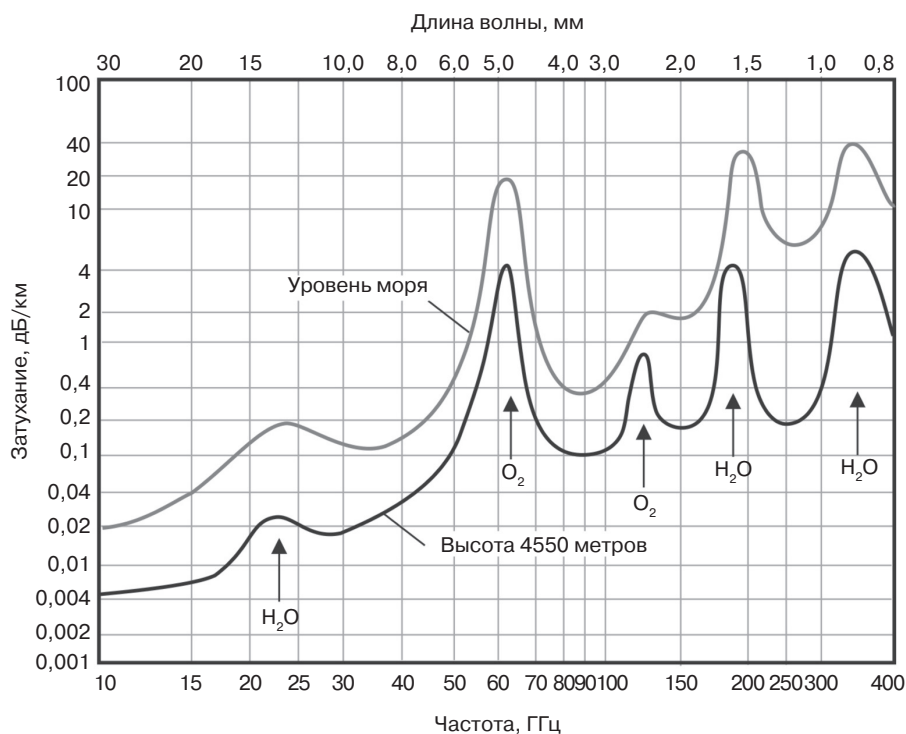


Рис. 1.2. Усредненное поглощение атмосферой миллиметровых волн при горизонтальном распространении

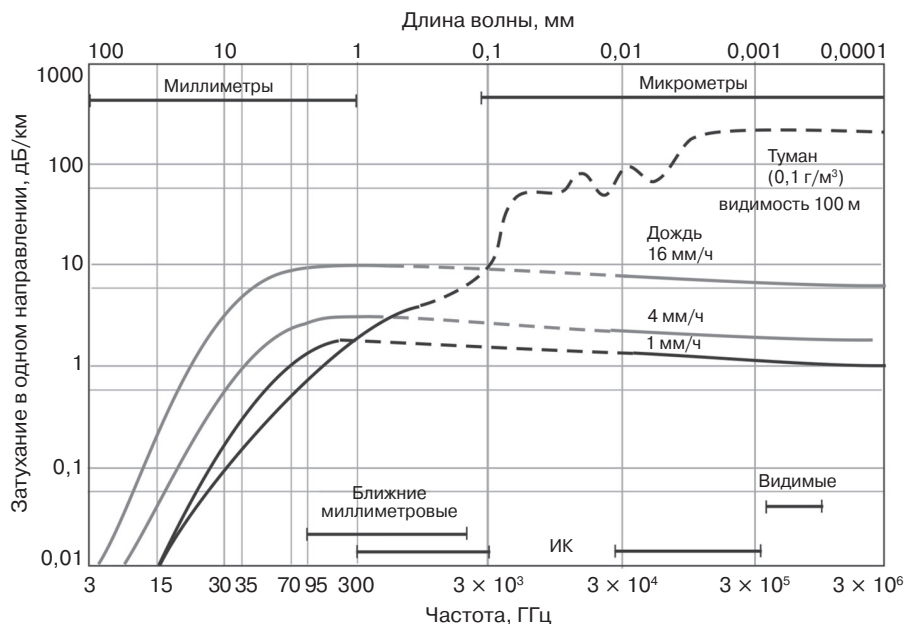


Рис. 1.3. Влияние дождя и тумана на распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн

Отмеченные выше особенности миллиметровых и субмиллиметровых волн, а также успехи и достижения в области электроники и микроэлектронной технологии, позволившие, несмотря на значительные технологические трудности, создать достаточно надежные полупроводниковые и другие компоненты этого диапазона с идентичными параметрами и характеристиками (источники мощности, детекторно-смесительные, управляющие, развязывающие устройства, различные элементы СВЧ-тракта: ответвители, фазовращатели, переключатели, аттенюаторы и т.п.), привели к тому, что многие системы и приборы миллиметрового диапазона волн в настоящее время переходят из стадии разработки в стадию производства. Все более очевидной становится тенденция освоения и практического использования коротковолновой части миллиметрового ($f \geq 75$ ГГц) диапазона.

Основные направления разработок в миллиметровом диапазоне волн связаны с созданием разнообразных систем и аппаратуры, прежде всего военного, а также научного и промышленного назначения [1].

1.3. Области применения миллиметровых и субмиллиметровых волн в науке и технике и основные направления разработок

Основными областями применения миллиметровых и субмиллиметровых волн в науке и технике являются:

- радиолокация;
- радионавигация;
- радиосвязь;
- радиоуправление;
- радиопротиводействие;
- радиоастрономия;
- радиометрия;
- медицина;
- атмосферная метеорология;
- средства вычислительной техники;
- моделирование радиотехнических систем;
- научные исследования разных направлений.

Для современной радиоэлектроники, являющейся развитой отраслью техники, характерно наличие и разработка большого числа радиосистем, существенно различающихся по своему назначению, принципу действия, используемому диапазону частот, сложности, стоимости, массе и габаритам, массовости производства и т.д. При этом под радиосистемой понимают любую техническую систему, в которой основная функция выполняется радиоэлектронными средствами.

В свою очередь, в соответствии с назначением системы делят на ряд категорий: системы радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радиоуправления, радиотелеметрии, радионаведения, радиопротиводействия и др. Основными составными частями любой радиосистемы являются радиопередающие, радиоприемные, антенно-фидерные устройства, а также устройства питания, отображения информации, электронно-вычислительные и др.

В радиопередающем устройстве любой системы осуществляется модуляция закодированным сообщением колебаний несущей частоты, в качестве которых в последнее время все шире используются колебания миллиметровых и субмиллиметровых волн. Соответственно, с использованием трактов миллиметрового диапазона и его элементов строятся приемные и антенно-фидерные устройства, а системы в целом относятся к системам миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн.

За радиосистемами различного назначения в нормативно-законодательном порядке закрепляются те или иные предпочтительные участки частотных диапазонов.

К числу основных радиосистем миллиметрового диапазона, разработка которых активно проводится в последние годы многими предприятиями и фирмами прежде всего России и США, относятся:

- радиолокационные станции (РЛС) с высокой разрешающей способностью, в том числе РЛС опознавания и локации космических объектов с Земли и со спутников, РЛС обнаружения и сопровождения низколетящих целей для зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) и кораблей, бортовые самолетные РЛС и др.;
- различные системы связи, в том числе связь «Земля-космос», межспутниковая связь (например, на частотах в области 60 ГГц, вследствие наличия пика в атмосфере до 20 дБ/км в космосе может быть обеспечена дальняя связь между спутниками, скрытая от наземных наблюдений), системы сверхдальной связи, скрытая оперативно-тактическая связь на дальность до 5–8 км, опять-таки на частотах полос непрозрачности и др.;
- средства наведения, в том числе системы активного и пассивного наведения ракет, головки самонаведения реактивных снарядов и т.п.;
- радионавигационные системы различного назначения, в том числе самолетные, спутниковые, морские и др., которые охватывают навигацию и опознавание;
- системы радиопротиводействия, используемые в электронной разведке, связной, сигнальной радиоразведке и т.п.;
- ряд других систем, включая системы управления и контроля.

Одной из важных областей применения миллиметровых и субмиллиметровых волн является моделирование.

Для лучшего представления и исследований свойств разрабатываемых РЛС и характеристик отражения детектируемых целей создаются лабораторные модели, работающие на существенно более высоких частотах, чем сами станции. При этом моделируемые цели уменьшаются в соответствующем масштабе. Обычные значения коэффициентов уменьшения находятся в пределах от $1/4$ до $1/20$ для самолетов и от $1/100$ до $1/200$ — для кораблей. Так как наиболее распространенными рабочими частотами РЛС являются частоты от 3 до 10 ГГц, модели РЛС разрабатываются для частот от 10 до 200 ГГц (имеется сообщение о разработке такой модели на частоте 890 ГГц).

Широкие перспективы дальнейших работ связаны с применением миллиметровых и субмиллиметровых волн в научных исследованиях, для зондирования атмосферы в метеорологии, медицине, радиоастрономии и других областях.

Так, в последние годы значительно активизировались радиоастрономические исследования, позволяющие получить сведения не только о распределении источников радиоизлучения в пространстве, но и об их физической природе. Исследования простираются теперь и в область субмиллиметровых волн. Проблемы, связанные с ослаблением сигналов в атмосфере, преодолеваются благодаря использованию космических устройств (вынесению радиотелескопов за пределы атмосферы на спутниках, космических станциях и т.п.).

В настоящее время уже зарегистрированы экстралактические источники в субмиллиметровом диапазоне на волнах длиной 1 мм, 350 и 100 мкм. Развитию исследований в этой области способствовало создание специальных чувствительных радиометров.

Большие успехи достигнуты в радиоспектроскопии миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, в том числе в части создания аппаратуры, предназначенной для изучения спектров поглощения. Проводятся исследования взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, находящимся в газообразном, жидком и твердом состояниях. Исследуются такие материалы, как германий, кремний, арсенид галлия и т.д.

Все более совершенная техника и источники излучения в коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов находят применение при нагреве и диагностике плазмы, для определения электронной концентрации, частоты столкновений и электронной температуры.

Диапазон миллиметровых и субмиллиметровых волн применяется также в биологии и медицине. Разрабатывается СВЧ-термограф для получения изображения грудной клетки и позвоночника. Исследуются биологические эффекты в этих диапазонах частот. Ведутся работы по созданию радиометров, предназначенных для диагностики опухолей (например, рака груди). Излучения миллиметровых волн могут быть использованы для разрушения опухолей (путем нагрева) без хирургического вмешательства.

Развиваются и другие области применения миллиметровых и субмиллиметровых волн: в радиорелейной связи, на транспорте, в сельском хозяйстве и т.п.

Частотное распределение миллиметрового диапазона для различных областей применения, установленное в США, приведено в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Частотное распределение мм-диапазона в США

№ п/п	Применение	Частотный диапазон
1	Выделены участки Fixed	36–43; 50–51; 54,25–58,2; 59–64; 76–86; 92–95; 102–130; 140–142; 150–165; 170–182; 185–190; 200–230; 265–300
2	Закреплено за спутниками Fixed satellite	30–31; 40–41; 50–51; 92–95; 102–105; 140–142; 150–152; 220–230; 265–275
3	Радиолокация Radiolocation	33,4–36; 48–50; 70; 71–76; 94; 140; 165–170; 230; 240–250
4	Радиоастрономия Radio astronomy	31,2–31,5; 86–92; 130–140; 230–240
5	Исследования космоса Space research	31,5–31,8; 51–54,25; 58,2–59; 64–66; 86–92; 101–102; 130–140; 182–185; 230–240

Таблица 1.1 (окончание)

№ п/п	Применение	Частотный диапазон
6	Закреплено за подвижными средствами Mobile	31; 36–43; 50–51; 54,25–64; 76–86; 92–95; 102–130; 140–142; 150–165; 170–190; 200–230; 265–300
7	Самолетные подвижные средства Aeronautical mobile	
8	Морские подвижные средства Maritime mobile	
9	Самолетные подвижные спутники Aeronautical mobile satellite	43–48; 66–71; 95–101; 142–150; 190–200; 250–265
10	Морские подвижные спутники Maritime mobile satellite	
11	Радионавигация (р/н) Radionavigation	31,8–33,4
12	Спутниковая р/н Aeronautical Radionavigation	
13	Морская р/н Maritime Radionavigation	
14	Спутниковая р/н Radionavigation Satellite	43–48; 66–71; 95–101; 142–150; 190–200; 250–265
15	Самолетная спутниковая р/н Aeronautical Radionavigation satellite	
16	Морская спутниковая р/н Maritime Radionavigation satellite	
17	Межспутниковая р/н Intersatellite	54,25–64; 105–130; 170–182; 185–190
18	Радиовещательные спутники Broadcasting Satellite	41–43; 84–86
19	Любительская связь Amateur	48–50; 71–76; 165–170; 240–250
20	Исследования Земли со спутника Earth exploration Satellite	51–52

Распределение включает спутниковую связь, радиолокацию, различные виды радионавигации, радиоастрономию, исследования земной поверхности со спутников и др. и охватывает весь непрерывный диапазон частот от 30 до 300 ГГц, как области окон прозрачности, так и области непрозрачности атмосферы (например, для межспутниковой связи и радионавигации отведены участки полосы непрозрачности 54; 25–64; 105–130; 170–180 и 185–190 ГГц).

1.4. Линии передачи миллиметровых и субмиллиметровых волн

Разработки различных систем и аппаратуры, т.е. практическое использование коротких миллиметровых и субмиллиметровых волн, требуют создания волноводных систем и различных элементов, входящих в волноводный тракт, приспособленных для эффективной работы в этих частотных диапазонах. Таким работам в США, России, Японии и других странах уделяется серьезное внимание.

