



Достижение высокого технологического уровня радио-электроники невозможно без поддержания современного уровня знаний. Серия книг «Мир радиозлектроники» с 2010 года успела зарекомендовать себя как собрание актуальной научной и технической литературы.

*Директор Департамента
радиозлектронной промышленности
Минпромторга России С.В. Хохлов*



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Хохлов Сергей Владимирович, директор Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга РФ – председатель редсовета

Члены совета:

Авдонин Борис Николаевич, советник директора ФГУП «МНИИРИП», д.э.н., профессор, г. Москва

Акопян Иосиф Григорьевич, АО «МНИИ «Агат», д.т.н., профессор, г. Москва

Анцев Георгий Владимирович, ген. директор – ген. конструктор АО «Концерн «Моринформсистема-Агат», г. Москва

Беккиев Азрет Юсупович, зам. ген. директора холдинговой компании «Росэлектроника», д.т.н., профессор, г. Воронеж

Белый Юрий Иванович, ген. директор АО «НИИП им. В.В. Тихомирова», г. Жуковский

Боев Сергей Федотович, председатель совета директоров АО «РТИ», генеральный конструктор, лауреат Государственной премии, д.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

Борисов Юрий Иванович, заместитель министра обороны РФ, д.т.н., г. Москва

Букашкин Сергей Анатольевич, АО «Концерн «Автоматика», д.т.н., профессор, г. Москва

Бушуев Николай Александрович, советник ген. директора АО «НПП «Контакт», к.ф.-м.н., д.э.н., профессор, г. Саратов

Верба Владимир Степанович, ген. конструктор АО «Концерн радиостроения «Вега», чл.-корр. РАН, г. Москва

Верник Петр Аркадьевич, директор АНО «Институт стратегий развития», г. Москва

Вилкова Надежда Николаевна, ген. директор ЗАО «МНИТИ», к.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

Гуляев Юрий Васильевич, научный руководитель ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, академик РАН, г. Москва

Зверев Андрей Владимирович, к.э.н., г. Москва

Кожанов Дмитрий Александрович, ген. директор АО «НИИЭТ», г. Воронеж

Козлов Геннадий Викторович, советник ген. директора ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей», д.т.н., профессор, г. Москва

Красников Геннадий Яковлевич, ген. директор АО «НИИМЭ», академик РАН, г. Москва, г. Зеленоград

Критенко Михаил Иванович, госкорпорация «Ростех», к.т.н., г. Москва

Мальцев Петр Павлович, научный руководитель ИСВЧПЭ РАН, д.т.н., профессор, г. Москва

Минаев Владимир Николаевич, д.т.н., профессор, г. Москва

Муравьев Сергей Алексеевич, к.т.н., с.н.с., г. Москва

Немудров Владимир Георгиевич, научный руководитель АО «НИИМА «Прогресс», д.т.н., профессор, г. Москва

Попов Владимир Васильевич, президент ОАО «Светлана», к.т.н., г. Санкт-Петербург

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, президент МГТУ МИРЭА, г. Москва

Суворов Александр Евгеньевич, ген. директор ФГУП «МКБ «Электрон», г. Москва

Турилов Валерий Александрович, ген. директор АО «КНИИТМУ», к.т.н., доцент, г. Калуга

Федоров Игорь Борисович, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана, академик РАН, д.т.н., профессор, г. Москва

Чаплыгин Юрий Александрович, президент Национального исследовательского университета «МИЭТ», чл.-корр. РАН, г. Москва, г. Зеленоград

Шахнович Илья Владимирович, главный конструктор ООО «НИИИТ», г. Москва

Шубарев Валерий Антонович, президент ОАО «Авангард», д.т.н., профессор, г. Санкт-Петербург

Якунин Александр Сергеевич, АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж



МИР

радиоэлектроники

Джузеппе А. Фабрицио

**Высокочастотный
загоризонтный радар:**
основополагающие принципы,
обработка сигналов
и практическое применение

перевод с английского
Н.Л. Бирюкова, Е.Б. Махияновой,
К.В. Юдинцева

под редакцией
д.т.н., д.э.н., проф. С.Ф. Боева

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2018

УДК 621.396.96
ББК 32.95
Ф12

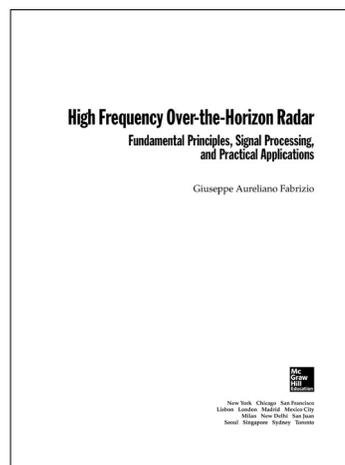
Ф12 Фабрицио Джузеппе А.

Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 936 с. ISBN 978-5-94836- 448-3

Основная цель данной книги состоит в том, чтобы представить новейшие достижения в области загоризонтных радиолокационных систем (ЗГ РЛС). При этом основное внимание уделено подробному описанию методов и моделей обработки сигналов, которые в значительной степени способствовали внедрению самых современных технологий в ЗГ РЛС, но недостаточно подробно изложены в существующей литературе. Настоящее издание направлено на преодоление этого разрыва.

Книга отличается цельностью изложения и включает описание основных принципов проектирования и эксплуатации ЗГ РЛС на более доступном уровне для читателей, не имеющих предварительных знаний в данной области. При этом сделана попытка объединить большое количество ранее разбросанных публикаций по теме ЗГ РЛС и адаптивной обработки сигналов на единой платформе, используя обширный список цитирования, с тем чтобы показать связи между многочисленными теоретическими и экспериментальными работами, опубликованными в этих областях. Отличительная особенность данной книги заключается в удачном включении экспериментальных результатов, полученных при практической эксплуатации ЗГ РЛС, использующих ионосферное распространение и поверхностные волны, для иллюстрации практических применений методов обработки данных.

Книга будет интересна научным сотрудникам и инженерам, желающим получить более детальное представление о данной технологии, а также инженерам-практикам и исследователям, заинтересованным в создании надежных алгоритмов обработки сигналов для реальных систем. Эта книга, возможно, станет стимулом для молодых ученых и инженеров к изучению проблем ЗГ РЛС и радиолокации в целом.



УДК 621.396.96
ББК 32.95

© 2013 by The McGraw-Hill Companies. All rights reserved.

© 2018, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление.

ISBN 978-5-94836-448-3

ISBN 978-0-07-162127-4 (англ.)

Содержание

Предисловие редактора перевода	15
Об авторе	17
Предисловие	18
Благодарности	19
Аббревиатуры	21
Глава 1. Введение	28
1.1. Предпосылки и мотивация.....	31
1.1.1. РЛС прямой видимости.....	31
1.1.2. Ограничения по зоне обнаружения.....	33
1.1.3. За горизонтом.....	36
1.2. Принципы работы загоризонтных радаров.....	39
1.2.1. Принцип действия загоризонтных ионосферных РЛС.....	39
1.2.2. Общая характеристика.....	44
1.2.2.1. Среда распространения.....	44
1.2.2.2. Характеристики системы.....	46
1.2.2.3. Обработка сигналов и условия распространения КВ-сигналов.....	48
1.2.3. Практические приложения применения.....	51
1.2.3.1. Раннее обнаружение в обширной зоне наблюдения.....	51
1.2.3.2. Дистанционное зондирование.....	54
1.3. Основное уравнение КВ-радара.....	55
1.3.1. Наклонная дальность.....	56
1.3.2. Передаваемая мощность.....	56
1.3.3. Усиление антенны.....	57
1.3.4. Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели.....	58
1.3.5. Время интеграции.....	59
1.3.6. Общие потери.....	60
1.3.7. Постоянная распространения.....	60
1.3.8. Шум окружающей среды.....	61
1.3.9. Численный пример.....	61
1.4. Номинальные возможности системы.....	62
1.4.1. Минимальное и максимальное расстояния.....	63
1.4.2. Зона выдержки интервала зондирования.....	65
1.4.3. Разрешение и точность.....	67
ЧАСТЬ I. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ	72
Глава 2. Ионосферное распространение радиоволн	72
2.1. Ионосфера.....	73
2.1.1. Исторический экскурс.....	74
2.1.1.1. Ранние радиоэксперименты.....	74
2.1.1.2. Предлагавшиеся физические интерпретации.....	74
2.1.1.3. Радиосвязь и радиовещание.....	75
2.1.1.4. Открытие ионосферы.....	76
2.1.1.5. Послевоенные годы.....	77
2.1.2. Образование ионосферы и ее структура.....	78
2.1.2.1. Процессы, отвечающие за образование ионосферы.....	78
2.1.2.2. Процессы, обуславливающие снижение концентрации свободных электронов.....	80

2.1.2.3. Образование слоя.....	82
2.1.3. Области D, E и F.....	84
2.1.3.1. Область D.....	86
2.1.3.2. Область E.....	87
2.1.3.3. Спорадический слой E (E_S).....	88
2.1.3.4. Область F.....	88
2.1.3.5. Солнечная активность.....	91
2.2. Пространственная и временная изменчивость.....	92
2.2.1. Вертикальное радиозондирование.....	93
2.2.1.1. Плазменная и критическая частоты.....	94
2.2.1.2. Фазовый и групповой показатели преломления.....	95
2.2.1.3. Истинная и действующая высоты отражения.....	96
2.2.1.4. Ионограмма вертикального зондирования.....	97
2.2.2. Измерения и модели.....	100
2.2.2.1. Климатологические модели ионосферы.....	100
2.2.2.2. Влияние солнечного излучения на формирование ионизированных слоев.....	101
2.2.2.3. Слой F2.....	104
2.2.2.4. Низкие и высокие широты.....	107
2.2.3. Возмущения и бури.....	109
2.2.3.1. Солнечные вспышки и внезапные ионосферные возмущения.....	110
2.2.3.2. Выбросы коронального вещества.....	111
2.2.3.3. Протонные вспышки на Солнце.....	112
2.2.3.4. Геомагнитные и ионосферные бури.....	112
2.2.3.5. Бегущие ионосферные возмущения.....	113
2.3. Наклонное распространение.....	114
2.3.1. Соотношения эквивалентности.....	114
2.3.2. Двухточечные линии [связи].....	117
2.3.3. Частота, угол излучения и наземная дальность.....	124
2.3.3.1. Фиксированная частота.....	124
2.3.3.2. Фиксированный угол излучения.....	126
2.3.3.3. Трассировка лучей.....	129
2.4. Ионосферные моды.....	131
2.4.1. Обыкновенная и необыкновенная волны.....	131
2.4.1.1. Магнитоионное расщепление и поляризация.....	132
2.4.1.2. Фарадеевское вращение.....	134
2.4.2. Многолучевое распространение.....	136
2.4.2.1. Режимы первого и более высокого порядка.....	136
2.4.2.2. Гибридные моды.....	138
2.4.2.3. Двухнаправленное распространение.....	140
2.4.2.4. Трансэкваториальное распространение радиоволн.....	142
2.4.3. Амплитудное и фазовое замирание.....	143
2.4.3.1. Амплитудное замирание.....	144
2.4.3.2. Фаза и частота.....	146
Глава 3. Системные характеристики.....	147
3.1. Предварительные соображения.....	148
3.1.1. Конфигурация ЗГ РЛС и выбор мест развертывания.....	148
3.1.1.1. Однопозиционные системы.....	149
3.1.1.2. Двухпозиционные системы.....	150
3.1.1.3. Место базирования (развертывания).....	152

