

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

СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ

**Техническая энциклопедия
В 2-х книгах**

Книга 1



ТЕХНОСФЕРА



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

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 монокристаллических интегральных схем СВЧ	515
7.4.1. Основные сферы применения монокристаллических 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-монокристаллических 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