В качестве основного волноводного тракта систем миллиметрового диапазона за рубежом, например в США, в диапазоне частот до 325 ГГц используются полые металлические одномодовые волноводы прямоугольных сечений.

В табл. 1.2 приведены обозначения, размеры, диапазоны частот (и их обозначения) стандартных волноводов зарубежных фирм.

В табл. 1.3 приведены значения частотных диапазонов волноводов стандартных сечений миллиметрового диапазона, используемые в России.

В диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн наряду с полыми металлическими волноводами прямоугольного и цилиндрического сечений, в которых распространяются волны одного типа, при решении разнообразных задач применяют и волноводы других типов, в частности волноводы увеличенного сечения (сверхразмерные), желобковые волноводы, различного типа микрополосковые линии, диэлектрические, лучевые и другие волноводы.

Формулы для основного H_{10} (TE_{10}) типа волны прямоугольного волновода:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{f}{c}\right)^2 - \left(\frac{1}{2a}\right)^2}}, \quad (1.1)$$

где Λ — длина волны в волноводе основной моды; λ — длина волны в свободном пространстве; f — частота (Гц); c — скорость света в свободном пространстве; a — размер широкой стенки волновода.

$$f_{\text{кр}(H_{10})} = \frac{c}{2a} \text{ или } f_{\text{кр}(H_{10})} = \frac{149,9}{a} (\text{ГГц}), \quad (1.2)$$

где $f_{\text{кр}(H_{10})}$ — критическая частота (или частота среза) основного типа волны.

$$\alpha = 2,3273 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \frac{1}{b\sqrt{a}} \frac{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + \frac{2b}{a}}{\sqrt{\frac{f}{f_c}} \sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 - 1}} (\text{дБ/м}), \quad (1.3)$$

где α — затухание в прямоугольном волноводе; ρ — удельное сопротивление внутренней немагнитной металлической стенки; ρ_0 — удельное сопротивление меди $= 1,7241 \cdot 10^{-8}$ Ом/м; a — внутренняя ширина волновода (мм); b — внутренняя высота волновода (мм); f_c — критическая частота, определяемая выражением (1.2); f — частота, на которой рассчитывается затухание.

$$P_{\text{пред}} = \frac{abE_{\text{пред}}^2}{1,51} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} (\text{кВт}), \quad (1.4)$$

где $P_{\text{пред}}$ — предельная мощность волновода; $E_{\text{пред}} = 29$ кВ/см (для воздуха).

Таблица 1.2. Стандартные волноводы зарубежных фирм

Обозначения частотного диапазона					Частотный диапазон, ГГц	Сечение волновода, мм (дюйм)	Частота среза, ГГц	Обозначение волновода			
TRG, США	Hughes, США	Millitech (ВСJ), США	H/P, США	Hitachi, Япония				IEC	EIA	JAN	Brit
K	K	K	K	K	18,0–26,5	$10,67 \times 4,32$ ($0,420 \times 0,170$)	14,8	R220	WR-42	RG-53/V	WG-20
A	Ka	Ka	R	R	26,5–40,0	$7,11 \times 3,56$	21,10	R320	WR-28	RG-96/V	WG-22
B	Q	Q(B)	Q	Q	33,0–50,0	$5,69 \times 2,84$ ($0,224 \times 0,112$)	26,35	R400	WR-22	RG-96/V	WG-23
V	V	V(Q)	V	F	40,0–60,0	$4,78 \times 2,39$ ($0,188 \times 0,094$)	31,41	R500	WR-19		WG-24
V	V	V	V	M	50,0–75,0	$3,76 \times 1,88$ ($0,148 \times 0,074$)	39,90	R620	WR-15	RG-98/V	WG-25
E	E	E	E	E	60,0–90,0	$3,10 \times 1,55$ ($0,122 \times 0,061$)	48,40	R740	WR-12	RG-99/V	WG-26
W	W	W(R)	W	W	75,0–110,0	$2,54 \times 1,27$ ($0,100 \times 0,050$)	59,05	R900	WR-10		WG-27
F	F	F(N)		V	90,0–140,0	$2,03 \times 1,02$ ($0,080 \times 0,040$)	73,84	R1200	WR-08	RG-138/V	
D	D	D(T)		T	110,0–170,0	$1,55 \times 0,83$ ($0,065 \times 0,0325$)	90,85	R1400	WR06, WR07	RG-136/V	
G	G	G			140,0–220,0	$1,30 \times 0,65$ ($0,051 \times 0,0255$)	115,75	R1800	WR-05		
		Y			170,0–260,0	$1,10 \times 0,55$ ($0,043 \times 0,0215$)	137,52	R2200	WR-04		
		D			220,0–325,0	$0,86 \times 0,43$ ($0,034 \times 0,017$)	173,28	R2600	WR-03		
					325,0–400,0	$0,71 \times 0,355$ ($0,028 \times 0,014$)	211,00		WR-2,8		
					400,0–500,0	$0,56 \times 0,28$ ($0,022 \times 0,011$)	268,0		WR-2,2		

Таблица 1.3. Стандартные сечения волноводов и их рабочие диапазоны частот (по ОСТ 4.206.000 ред. 1-77)

I ряд		II ряд	
Сечение волновода а × b, мм	Частотный диапазон, ГГц	Сечение волновода а × b, мм	Частотный диапазон, ГГц
0,9 × 0,45	218,8–315,6	0,7 × 0,35	258,4–405,1
1,3 × 0,65	142,8–218,8	1,1 × 0,55	178,4–258,4
2,0 × 1,0	94,28–142,8	1,6 × 0,80	118,1–178,4
3,0 × 1,50	63,79–94,28	2,4 × 1,20	78,33–118,1
4,4 × 2,2	44,09–63,79	3,6 × 1,80	53,57–78,33
6,2 × 3,1	30,91–44,09	5,2 × 2,60	37,50–53,57
9,0 × 4,5	21,43–30,93	7,2 × 3,40	25,95–37,50
13,0 × 6,5	14,71–21,43	11,0 × 5,50	17,44–25,95
19,0 × 9,5	9,93–14,71	16,0 × 8,00	12,05–17,44
28,5 × 12,6	6,85–9,93	(17,0 × 8,00)	11,55–16,66
40,0 × 20,0	4,80–6,85	23 × 10,0	8,15–12,05
58,0 × 29,0	3,20–4,80	35 × 15,0	5,64–8,15
90,0 × 45,0	2,14–3,20	48 × 24,0	3,94–5,64
130,0 × 65,0	1,45–2,14	72 × 34	2,59–3,94
		110 × 55	1,72–2,59
		(120 × 57)	1,56–2,38
		160 × 80	1,16–1,72

При переходе к коротким волнам свойства одномодовых волноводов ухудшаются: размеры уменьшаются, ужесточаются допуски на размеры, а потери возрастают. На длине волны 1 мм потери в прямоугольном волноводе, в котором распространяется волна H_{10} , превышают 20 дБ/м. При уменьшении длины волны потери быстро растут.

На рис. 1.4 представлены частотные зависимости типичных значений потерь стандартных волноводов США (от WR-28 до WR-3).

В технически обоснованных случаях допускается применение волноводов в диапазоне частот $(1,25–1,90)f_{кр(H_{10})}$.

Практическая реализация волноводных устройств с сечением волновода менее чем $1,6 \times 0,8$ или $1,3 \times 0,65$ мм становится сложной задачей из-за увеличения потерь в них, существенного уменьшения всех линейных размеров и необходимости значительного ужесточения допусков на них. Серьезной проблемой для этих сечений волноводов становится обеспечение надежных фланцевых соединений без перекосов и смещений апертур сочленяемых волноводов, что существенно сказывается на параметрах измерительного тракта.

Некоторое практическое использование находят волноводы увеличенных сечений, в которых могут существовать колебания высших типов. Потери в них значительно ниже. Так, при $\lambda = 0,8$ мм затухание в волноводе сечением $7,2 \times 3,4$ мм составляет 1,4 дБ/м, а при $\lambda = 0,65$ мм затухание в волноводе сечением 23×10 равно 1,65 дБ/м.

В рассматриваемых диапазонах предложены и исследуются также волноводы других типов, например Н-волноводы, желобковые (с выемками вдоль широких стенок). Изучаются разные варианты диэлектрических волноводов, однако потери в таких волноводах достаточно высоки.

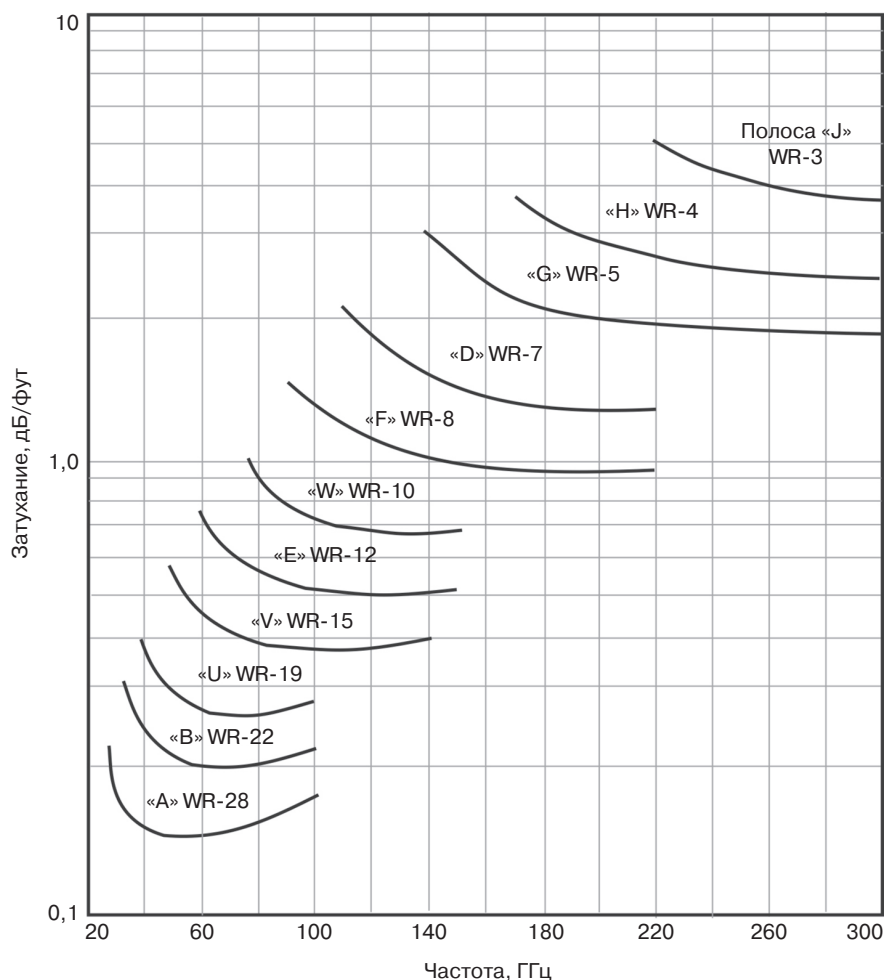


Рис. 1.4. Частотные зависимости потерь в стандартных волноводах

Невозможность создания волноводов с низкими потерями привела в свое время к использованию в субмиллиметровом диапазоне волн квазиоптической техники. Находят некоторое применение лучевые волноводы с линзами и зеркалами. К их недостаткам относятся сравнительно высокий уровень потерь и необходимость тщательной юстировки зеркал.

К настоящему времени можно выделить следующие разновидности линий передачи квазиоптического тракта:

- сверхразмерный многомодовый металлический прямоугольный волновод с основной волной типа H_{10} ;
- желобковый волновод;
- квазиоптический лучевод;
- металлодиэлектрический волновод (МДВ) круглого сечения;
- квазиоптическая линия передачи типа «канал в диэлектрике»;
- металлодиэлектрический волновод прямоугольного сечения.

Таблица 1.4. Характеристика линий передачи

Тип линии	Погонные потери в суб-мм-диапазоне	Степень самофилътрации	Устойчивость поляризации	Технологичность изготовления	Возможность построения элементов тракта	Недостатки
Одномодовый прямоугольный волновод	30 дБ/м; ($f = 300 \text{ ГГц}$)	Одномодовый режим	Устойчивая	Возможно производство единичных образцов	Возможно построение элементов с невысокими параметрами	Большие погонные потери, нетехнологичность
Сверхразмерный прямоугольный волновод; размер волновода $10 \times 23 \text{ мм;}$ $\lambda = 1 \text{ мм}$	$\alpha = 1 \text{ дБ/м}$	Отсутствует	Возможно преобразование на неоднородностях	Высокая	Возможно построение широкого комплекта	Отсутствие самофилътрации и возбуждение паразитных мод на неоднородностях тракта
Диэлектрический лучевод $\lambda = 0,8-1,7 \text{ мм;}$ $\varepsilon = 1,4-2,3$	$\alpha = 1,2-5 \text{ дБ/м}$	Высокая	Слабая	Средняя	Исследована возможность построения широкого класса элементов	Большие частоты, устойчивость поляризации, возбуждение паразитных мод на неоднородностях
МДВ (прямоугольный)	$\alpha = 0,03 \text{ дБ/м}$	Средняя	Устойчивая	Высокая	Возможно построение широкого класса элементов	Возбуждение паразитных мод на неоднородностях
МДВ (круглый)	$\alpha = 0,0037 \text{ дБ/м;}$ $KA = 40, \lambda = 2 \text{ мм}$	Средняя	Не фиксирована	Высокая	Возможно построение широкого класса элементов	Возбуждение паразитных мод неоднородности, неустойчивость поляризации
Желобковый волновод	$f = 230 \text{ ГГц;}$ $\alpha = 0,07-0,08 \text{ дБ/м}$	Высокая	Устойчивая	Высокая	Слабо изучена	Отсутствие экранировки, излучение на неоднородностях
Канал в диэлектрике (квадратный и круглый)	Зависит от материала диэлектрика	Высокая	Устойчивая для квадратного и не фиксирована для круглого	Высокая	Возможно построение широкого класса элементов	Слабая экранировка и большое погонное затухание для диэлектриков с большим tg

Как показал ряд проведенных исследований, наиболее предпочтительным для использования в аппаратуре и различных системах коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазона (свыше 150 ГГц) представляется металлодиэлектрический сверхразмерный волновод.