3.1.2. Сигналы РЛС	153
3.1.2.1. Классы сигналов	154
3.1.2.2. Импульсные и непрерывные сигналы	158
3.1.2.3. ЧМ-сигнал с линейной непрерывной модуляцией	159
3.1.3. Внеполосное излучение	161
3.1.3.1. Спектр линейно-частотно-модулированного непрерывного колебания (ЛЧМНК)	162
3.1.3.2. Методы формирования импульса	165
3.1.3.3. Уровни боковых лепестков по дальности	167
3.2. Архитектура РЛС	169
3.2.1. Передающая система	169
3.2.1.1. Антенный элемент	170
3.2.1.2. Конструкция решетки	174
3.2.1.3. Генерация сигналов	179
3.2.1.4. Усиление мощности	181
3.2.2. Приемная система	183
3.2.2.1. Антенный элемент	183
3.2.2.2. Конструкция решетки	187
3.2.2.3. Гетеродинные приемники	191
3.2.2.4. Цифровые приемники прямой обработки сигнала	198
3.2.3. Калибровка решетки	202
3.2.3.1. Влияние ошибок калибровки	203
3.2.3.2. Источники внутренней калибровки	206
3.2.3.3. Внешние калибровочные источники	209
3.3. Управление частотой	211
3.3.1. Оценка трассы распространения радиосигнала	213
3.3.1.1. Ионозонд возвратно-наклонного зондирования	213
3.3.1.2. Мини-РЛС	216
3.3.2. Занятость каналов и шум	218
3.3.2.1. Устройство контроля спектра	219
3.3.2.2. Фоновый шум	220
3.3.3. Структура ионосферного режима (моды)	222
3.3.3.1. Ионозонды вертикального и наклонного зондирования	223
3.3.3.2. Коэффициент рассеяния канала	225
3.4. Историческая перспектива	227
3.4.1. Системы настоящего и прошлого поколений	227
3.4.1.1. ЗГ РЛС MADRE	228
3.4.1.2. Широкоапертурная научно-исследовательская установка (WARF)	230
3.4.1.3. AN/FPS-95 (Cobra Mist)	231
3.4.1.4. ЗГ РЛС AN/FPS-118	232
3.4.1.5. AN/TPS-71 (перебазируемая ЗГ РЛС)	233
3.4.2. ЗГ РЛС Австралии	235
3.4.2.1. GEEBUNG	236
3.4.2.2. Фаза А ЗГ РЛС Jindalee	236
3.4.2.3. Ступень В ЗГ РЛС Jindalee	237
3.4.2.4. Оперативная радиолокационная сеть Jindalee (JORN — Jindalee Operational Radar Network)	238
3.4.3. Перспективы на будущее	239
Глава 4. Традиционная обработка	242
4.1. Условия распространения сигналов	243

4.1.1. Эхо-сигналы, отраженные от цели	244
4.1.1.1. Модель точечного отражателя	245
4.1.1.2. Эффективная площадь отражения цели	247
4.1.1.3. Изменения комплексной амплитуды	250
4.1.2. Мешающие отражения	253
4.1.2.1. Мешающие отражения от земной поверхности	254
4.1.2.2. Мешающие отражения от морской поверхности	258
4.1.2.3. Ионосферные мешающие отражения	263
4.1.3. Шумы и помехи	267
4.1.3.1. Атмосферный и галактический шум	268
4.1.3.2. Искусственные шумы и помехи	274
4.2. Стандартные процедуры обработки	276
4.2.1. Сжатие импульса	278
4.2.1.1. Вытяжка	280
4.2.1.2. Полностью цифровая реализация	284
4.2.2. Формирование диаграммы направленности антенной решетки	286
4.2.2.1. Диаграммы направленности антенного элемента и подрешетки	287
4.2.2.2. Цифровое формирование ДНА	288
4.2.2.3. Характеристики диаграммы направленности антенной решетки	294
4.2.3. Доплеровская обработка	296
4.2.3.1. Индикатор движущейся цели	296
4.2.3.2. Спектральный анализ	298
4.2.3.3. Маневрирующие цели	301
4.2.3.4. Практические примеры	302
4.3. Эксплуатационные аспекты	307
4.3.1. Работа с целями в воздухе и на поверхности	308
4.3.1.1. Несущая частота	308
4.3.1.2. Ширина полосы частот	313
4.3.1.3. Частота повторения импульсов	315
4.3.1.4. Интервал когерентной обработки	317
4.3.2. Подавление кратковременных помех	319
4.3.2.1. Принципы и методы	320
4.3.2.2. Примеры обработки реальных данных	322
4.3.3. Экстраполяция данных и подбор сигналов	325
4.3.3.1. Экстраполяция данных (DATEX)	325
4.3.3.2. Коррекция ионосферных искажений (IDC)	327
4.3.3.3. Примеры обработки реальных данных	330
4.4. Обнаружение и слежение	331
4.4.1. Обработка с постоянной частотой ложных тревог	331
4.4.1.1. Вероятности обнаружения цели и ложной тревоги	333
4.4.1.2. Усреднение по элементам разрешения CFAR	335
4.4.1.3. Порядковая (ранговая) статистика	340
4.4.2. Определение порогов и пиковое детектирование	342
4.4.3. Отслеживание и регистрация координат	344
4.4.3.1. Сопровождение	345
4.4.3.2. Регистрация координат и сопоставление трасс	348
Глава 5. РЛС поверхностной волны	351
5.1. Главные характеристики	352
5.1.1. Принцип действия	352
5.1.1.1. Распространение ЭМВ вдоль земной поверхности	352

5.1.1.2. Характеристики поверхностной волны	353
5.1.1.3. Концепция высокочастотных радаров поверхностной волны	354
5.1.2. Архитектура и технические характеристики	356
5.1.2.1. Описание базовой системы	357
5.1.2.2. Уравнение радиолокации для ЗГ РЛС ВЧ ПЭВ	359
5.1.2.3. Номинальные рабочие характеристики системы	365
5.1.3. Практические приложения	368
5.1.3.1. Наблюдение за надводным пространством	369
5.1.3.2. Военное и гражданское применение	370
5.1.3.3. Дистанционное зондирование	371
5.2. Механизм распространения	372
5.2.1. Малые и большие расстояния	374
5.2.1.1. Плоская поверхность	374
5.2.1.2. Сферическая поверхность	380
5.2.2. Тропосферная рефракция	386
5.2.3. Неровности поверхности и ее неоднородность	391
5.3. Факторы окружающей среды	397
5.3.1. Помехи отражения от морской поверхности	397
5.3.1.1. Основные принципы	398
5.3.1.2. Помехи отражения первого и второго класса (порядка)	404
5.3.1.3. Влияние на эксплуатационные характеристики ЗГ РЛС ПЭВ	412
5.3.2. Ионосферные помехи	416
5.3.2.1. Классификация трасс распространения	417
5.3.2.2. Распределение по дальности	418
5.3.2.3. Доплеровские характеристики	419
5.3.2.4. Частотная зависимость	421
5.3.2.5. Пространственные и поляриметрические свойства	423
5.3.3. Интерференция и шум	424
5.4. Практическая реализация	427
5.4.1. Конфигурация и выбор места развертывания	427
5.4.1.1. Конфигурация РЛС	427
5.4.1.2. Выбор местоположения (площадки) РЛС	429
5.4.2. Подсистемы РЛС	431
5.4.2.1. Система передачи	431
5.4.2.2. Система приема	432
5.4.3. Обработка сигнала и данных	434
5.4.3.1. Снижение уровня ионосферных помех	436
5.4.3.2. Поляризационная фильтрация	437
5.5. Эксплуатационные соображения	438
5.5.1. Эффективная поверхность рассеяния ЭМВ	438
5.5.1.1. Область рэлеевского резонанса	439
5.5.1.2. Методы моделирования	440
5.5.1.3. Взаимовлияние между ЭПР разных целей	441
5.5.1.4. Экспериментальные измерения	441
5.5.2. Многочастотный режим	445
5.5.2.1. Выбор частоты	445
5.5.2.2. Двухчастотный режим эксплуатации	447
5.5.3. Примеры систем	451
5.5.3.1. Изделия Иука и SECAR	452
5.5.3.2. РЛС SWR-503	454
5.5.3.3. Система BAE SWR	455

ЧАСТЬ II. ОПИСАНИЕ СИГНАЛОВ	458
Глава 6. Интерференционно-волновая модель	458
6.1. Детерминированное описание сигналов ионосферного распространения	459
6.1.1. Обоснование направлений исследований	459
6.1.2. Укрупненная структура сложных волновых полей	461
6.1.3. Тонкая структура мод	464
6.2. Функция рассеяния канала	466
6.2.1. Идентификация ионосферных мод	467
6.2.2. Номинальные параметры мод	468
6.2.3. Наблюдение тонкой структуры	472
6.3. Разрешающая способность тонкой структуры	480
6.3.1. Представление сигналов	480
6.3.2. Оценка параметров	484
6.3.3. Пространственно-временной алгоритм MUSIC	486
6.4. Результаты экспериментов	488
6.4.1. Предварительный анализ данных	488
6.4.2. Точность подбора модели	493
6.4.3. Выводы и обсуждение	497
Глава 7. Статистическая модель сигнала	498
7.1. Стационарные процессы	499
7.1.1. Предпосылки, возможности и область применения	499
7.1.2. Измерения КВ-сигналов	501
7.1.3. Расширение представлений об антенных решетках	504
7.2. Диффузное рассеяние	506
7.2.1. Математическое представление	507
7.2.2. Изменяющаяся ионосферная структура	509
7.2.2.1. Статистические данные второго порядка	509
7.2.3. Функции автокорреляции	511
7.3. Временные статистические характеристики	513
7.3.1. Метод оценки параметра	514
7.3.2. Приемочные проверки гипотез	517
7.3.3. Предположение о пространственной однородности	521
7.4. Пространственные и пространственно-временные статистические характеристики	526
7.4.1. Коэффициенты корреляции	528
7.4.2. Средний плоский волновой фронт	532
7.4.3. Пространственно-временная разделимость	538
Глава 8. Имитатор КВ-канала	544
8.1. Точечные и распределенные источники	544
8.1.1. Традиционные модели обработки антенных решеток	545
8.1.2. Когерентные и некогерентные распределения лучей	546
8.1.3. Определение параметров распределенных сигналов	547
8.2. Обобщенная модель Уоттерсона	549
8.2.1. Математическая постановка и интерпретация	549
8.2.2. Временные и пространственные флуктуации	552
8.2.3. Ожидаемые статистики второго порядка	554
8.3. Методы параметрической оценки	556
8.3.1. Стандартные процедуры идентификации	557
8.3.2. Алгоритм согласованного фильтра MF MUSIC	558

8.3.3. Метод нахождения корней полинома.....	561
8.4. Приложение к реальным данным.....	564
8.4.1. Метод наименьших квадратов замкнутой формы.....	565
8.4.2. Метод подпространств.....	569
8.4.3. Выводы и обсуждение.....	572
Глава 9. Анализ способов подавления помех.....	574
9.1. Сглаживание шумов и помех.....	575
9.1.1. Пространственная обработка.....	575
9.1.2. Известные методы.....	576
9.1.3. КВ-приложения.....	578
9.2. Стандартный метод адаптивного формирования диаграммы направленности.....	580
9.2.1. Метод обратной матрицы отсчетов.....	580
9.2.2. Практическая реализация схем.....	581
9.2.3. Альтернативный подход, учитывающий временную зависимость.....	585
9.3. Анализ мгновенных показателей.....	586
9.3.1. Сбор реальных данных.....	586
9.3.2. Анализ характеристик на интервале ИКО (CPI).....	587
9.3.3. Повышение ОСПШ на выходе.....	590
9.4. Статистический анализ показателей.....	591
9.4.1. Базовые схемы.....	591
9.4.2. Пакетные периодические схемы.....	593
9.4.3. Эксплуатационные проблемы.....	595
9.5. Моделирование прогнозируемых показателей.....	595
9.5.1. Параметры многоканальной модели.....	595
9.5.2. Влияние искажений волнового фронта.....	596
9.5.3. Выводы и обсуждение.....	598
ЧАСТЬ III. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ.....	600
Глава 10. Технология адаптивного формирования диаграммы направленности.....	600
10.1. Основные понятия.....	601
10.1.1. Оптимальные и адаптивные фильтры.....	601
10.1.2. Однородный гауссов случай.....	605
10.1.2.1. Адаптивное обучение с использованием согласованного полезного сигнала.....	606
10.1.2.2. Адаптивное обучение при использовании несогласованного полезного сигнала.....	607
10.1.2.3. Неадаптивное обучение с согласованным полезным сигналом.....	609
10.1.2.4. Неадаптивное обучение при несогласованности полезного сигнала.....	611
10.1.2.5. Производительность оптимального фильтра.....	612
10.1.3. Работа в реальных условиях.....	613
10.1.3.1. Амплитудная и спектральная несогласованность.....	613
10.1.3.2. Выбор обучающих данных.....	615
10.1.3.3. Методы работы в условиях недостатка выборок.....	616
10.2. Постановка задачи.....	617
10.2.1. Снижение интерференции и местных помех от отражений.....	618
10.2.2. Модель многоканальных данных.....	619
10.2.2.1. Внешние помехи (интерференция).....	619
10.2.2.2. Помехи отражений.....	621
10.2.3. Стандартное адаптивное формирование диаграммы направленности.....	623
10.3. Изменяющиеся по времени (нестационарные) методы.....	625

10.3.1. Стохастические ограничения	626
10.3.2. Нестационарная пространственная адаптивная обработка	627
10.3.2.1. Альтернативный алгоритм TV-SAP	628
10.3.2.2. Сложность вычислений	630
10.3.3. Экспериментальные результаты	632
10.3.3.1. Обычное и изменяющееся во времени SMI-MVDR-формирование диаграммы направленности	633
10.3.3.2. Изменяющееся по времени (нестационарное) LSMI-MVDR-формирование диаграммы направленности	636
10.3.3.3. Применение TV-SAP-метода с ограничениями, управляемыми данными	638
10.3.3.4. Сравнение со стохастическими ограничениями	640
10.4. Постдоплеровские методы	645
10.4.1. Практическое применение	645
10.4.1.1. Пассивная радиолокация	646
10.4.1.2. PCL-система загоризонтных ВЧ-РЛС	648
10.4.1.3. Обычная схема обработки сигнала	652
10.4.2. Зависящее от дальности адаптивное формирование диаграммы направленности	654
10.4.2.1. Традиционное адаптивное формирование диаграммы направленности	655
10.4.2.2. RD-SAP-метод постдоплеровской обработки	656
10.4.3. Развернутый анализ данных	660
10.4.3.1. Эмпирические характеристики работающего приемника	661
10.4.3.2. Распределение обнаружений	662
10.4.3.3. Индикация отслеживания начала траектории цели	665
Глава 11. Пространственно-временная адаптивная обработка	668
11.1. Архитектура STAP	669
11.1.1. STAP в области медленного времени	670
11.1.2. STAP в области быстрого времени	672
11.1.3. 3D-STAP	675
11.2. Модель данных	677
11.2.1. Композитный сигнал	677
11.2.2. «Холодные» помехи	679
11.2.3. «Горячие» помехи	682
11.3. Методы подавления помех	686
11.3.1. Стандартные схемы	687
11.3.1.1. Линейные детерминированные ограничения	688
11.3.1.2. Не изменяющаяся по времени (стационарная) STAP	690
11.3.1.3. Алгоритм STAP без ограничений	691
11.3.1.4. Относительные достоинства и недостатки STAP	691
11.3.2. Альтернативные процедуры	692
11.3.2.1. Алгоритм STAP со стохастическими ограничениями (SC-STAP)	693
11.3.2.2. Изменяющийся во времени алгоритм STAP (TV-STAP)	696
11.3.3. Результаты моделирования	700
11.3.3.1. Подавление «горячих» помех	701
11.3.3.2. Обработка «холодных» помех	703
11.3.3.3. Схемы для практического применения	705
11.4. Реализация алгоритма STAP для постдоплеровских частот	708
11.4.1. Описание алгоритма	709

11.4.2. Экспериментальные результаты	716
11.4.2.1. Отображение дальности и доплеровского сдвига цели	718
11.4.2.2. Сигнатура доплеровского сдвига по времени	720
11.4.3. Заключение	722
Глава 12. Схемы обнаружения с помощью обобщенного критерия отношения правдоподобия (GLRT — Generalized Likelihood-Ratio Test)	725
12.1. Постановка задачи	726
12.1.1. Предпосылки и формулировка задачи	727
12.1.2. Традиционные критерии проверки гипотез	731
12.1.3. Альтернативные бинарные критерии	735
12.1.3.1. Обобщенные критерии одновременной проверки нескольких гипотез (GMHT — Generalized Multi-Hypothesis Tests)	737
12.2. Модели измерений	738
12.2.1. Процесс возникновения помех	738
12.2.1.1. Однородный гауссов случай	739
12.2.1.2. Смешанная гауссова модель	739
12.2.1.3. Сферически инвариантный случайный процесс (SIRP)	740
12.2.2. Полезный сигнал	742
12.2.2.1. Отметка дискретной цели	742
12.2.2.2. Расширенные полезные сигналы	743
12.2.2.3. Распределенные полезные сигналы	746
12.2.3. Когерентная интерференция	748
12.3. Схемы обработки	750
12.3.1. Одно- и двухэтапные методы GLRT	750
12.3.1.1. Метод GLRT, предложенный Kelly	751
12.3.1.2. Адаптивный согласованный фильтр (AMF)	752
12.3.1.3. Альтернативное выражение для GLRT	753
12.3.2. Частично однородный случай	754
12.3.2.1. Адаптивное устройство оценки когерентности (ACE)	754
12.3.2.2. Адаптивный детектор подпространства (ASD — Adaptive Subspace Detector)	754
12.3.2.3. Обобщенные детекторы подпространства (GSD — Generalized Subspace Detectors)	755
12.3.3. Обнаружение целей на совместном множестве данных	759
12.3.3.1. Однородный случай	759
12.3.3.2. Мультианговые сигналы и частично однородные помехи	763
12.4. Практическое применение	766
12.4.1. Пространственная обработка	766
12.4.1.1. Эксперимент на РЛС Jindalee	766
12.4.1.2. Эксперимент на загоризонтной РЛС Иука	774
12.4.2. Временная обработка	779
12.4.3. Комбинированные методы	783
Глава 13. Оценка сигнала слепыми методами	786
13.1. Постановка задачи	787
13.1.1. Модель многолучевости	788
13.1.1.1. Принимаемый сигнал	790
13.1.1.2. Локализованное рассеяние	792
13.1.1.3. Данные принятых сигналов	793
13.1.1.4. Множественные источники	795
13.1.2. Цели обработки	796

13.1.2.1. Оценка сигнала	796
13.1.2.2. Оценка канала	798
13.1.2.3. Основные предположения и допущения	799
13.1.3. Пример для объяснения	800
13.2. Стандартные методы	802
13.2.1. Слепой метод идентификации системы	802
13.2.2. Слепое разделение сигнала	806
13.2.2.1. Методы на основе многообразия	809
13.2.2.2. Методы на основе знаний параметров источника	811
13.2.3. Выводы	811
13.3. Алгоритм GEMS	812
13.3.1. Обработка при отсутствии шума	812
13.3.1.1. Единичный источник	813
13.3.1.2. Множественные источники	816
13.3.1.3. НКР-модель	818
13.3.2. Порядок работы	819
13.3.3. Вычислительная сложность	823
13.4. Эксперимент SIMO	826
13.4.1. Сбор данных	827
13.4.2. Методы копирования сигнала	829
13.4.3. Применение алгоритма GEMS	831
13.4.3.1. Оценка сигнала с помощью алгоритма GEMS	831
13.4.3.2. Оценка волнового фронта с помощью алгоритма GEMS	834
13.4.3.3. КР и НКР волновые фронты	836
13.5. MIMO-эксперимент	837
13.5.1. Сбор данных	838
13.5.2. Разделение сигнала по источникам и многолучевости	839
13.5.3. Радиолокационные приложения	841
13.6. Однопозиционная геолокация	844
13.6.1. Предпосылки и мотивация	844
13.6.2. Сбор данных	847
13.6.3. Метод геолокации	849
13.6.3.1. Фазовые измерения	849
13.6.3.2. Измерения временной задержки	852
13.6.3.3. Комбинированные измерения	854
13.6.4. Заключение и планы на будущее	855
ЧАСТЬ IV. ПРИЛОЖЕНИЯ И ЛИТЕРАТУРА	856
Приложение А. Распределение выборочной АКП	856
Приложение В. Пространственно-временная делимость	861
Приложение С. Модальное разложение	863
Литература	865
Предметный указатель	906

Предисловие редактора перевода

Уважаемые читатели!

Представляемая вашему вниманию книга посвящена интереснейшей проблеме современной радиолокации — проектированию и разработке загоризонтных РЛС. Ее автор Джузеппе А. Фабрицио является крупным и весьма авторитетным экспертом в области проектирования таких радиолокаторов. Работая в Организации оборонной науки и техники (DSTO — Defense Science and Technology Organization) Австралии, занимая должность ведущего научного сотрудника отдела адаптивной обработки сигналов в подразделении, занимающемся загоризонтной радиолокацией, Дж. А. Фабрицио посвящает много времени исследованиям и разработкам новых методов и алгоритмов обработки информации. Следует отметить, что Австралия достаточно давно и небезуспешно занимается проблематикой загоризонтной радиолокации, имеет определенные успехи в разработках ЗГ РЛС, хотя «монополизм» России и США в этой отрасли будет сохраняться достаточно долго, по крайней мере ближайšie 20–30 лет.

Несмотря на то что книга написана несколько лет назад, выпуск ее русского перевода несколько задержался. Это связано с целым рядом обстоятельств. Во-первых, издательство не до конца было уверено в том, что перевод будет пользоваться спросом: проблемами практического применения загоризонтной радиолокации в России занимается небольшое число научно-производственных компаний. Однако неожиданный успех вышедшей в начале 2017 года монографии В. Ф. Акимова и Ю. К. Калинина «Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов» под редакцией С. Ф. Боева показал востребованность серьезных публикаций по этой проблематике и стимулировал ускорение работы по подготовке перевода.

Интересно отметить, что книга Дж. Фабрицио не может считаться какой-либо альтернативной монографией российских авторов. Совместный анализ обоих изданий показывает, что они хорошо дополняют друг друга: в российской монографии упор сделан на рассмотрение физических основ и принципов проектирования загоризонтных РЛС, книга Дж. Фабрицио посвящена в значительной степени вопросам обработки информации (сигналы, первичная обработка, вторичная обработка и т. д.). Таким образом, это «двухкнижие» представляет собой великолепное справочное пособие по проектированию и разработке загоризонтных радиолокаторов, по сути дела, «настольную книгу» как для главного конструктора, так и для всех ведущих разработчиков.

Знакомство с книгой Дж. Фабрицио, на наш взгляд, будет полезно и для начинающих инженеров, и для зрелых специалистов. В частности, прочитав эту книгу, любой инженер, интересующийся радиоинформационными технологиями, поймет, насколько интересна, обширна и, видимо, неисчерпаема тематика загоризонтной радиолокации. Имеющийся (в первую очередь в России и США) практический опыт создания загоризонтных РЛС показал их перспективность для решения целого ряда специальных, научных и народнохозяйственных задач. Вместе с тем этот опыт показал, что многие научно-технические проблемы, решенные разработчиками загоризонтных РЛС на инженерном уровне и, возможно, неоптимальным образом, требуют научного «осмысления» и оптимизации. Принципиальная задача — обеспечение эффективной работы РЛС в условиях воздействия реальной среды распространения радиоволн, похоже, является задачей для радиофизиков «на все времена». Остается множество вопросов, касающихся антенной техники, повышения информационно-энергетических характеристик, выбора наиболее эффективных параметров зондирующих сигналов. Наконец, «вечная» проблема — проблема обработки информации и максимизации объема информации, получаемой от загоризонтных РЛС. Все это дает основания полагать, что книга Дж. Фабрицио — не последняя работа по проблематике загоризонтной радиолокации.