Сопоставление основных характеристик квазиоптических линий передачи закрытого типа приведено в табл. 1.4.

1.5. Теоретические основы функционирования радиолокационных устройств

1.5.1. Хронология событий, связанных с созданием первых РЛС

Даже сегодня нельзя назвать тех изобретателей, которые являются неофициальными создателями РЛС. Тем не менее имеются некоторые узловые моменты в открытии важных базовых знаний и важных изобретений, которые можно изложить в следующем виде:

1865 г. — английский физик Джеймс Клерк Максвелл разработал свою теорию (описание свойств электромагнитных волн и механизма их распространения).

1886 г. — немецкий физик Генрих Рудольф Герц открыл электромагнитные волны и подтвердил этим теорию Максвелла.

1904 г. — немецкий инженер в области высоких частот Христиан Хюльсмейер изобрел так называемый «телемобилоскоп» для наблюдения перемещения различных объектов (лодок и кораблей) на воде. Он измерял время перемещения электромагнитных волн к металлическому объекту (кораблю) и обратно, а на основании этого времени вычислял расстояние. Хюльсмейер зарегистрировал свое изобретение в патент Германии и Великобритании.

1917 г. — французский инженер Люсьен Леви изобрел супергетеродинный приемник. Он использовал впервые широко применяемое впоследствии обозначение «Промежуточная частота», а также указывает на теоретическую возможность организации эффекта двойного гетеродинирования.

1921 г. — изобретение магнетрона как эффективной передающей трубки американским физиком Альбертом Валлансом Халлом.

1922 г. — американские электротехники Тейлор и Янг из Морской исследовательской лаборатории (США) впервые определили положение деревянного корабля.

1930 г. — капитан ВМФ Хиланд из Морской исследовательской лаборатории (США) впервые в мире определил местоположение летательного аппарата.

1931 г. — первый корабль оснащен радаром, где в качестве антенны используется параболическое зеркало с рупорным возбудителем (узлом запитки).

1936 г. — разработка первого клистрона инженерами Метколфом и Ганном из молодой компании General Electric. Он стал потом важным компонентом в радарх в качестве усилителя (или генераторной лампы).

1940 г. — различное многофункциональное радарное оборудование разрабатывается в США, России, Германии, Франции и Японии и других странах.

Первые теоретические размышления по использованию электромагнитных волн для определения местоположения корабля были представлены инженером из

Дюссельдорфа Хюльсмейером в 1904 г. в Германии и зарегистрированы в Англии в качестве патента. В описании к патенту можно увидеть иллюстрацию в спецификации патента, который описывал процесс обнаружения приближающегося корабля с помощью метода обратного отражения.

Испытания, проведенные на Рейне, подтвердили полезность этого метода.

1.5.2. Базовые принципы функционирования радара

Название этого радиолокационного прибора «радар» (Radar) происходит от аббревиатуры его полного наименования на английском языке – RADio Detection And Ranging. Можно описать следующим образом принцип, по которому работает радар: очень схож с принципом отражения звуковой волны. Если вы кричите в направлении звукоотражающего объекта (такого как ущелье в горах или пещера), вы услышите эхо. Если вам известна скорость звука в воздухе, вы можете затем оценить расстояние и общее направление и направление на объект. Время, необходимое для возврата эха, может грубо преобразовываться в расстояние, если вам известна скорость звука.

В радаре используются импульсы электромагнитной энергии в основном таким же образом, как показано на рис. 1.5. Высокочастотная энергия измеряется радаром и отражается от наблюдаемого объекта. Некоторая небольшая часть этой отраженной энергии возвращается обратно к радару. Эта отраженная энергия называется ЭХО, так же как и в терминологии звука. Радар использует это эхо для определения направления и расстояния до отражающего объекта.

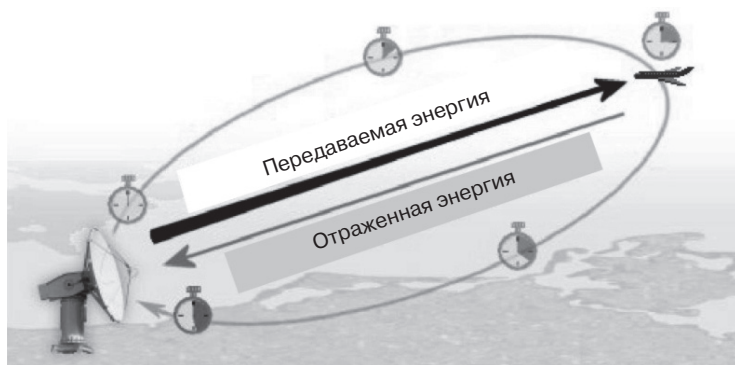


Рис. 1.5. Принцип работы простейшего радара

Как следует из этого определения, радары используются для обнаружения присутствия цели (объекта обнаружения) и определения его положения в пространстве. Сокращение подразумевает также тот факт, что измеряемой количественной величиной обычно является расстояние до объекта.

На рис. 1.6. показан упрощенный принцип работы простейшего радара. Антенна радара облучает цель СВЧ-сигналом, который затем отражается от цели и «захватывается» приемным устройством. Электрический сигнал, захватываемый приемной антенной радара, называется «эхом» или «ответом». Сигнал радара генерируется мощным передатчиком и принимается специальным высокочувствительным приемником.

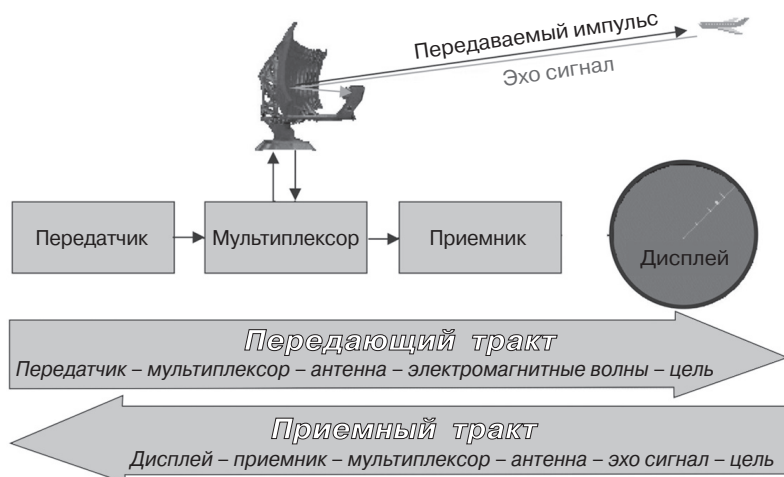


Рис. 1.6. Блок-схема простейшего радара

1.5.3. Алгоритм обработки сигнала

Алгоритм работы простейшего радара можно описать следующим образом [1].

- Передатчик радара выдает короткие мощные СВЧ импульсы энергии.
- Переключатель (мультиплексор) попеременно переключает антенну между передатчиком и приемником так, чтобы использовалась только одна необходимая антенна. Это переключение необходимо, так как мощные импульсы передатчика разрушили бы приемник, если бы энергия поступила непосредственно на вход приемника.
- Антенна передает сигналы передатчика в пространство с требуемым распределением и эффективностью. Этот процесс применяется аналогичным образом при приеме.
- Передаваемые импульсы излучаются в пространство посредством антенны в виде электромагнитной волны, которая проходит по прямой линии с постоянной скоростью и будет затем отражаться от цели.
- Антенна принимает обратные рассеянные сигналы (так называемые эхо-сигналы).
- При приеме мультиплексор подает слабые эхо-сигналы на вход приемника.
- Сверхчувствительный приемник усиливает и демодулирует принятые СВЧ сигналы и выдает видеосигналы на выход.
- Индикатор представляет наблюдателю непрерывную графическую картину положения целей относительно радара.

Все цели выдают так называемое диффузное отражение, т.е. сигнал обычно отражается в широком диапазоне направлений. Такой отраженный сигнал также называется «рассеянием» или обратным рассеянием — это термин, присвоенный отражениям сигнала в противоположном направлении относительно падающего луча.

Сигналы радара могут отображаться как на традиционном индикаторе положения на плоскости (PPI), так и на более современных (жидкокристаллических,

плазменных и др.) системах дисплея радара. Экран РРІ имеет вращающийся вектор с радаров в начале координат, который отображает направление антенны (азимут целей). Он обычно изображает картину исследуемого пространства в виде карты зоны, покрываемой лучом радара.

Очевидно, что большинство функций простейшего радара являются зависящими от времени. Временная синхронизация между передатчиком и приемником радара требуется для измерения расстояния. Системы радара излучают каждый импульс в течение времени передачи (или длительности импульса τ), ожидают возврата эхо-сигналов во время «слушания» или времени покоя и затем излучают следующий импульс, что показано на рис. 1.7.

Так называемый синхронизатор координирует во времени процесс синхронизации для определения расстояния до цели и выдает сигналы синхронизации для радара. Он же одновременно подает сигналы на передатчик, который посылает следующий новый импульс, и на индикатор и другие связанные схемы управления.

Время между началом одного импульса и началом следующего импульса называется периодом или межимпульсным интервалом (PRT) и

$$PRT = 1/PRF.$$

Здесь частота повторения импульса (PRF) системы простейшего радара — это число импульсов, которые передаются в секунду. Частота передачи импульсов существенно влияет на максимальное расстояние, которое может отображаться, что мы покажем ниже.

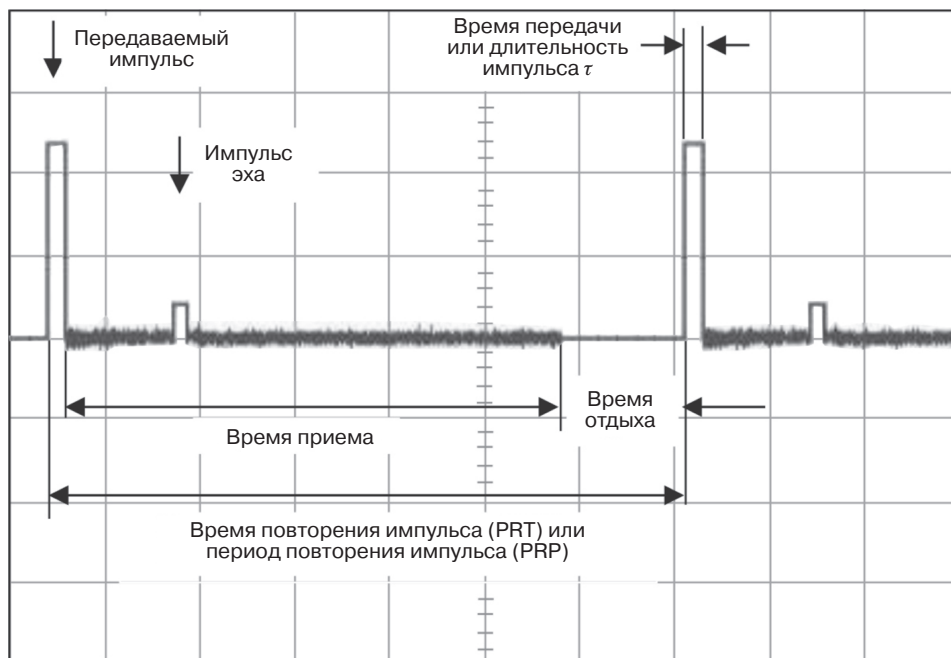


Рис. 1.7. Временные этапы периодов работы простейшего радара

1.5.4. Основная функция радара – измерение расстояния

Расстояние до стационарной или перемещающейся цели (объекта) определяется из времени прохождения высокочастотного передаваемого сигнала и скорости распространения (c_0). Фактическое расстояние цели от радара обычно называют «наклонная дальность» — это некоторая линия в поле зрения между радаром и облучаемым объектом, в то время как расстояние «по земле» — это горизонтальное расстояние между излучателем и его целью и его расчеты требуют знания высоты цели. Так как волны проходят к цели и обратно, то физическое время кругового прохождения луча радара делится пополам с целью получения времени, которое необходимо волне для достижения этой цели. Поэтому для расчетов обычно используется следующая формула:

$$R = \frac{t_{\text{delay}} \cdot c_0}{2}, \quad (1.5)$$

где R — наклонная дальность; t_{delay} — время, необходимое для прохождения сигнала до цели и обратно; c_0 — скорость света (приблизительно 3×10^8 м/сек).

Если соответствующее время прохождения (t_{delay}) известно, то расстояние R между целью и радаром можно легко рассчитать с использованием этого выражения.

Одна из практических проблем определения **точности расстояния** состоит в том, как однозначно определить расстояние до цели, если цель возвращает мощный эхо-сигнал. Эта проблема возникает из-за того, что импульсные радары, как правило, передают последовательность импульсов. Приемник радара измеряет время между передними фронтами последнего переданного импульса и импульса эха. На практике часто бывают, что эхо будет приниматься от цели на значительном (большом) расстоянии после передачи второго импульса передачи.

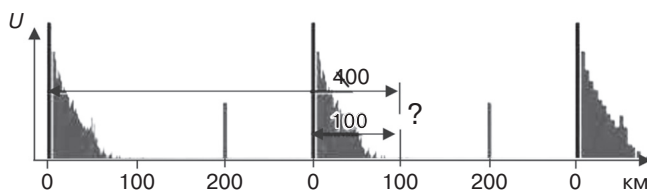


Рис. 1.8. Эхо при «втором» просмотре на расстоянии 400 км уже допускает возможность неправильного определения расстояния в 100 км

В этом случае радар будет определять «неправильный» временной интервал и, как следствие, неправильное расстояние. Процесс измерения допускает, что импульс связывается со вторым переданным импульсом и показывает значительно меньшее по сравнению с фактическим расстоянием до цели. Это называется «неоднозначность определения расстояния» и имеет место тогда, когда имеются крупноразмерные цели на расстояниях, превышающих время повторения импульса. Время повторения импульса определяет максимальное «однозначное» расстояние. Для увеличения значения «однозначного» расстояния необходимо увеличить PRT (это значит — снизить PRF).

Эхо-сигналы, появляющиеся после времени приема, могут фиксироваться:

- либо во времени передачи, где они остаются непринимаемыми в расчет, так как радар не готов к приему в это время,
- либо в следующем времени приема, когда они могут приводить к ошибке измерения.

Зона однозначного определения дальности радара может определяться с использованием формулы [1]:

$$R_{unamb} = (PRT - \tau) c_0 / 2. \quad (1.6)$$

Численное значение используемого периода повторения импульсов (PRT) радара исключительно важно при определении максимального расстояния, так как время возврата от цели, которое превышает PRT системы радара, проявляется при неправильных положениях (расстояниях) на экране радара. Отражения, которые появляются при этих «неправильных» расстояниях, рассматриваются как вторичные эхо-сигналы во времени.

Кроме проблемы зоны однозначного определения дальности удаленных целей (объектов), существует и проблема обнаружения объектов на **минимальном расстоянии от радара**.

Известно, что когда передний фронт эхо-импульса попадает внутрь импульса передачи, невозможно точно определить время «кругового» прохода. Минимальное обнаруживаемое расстояние ($R_{\min}$) зависит от импульса передатчиков при τ и времени восстановления мультимплексора t_{recovery} следующим образом [1]:

$$R_{\min} = \frac{(\tau + t_{\text{recovery}}) \cdot c_0}{2}. \quad (1.7)$$

Поскольку приемник радара не воспринимает сигнал до момента окончания импульса передачи, необходимо отключить его от передатчика во время передачи для исключения повреждения. В этом случае импульс «эхо» приходит от очень близкой цели. Следует иметь в виду, что цели на расстоянии от радара, эквивалентном длительности импульса, не обнаруживаются. Например, типовое значение для длительности импульса в 1 мкс для радара обычно соответствует минимальному определяемому расстоянию в 150 м, что, в общем, приемлемо. Однако радары с «длинным» импульсом имеют недостаток относительно минимального расстояния, в частности радары с сжатием импульса, которые могут использовать длительности импульса порядка десятков и даже сотен микросекунд. Типовая длительность импульса τ обычно составляет:

- радар ПВО: до 800 мкс (минимальное расстояние 120 км);
- радар воздушного наблюдения гражданского аэропорта 1,5 мкс (минимальное расстояние 250 м);
- бортовой радар обнаружения перемещения объекта по поверхности: 100 нс (минимальное расстояние 25 м).

Определение направления движения цели (объекта) — еще одна из важных функций радара.

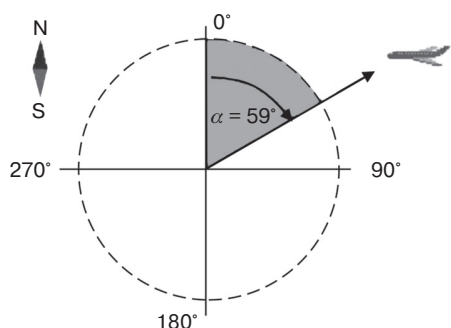


Рис. 1.9. Определение истинного значения пеленга цели

Специалисты по радарам часто используют такой термин, как **азимут** — направление на цель, которое определяется направленностью антенны радара. Направленность, иногда называемая «коэффициент усиления антенны в заданном направлении», — это способность антенны концентрировать передаваемую энергию в одном конкретном направлении. Соответственно такая антенна с высокой направленностью называется направленной антенной.

Путем измерения направления, в котором направляется антенна при приеме эха можно определять координаты цели. Точность угловых измерений обычно определяется направленностью, которая является определенной функцией геометрического размера антенны.

«Истинный» пеленг цели радара — это угол между истинным направлением на север и некоторой условной линией, указывающей направление на цель. Этот угол обычно измеряется в горизонтальной плоскости и по часовой стрелке от направления на север. Угол азимута на цель радара может также измеряться по часовой стрелке от центральной линии несущего радара корабля или самолета и называется в этом случае относительным азимутом.

В частности, быстрая и точная передача информации по азимуту между поворотным столом радара со смонтированной антенной на нем и информационными экранами имеет важное практическое значение для различных servo-систем современных РЭА.

Эти servo-системы используются в более старых антеннах классических радаров и пусковых установках баллистических ракет и работают с помощью приборов типа сельсин-датчиков с вращательным моментом и сельсин-приемников с вращательным моментом. При каждом вращении антенны кодирующее устройство посылает множество импульсов, они затем подсчитываются в индикаторах. Некоторые радары работают без (или с частичным) механическим перемещением. Радары первой группы используют электронное сканирование фазы по азимуту и/или по возвышению (антенны с фазированной антенной решеткой).

1.5.5. Угол возвышения цели

Угол возвышения — это угол между горизонтальной плоскостью и линией видимости, измеренный в вертикальной плоскости. Угол возвышения обычно описывается с помощью символа буквы ϵ . Угол возвышения всегда положителен выше горизонта (угол возвышения 0), а отрицателен ниже горизонта (рис 1.10).

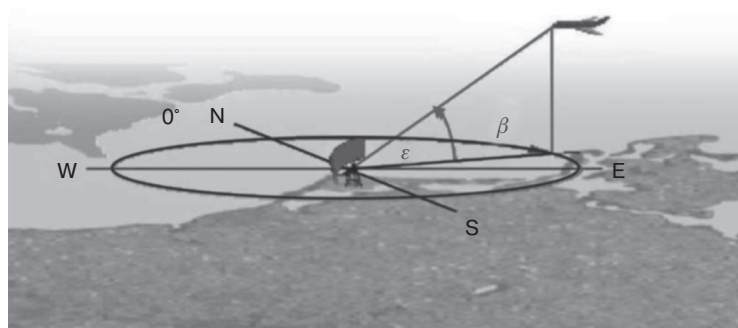


Рис. 1.10. Определение угла возвышения объекта

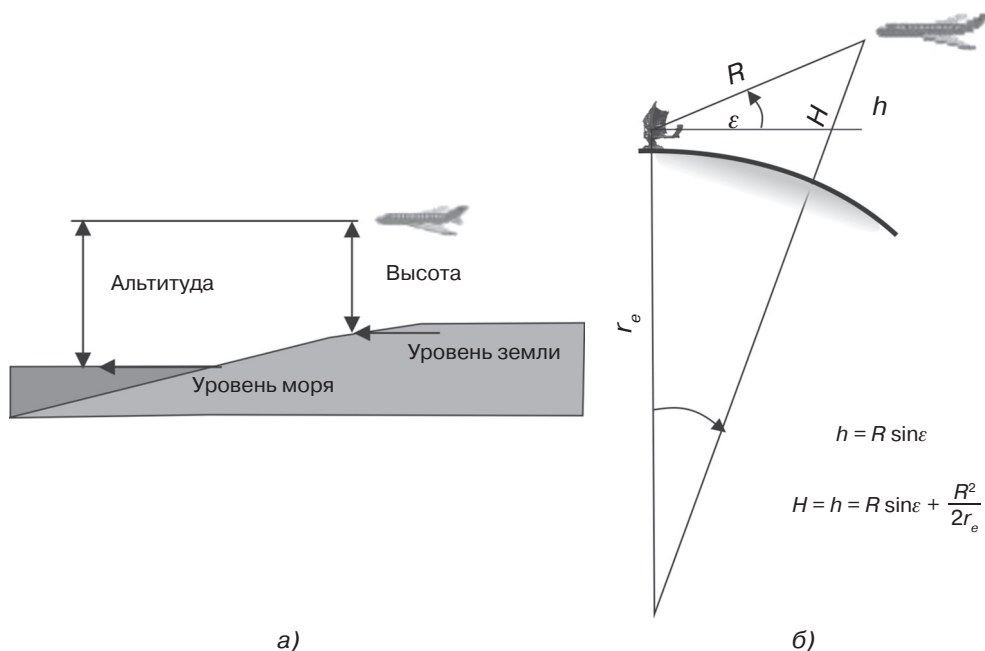


Рис. 1.11. Определение амплитуды (а) и высоты (б) относительно уровня земли и уровня моря

Очень важный для пользователей радара параметр – высота цели над поверхностью земли (альтитуда), что обозначается обычно буквой H . Истинной альтитудой считается фактическое расстояние над уровнем моря (рис. 1.11). Альтитуда может рассчитываться с помощью расстояния R и угла возвышения ε , как показано на рис. 1.10, где:

- R – наклонное расстояние до цели;
- ε – измеренный угол возвышения;
- r_e – эквивалентный радиус по земле.

Однако на практике, как известно, распространение электромагнитных волн также подвергается эффекту рефракции (передаваемый луч радара не является пря-

мой линией стороны этого треугольника, он изгибается), и величина отклонения от прямой линии зависит от следующих основных факторов:

- передаваемой длины волны;
- барометрического давления атмосферы;
- температуры воздуха и
- атмосферной влажности.

Точность определения цели — это степень соответствия между оцениваемым и фактически измеренным положением и/или скоростью цели в данный момент времени и ее фактическим положением (или скоростью). Точность радионавигационных характеристик обычно представляется в виде заданной статистической меры «системной ошибки».

Следует сказать, что установленная величина требуемой точности представляет неопределенность регистрируемой величины относительно истинной величины и фактически показывает интервал, в котором лежит истинная величина при установленной вероятности. Обычно рекомендуемый уровень этой вероятности составляет 9–10%, что соответствует примерно двум стандартным отклонениям среднего для нормального гауссового распределения измеряемой переменной.

Любое остаточное смещение должно быть малым в сравнении с установленным требованием к точности. Истинное значение — это такая величина, которая при рабочих условиях характеризует точно переменную, которая должна измеряться или наблюдаться на требуемом характеристическом интервале времени, области и/или объеме.

Точность не должна «конфликтовать» с еще одним важным параметром — разрешением радара.

1.5.6. Разрешение радара по цели

Разрешение по цели в общем случае — это его способность к распознаванию между различными целями, которые находятся очень близко как по расстоянию, так и по азимуту. Так, например, радары управления высокоточными вооружениями, которые требуют очень большой точности, должны быть способны эффективно различать между целями, которые находятся на расстоянии только нескольких метров. Поисковые радары статических объектов обычно менее точные. Они обеспечивают только требуемое разрешение между целями, находящимися на расстоянии сотен метров или даже километров. Разрешение любого радара обычно делится, в свою очередь, на две категории: разрешение по расстоянию и разрешение по углу (азимуту) (рис. 1.12).

Угловое разрешение на дисплее радара — это минимальное угловое разделение, при котором две равные цели на одном расстоянии могут разделяться. Характеристики углового разрешения радара определяются шириной луча антенны, представленным углом Θ на -3 дБ, который определяется точками на половину мощности (-3 дБ). Точки половинной мощности диаграммы направленности излучения антенны (т.е. ширина луча в -3 дБ) обычно указываются как пределы ширины луча антенны с целью определения углового разрешения. Поэтому, как правило, две идентичные цели на одинаковом расстоянии видны «в угле», если они разделяются более чем шириной луча антенны. Сразу же нужно сделать важное замечание: чем меньше ширина луча Θ , тем выше направленность антенны радара и лучше разрешение по азимуту (рис. 1.13).

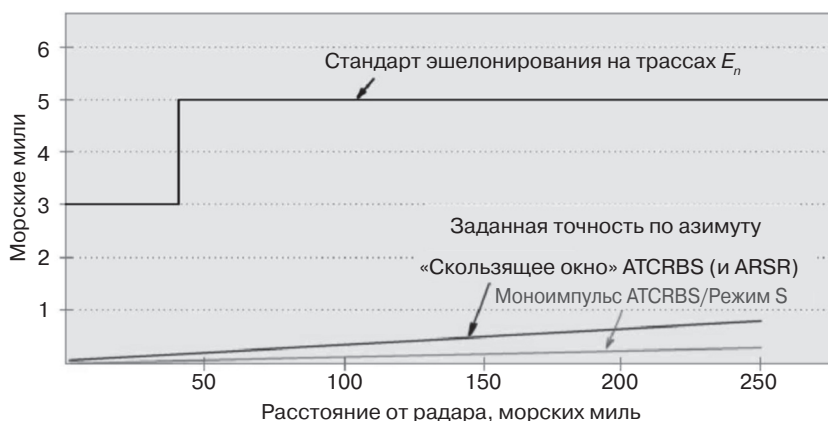


Рис. 1.12. Зависимость точности радара от расстояния до цели [1] (Лаборатория MIT Lincoln)

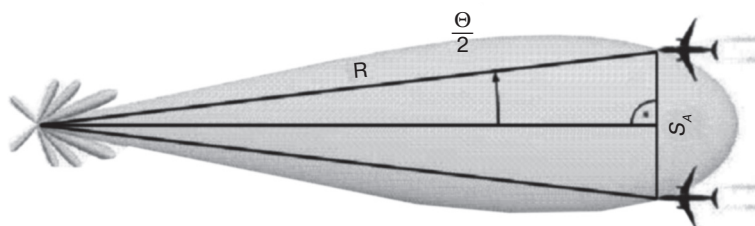


Рис. 1.13. Угловое разрешение

Угловое разрешение как расстояние между двумя независимыми целями на наклонном расстоянии может рассчитываться с помощью следующей формулы [1]:

$$S_A \leq 2R \cdot \sin \frac{\Theta}{2} \text{ [м]}, \quad (1.8)$$

где Θ — ширина луча антенны; S_A — угловое разрешение как расстояние между двумя целями; R — расстояние «цель-антенна».