Хотелось бы отметить одну проблему, с которой пришлось столкнуться в ходе подготовки перевода книги. Дело в том, что, видимо, вследствие недостаточной координации между разработчиками разных стран сложившаяся терминология по этому научно-техническому

направлению в нашей стране и за рубежом не совпадает. В связи с этим хочется заранее принести извинения за те возможные неточности, которые читатели, особенно те, которые знакомы с рассматриваемой проблематикой, могут встретить на страницах переводного издания. Уверены, что эти возможные неточности не приведут к искажению физической сущности рассматриваемых вопросов и не запутают читателей.

В заключение хочется выразить большую благодарность целому ряду специалистов, поработавшим над переводом и над его последующим редактированием: Ф. Ф. Евстратову, В. А. Собчуку, В. Ф. Акимову, Ю. К. Калинин, Т. А. Колосовой, А. В. Морозу, и некоторым другим специалистам АО «РТИ», НИИДАРа, РТИ им. А. Л. Минца. Уверены, что это издание послужит не одному поколению российских ученых и инженеров, работающих в области загоризонтной радиолокации и радиолокации в целом!

Доктор технических наук,
доктор экономических наук, профессор,
лауреат Государственной премии С. Ф. Боев.
Кандидат технических наук, доцент Д. Д. Ступин

Об авторе



Джузеппе Аурелиано Фабрицио в 1992 году получил с отличием степень бакалавра, а в 2000 — степень доктора наук факультета электротехники и электронной техники университета Аделаиды, Австралия. С 1993 года д-р Фабрицио работает в научно-исследовательском институте Министерства обороны Австралии (DSTO — Defence Science and Technology Organization), в котором осуществляет научное руководство по средствам электронной борьбы (EW) и адаптивной обработке сигналов в отделении КВ-радиолокации. Д-р Фабрицио отвечает за разработку и практическую реализацию инновационных и надежных методов адаптивной обработки сигналов, работает над повышением эксплуатационных характеристик современных радиолокационных загоризонтных

систем. Он старший член Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE — Institute of Electrical and Electronic Engineer) и автор более 50 научных публикаций в журналах и трудах конференций. Д-р Фабрицио был дважды (в 2003 и 2004 гг.) года удостоен престижной премии М. Барри Карлтона (M. Barry Carlton) за лучшую статью года, опубликованную в журнале IEEE Transactions по аэрокосмическим и электронным системам (AES). В 2007 году он стал лауреатом почетной премии DSTO в знак признания его вклада в адаптивную обработку сигналов загоризонтной радиолокационной сети JORN (Jindalee Operational Radar Network). В том же году он получил грант научного оборонного общества DSTO на проведение совместных исследований в университете La Sapienza в Риме, Италия. Д-р Фабрицио вел учебные семинары по загоризонтной радиолокации на конференции IEEE по радиолокации, проходившей в Риме в 2008 году, и на Международной конференции IEEE по радиолокации 2010 года в Вашингтоне. Он представитель Австралии в Международной секции радиолокационных систем IEEE, а в настоящее время занимает пост вице-президента по образованию в Совете управляющих Общества аэрокосмических и электронных систем AESS (Aerospace and Electronic Systems Society). Д-р Фабрицио сотрудничает с международными оборонными ведомствами в рамках Меморандума о взаимопонимании и является национальным представителем в исследовательской группе НАТО по вопросам динамического разделения сигналов (DWD — Dynamic Waveform Diversity) (SET-179). Он также официально сотрудничает с промышленностью, в том числе с Raytheon, Lockheed Martin и BAE Systems, а также с многочисленными научными институтами как в Австралии, так и за рубежом. В 2011 году за вклад в развитие загоризонтной радиолокации и обработки радиолокационных сигналов д-р Фабрицио был удостоен премии IEEE в области радиолокации в честь Фреда Натансона. Он подготовил первое издание *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications* («Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение»), которое дополняет существующую литературу по радиолокации и может стать основой для дальнейших исследований в данной области.

Предисловие

В отличие от множества монографий, посвященных радиолокации в микроволновом диапазоне, до сих пор только одна работа была посвящена исключительно теме коротковолновой загоризонтной радиолокации. Это книга «*Основы загоризонтной радиолокации*», изданная под редакцией А. А. Колосова, изначально опубликованная на русском языке («Радио и связь», 1984), а затем переведенная на английский язык Бартоном (W. F. Barton, Artech House, Norwood, MA, 1987). До сих пор эта монография содержит множество ценной информации, но ее содержание не обновлялось со времени первого издания и поэтому не охватывает тот огромный прогресс, который достигнут в области загоризонтной радиолокации в течение двух последних десятилетий.

В главе, посвященной загоризонтной радиолокации, в авторитетном издании «*Справочника по радиолокации*»¹ под редакцией М. Скольника и в соавторстве с Дж. Хедриком и С. Андерсоном (3-е издание, McGraw-Hill, 2008) дан превосходный обзор основных понятий, но ограниченный объем главы неминуемо снизил глубину трактовки, что, возможно, наиболее заметно в области обработки сигналов, которая играет ключевую роль в повышении качественных показателей современных загоризонтных радиолокационных систем. Учитывая сильный всплеск интереса к системам загоризонтного радионаблюдения в международном радиолокационном сообществе, включая оборонную, коммерческую и научную сферы, вполне уместно и своевременно изложить информацию о значительных успехах в загоризонтной радиолокации, которые произошли за последние 20 лет, чему полностью посвящено настоящее издание.

Основная цель данной книги состоит в том, чтобы представить новейшие достижения в области загоризонтных радиолокационных систем (ЗГ РЛС). При этом основное внимание уделено подробному описанию методов и моделей обработки сигналов, которые в значительной степени способствовали внедрению самых современных технологий в ЗГ РЛС, но недостаточно подробно изложены в существующей литературе. Настоящее издание направлено на преодоление этого разрыва. Книга отличается цельностью изложения и включает описание основных принципов проектирования и эксплуатации ЗГ РЛС на более доступном уровне для читателей, не имеющих предварительных знаний в данной области. При этом сделана попытка объединить большое количество ранее разбросанных публикаций по теме ЗГ РЛС и адаптивной обработки сигналов на единой платформе, используя обширный список цитирования с тем, чтобы показать связи между многочисленными теоретическими и экспериментальными работами, опубликованными в этих областях.

Отличительная особенность данной книги заключается в удачном включении экспериментальных результатов, полученных при практической эксплуатации ЗГ РЛС, использующих ионосферное распространение и поверхностные волны, для иллюстрации практических применений методов обработки данных. Ожидается, что этот аспект книги будет представлять интерес для научных сотрудников и инженеров, желающих получить более детальное представление о данной технологии, а также для инженеров-практиков и исследователей, заинтересованных в разработке надежных алгоритмов обработки сигналов для реальных систем. Хотелось бы надеяться, что эта книга также вызовет энтузиазм у молодых ученых и инженеров при изучении проблем ЗГ РЛС и радиолокации в целом.

¹ В издательстве ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА» было выпущено новое издание книги «Справочник по радиолокации / Под ред. М. И. Скольника. Пер. с англ. под общей ред. В. С. Вербы. В 2 книгах. Москва: Техносфера, 2015. — 1352 с.

Благодарности

Возможность написать эту книгу и представить ее международному радарному сообществу — большая честь для автора, ведь это была совместная работа с исключительно талантливой командой ученых, инженеров и профессионалов в Научно-исследовательском институте Министерства обороны Австралии (DSTO). Особую признательность за поддержку данного проекта автор хотел бы выразить руководителю службы технической разведки и наблюдения ISRD (Intelligence, Surveillance and Reconnaissance Division) д-ру Тони Линдсею (Dr. Tony Lindsay). Также хочется искренне поблагодарить научного руководителя направления ЗГ РЛС д-ра Гордона Фрейзера (Dr. Gordon Frazer) и руководителя группы обработки и распространения сигналов д-ра МайкаТарли (Dr. Mike Turley) за их многолетнюю поддержку этой работы и ее автора.

С особой теплотой хотелось бы поблагодарить бывшего руководителя ISRD д-ра Малколма Голли (Dr. Malcolm Golley) за доверие, оказанное автору, когда он, будучи молодым инженером, решил получить докторскую степень в области адаптивной обработки в ЗГ РЛС. Поддержка этих исследований д-ром Голли и его вдохновляющее руководство способствовали профессиональному росту автора. Также нельзя не отметить проф. Дага Грея (Prof. Doug Gray), проф. Юрия Абрамовича (Prof. Yuri Abramovich) и проф. Стюарта Андерсона (Prof. Stuart Anderson), которые были наставниками автора все эти годы. Так, в основе большинства исследований, описанных во II части книги, лежат направления, впервые предложенные проф. Абрамовичем.

Работа над этой книгой велась при активной поддержке со стороны коллеги и друга автора — проф. Алонсо Фарина (Prof. Alfonso Farina). Продолжительное и успешное техническое сотрудничество с проф. Фарина стало большой удачей для автора. Автор также благодарен проф. Фарина за проведение совместных исследований по программе оборонной науки в Италии и организацию первого учебного семинара по загоризонтной радиолокации в рамках конференции IEEE по радиолокации, проходившей в Риме в 2008 году. Это стало исключительно благоприятной возможностью для формирования основной структуры книги. И, что самое важное, автор глубоко признателен проф. Фарина как своему учителю в профессии за его мудрое наставничество.

В написании книги очень помогло использование материалов, предоставленных множеством бывших и настоящих сотрудников ISRD. Автор благодарен нескольким коллегам по DSTO за экспертную проверку отдельных разделов; в частности, ценные рекомендации были получены от д-ра Тони Линдсея, д-ра Майка Тарли, д-ра Тревера Харриса (Dr. Trevor Harris), д-ра Мануэля Сервера (Dr. Manuel Cervera), Марка Тайлера (Mr. Mark Tyler), д-ра Дэвида Холдсворта (Dr. David Holdsworth), д-ра Джастина Прашифка (Dr. Justin Praschifka) и д-ра Линдона Дарбриджа (Dr. Lyndon Durbridge). Особо хочется отметить помощь Ника Спенсера (Mr. Nick Spencer) в правке корректуры некоторых разделов. Также автор признателен Бретту Норсею (Mr. Brett Northey), Дэвиду Незервею (Dr. David Netherway) и д-ру Эндрю Хейтману (Dr. Andrew Heitmann) за предоставление некоторых данных об окружающей среде. С особой теплотой хотелось бы поблагодарить Керри Бернс (Ms. Kerry Barnes) и Ли Хейс (Ms. Lee Hayes) за их ценную помощь в наборе текста и проверке некоторых ссылок.

Автор благодарен всем глубокоуважаемым внешним рецензентам за конструктивные комментарии. В частности, отзывы по отдельным главам и техническим направлениям любезно предоставили д-р Райан Риддолз (Dr. Ryan Riddolls) из научно-исследовательского подразделения Министерства обороны Канады (Defence Research and Development, Canada), проф. Ларри Марпл (Prof. Larry Marple, Georgia Tech Research Institute), д-р Дэвид Эмери (Dr. David Emery, BAE Systems), д-р Джефффри Сан Антонио (Dr. Geoffrey San Antonio, Naval Research Laboratory), д-р Фред Ирл (Dr. Fred Earl, National Systems), д-р Бен Джонсон (Dr. Ben Johnson, Lockheed Martin), д-р Джим Барнум (Dr. Jim Barnum, SRI International), д-р Дональд Беррик (Dr. Donald Barrick, Codar Ocean Sensors) и д-р Л. Дж. Никич (Dr. L. J. Nickisch, Northwest Research Associates).

Как автору, так и его книге много дало общение с коллегами из широких научных кругов, работающими в сфере радиолокации и обработки сигналов. В частности, автор высоко ценит дружбу и сотрудничество с проф. Алексом Гершманом (Prof. Alex Gershman), проф. Фульвио Гини (Prof. Fulvio Gini) и проф. Луи Шарфом (Prof. Louis Scharf), благодаря которым были разработаны методы обработки сигналов в РЛС, описанные в данной книге. Также хочу поблагодарить проф. Хью Гриффитса (Prof. Hugh Griffiths), д-ра Брахема Хаймда (Dr. Braham Himed), проф. Германа Ролинга (Prof. Hermann Rohling), д-ра Билла Мелвина (Dr. Bill Melvin), проф. Дона Синнота (Prof. Don Sinnott) и проф. Криса Бейкера (Prof. Chris Baker) за обмен ценными знаниями и опытом на международных конференциях и постоянную поддержку.

Автор искренне благодарен ответственному редактору издательства McGraw-Hill Professional Венди Ринальди (Ms. Wendy Rinaldi) и всей редакционной команде за отличную организацию работы над книгой. И, наконец, автор с любовью благодарит свою жену Лукрецию за ее стойкость, поддержку и терпение, особенно после переезда в Австралию с новорожденным сыном Леонардо. Без ее помощи и ободрения текст книги никогда не был бы готов в сроки, установленные планом подготовки к публикации.

Аббревиатуры

ABORT	Adaptive Beamformer Orthogonal Rejection Test, многогранговый вариант критерия ортогонального подавления помех в адаптивном формирователе диаграммы направленности
ACS	Auto-Correlation Sequence, автокорреляционная последовательность (АКП)
ACF	Auto-Correlation Function, автокорреляционная функция (АКФ)
ACE	Adaptive Coherence Estimator, адаптивное устройство оценки когерентности
ADC	Analog-to-Digital Converter, аналого-цифровой преобразователь (АЦП)
AEW	Airborne Early-Warning, бортовые радары дальнего радиолокационного обнаружения
AF	Ambiguity Function, функция неопределенности (ФН)
AGC	Automatic Gain Control, автоматическая регулировка усиления (APУ)
AGW	Acoustic Gravity Waves, акустико-гравитационные волны (АГВ)
AIS	Automated Identification System, система автоматизированной идентификации (САИ)
AMF	Adaptive Matched Filter, адаптивный согласованный фильтр
APES	Amplitude and Phase Estimation, оценка амплитуды и фазы
APEX	Aperture Extrapolation, экстраполяции апертуры
AR	Auto-Regressive, авторегрессионные модели (АР)
ARD	Azimuth-Range-Doppler, азимут — дальность — доплеровский сдвиг
ARMA	Auto-Regressive Moving-Average, авторегрессионная модель скользящего среднего (АРСС)
ARO	ARithmetically Oriented, арифметические операции
ART	Analytical Ray-Tracing, метод аналитической трассировки
ASD	Adaptive Subspace Detector, адаптивный детектор подпространства
ATC	Air traffic Control, управление воздушным трафиком
BANDEX	Bandwidth Extrapolation, экстраполяции полосы частот
BMD	Ballistic Missile Defence, противоракетная оборона (ППО)
BPL	Broadband over Power Lines, широкополосный доступ к сети Интернет по линиям электропередачи
BRD	Beam-Range-Doppler, луч дальности и доплеровских частот
BSI	Blind System Identification, «слепые» методы идентификации системы
BSS	Blind Signal Separation, «слепое» разделения сигнала
BSS	Backscatter Sounder, устройство приема обратно рассеянных сигналов
BTL	Basic Transmission Loss, потери мощности (излучения)/основные потери распространения
CA	Cell-Averaging, усреднение по элементам разрешения
CCIR	International Radio Consultative Committee, Международный консультативный комитет по радиосвязи (МККР)
CD	Coherently Distributed, когерентно распределенный (КР)
CFAR	Constant False-Alarm Rate, постоянный уровень ложных тревог
CH	Chain Home, РЛС Англии 1938 г., считается первым военным радаром
CIT	Coherent Integration Time, время когерентного накопления
CMD	Cross Modulation Distortion, интермодуляционное искажение
CME	Coronal Mass Ejections, корональные выбросы массы (КВМ)
CNR	Clutter-to-Noise Ratio, отношение мешающего, паразитного отражения к помехе
CODAR	Coastal Ocean Dynamics Application Radar, зондирование прибрежных океанских вод

COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex, кодированные сигналы с ортогональным частотным разделением каналов
CPI	Coherent Processing Interval, интервал когерентной обработки (ИКО)
CR	Coordinate Registration, регистрация координат (РК)
CSF	Channel Scattering Function, функция рассеяния канала (ФРК)
CSSIP	Centre for Sensor Signal and Information Processing, центр обработки информации и сигналов
CTB	Conventional Tapered Beamformer, формирователь диаграммы направленности
CUT	Cell Under Test, тестируемый элемент разрешения
CW	Continuous Wave, непрерывный сигнал
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency, Агентство передовых оборонных исследовательских проектов
DATEX	Data Extrapolation, экстраполяция данных
DAB	Digital Audio Broadcasts, цифровая аудиотрансляция
DDCs	Digital Down Converters, цифровые понижающие преобразователи (ЦПП)
DDRx	Direct Digital Receiver, приемник прямой цифровой обработки (ППЦО)
DFT	Discrete Fourier Transform, дискретное преобразование Фурье (ДПФ)
DIR	Dwell Illumination Region, область обзора, одновременно покрываемая лучом
DND	Department of National Defence, Министерство обороны Канады
DOA	Direction of Arrival, направление прихода сигнала
DOF	Degrees of Freedom, степени свободы
DOSE	Direction-of-Arrival by Signal Elimination, алгоритм определения направления прихода сигнала
DSTO	Defence Science and Technology Organization, Научно-исследовательский институт Министерства обороны Австралии
DVB-T	Digital Video Broadcasts Terrestrial, цифровая наземная видеотрансляция
DWD	Dynamic Waveform Diversity, динамическое разделение сигналов
DWI	Direct-Wave Interference, помехи прямой волны
ECA	Extensive Cancellation Algorithm, алгоритм обширного гашения луча
EEZ	Exclusive Economic Zone, эксклюзивная экономическая зона
EKF	Extended Kalman Filter, расширенный фильтр Калмана
ELF	Extremely Low Frequency, широкий спектр частот
EM	Electromagnetic, электромагнитное окружение
EMI	Electromagnetic Interference, электромагнитные помехи
EMC	Electromagnetic Compatibility, электромагнитная совместимость (ЭМС)
ESB	Earth Surface Backscatter, обратное рассеяние от земной поверхности
EUV	Extreme Ultra-Violet, коротковолновое ультрафиолетовое излучение (КУФ)
EW	Electronic Warfare, радиоэлектронная борьба (РЭБ)
FA	Fitting Accuracy, точность приближения
FDTD	Finite-Difference Time-Domain, конечно-разностный временной метод
FFT	Fast Fourier Transform, быстрое преобразование Фурье (БПФ)
FIR	Finite Impulse Response, конечная импульсная характеристика (КИХ)
FIR-MIMO	Finite Impulse Response Multiple-Input Multiple-Output, конечная импульсная характеристика с несколькими входами и выходами
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave, сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигнал)
FMS	Frequency Management System, система управления частотой
GAM	Generalized Array Manifolds, обобщенные многообразия массива
GEMS	Generalized Estimation of Multipath Signals, алгоритм обобщенной оценки многолучевых сигналов

GEP	Generalized Eigenvalue Problem, поиск собственных значений
GFB	Go Fast Boats, обнаружение и сопровождение маломерных быстроходных судов
GIP	General IzedInner Product, обобщенное скалярное произведение
GLRT	Generalized Likelihood-Ratio Test, обобщенное отношение правдоподобия
GNN	Global Nearest Neighbor, глобальный поиск ближайшего соседа
GMHT	Generalized Multi-Hypothesis Tests, обобщенные критерии одновременной проверки нескольких гипотез
GOCA	Greatest-Of-Cell-Averaging, усреднение по элементам и определение наибольшего значения
GRT	Gross Registered Tonnage, брутто-регистрированное водоизмещение
GSD	Generalized Subspace Detectors, обобщенные детекторы подпространства
GWM	Generalized Watterson Model, обобщенная модель Уоттерсона
HF	High-Frequency, кВ (коротковолновый) VHF/OKB
HFSW	High-Frequency Surface-Wave, ЗГ РЛС-ВЧ ПЭВ (загоризонтная станция поверхностной электромагнитной волны)
HOS	Higher Order Statistics, статистика более высокого порядка
HPA	High-Power Amplifier, усилители мощности
HPF	High-Pass Filter, фильтр высоких частот (ФВЧ)
I-MIMO	Instantaneous Multiple-Input Multiple-Output, мгновенная система с несколькими входами и несколькими выходами (мгновенный метод пространственного кодирования сигнала)
I/Q	In-phase and Quadrature, синфазный и квадратурный
ID	Incoherently Distributed, некогерентно распределенный (НКР)
IDC	Ionospheric Distortion Correction, коррекция ионосферных искажений
IGY	International Geophysical Year, международный геофизический год (МГГ)
IID	Independent and Identically Distributed, независимые и одинаково распределенные
IIR	Infinite-Impulse-Response, бесконечная импульсная характеристика (БИХ)
IMD	Intermodulation Distortion, интермодуляционное искажение
IMM	Interactive Multiple Model, интерактивная многорежимная модель
IMS	Integrated Maritime Surveillance, обзор морского пространства
INE	Impulsive Noise Excision, устранение импульсных шумов
INR	Interference to Noise Ratios, отношение помехи к шуму (ОПШ)
IQML	Quadratic Maximum Likelihood, итерационный метод квадратичного максимального правдоподобия
IRI	International Reference Ionosphere, международная стандартная модель ионосферы (IRI-модель)
ISRД	Intelligence, Surveillance and Reconnaissance Division, Служба технической разведки и наблюдения
ITU	International Telecommunications Union, Международный союз электросвязи (МСЭ)
JFAS	Jindalee Facility Alice Springs, загоризонтная радарная система (установка Jindalee в Элис-Спрингс)
JDS	Joint-Data Set, совместное множество данных
JORN	Jindalee Operational Radar Network, действующая сеть радаров Jindalee
JPDA	Joint Probabilistic Data Association, совместное сопоставление вероятностных данных
KRPs	Known Reference Points, известные опорные точки, ориентир или репер
LF	Low Frequency/VLF, Very Low Frequency, низкая частота / очень низкая частота, НЧ/ОНЧ