Разрешение по расстоянию — это способность системы радара делать различие между двумя или более целями, находящимися по одному и тому же азимуту, но на разных расстояниях как между собой, так и от радара. Степень разрешения по расстоянию зависит от ширины передаваемого радаром импульса, типов и размеров целей и эффективности приемника и используемого индикатора. Ширина импульса — это первичный фактор в разрешении по расстоянию. Хорошо спроектированная система радара при наибольшей эффективности всех остальных факторов должна быть способной распознавать цели, разделенные на половину времени ширины импульса. Поэтому теоретическое разрешение по расстоянию системы радара приблизительно может рассчитываться по формуле:

$$S_r = \frac{c_0 \tau}{2} \text{ [м]}, \quad (1.9)$$

где c_0 — скорость света; τ — длительность импульса передатчика; S_r — разрешение по расстоянию как расстояние между двумя целями.

В системе со сжатием импульса разрешение по расстоянию радара задается шириной спектра передаваемого импульса (B_{rx}), а не шириной импульса.

$$S_r \geq \frac{c_0}{2B_{\text{rx}}} [\text{м}], \quad (1.10)$$

где c_0 — скорость света; B_{rx} — ширина диапазона импульса передатчика; S_r — разрешение по расстоянию как расстояние между двумя целями.

Это дает очень высокое разрешение, которое обычно получается и для длинных импульсов, но при более высокой средней мощности.

Специалисты по радарам часто используют такой термин, как **элемент разрешения**, смысл которого поясняют рис. 1.14 и 1.15 для случая наблюдения двух целей.

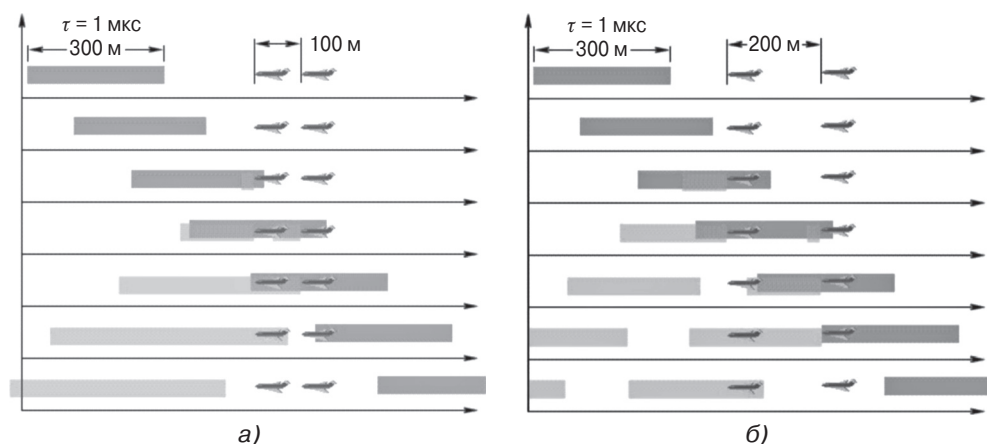


Рис. 1.14. Две цели со слишком малым промежутком (а) и при достаточно большом промежутке (б)

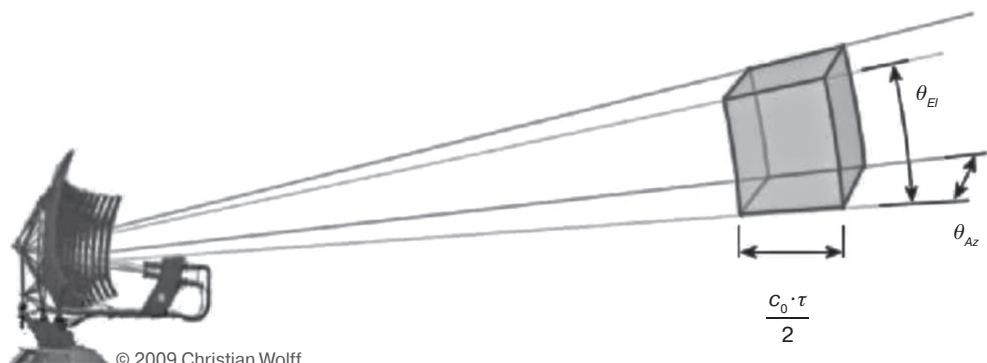


Рис. 1.15. Пояснение смысла элемента разрешения

Чем короче ширина импульса τ (или чем шире спектр передаваемого импульса) и уже угол апертуры, тем меньше ячейка разрешения и меньше невосприимчивость к величине помехи станции радара.

Выше мы старались избегать приведения сложных формул для оценки параметров простейшего радара, но сейчас следует дать более сложное выражение, которое называют основным уравнением радиолокации — «*уравнением радара*». Оно представляет собой физические зависимости передаваемой и принимаемой мощности передатчика (прием эхо-сигналов), очевидно, что принятая энергия — это предельно малая часть передаваемой энергии.

Уравнение радара связывает важные параметры, влияющие на принимаемый сигнал радара, и имеет следующий вид:

$$P_{rx} = P_{tx} \left[\frac{G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t}{(4\pi)^3 \cdot R^4 \cdot L_S} \right], \quad (1.11)$$

где P_{tx} — пиковая мощность, передаваемая радаром. Это известная величина для радара. Ее важно знать, так как вернувшаяся мощность прямо связана с передаваемой мощностью. P_{rx} — мощность, вернувшаяся к радару от цели.

Это обычно заранее неизвестная величина для конкретного радара, но она может быть легко вычислена. Очевидно, что для обнаружения цели эта мощность должна быть больше, чем минимально обнаруживаемый сигнал приемника.

1.5.7. Усиление антенны радара

Обычно этот параметр радара является известной величиной и приводится в его спецификации. Фактически это характеристика способности антенны фокусировать выходящую энергию в направленном луче. Его численное значение определяется очень простым соотношением:

$$G = \frac{\text{максимальная интенсивность излучения}}{\text{средняя интенсивность излучения}}. \quad (1.12)$$

Этот параметр (усиление антенны) описывает степень, в которой антенна концентрирует электромагнитную энергию в узком угловом луче. Два параметра, связанных с усилением антенны, — это коэффициент усиления антенны в заданном направлении и направленность. Усиление антенны служит в качестве критерия качества относительно изотропного источника с направленностью изотропной антенны, равной 1. Мощность, принимаемая от заданной цели, напрямую связана с квадратом усиления антенны, когда эта антенна используется как для передачи, так и для приема.

Этот параметр характеризует коэффициент усиления антенны — коэффициент увеличения передаваемой мощности в одном нужном направлении.

Можно отметить, что в этом отношении эталоном является «изотропная» антенна, которая одинаково передает мощность сигнала в любом произвольном направлении (рис. 1.16).

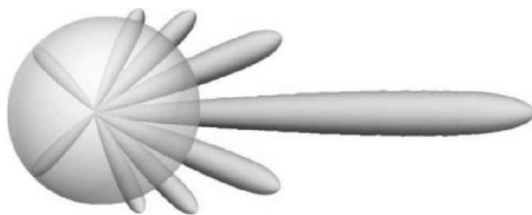


Рис. 1.16. Диаграмма направленности высоко направленной антенны в сравнении с изотропной направленностью шаровой формы

Например, если сфокусированный луч имеет мощность в 50 раз больше, чем у равнонаправленной антенны с такой же мощностью передатчика, то направленная антенна имеет усиление 50 (17 децибел).

1.5.8. Апертура антенны

Как было отмечено выше, обычно в простейших радарах одна и та же антенна используется во время передачи и приема. В случае передачи вся энергия будет обрабатываться антенной. В случае приема антенна имеет то же усиление, но антенна принимает только часть поступающей энергии. Параметр «апертура» антенны в общем случае описывает то, насколько хорошо эта антенна может принимать мощность от поступающей электромагнитной волны.

При использовании антенны в качестве принимающей сигнал апертура антенны может для упрощения понимания представляться как площадь круга, построенного перпендикулярно поступающему излучению, когда все излучение, проходящее в пределах круга, выдается антенной в согласованную нагрузку. Таким образом, плотность поступающей мощности (Вт/м^2) $\times$ апертуру (м^2) = поступающая мощность от антенны (Вт). Очевидно, что усиление антенны прямо пропорционально апертуре. Изотропная антенна обычно имеет апертуру $\lambda^2/4\pi$. Антенна с усилением G имеет апертуру $G\lambda^2/4\pi$.

Размеры проектируемой антенны зависят от ее требуемого усиления G и/или используемой длины волны λ в виде выражения частоты передатчика радара. Чем выше частота, тем меньше антенна (или выше усиление при равных размерах).

Большие «тарелкообразные» антенны радара имеют апертуру, почти равную ее физической площади, и усиление, как правило, от 32 до 40 дБ. Изменение качества антенны (нерегулярность антенны, деформации или обычный образовавшийся на ее поверхности лед) имеет очень большое влияние на усиление.

1.5.9. Эффективная площадь рассеяния цели

Эта характеристика также относится к числу важных параметров радара.

Размер и способность цели отражать энергию луча радара может кратко объединяться одним термином σ , известным как **эффективная площадь рассеивания цели (RCS)**, который имеет размерность единицы/кв. метр. Если бы абсолютно вся падающая энергия отражалась одинаково во всех направлениях, то поперечное сечение радара было бы равно площади сечения цели, как это видно на рис 1.17. На практике некоторая часть энергии поглощается и отраженная целью энергия

распределяется равномерно по всем направлениям. Поэтому эффективная площадь рассеивания сложна в оценке и, как правило, определяется путем экспериментальных измерений.

Эффективная площадь рассеивания цели зависит от следующих факторов:

- физической геометрии самолета и его внешних характеристик;
- направления излучающего радара;
- используемой частоты передатчиков радара;
- используемых типов материалов отражающей поверхности цели.

В табл. 1.5 приведены обобщенные данные о потерях энергии при прохождении луча радара в свободном пространстве.

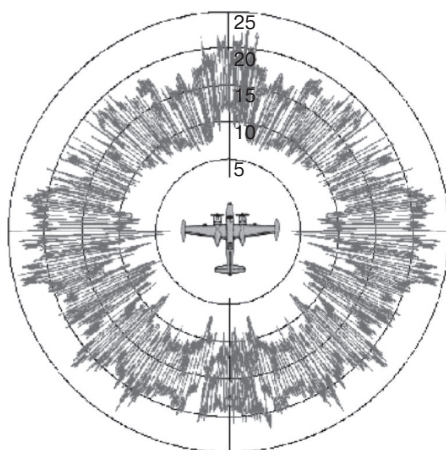


Рис. 1.17. Экспериментальная эффективная площадь рассеивания цели американского самолета В-26 на частоте 3 ГГц как функция угла азимута

Таблица 1.5. Потери при прохождении энергии радара в свободном пространстве

Цели	RCS, м ²	RCS, дБ
Реактивный Jumbo	100	20
Реактивный пассажирский самолет	20–40	13–13
Большой истребитель	6	7,8
Вертолет	3	4,7
Реактивный на 4 пассажира	2	3
Малый самолет	1	0
Стелс реактивный	0,1–0,01	–10–20

В табл. 1.5 параметр R – это расстояние до цели. Эта величина может рассчитываться путем измерения времени, которое требуется для возврата отраженного от цели сигнала. Расстояние важно, так как мощность, полученная отражающим объектом, обратно связана с квадратом ее расстояния от радара.

Потери энергии при прохождении сигнала в свободном пространстве – это потери напряженности сигнала электромагнитной волны, которые бы проистекали из прохождения по линии визуального взгляда через некоторое свободное пространство, без препятствий, за счет которых вызывались бы отражения или дифракция. Потери мощности пропорциональны квадрату расстояния между передатчиком радара и отражающим объектом (целью). Выражение для потерь при прохождении в свободном пространстве фактически включает два эффекта. Во-первых, закон распространения электромагнитной энергии в свободном пространстве определяется обратным квадратом расстояния, точнее, интенсивность линейных волн, излучаемых источником (величина энергии на единицу площади перпендикулярно источнику), обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника, как показано на рис. 1.18. Площадь поверхности A_1 (такого же размера, что и площадь поверхности A_2), удвоенная на расстоянии, принимает только четверть от энергии S_{A_1} . Это справедливо для обоих направлений как передаваемого, так и отраженного сигнала.

Говоря о коэффициенте полезного действия простейшего радара, необходимо знать и такие его параметры, как внешние и внутренние потери.

Обычно это сумма всех коэффициентов потерь радара, которая рассчитывается для компенсации ослабления сигнала за счет осадков и атмосферных газов. Ослабление сигнала за счет осадков – это функция интенсивности осадков и длины волны. Для атмосферных газов имеется определенная зависимость от угла возвышения, расстояния и используемой длины волны.

В табл. 1.6 [1] приведена упрощенная классификация видов потерь («компонент»), их общепринятые обозначения («символ») и типовые значения («потери»).