LFMCW	Linear Frequency-Modulated Continuous Waveform , непрерывный линейный частотно-модулированный сигнал (ЛЧМ-сигнал)
LCMV	Linearly Constrained Minimum Variance, критерий оптимизации с линейно ограниченной минимальной дисперсией
LMS	Least-Mean-Square, алгоритм наименьших квадратов
LNA	Low-Noise Amplifier, малошумящий усилитель (МШУ)
LO	Local Oscillator, гетеродин
LOS	Line-Of-Sight, прямая видимость
LPF	Low-Pass Filter, фильтр нижних частот (ФНЧ)
LPDA	Log Periodic Dipole Arrays, логопериодические дипольные антенные решетки (ЛПДА)
LRT	Likelihood-Ratio Test, критерий отношения правдоподобия
LSMI	Loaded Sample-Matrix Inverse, инверсии диагонально нагруженной матрицы выборок
LT	LocalTime, местное время (МВ)
MBC	Main-Beam Cancelation, подавление главного лепестка
MF	Medium Frequency, средние частоты сигналов
MF	Matched-field, согласованный фильтр
MFA	Model-Fitting Accuracy, относительная точность приближения
MHT	Multiple-Hypothesis Tracker, многоканальное сопровождение вероятных целей
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output, система со множеством входов и множеством выходов
ML	Maximum Likelihood, максимальное правдоподобие (МП)
MLE	Maximum-Likelihood Estimate, оценка максимального правдоподобия
MMSE	Minimum Mean Square Error, среднеквадратическая ошибка
MM-UPDAF	Multiple Model Unified Probabilistic Data Association Filter, объединение многоуровневой модели с вероятностным фильтром данных
MODE	Method of Direction Estimation, метод оценки направления
MOM	Method-of-Moments, метод моментов
MQP	Multi-segment Quasi-Parabolic, многосегментная квазипараболическая модель
MSC	Magnitude Squared Coherence, квадрат амплитуды (функции) когерентности
MTI	Moving Target Indicator, индикатор движущейся цели (доплеровский индикатор)
MUF	Maximum Useable Frequency, максимально применимая частота (МПЧ)
MUSIC	MUltiple SIgnal Classification, алгоритм разрешения группового сигнала
MVDR	Minimum Variance Distortionless Response, неискаженный отклик с минимальной дисперсией
NCM	Number of Complex Multiplications, число комплексных умножений
NEC	Numerical Electromagnetic Code, числовой электромагнитный код
NMF	Normalized Matched Filter, нормализованный согласованный фильтр
NHD	Non-Homogeneity Detection, обнаружение неоднородности
NRT	Numerical Ray-Tracing, метод лучевой трассировки
NVI	Near Vertical Incidence, область вблизи вертикального угла падения
OI	Oblique Incidence, наклонное зондирование (НЗ)
OIS	Oblique Incidence Sounder, зонд наклонного зондирования
OS	Ordered Statistics, порядковая (ранговая) статистика
PBR	Passive Bistatic Radar, пассивные бистатические РЛС
PCA	Polar Cap Absorption, поглощение полярной шапки (ППШ)

PCD	Partially Correlated Distributed, частично коррелированный распределенный (ЧКР)
PCL	Passive Coherent Location, пассивная когерентная локация
PDAF	Probabilistic Data Association Filter, вероятностное объединение выходных данных фильтра
PDF	Probability Density Function, функция плотности вероятности
PEC	Perfect Electric Conductor, идеально проводящий проводник
PFA	Probability of False Alarm, вероятность ложной тревоги
PMHT	Probabilistic Multiple Hypothesis Tracker, слежение с использованием многократных вероятностных гипотез
PRF	Pulse-Repetition Frequency, частота повторения импульсов (ЧПИ)
PRI	Pulse Repetition Interval, период повторения импульсов (ППИ)
PSF	Point Spread Function, функция рассеяния точки
PST	Power-Selected Training, мощность (эффективность) метода с обучающей выборкой
PW	Pulse-Waveform, импульсный
QCS	Quasi-Cubic Segment, модель с квазikuбической сегментацией
QP	Multi-Segment Quasi-Parabolic, многосегментный квазипараболический
QUMP	Quasi Uni-Modal Propagation, время квазиунимодального распространения
RAAF	Royal Australian Air Force, Королевские ВВС Австралии
RAF	Royal Air Force, Королевские воздушные силы
RAP	Range-only Adaptive Processing, адаптивная обработка по дальности
RD-SAP	Range-Dependent Spatial Adaptive Processing, алгоритм, зависящий от дальности пространственной адаптивной обработки
RCS	Radar cross section, отражающая площадь цели (ЭПР)
RCD	Radar Calibration Device, устройство калибровки радиолокационной станции
RCSL	Raytheon Canada System Limited, канадское подразделение компании Raytheon
RF	Radio Frequency, радиочастота
RFI	Radio Frequency Interference, радиопомехи
RIB	Rigid Inflatable Boats, надувные резиновые лодки с жестким набором корпуса
RMS	Root-Mean-Square, среднеквадратичное значение (отклонение) (СКО)
RMP	Recognized Maritime Picture, оперативная картина надводной обстановки
ROC	Receiver Operating Characteristic, рабочая характеристика приемника или ROC-кривая
RRD	Receiver-Range-Doppler, дальность — доплеровская частота
RRT	Receiver-Range-Time, приемник — дальность — время
RTIM	Real-Time Ionospheric Model, ионосферная модель реального времени (ИМРВ)
SAP	Spatial-only Adaptive Processing, пространственно-адаптивная обработка
SIMO	Narrowband Single-Input Multiple-Output, один вход и множество выходов
SC	Stochastic Constraints, метод стохастического ограничения
SCR	Signal-to-Clutter Ratio, отношение сигнал/помеха (ОСП)
SCV	Sub-Clutter Visibility, видимость на фоне помех
SDC	Spread-Doppler Clutter, мешающее отражение с расширенным доплеровским спектром
SDR	Signal-to-Disturbance Ratio, отношение сигнал/помеха
SDS	Single-Data Set, единичное множество данных

SFDR	Spurious-Free Dynamic Range, динамический диапазон без паразитных составляющих (ДДБПС)
SFN	Single-Frequency Networks, мультистатические одночастотные сети
SID	Sudden Ionospheric Disturbance, внезапные ионосферные возмущения (ВИВ)
SINR	Signal-to-Interference plus Noise Ratio, сигнал/помеха-плюс-шум (ОСШП)
SIRP	Spherically Invariant Random Process, сферически инвариантный случайный процесс
SLL	Sidelobe Level, уровень боковых лепестков
SMI	Sample Matrix Inverse, обратная (инверсионная) матрица выборки
SMI	Sample Matrix Inverse, выборочная обратная матрица
SCM	Sample Covariance Matrix, выборочная ковариантная матрица
SNR	Signal-to-Noise Ratio, отношение сигнал/шум (ОСШ)
SOI	Signal of Interest, нужный сигнал (полезный сигнал)
SOCA	Smallest-Of-Cell-Averaging, усреднение по элементам и определение наименьшего значения
SOS	Second-Order Statistics, статистика второго порядка
SRI	Standford Research Institute, Стэнфордский исследовательский институт
SSN	Sunspot Number, число солнечных пятен (число Вольфа)
SSL	Single-Site Location, локализация расположения одиночных источников
STAP	Space-Time Adaptive Processing, пространственно-временная обработка сигналов
Super DARN	Super Dual Auroral Radar Network, международная сеть РЛС по исследованию авроральных областей
SVD	Singular Value Decomposition, сингулярные числа матрицы
SWF	Shortwave Fadeout, коротковолновое затухание
SWNR	Signal-to-White Noise Ratio, отношение сигнала к белому шуму
TBP	Time-Bandwidth Product, длительность импульса на ширину полосы
TEC	Total Electron Content, измерение общего содержания электронов
TEP	Transequatorial Propagation, трансэкваториальное распространение (ТЭР)
TDS	Two-Data Set, двойное множество данных
TDOA	Time-Difference of Arrival, разность времени прихода
TID	Traveling Ionospheric Disturbance, перемещающееся ионосферное возмущение (ПИВ)
TkBD	Track-Before-Detect, схема отслеживания до детектирования
TMF	Tapered Matched Filter, сходящийся согласованный фильтр
TSJ	Terrain-Scattered Jamming, отраженные от рельефа местности сигналы джамминга, или «горячие помехи»
TDOA	Time-Difference of Arrival, разность времени прихода
TV-SAP	Time-Varying Spatial Adaptive Processing, изменяющаяся во времени пространственная адаптивная обработка
TWERP	Twin-Whip Endfire Receive Pair, двухштыревая продольно-направленная антенна (ДШПНА)
UKF	Unscented Kalman Filter, «неследящий» фильтр Калмана
ULA	Uniform Linear Array, линейная антенная решетка (ЛАР)
UMP	Uniformly Most Powerful Test, равномерный наиболее мощный критерий
UMPI	Uniformly Most Powerful Invariant, равномерно мощный инвариантный критерий
UNCLOS	United Nations Convention on the Law of the Sea, конвенция ООН по морскому праву
UT	Universal Time, всемирное время
VI	Vertical Incidence, вертикальное зондирование (ВЗ)

VIS	Vertical Incidence Sounder, ионозонд ВЗ
VRT	Virtual Ray-Tracing, трассировка виртуальных лучей (ТВЛ)
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН)
WARF	Wide Aperture Research Facility, широкоапертурная научно-исследовательская установка
WFA	WaveFront Analysis, метод анализа волнового фронта
WFG	Waveform Generator, генератор сигналов (ГС)
WFT	Wavefront Testing Procedures, тестирование волнового фронта
WRF	Waveform Repetition Frequency, частота повторения сигналов (ЧПС)
WRI	Waveform repetition interval, интервал повторения сигнала
WCF	Weighted Subspace Fitting, взвешенный подпространственный подбор
WSS	Wide-sense Stationary, стационарный процесс в широком смысле
ГФУ	Геофизические условия
ДН	Диаграмма направленности
ДЧХ	Дистанционно-частотная характеристика
ЗС	Зондирующий сигнал
КС	Кругосветный сигнал
КУ	Коэффициент усиления
МП	Максимальное правдоподобие
ОРЧ	Оптимальная рабочая частота
ТТХ	Тактико-технические характеристики
ФХ	Фазовая характеристика
ЧХ	Частотная характеристика

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

Загоризонтные ионосферные РЛС¹ (ОТН — Over-The-Horizon radar, загоризонтная РЛС или радар) работают в диапазоне высоких частот (ВЧ², HF — High-Frequency) 3–30 МГц и используют для обнаружения и сопровождения воздушных и надводных целей отраженные от ионосферы сигналы, что позволяет, по сравнению с обычными радарными прямой видимости, *на порядок* увеличить расстояния до целей. Более половины века международных исследований и разработок в этой области привели к созданию зрелого поколения загоризонтных радиолокационных систем, обеспечивающих экономически эффективное раннее обнаружение целей в широкой области. В частности, способность ионосферной ЗГ РЛС (ОТН-радар) устойчиво контролировать удаленные географические регионы, в которых не представляется возможным или удобным использование микроволновых РЛС, представляет собой важное преимущество таких систем.

Высокие качественные показатели действующих самых современных загоризонтных радарных систем достигнуты в высшей степени благодаря теоретическим и экспериментальным исследованиям в области моделирования распространения волн в ионосфере, усовершенствованной аппаратной части системы, «умным» управляющим ресурсам и цифровой обработке сигналов. Знания, полученные и обобщенные в рамках совместных программ международного сотрудничества, сыграли ключевую роль в успешном развертывании загоризонтных радиолокационных систем по всему миру.

Загоризонтные РЛС впервые появились между 1950 и 1970 годами и почти во всех отношениях претерпели значительные изменения, но особенно примечателен прогресс последних четырех десятилетий, достигнутый главным образом из-за поразительных достижений в ключевых технологиях, которые позволили существенно повысить общие возможности радиолокационных загоризонтных радарных систем. Например, наличие высококлассных цифровых приемников в сочетании со стремительным повышением быстродействия компьютеров позволило использовать современные методы адаптивной обработки сигналов для повышения чувствительности загоризонтных РЛС в сложных условиях атмосферных помех. Кроме того, в результате применения современных принципов и методов улучшены показатели, повышающие эксплуатационные характеристики загоризонтных радаров, особенно в качестве средства наблюдения в военных приложениях.

Основная причина давнего интереса к методам загоризонтной радиолокации заключается в том, что характеристики таких систем не только уникальны, но и дополняют многие другие средства наблюдения, работающие в настоящее время на морских, воздушных и космических платформах. Преимущества ЗГ РЛС в отношении альтернативных систем видеонаблюдения общепризнанны, а это важно и для обороны, и в гражданских приложениях, особенно с точки зрения тех преимуществ, которые обеспечивают загоризонтные РЛС в качестве элементов интегрированных многоуровневых систем датчиков наблюдения.

В настоящей главе для предварительного знакомства приведены самые общие, элементарные принципы загоризонтных РЛС — ОТН-радаров. Основная цель данной главы заключается в создании «скелета» монографии, который объединил бы наиболее важные черты ЗГ РЛС и служил бы введением к более подробному изложению в последующих

¹ Далее по тексту используются обозначения ЗГ РЛС и КВ РЛС. — *Прим. пер.*

² Общепринятое сокращение названия данного диапазона — КВ («коротковолновый»). — *Прим. пер.*

главах. А именно первый раздел настоящей главы начинается с краткого описания предпосылок и условий, которые более чем полвека тому назад привели к созданию загоризонтных РЛС. В данном разделе рассматриваются два разных типа ЗГ РЛС. Первый — ЗГ РЛС на ионосферных волнах, и второй — на земных радиоволнах¹. Хотя термин «загоризонтная РЛС» (ЗГ РЛС) или ОТН-радар на протяжении большей части этой книги относится к ионосферным системам, реализации РЛС на земной волне, которые используют распространения на пространственных и поверхностных волнах, также рассматриваются в отдельной (независимой) главе.

Во втором разделе данной главы дается общее представление о работе загоризонтных РЛС и об основных проблемах, создаваемых окружающей средой работе РЛС. Кроме того, в разделе рассматриваются общие характеристики загоризонтных радиолокационных систем и ряд их практических применений (не ограничивающихся наблюдением), которые иллюстрируют различные применения загоризонтных радиолокационных систем в военных и гражданских целях.

В третьем разделе этой главы обсуждаются номинальные возможности и ограничения ЗГ РЛС и их отличия от типичных микроволновых радаров, которые были выбраны для сравнения в качестве образца. В частности, чтобы подчеркнуть различия, а часто и дополняющие свойства этих двух видов радиолокационных систем, используется основное уравнение радиолокации. Такой подход развивается далее не только потому, что подавляющее большинство радаров работают на сверхвысоких частотах, но и потому, что понятие «радар» служит синонимом этой полосы частот и представляет собой наиболее широко известный класс систем. Кроме того, это сделано для того, чтобы пояснить, что и загоризонтные, и обычные обзорные радиолокаторы, несмотря на их существенное разнообразие в архитектуре, эксплуатационных характеристиках и номинальных возможностях, имеют много общих функций. Четвертый, последний раздел данной главы подводит итоги обзора номинальных характеристик, которые можно встретить в технических описаниях загоризонтных радиолокационных систем, такие как характерное покрытие, разрешающая способность и точность.

Основную часть книги после введения можно разделить на три части. Основные темы, рассматриваемые в каждой части, подытожены по главам так, чтобы кратко дать общее представление о структуре книги. По существу I часть на базовом уровне представляет широкий спектр принципов и методов построения загоризонтных радаров. II часть на основе анализа экспериментальных данных действующих радиолокационных загоризонтных систем в основном посвящена моделированию КВ-сигналов, а уже III часть посвящена применению современных методов обработки реальных данных или данных, полученных при моделировании радиолокационных систем. Хотя эта организация изложения выглядит вполне естественно в том смысле, что более поздние части изложения основываются на разделах, изложенных ранее, но отдельные главы относительно независимы и могут рассматриваться в порядке предпочтения. В конце основной части монографии следуют приложения и библиография.

- **Часть I: основные принципы** (2–5 главы). Эта часть расширяет общие представления, изложенные в данной главе с тем, чтобы обеспечить более широкий охват основных принципов и методов радиолокации, реализованных в загоризонтных РЛС для заинтересованных читателей, специалистов, недостаточно знакомых или вообще незнакомых с этой областью. Кроме этого, на элементарном уровне подробно анализируется широкий круг вопросов. Во второй главе представлены базовые понятия ионосферы и описаны ее свойства с точки зрения среды распространения КВ-радиоволн. Практические вопросы разработки загоризонтных радиолокационных систем и ключевые характеристики основных подсистем рассматриваются в главе 3. В 4 главе обсуждаются различные типы сигналов, принимаемые радиолокационными системами в ВЧ-радиодиапазоне, электромагнитной среде, и поясняются общепринятые этапы обработки сигналов и данных, которые используются

¹ РЛС на земных радиоволнах называют также РЛС на поверхностных волнах.

для обнаружения цели, локализации и сопровождения. Пятая глава посвящена исключительно теме РЛС на поверхностных КВ-волнах и рассматривает ряд вопросов, имеющих прямое отношение к конкретной реализации радаров такого типа.

В изложении всех глав помещены краткие сведения об истории развития загоризонтных радиолокационных систем в разных странах, по всему миру начиная с ранних работ по распространению радиоволн через ионосферу до реализации современных ионосферных загоризонтных РЛС и радиолокационных систем на поверхностных волнах. Это далеко не полное повествование проливает свет на некоторые стороны развития загоризонтных РЛС и позволяет сравнивать между собой различные системы с точки зрения современных программ их реализации, что придает дополнительную убедительность при изложении технических вопросов.

- **Часть II: описание сигналов.** Главы 6–9 посвящены описанию и математическому моделированию узкополосных коротковолновых сигналов в пространственно-временных координатах, которые принимаются ЗГ РЛС после ионосферного распространения. Шестая глава, в частности, исследует возможность детерминированного описания реальных КВ-сигналов, которые принимаются типичными ЗГ РЛС, на интервалах когерентной обработки порядка нескольких секунд. Для более длительных интервалов времени, порядка нескольких минут, в главе 7 исследуется возможность представления КВ-каналов стационарными случайными процессами с пространственно-временными статистиками второго порядка. Такой подход закладывает основание для представления различных типов сигналов, включая мешающие отражения, интерференцию и отраженные от цели эхо-сигналы. В главе 8 представлены различные процедуры оценки параметров модели при обработке реальных данных в реальном масштабе времени. В 9 главе представлено экспериментальное обоснование метода оценивания многомерных моделей сигналов и методов оценки параметров при прогнозировании параметров адаптивного формирования диаграммы направленности в конкретной практике подавления помех.

Поскольку понимание свойств КВ-сигналов играет решающую роль в разработке эффективных методов обработки сигналов ЗГ РЛС, эта часть книги закладывает основу для теоретических выкладок и практических приложений современных методов обработки, представленных в третьей части. Несмотря на то что физические идеи сравнительно часто используются при моделировании сигналов, следует особо подчеркнуть, что основное предназначение таких моделей заключается в демонстрации свойств цифровых выборочных данных сигналов, принимаемых ЗГ РЛС, с точки зрения их пригодности для последующей обработки сигналов.

- **Часть III: методы обработки.** В главах 10–13 при создании помехоустойчивых алгоритмов адаптивной обработки сигналов, пригодных для использования ЗГ РЛС, используются модели сигналов, разработанные во II части. В частности, в 10 главе рассматривается использование адаптивного алгоритма формирования диаграммы направленности и сглаживания помех на интервале когерентной обработки в условиях изменяющейся во времени пространственной структуры помех. В этой главе описываются также различные факторы, которые могут потенциально ограничить адаптивное формирование параметров диаграммы направленности в реальных системах и некоторые часто используемые на практике подходы, которые способствуют улучшению показателей формирования диаграммы направленности. В главе 11 обосновывается использование в загоризонтных радарх методов адаптивной пространственно-временной обработки сигналов (STAP — Space-Time Adaptive Processing) и описываются алгоритмы снижения негативного влияния многолучевой интерференции, возникающей при распространении радиоволн в ионосфере. В главе 12 ставится задача обнаружения целей с использованием процедуры испытаний двух гипотез непосредственно по принимаемым данным и выводятся адаптивные алгоритмы, основанные на методе испытаний с использованием (или на базе) обобщенного отношения правдоподобия (GLRT — Generalized Likelihood

Ratio Test). Описываются различные схемы обнаружения, основанные на заданном постоянном уровне ложных тревог (CFAR — Constant False-Alarm Rate) для разных моделей измерений, которые учитывают неопределенность полезного сигнала и статистическую неоднородность возмущений (мешающих отражений и/или помехи-плюс-шумы).

В заключительной главе обсуждается гораздо менее исхоженная область исследований, поскольку радиолокационное поле традиционно вызывает постоянный интерес. В частности, глава 13 посвящена проблеме разделения сигналов источника и многолучевого распространения методами слепой обработки сигналов (обычно применяемыми в области связи) без данных о сигнале. Исследуется также пригодность таких методов для пассивной когерентной локации (PCL — Passive Coherent Location), а также в других приложениях загоризонтных радиолокационных КВ-систем. Ключевой момент 13 главы и других глав этой части книги заключается в демонстрации тех преимуществ в показателях, которые могут быть получены при использовании адаптивных методов радиолокации вместо традиционной обработки за счет сравнения результатов, полученных на основе реальных и смоделированных данных.

1.1. Предпосылки и мотивация

Система РЛС дальнего обнаружения — Chain Home (CH), установленная на восточном побережье Великобритании примерно в 1938 году, широко известна и рассматривается как пример первой радиолокационной системы военного назначения, убедительно продемонстрировавшей свои возможности в ПВО во время войны. Радары CH работали в диапазоне 20–30 МГц, поскольку доступные высокочастотные технологии того времени только в этом диапазоне обеспечивали создание мощности, достаточной для реализации предлагаемого метода радиолокации. В отличие от современных ионосферных загоризонтных РЛС, система CH была разработана для обнаружения целей в зоне прямой видимости радара, а не за горизонтом. На самом деле отражения от ионосферы, возвратившиеся с очень больших расстояний, рассматривались операторами РЛС CH как «помехи». Отсылаем к изданию [Neal, 1985] читателя, интересующегося более полным описанием действующей в то время радиолокационной системы CH, которая оказала решающее влияние на исход битвы за Британию. Позднее, во время Второй мировой войны, радары, использующие частоты УКВ- и СВЧ-диапазона, успешно использовались для радионаблюдения в условиях прямой видимости.

1.1.1. РЛС прямой видимости

Выбор диапазона частот оказывает решающее влияние на физические характеристики и номинальные возможности радиолокационных систем. Рабочие полосы частот РЛС простираются от ВЧ- до СВЧ-диапазонов. Классификация радиодиапазонов проводится в соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи (МСЭ, ITU — International Telecommunications Union) в буквенных обозначениях, приведенных в табл. 1.1. Подавляющее большинство обзорных радиолокационных систем во всем мире работают в УВЧ или еще более высоких частотах, так как технические характеристики и стоимостные показатели на этих частотах представляются наиболее конкурентоспособными в радиолокационных системах прямой видимости.

Например, бортовые радары дальнего радиолокационного обнаружения (AEW — Airborne Early-Warning) работают в полосе ультравысоких частот (УВЧ) или полосе L. Многофункциональные РЛС, используемые для наблюдения и управления огнем орудий на морских платформах, обычно работают в полосах S и C, в то время как X-группа и еще

Таблица 1.1. Буквенные обозначения диапазонов от КВ до СКВ, рекомендуемые МСЭ, и некоторые примеры применений радаров гражданского и оборонного назначения. Загоризонтные РЛС работают в диапазоне КВ 3–30 МГц, а большинство обычных (прямой видимости) радиолокаторов работают в дециметровом УКВ-диапазоне и на более высоких частотах микроволнового СВЧ-спектра. Необходимо отметить, что существуют радиолокационные системы, которые используют более низкие и более высокие диапазоны частот, чем те, которые перечислены в данной таблице

Обозначение диапазона*	Диапазон частот	Длины волн	Примеры применения РЛС
HF/КВ (High-Frequency, высокие частоты)	3–30 МГц	10–100 м	Загоризонтные наблюдения, океанские датчики дистанционного извещения (ионосферные РЛС и РЛС на поверхностных, наземных волнах)
VHF/ОКВ (Very High Frequency, очень высокие частоты)	30–300 МГц	1–10 м	Сверхдальний диапазон воздушного обзора, малоглубинное радиолокационное зондирование — георадары, профилирование ветра
UHF/УКВ (Ultra-High Frequencies, ультравысокие частоты)	300–1000 МГц	0,3–1 м	Сверхдальний диапазон воздушного обзора / воздушные бортовые радары дальнего обнаружения (AEW) (например BMD — Ballistic Missile Defence, противоракетная оборона (ПРО))
L	1–2 ГГц	15–30 см	Сверхдальний диапазон воздушного обзора / бортовые радары дальнего обнаружения (AEW) (максимальная дальность обнаружения ~500 км)
S	2–4 ГГц	7,5–15 см	Многофункциональный радиолокатор, радар управления трафиком аэропорта terminal, морской радар
C	4–8 ГГц	3,75–7,5 см	Управление огнем орудий малой и средней дальности, метеорологические радары
X	8–12 ГГц	2,5–3,75 см	Бортовые радары перехвата и наведения, противоракетные радары и радары наведения ракет
Ku	12–18 ГГц	1,67–2,5 см	Радары наведения ближнего действия, морские навигационные радары (гражданские и военные)
K	18–27 ГГц	1,11–1,67 см	Ограниченное использование (из-за сильного поглощения в атмосферных газах и парах H ₂ O)
Ka	27–40 ГГц	0,75–1,11 см	Наведение в зоне малого радиуса действия, радары обнаружения движения в зоне аэропорта

* — обозначения диапазонов: международное/национальное.