Таблица 1.6. Потери в системе радара

Компонент	Символ	Потери
Атмосферные потери	L_a	1,2 дБ
Потери за счет формы луча	L_{ant}	1,3 дБ
Коэффициент ширины луча	L_B	1,2 дБ
Потери на согласование фильтра	L_m	0,8 дБ
Потери на флуктуации (для $P_a = 0,9$)	L_f	8,4
Потери интеграции	L_i	3,2
Различные потери на обработку сигнала	L_x	3,0
Потери цепи приема	L_r	1,0
Потери цепи передачи	L_t	1,0
Суммарные потери системы	L_s	21,1

Наименьший уровень сигнала, который может обнаруживаться радаром (P_{MDS}), называется **минимальным обнаруживаемым сигналом**. Меньшие мощности, чем P_{MDS} , не пригодны для использования, так как они теряются в шумах приемника и окружающей среды.

Говоря о мощности передатчика радара, необходимо понимать, что чем больше мощность передатчика, тем больше дальность обнаружения цели.

Так, для удвоения расстояния обнаружения требуется увеличить мощность передатчика в 16 раз. Если передаваемая мощность снижается в $1/16$ раза (например, отказ двух из 32 модулей передатчика), изменение максимального расстояния радара будет практически незначительным:

$$\sqrt[4]{15/16} = \sqrt[4]{0,9375} = 0,982 < 2\%.$$

То есть составит менее 2%, как показано на рис. 1.19.

Даже если откажут 8 модулей радара, максимальное расстояние (дальность) обнаружения цели уменьшится на 7%.

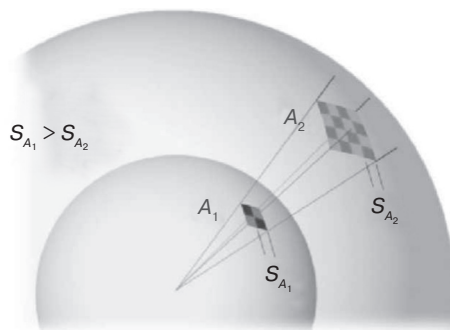


Рис. 1.18. Снижение плотности мощности при отсутствии направленности в связи с геометрическим расхождением луча

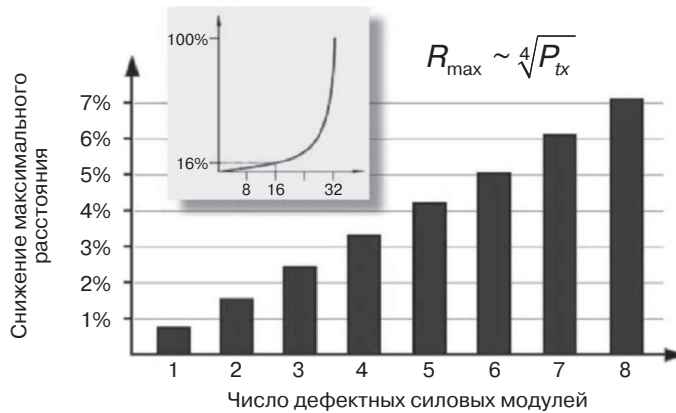


Рис. 1.19. Пониженное максимальное расстояние из-за отказа модулей в твердотельном передатчике для случая использования 32 модулей

Выше мы рассмотрели ряд основных и очевидных параметров, которые характеризуют технические возможности «классических» радаров. Специалисты по проектированию и применению радиолокационных устройств и систем используют *еще около 20 важных параметров*. Учитывая направленность тематики этой книги, далее мы рассмотрим еще несколько таких параметров, связанных уже с особенностями применения радаров в реальных условиях. В первую очередь это минимально различимый эхо-сигнал и шумы.

1.5.10. Шумы и эхо-сигналы

Минимально различимый эхо-сигнал определяется как мощность полезного эхо-сигнала на приемной антенне, который дает на экране различимую отметку цели. Минимально различимый сигнал на входе приемника обеспечивает максимальное расстояние обнаружения для радара.

Для каждого приемника имеется определенная величина мощности приема, при которой приемник может работать вообще. Эта наименьшая рабочая принимаемая мощность часто обозначается MDS (минимально различимый сигнал) (рис. 1.20). Типовые значения MDS для радара лежат в диапазоне от 104 до 113 дБ.

Численные значения величины максимальной дальности определения цели можно определить из выражения:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{tx}} \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t}{(4\pi)^3 \cdot P_{\text{MDS}} \cdot L_S}}. \quad (1.13)$$

Термин «**шум**» также широко используется разработчиками и пользователями радиолокационной техники.

Численное значение MDS зависит в первую очередь от отношения сигнал/шум, определяемого как отношение энергии полезного сигнала к энергии шума. Все радары, так как они являются полностью электронным оборудованием, должны уверенно работать в присутствии определенного уровня шума. Основной источник шума называется тепловым шумом, и он вызывается тепловым движением электронов.

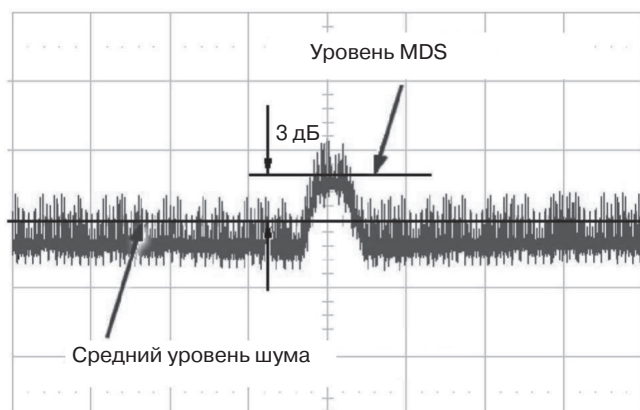


Рис. 1.20. Картина отношения сигнал/шум в 3 дБ на экране осциллографа

В общем случае все виды шумов можно разделить на две большие группы: внешний атмосферный или космический шум и внутренний (шум приемника – вырабатываемый внутри в приемнике радара).

Общая (интегральная) чувствительность приемника во многом зависит от уровня собственного шума приемника радара. Приемник с низким уровнем собственного шума, как правило, разрабатывается с использованием специальных конструкций и компонентов, которые расположены в самом начале тракта. Проектирование приемника с очень низкой шумовой характеристикой достигается за счет минимизации коэффициента шума в самом первом его блоке. Этот компонент, как правило, характеризуется низкой шумовой характеристикой с большим усилением. По этой причине он обычно и называется «малошумящий предусилитель» (Low noise preamplifier – LNA).

Приведем ниже ряд конкретных примеров, поясняющих методику вычисления максимальной дальности обнаружения цели (или максимального расстояния), на которой цель имеет высокую степень вероятности обнаружения радаром. В табл. 1.7 представлен в качестве примера ряд вышерассмотренных параметров с их численными значениями.

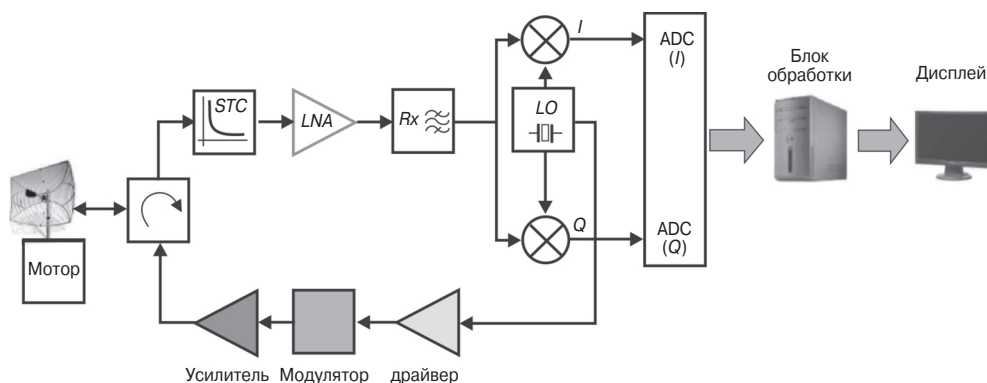


Рис. 1.21. Упрощенная схема приемо-передающего тракта

Таблица 1.7. Перечень основных параметров реального радара

Параметр	Метрические единицы	Децибелы
Излучаемая мощность $P_{\text{из}}$	1×10^6 Вт	60 дБ
Усиление антенны G	1900	32,5 дБ
Длина волны передатчика λ (2700 МГц)	0,11 м	
Поперечное сечение радара σ (например, малый самолет)	1 м^2	
Эхо MDS P_{MDS}	5×10^{-15} Вт	–113 дБ
Сумма потерь (табл. 1.6) L_s	128,9	21,1 дБ

Если мы подставим метрические величины из вышеприведенной таблицы в уравнение (1.13) для расчета численного значения R_{max} , то получим следующее выражение [1]:

$$R_{\text{max}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{из}} \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t}{(4\pi)^3 \cdot P_{\text{MDS}} \cdot L_s}} = \sqrt[4]{\frac{1 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot 1900^2 \cdot 0,11^2 \cdot 1 \text{ м}^4}{(4\pi)^3 \cdot 5 \cdot 10^{-15} \text{ Вт} \cdot 128,8}} = 76,5 \text{ км}.$$

В наиболее ответственных областях применения радаров (военная техника, противовоздушная и противоракетная оборона, безопасность воздушного движения) особую важность имеет параметр «интенсивность ложных сигналов».

Ложная тревога — это «ошибочное решение по обнаружению цели радаром, вызванное шумом или другими мешающими сигналами, превосходящими порог обнаружения». Проще говоря, это указание наличия цели радаром, когда реальной цели нет. Интенсивность ложных сигналов (*FAR*) рассчитывается с использованием следующей формулы:

$$FAR = \frac{\text{количество ложных целей}}{\text{число ячеек диапазона}}. \quad (1.14)$$

Сигналы ложных тревог вырабатываются тогда, когда тепловой шум превышает некоторый уровень установленного порога за счет наличия паразитных сигналов (как внутренних для приемника радара, так и из источников, внешних для радара) или при ошибках (сбоях) функционирования оборудования. Ложный сигнал может проявляться как мгновенная метка цели на дисплее ЭЛТ, на выходе процессора цифрового сигнала, в виде звукового сигнала или всеми этими средствами вместе. Если порог обнаружения устанавливается слишком высоко, будет очень мало ложных сигналов, но требуемое отношение сигнал/шум будет «подавлять» обнаружение действительных целей. Если порог установлен слишком низко, то слишком большое число ложных срабатываний будет маскировать обнаружение действительных целей.

Искусство разработчика радара и заключается в том, что необходимо выбрать именно оптимальный для решаемого круга задач уровень порога обнаружения.

Принятый и демодулированный эхо-сигнал обрабатывается пороговой логикой. Этот порог должен сбалансироваться так, чтобы нужные сигналы определенной амплитуды имели возможности прохождения, а шум бы автоматически удалялся.

Так как сильный шум присутствует в «верхушках» смешанного сигнала, которые лежат в диапазоне нужных малых сигналов, то оптимизированный уровень порога должен быть компромиссом. Нужные сигналы должны, с одной стороны, достигать индикации при минимальной амплитуде; с другой стороны, интенсивность ложных сигналов не должна возрастать.

Поэтому используется еще один параметр — *вероятность обнаружения цели*, который определяется следующим образом:

$$P_D = \frac{\text{обнаружение цели}}{\text{все возможные метки цели}} \times 100\%. \quad (1.15)$$

И в заключение этого раздела, в основном посвященного рассмотрению параметров радарных систем, отметим и некоторые важные для понимания аппаратные методы улучшения параметров радаров, конкретно — рассмотрим радар с разнесением частот.

1.5.11. Радар с разнесением частот

Для преодоления возможных ошибок определения размеров цели во многих радарх используется две или более частоты облучения. «Разнос» частот, как правило, обеспечивают два передатчика, работающие в паре для облучения цели двумя отдельными частотами, как показано на рис. 1.22.

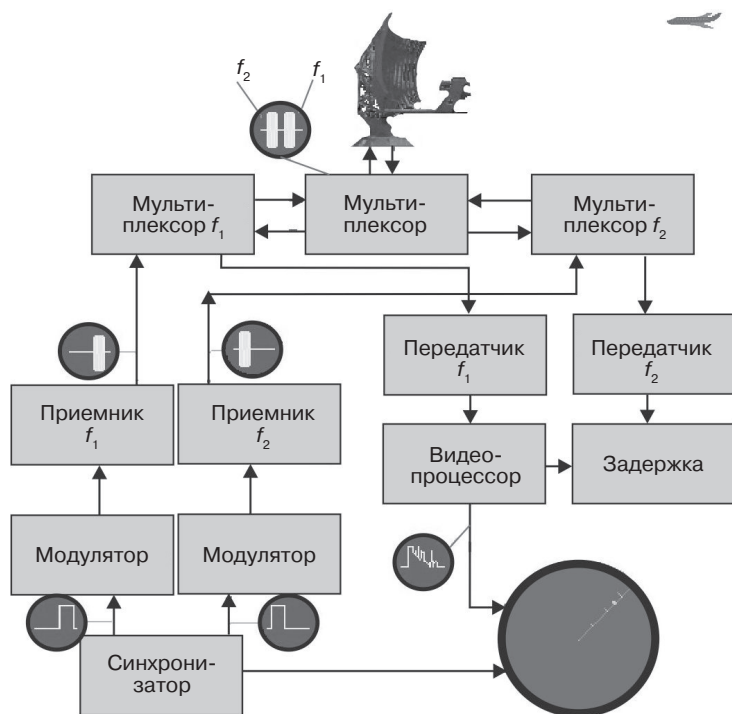


Рис. 1.22. Блок-схема структуры радара с разнесением частот

При применении радаров с несколькими частотами возможно достичь более высокой вероятности дальнего обнаружения при равной интенсивности ложных сигналов. То есть если вероятность обнаружения и интенсивность ложных сигналов равны в обеих системах, то путем использования двух или более частот возможно достичь более высокого максимального расстояния обнаружения. Сглаживание флуктуации комплексного эхо-сигнала является физической основой для этого. Предельные значения (минимальные и максимальные) изменяются относительно друг друга из-за различий во вторичной диаграмме излучения для цели для различных несущих частот. Если обратное рассеяние для первой частоты имеет максимум, то обратное рассеяние для второй частоты имеет минимум для большинства.

Это вызывает «сглаживание» результирующего сигнала при добавлении одиночных принятых сигналов. Одиночные отраженные сигналы должны быть независимыми с целью увеличения максимального расстояния путем увеличения вероятности обнаружения цели. Недостаток этого метода состоит в том, что сигналы имеют разный спектр, и поэтому они легко обнаруживаются, делая цель видимой для противника. В дополнение к усилению на 3 дБ в характеристике, достигаемому путем использования двух параллельных передатчиков, использование двух отдельных частот улучшает характеристики радара путем снижения потерь на флуктуации, как правило, на 2,8 дБ (табл. 1.6 и 1.7).

В этом случае максимальная дальность обнаружения радара при прочих равных параметрах, указанных в табл. 1.5 и 1.6, может быть увеличена почти на 40% (106,8 км вместо 76,5 км), что легко определить из выражения:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{tx} \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t}{(4\pi)^3 \cdot P_{MDS} \cdot L_s}} = \sqrt[4]{\frac{2 \cdot 10^6 W \cdot 1900^2 \cdot 0,11^2 \cdot 1 \text{ м}^4}{(4\pi)^3 \cdot 5 \cdot 10^{-15} W \cdot 67,6}} = 106,8 \text{ км.} \quad (1.16)$$

Для увеличения вероятности обнаружения такого радара с разнесением частот передатчиком излучаются два импульса с различными частотами один после другого с очень короткими интервалами. Допуская достаточный «зазор» между частотами излученных импульсов, эхо-сигналы цели с флуктуациями статистически не коррелируют.

В радаре с разнесением частот, в зависимости от конкретной задачи, можно реализовать либо увеличение максимального расстояния, либо увеличение вероятности обнаружения цели.

1.6. Общие сведения о радиолокационных системах

Современные радиолокационные системы имеют множество разновидностей, различаются структурой, характеристиками, сферами применения, линейными размерами и т.д. Одни из них используются для управления воздушным транспортом в аэропортах, другие — в системах раннего предупреждения о ракетном нападении для наблюдения за объектами на большом расстоянии. Одни РЛС располагаются на земле (стационарные и мобильные), другие — на морских судах, на борту самолетов, беспилотных летательных аппаратов, спутниках, ракетах и т.п. Имеются портатив-

ные РЛС, которые могут эксплуатироваться и управляться одним человеком, а также системы, занимающие несколько огромных помещений и даже отдельных зданий.

Поэтому ниже будут более подробно рассмотрены классификация, архитектура, функциональные возможности и области применения таких радиолокационных систем и устройств.

1.6.1. Классификация радиолокационных устройств

В зависимости от выполняемой функции радиолокационные устройства (РЛУ) классифицируются следующим образом (рис. 1.23) [1].

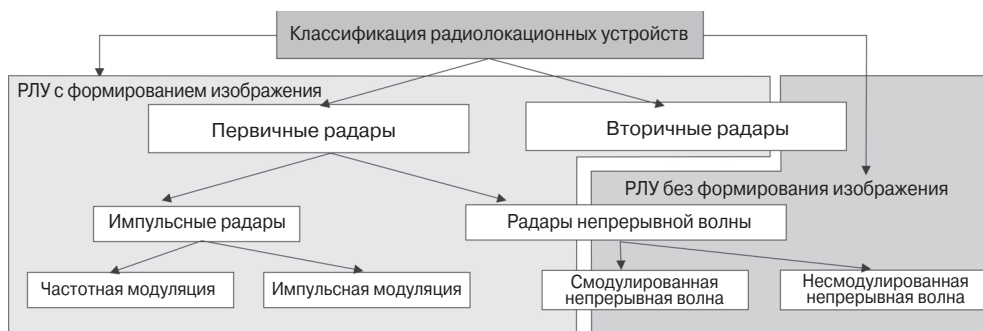


Рис. 1.23. Функциональная классификация РЛУ

Можно выделить сразу две большие группы РЛУ, отличающиеся типом (видом) используемого устройства отображения конечной информации.

Это РЛУ с формированием изображения и РЛУ без формирования изображения.

РЛУ с построением изображения формирует картину наблюдаемого объекта или области. Они обычно применяются для построения карты земной поверхности, других планет, астероидов, других небесных тел и для распределения по категориям целей для военных систем.

Радары без построения изображения производят измерения обычно только в линейном одномерном представлении изображения. Типичными представителями системы радара без построения изображения являются измерители скорости и радарные измерители высоты. Они также называются измерителями на отражении, так как они измеряют свойства отражения объекта или области, которые наблюдаются. Примеры вторичных радаров без построения изображения — противоугонные системы в автомобилях, системы защиты помещений и др.

Все разновидности РЛУ в зарубежной литературе [1] разделяются на две большие группы «Primary Radars» (первичные радары) и «Secondary Radars» (вторичные радары). Рассмотрим их отличия, особенности организации и применения, используя ниже терминологию основного используемого источника [1].

1.6.2. Первичные радары (Primary Radars)

Первичный радар сам формирует и передает высокочастотные сигналы, которые отражаются от целей. Возникшие эхо-сигналы принимаются и оцениваются. В от-

личие от вторичного радара, первичный радар излучает и принимает свой собственный излученный сигнал снова в виде эха. Иногда первичный радар бывает оснащен дополнительным устройством запроса, которым снабжены вторичные радары, для комбинации преимуществ обеих систем.

В свою очередь, Primary Radars разделены на две большие группы — импульсные (Pulses Radars) и волновые (Continuous Wave).

Импульсный радар формирует и передает высокочастотный импульсный сигнал высокой мощности. После этого импульсного сигнала следует более длинный временной перерыв, при котором может быть принят эхо сигнал, перед тем как отправляется следующий сигнал. В результате обработки можно определить направление, расстояние и иногда, при необходимости, высоту или высоту над уровнем моря цели исходя из зафиксированного положения антенны и времени распространения импульсного сигнала. Эти классические радары передают очень короткие импульсы (для получения хорошего разрешения по расстоянию) с предельно высокой мощностью импульса (для получения максимального расстояния распознавания цели).

В свою очередь все импульсные радары можно разбить также на две большие группы.

Первую из них составляют импульсные радары с использованием метода сжатия импульсов. Эти радары передают относительно слабый по мощности импульс с большой длительностью. Отмодулирует передающийся сигнал для получения разрешения по расстоянию также в пределах передающегося импульса с помощью методики сжатия импульса.

Далее различают моностатические и бистатические радары, представляющие вторую группу. Первые разворачиваются на одном месте, передатчик и приемник располагаются совместно и радар в основном использует одну и ту же антенну для приема и передачи.

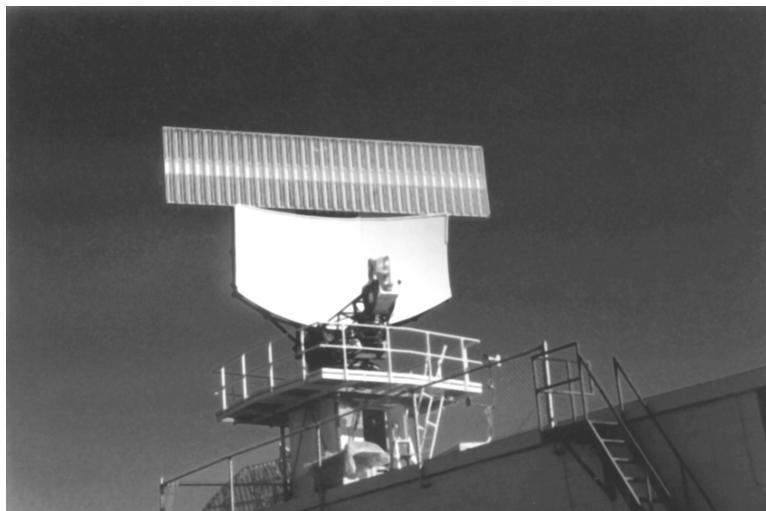


Рис. 1.24. Антенна моноимпульсного вторичного радара наблюдения (выглядит, как решетка), смонтированная поверх антенны первичного радара (параболический рефлектор)

Бистатистические радары состоят из разделенных мест расположения приемника и передатчика (на значительном расстоянии).

1.6.3. Вторичные радары (Secondary Radars)

Так называемый вторичный радар отличается тем, что использующий его объект, например самолет, должен иметь собственный ретранслятор (передающий ретранслятор) на борту и этот ретранслятор отзывается на запрос путем передачи кодированного сигнала отзыва. Этот отклик может содержать значительно больше информации, чем может получить первичный радар (например, высота, код идентификации или также любые технические проблемы на борту, такие как потери радиосвязи).

Рассмотрим более подробно с использованием рис. 1.25 принцип работы этого типа радаров для случая бортового применения (гражданский или военный самолет).

Устройство запроса, расположенное на земле, передает кодированные импульсы в различных режимах. Каждый такой код представляет собой различный вопрос. Для обычного SSR (т.е. не режим S) набор вопросов очень прост. Прежде всего, контроллер хочет знать идентификацию самолета (Кто ты?).

Радар обычно выдает 2-мерную географическую привязку самолета, но управление воздушным движением в основном 3-мерный процесс, так что вопрос «Какая у вас высота?» завершает географическую привязку. Эти различные вопросы и определяют режим работы системы. Самолеты откликаются через ретранслятор в соответствующем коде.

Выбранный режим кодируется в кодере. (С помощью различных режимов могут задаваться различные вопросы самолету.) Передатчик модулирует эти кодированные импульсы СВЧ колебаниями. В связи с тем, что в канале запроса используется другая частота, нежели в ответе, обычно можно исключить дорогой мультиплексор.

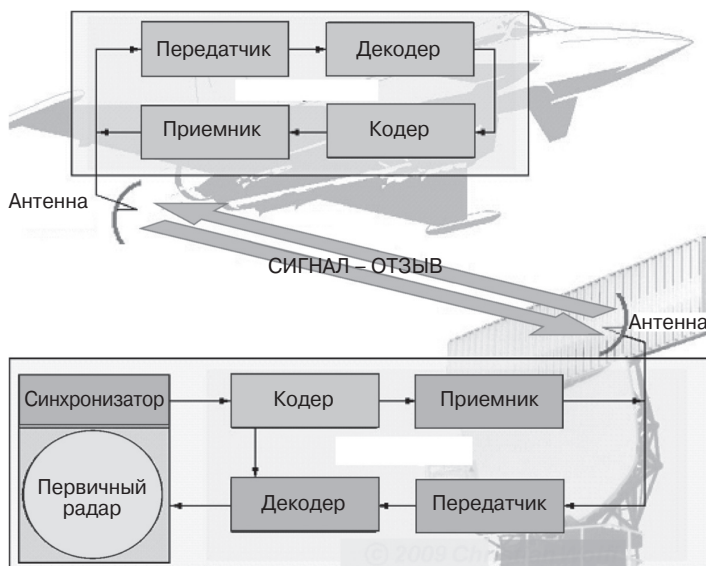


Рис. 1.25. Пояснение принципа работы обзорного радара самолета

Антенна обычно монтируется на антенне первичного радара (как показано на рис. 1.24) и поэтому поворачивается синхронно с отклонением монитора.

На самолете также имеется приемная антенна и ретранслятор. Приемник самолета усиливает и демодулирует импульсы запроса. Декодер декодирует вопрос в соответствии с желаемой информацией и побуждает кодер к подготовке соответствующего ответа. Кодер кодирует ответ. Передатчик усиливает импульсы ответа и модулирует их СВЧ колебаниями ответа.

В устройстве запроса на земле приемник усиливает и демодулирует импульсы ответа самолета, при этом фильтруются сигналы помех и глушения в приемнике.

Из информации «Mode» и «Code» декодер декодирует ответ. На дисплее аэродромного радара отображается дополнительная информация устройства запроса. Возможно, дополнительные цифры могут отображаться на дополнительном экране.

В сжатом виде различия принципов работы первичных и вторичных радаров представлены в табл. 1.8.

Таблица 1.8. Сравнение характеристик первичного радара и вторичного радара

Первичный радар для обзора (PSR)	Вторичный радар для обзора (SSR)
Первичный радар имеет главное отличие: он работает с пассивным эхо. Передаваемые ВЧ импульсы отражаются целью и затем принимаются тем же блоком радара. Непосредственной причиной отраженного эха является переданный импульс, отправляемый радаром	Вторичный радар работает с активными сигналами ответа. Вторичный радар передает и также принимает высокочастотные импульсы, так называемые запросы. Они не просто отражаются целью, а принимаются и обрабатываются с помощью ретранслятора. После этого цель отвечает на другой частоте, блоком данных ответа, который формируется и передается

Очевидно, что обе системы имеют свои преимущества и недостатки в связи со своими разными принципами. Если один получает только конкретную информацию о направлении, высоте и расстоянии целей для первичного радара, то вторичный радар обзора обеспечивает наблюдателя дополнительной информацией, типа идентификации сигнала и также высоты целей.

Наличие ретранслятора необходимо для обеспечения значительного снижения мощности передатчика в случае достижения того же максимального расстояния обнаружения. Приемник вторичного радара может быть менее чувствительный, так как мощность активного ответа всегда выше, чем мощность пассивных эхосигналов. Это обстоятельство имеет негативное влияние на боковые лепестки. Это должно компенсироваться разработчиком путем использования соответствующих мер подавления эффекта боковых лепестков.

Так как частоты передачи и приема различны, здесь не возникает мешающих отражений. Поэтому нет необходимости в МТИ системе для компенсации паразитных отражений от земли. С другой стороны, изменение частоты с помощью преднамеренной помехи невозможно. Возникающие внутренние помехи в обнаружении вторичного радара исключаются использованием дополнительных мер при монтаже радиоэлектронных компонентов радара.

1.6.4. Радар непрерывной волны (Continuous Wave Radar)

Радары непрерывной волны (CW-радары) передают непрерывно высокочастотный сигнал. Эхо-сигнал также *принимается и обрабатывается непрерывно*. Передава-

емый сигнал этого радара постоянен по амплитуде и частоте. Этот вид радаров обычно специализируется на измерении скорости движения различных объектов. Например, это оборудование используется для измерителей скорости. CW-радар, передающий немодулированную мощность, может измерять скорость с использованием доплеровского эффекта, при этом он не может измерять расстояние до объекта.

Блок схема CW-радара

Простой CW-радар на доплеровском эффекте имеет внутреннее устройство, показанное на рис. 1.26.

Генератор G_1 вырабатывает ВЧ-сигнал с очень стабильной частотой f_s . Второй генератор G_2 вырабатывает ВЧ-сигнал частоты f_{ZF} . Каскад смесителя с последующим узкополосным фильтром вырабатывает локальное колебание со стабильной частотой $f_s + f_{ZF}$ — сумма частоты передатчика и генерируемой промежуточной частоты. Как часть супергетеродинного приемника, следующий каскад смесителя преобразует ВЧ-сигналы обратного рассеяния $f_s + f_D$ в сигнал промежуточной частоты.

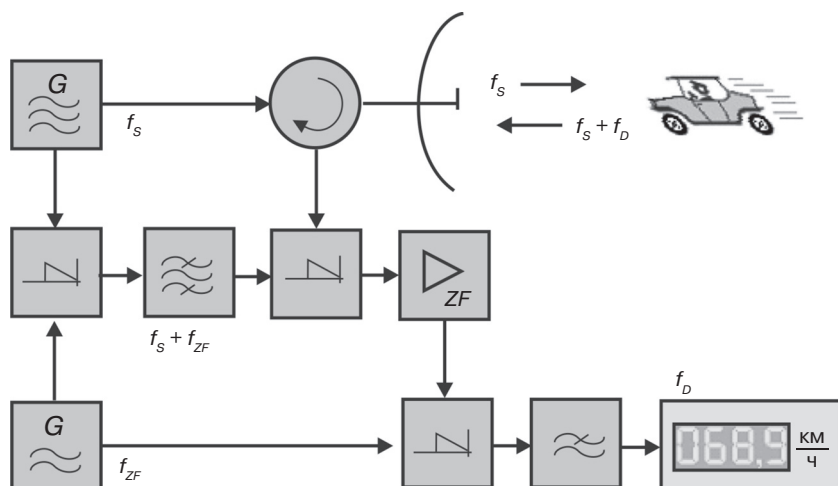


Рис. 1.26. Блок-схема CW-радара [1]

Усилитель промежуточной частоты делает приемник очень чувствительным для слабых эхо-сигналов. Выход последнего каскада смесителя фиксирует только доплеровскую частоту f_D . Частотомер подсчитывает эту частоту и посредством этой подсчитанной величины рассчитывает скорость объекта. С целью получения точного результата эта процедура расчета должна калиброваться в соответствии с точно заданным углом направления излучения к проезжей части.

Измеритель скорости — это узкоспециализированные CW-радары. Передавая немодулированную мощность, можно измерить скорость только путем использования доплеровский эффект, причем реальное расстояние до нарушающего правила автомобиля не имеет значения. Если вам нужна информация о расстоянии, то временное измерение может реализовываться за счет частотной модуляции или фазовой модуляции передаваемой мощности.

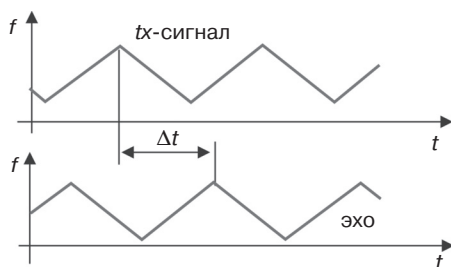


Рис. 1.27. Измерение расстояния с помощью системы FMCW [1]

Так как значение доплеровской частоты зависит от используемой длины волны, радары используют очень высокочастотный диапазон, обычно 24,125 ГГц и выше.

Он может измерять скорость приближающегося и удаляющегося транспорта справа и слева от наблюдателя. Радар может монтироваться на машине или на треноге. Нарушение правил дорожного движения может сопровождаться использованием фотокамеры с высоким разрешением.

СВ-радары имеют тот основной недостаток, что они не могут измерять расстояние. Для устранения этой проблемы может использоваться метод частотного сдвига.

СВ-радар с частотной модуляцией

При методе частотного сдвига сигнал, который постоянно изменяется по частоте вокруг фиксированного базиса, используется для обнаружения стационарных объектов. Когда принимается отражение, частоты могут проверяться, и, зная, когда в прошлом эта конкретная частота была отправлена, вы можете провести расчет расстояния (метод FMCW — Frequency modulation continuous wave).

Иногда для решения частных задач вместо этих радаров с непрерывной волной с частотной модуляцией (FMCW) используют радары, в которых плавно меняются частоты вверх и вниз. Аналогично импульсным радарам измеренное время задержки может использоваться для расчета расстояния с помощью следующего уравнения:

$$R = \frac{c_0 \cdot \Delta t}{2},$$

где c_0 — скорость света $= 3 \times 10^8$ м/с; t — измеренная разница во времени (с); R — показания альтиметра до поверхности земли (м).

Этот тип радара часто используется в качестве радарного альтиметра. Радарный альтиметр используется для измерения точной высоты при процедуре приземления самолета. Альтиметры радары также являются компонентами систем предупреждения о возможности столкновения с землей, сообщающих пилоту, что самолет летит слишком низко или что поверхность земли приближается, угрожая столкновением с самолетом.

1.6.5. Классификация и принципиальные особенности военных радаров

Все многообразие радаров можно разделить на типы на основе сфер их использования.

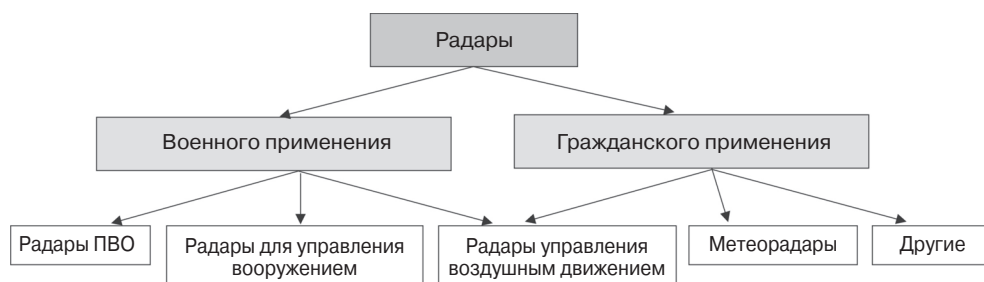


Рис. 1.28. Классификация радаров в соответствии со сферой использования [1]

Радары ПВО могут обнаруживать воздушные цели и определять их положение, курс и скорость в относительно большом пространстве. Максимальное расстояние для радаров ПВО может превышать 500 км, и покрытие по азимуту составляет полный круг в 360 градусов. Радары ПВО обычно делятся на две категории в зависимости от объема передаваемой информации о положении цели. Радары, которые выдают только информацию о расстоянии и азимуте, называются двумерными, или 2D радары. Радары, которые выдают расстояние, азимут и высоту, называются трехмерными или 3D радары.

Радары ПВО используются как устройства раннего предупреждения, так как они могут обнаруживать приближение самолета противника или ракет на больших расстояниях. В случае атаки раннее предупреждение о противнике важно для организации успешной обороны от атаки. Защита от авиации в виде противовоздушной артиллерии, ракет или истребителей должна иметь высокую степень готовности во времени для отражения атаки. Информация о расстоянии и азимуте, даваемая радары ПВО, предназначена для начального позиционирования радаров, отслеживания и управления огнем по цели.

Другая функция радара ПВО — направление боевого патрулирующего самолета к положению, пригодному для перехвата самолета противника. В случае управления самолетом информация по направлению движения цели получается оператором радара и передается на самолет либо голосом пилоту по радиоканалу, либо по компьютерной линии.

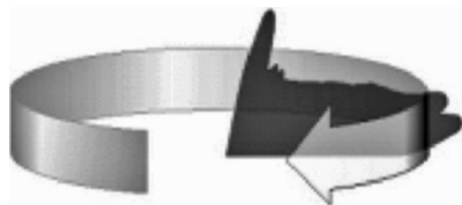


Рис. 1.29. Принцип построения диаграммы типового 2D радара — используется вращающаяся антенна с косекансовой диаграммой направленности

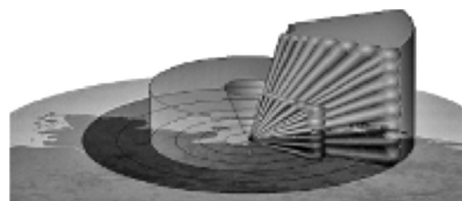


Рис. 1.30. Вид диаграммы направленности типового 3D радара (комбинация вертикального управления электронным лучом и механического горизонтального перемещения остронаправленного луча)

Основные применения радаров ПВО:

- раннее предупреждение на большом расстоянии (включая раннее предупреждение о воздушной цели);
- захват цели и предупреждение о баллистической ракете;
- определение высоты цели.

В качестве типового примера военных радаров следует привести *радары для управления вооружением*.

Радар, который обеспечивает непрерывные данные о положении одиночной цели, называется *слеющим* радаром. Также имеются радары *управления огнем*; оба наименования часто используются взаимозаменяемо.

Типовые характеристики радара управления огнем включают очень высокую частоту повторения импульсов, очень короткие импульсы и очень узкий луч. Эти характеристики при обеспечении предельной точности ограничивают расстояние и затрудняют начальное обнаружение цели.

Радар управления огнем вначале направляется на вероятное местоположение нужной цели из-за узкой диаграммы направленности. В непосредственной близости от цели радар переключается на фазу захвата цели. Электронная система радара проводит обзор малого объема пространства в предварительно заданном районе локализации цели.

Как только цель локализована, радар автоматически входит в фазу отслеживания. Используя один из возможных способов сканирования, радар автоматически следует за движением цели. Как говорится, радар должен фиксироваться на цели на фазе отслеживания. Три последовательных фазы работы часто называются режимами и обычны для последовательности обработки цели для большинства радаров управления огнем.



Рис. 1.31. Антенна мобильного 3D радара ПВО



Рис. 1.32. Радар обнаружения вертолетов и самолетов в немецкой системе захвата цели

Многофункциональные радары с активной решеткой (MFR) позволяют современным системам вооружения при массированных атаках ракет с очень малым сечением для радара успешно работать в концентрированной среде помех. Такие радары должны обеспечивать большое число каналов управления огнем, одновременно отслеживать как ракеты противника, так и объекты ПВО и выдавать команды промежуточного курса системам поражения.

Антенны с активной фазированной решеткой конструктивно включают панели, состоящие из матриц силовых модулей на GaAs, передающих различные импульсные конфигурации и строящие подробную картину зоны наблюдения. Типовая конфигурация такого радара обычно содержит приблизительно 2000 элементов на каждой плоскости, с четырьмя фиксированными панелями. Каждая такая матричная плоскость может покрывать 90° как по возвышению, так и по азимуту для обеспечения полного полусферического покрытия.

К многофункциональным военным радарам относятся и радары для отслеживания нескольких целей

Рабочие функции радара для отслеживания нескольких целей включают:

- одновременное отслеживание нескольких авиационных целей;
- поиск на большом расстоянии;
- поиск информации с большой скоростью данных для низколетящего самолета;
- поиск информации с высоким разрешением при близости воздушных целей;
- информация по автоматическому позиционированию и высоте;
- возможность задания цели для других систем.

Еще один пример военного радара — это **радар для определения местоположения миномета** (рис. 1.33).

Радар для определения местоположения миномета обеспечивает быстрое определение (засечку) позиции минометов противника в координатах карты местности, позволяющее артиллерийскому подразделению начать контратаку. Система электронным образом сканирует горизонт в заданном секторе несколько раз в секунду,

засекает и автоматически отслеживает снаряды неприятеля, затем вычисляет вдоль траектории ее начало. Координаты и высота орудия затем передаются оператору.

При управлении воздушным движением широко используются следующие системы радаров:

- радары обеспечения полета (рис. 1.34);
- радары воздушного наблюдения (рис. 1.35);
- радары точного захода на посадку (рис. 1.36);
- радары движения по поверхности;
- специальные метеорологические радары.

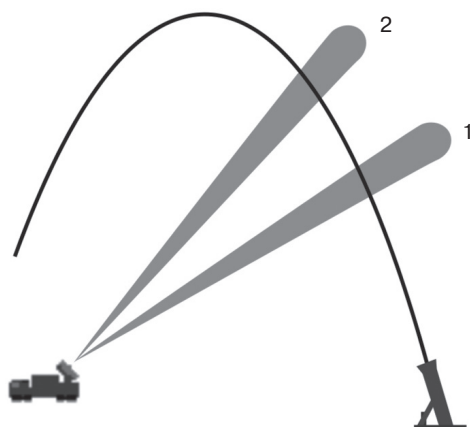


Рис. 1.33. Принцип работы радара для определения положения миномета



Рис. 1.34. Вид типового радара обеспечения полета SRE-M7