более высокие частоты могут быть использованы для противоракетной обороны и ближнего наведения ракет. Вообще использование более высоких частот обеспечивает более высокое разрешение и точность, при этом при меньших габаритах аппаратуры. С другой стороны, РЛС, работающие на более низких частотах, обеспечивают компромисс с упомянутыми достоинствами за счет преимуществ в дальности обнаружения и меньшей чувствительности к помехам, создаваемым погодными условиями и влиянием эффекта затенения.

Резонно спросить, почему в конечном итоге обычные обзорные радиолокационные системы, предназначенные для работы в пределах прямой видимости, были преимущественно реализованы в диапазоне УКВ и на более высоких частотах, а не в диапазоне КВ, несмотря на то что подходящие технологии уже стали доступны. На рис. 1.1 иллюстрируются некоторые из несомненных доводов в пользу работы на более высоких частотах при следующих основных технических достоинствах: (1) системы предназначены для работы в малой ширине полосы частот, в которой есть большее количество полос пропускания, обеспечивающих точное разрешение целей, (2) возможность создания узких (с высоким коэффициентом усиления) диаграмм направленности лучей с использованием антенн с относительно небольшими апертурами позволяет легче удовлетворять условиям размещения их на ограниченной площадке, (3) эффективная отражающая поверхность от цели, которая лежит в оптической области, в отличие от случая резонансного рассеяния Рэлея, (4) существенно более низкий уровень шума окружающей среды, который, как правило, ниже минимального порогового уровня собственного (теплого) шума приемника, (5) относительно стабильные и предсказуемые для более точной локализации и сопровождения цели радиотракты (радиоканалы) распространения (линия прямой видимости) по сравнению с ионосферными трактами, (6) наличие в определенных практических приложениях возможностей снижения в рабочих диапазонах уровня мешающих отражений от поверхностей с использованием механизма верхнего обзора. Всесторонний обзор радиолокационных систем наблюдения прямой видимости (наземного и воздушного базирования) можно найти во многих превосходных книгах, и в том числе среди многих других авторитетных авторов: [Сколник, 2015] и [Nathanson, Reilly, Cohen, 1999].

1.1.2. Ограничения по зоне обнаружения

Несмотря на целый ряд достоинств, приведенных на рис. 1.1, принципиальный недостаток обычных радиолокационных систем, работающих в диапазоне сверхвысоких частот, состоит в том, что зона обнаружения номинально ограничена расстояниями прямой видимости (LOS — Line-Of-Sight) между радаром и целью. На практике кривизна Земли ограничивает дальность зоны обнаружения микроволнового радара по поверхности Земли, которая часто не превышает дальности геометрического горизонта. В некоторых случаях покрытие может быть ограничено более короткими расстояниями, когда топографические особенности, например горы, затеняют цели радиолокационного обзора. Характеристики

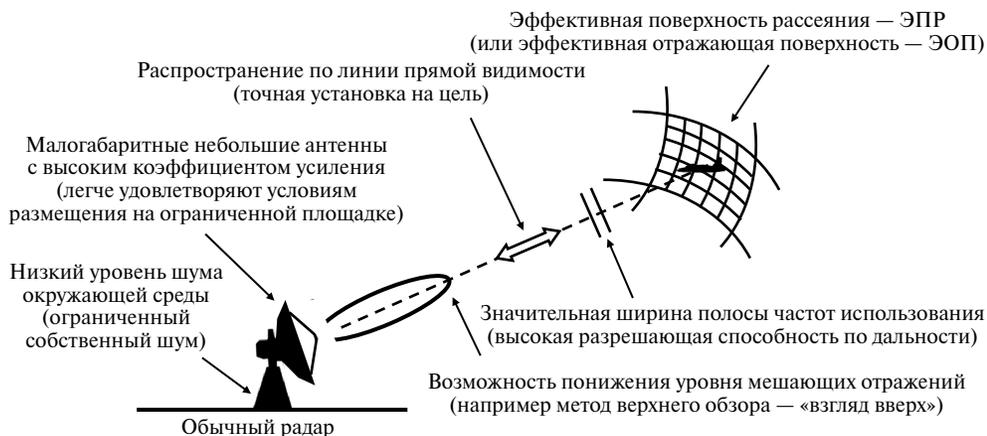


Рис. 1.1. Обзор основных технических причин, стимулирующих реализацию обзорных радиолокаторов прямой видимости в дециметровом (УКВ) и сантиметровом (СВЧ) диапазонах, а не в диапазоне коротких волн (КВ), несмотря на то что необходимые технологии уже стали доступны. © Commonwealth of Australia 2011

некоторых РЛС микроволнового диапазона подвержены также влиянию метеорологических явлений, таких как, например, град или дождь, которые могут ухудшать видимость целей из-за мешающих отражений и увеличения затухания сигнала.

Указанные концептуальные ограничения обычных радаров прямой видимости проиллюстрированы на рис. 1.2. А именно верхняя часть рисунка иллюстрирует затенение и затухание сигналов, которые могут возникать на относительно коротких расстояниях. С другой стороны, средняя и нижняя части рисунка показывают затемнение тракта прямой видимости РЛС судов на поверхности моря и воздушных целей, обусловленное кривизной Земли. Рассмотрены варианты установки антенн на наземных и бортовых радиолокационных платформах.

При нормальных атмосферных условиях из-за рефракции в тропосфере сигналы микроволновых радаров, как правило, немного отклоняются в сторону Земли. Этот механизм практически расширяет радиогоризонт за пределы геометрического горизонта. Для наземного радара, работающего на сверхвысоких частотах, увеличенное расстояние радиогоризонта, обусловленное такой тропосферной рефракцией, часто рассчитывается с учетом гипотетического эффективного радиуса Земли, который составляет примерно четыре трети его истинного значения¹. Номинальное значение радиогоризонта может быть рассчитано с учетом поправочного коэффициента на радиус Земли при вычислении геометрического горизонта по простым правилам тригонометрии.

При необычных или аномальных атмосферных условиях сверхрефракция сигналов микроволнового диапазона может время от времени расширять зону обнаружения обычного радара значительно выше номинального значения радиогоризонта. Это позволит обнаруживать надводные цели и низколетающие самолеты на расстояниях, значительно больших, чем при нормальных (а в глобальном масштабе при усредненных) атмосферных условиях. Однако это явление распространения волн, известное также как «волноводный эффект», слабо предсказуемо, никаким образом не контролируется и поэтому на практике не может браться в расчет для расширения зоны обнаружения обычной микроволновой РЛС свыше ее номинального значения. На практике другой тип аномального распространения волн может уменьшить зону эффективного обнаружения относительно ее номинального значения, ожидаемого при нормальных атмосферных условиях. Это явление, известное как субрефракция (пониженная или отрицательная рефракция), проявляется в отклонении сигнала от поверхности Земли.

Как следует из средней части рис. 1.2, номинальное значение радиуса зоны обнаружения обычной РЛС прямой видимости ограничивается кривизной (выпуклостью) Земли. Количественно дальность обнаружения может быть оценена по расстоянию по поверхности Земли — d_m . Предполагается, что антенна на платформе РЛС поднята на высоту h_r над гладкой сферической поверхностью Земли с эффективным радиусом r_e , который учитывает рефракцию при нормальных атмосферных условиях. Расстояние вдоль поверхности Земли от точки вертикально под радаром до геометрического горизонта определяется как длина дуги по формуле $d = r_e \arccos\{r_e/(r_e + h_r)\}$. Для целей на высоте h_t линия прямой видимости доходит до точки на максимальном расстоянии по поверхности Земли d_m , определяемой по формуле (1.1). В этом первом диапазоне трассы по дуге большого круга радар и цель соединены между собой прямой линией, которая проходит по касательной к поверхности Земли. Любое дальнейшее увеличение расстояния приводит к потерям в обнаружении из-за кривизны Земли.

$$d_m = r_e [\arccos\{r_e/(r_e + h_r)\} + \arccos\{r_e/(r_e + h_t)\}] \quad (1.1)$$

¹ Модель эффективного радиуса Земли с поправочным коэффициентом $k = 4/3$ подходит для РЛС, поднятых над уровнем Земли не выше примерно 1 км (при этом предполагается линейное изменение коэффициента преломления с высотой) и для радиочастот выше КВ-диапазона. Поправочный коэффициент при размещении РЛС свыше 1 км и/или для радиочастот ниже VHF/ОКВ-диапазона стремится к единице.

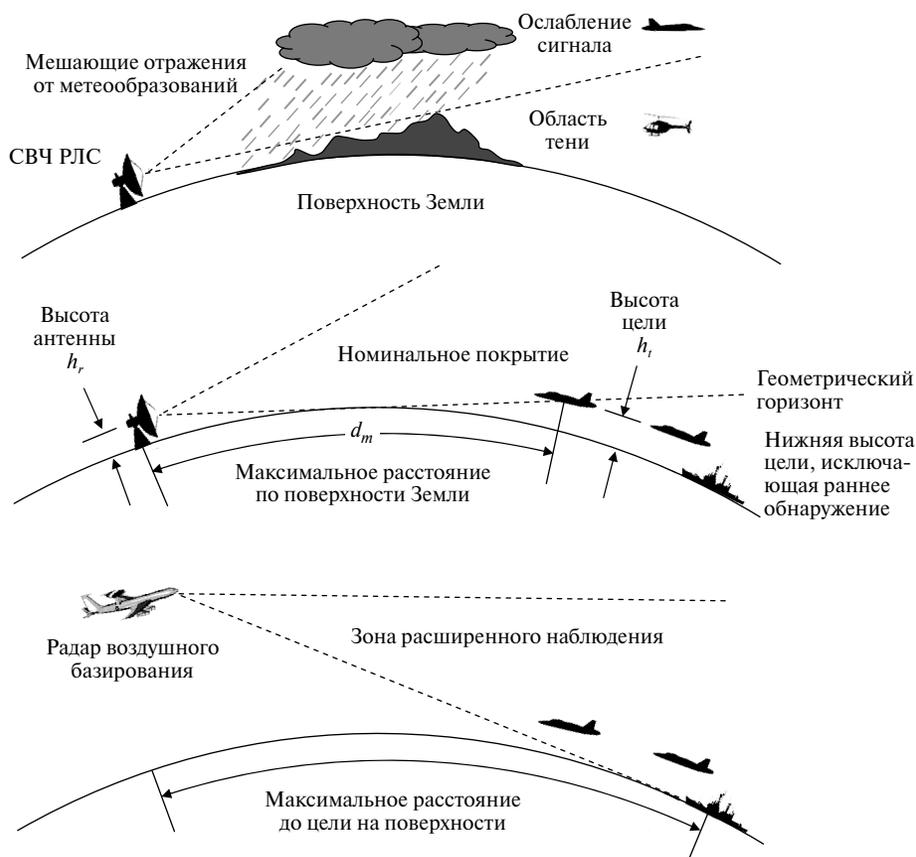


Рис. 1.2. Средняя и нижняя части рисунка схематически иллюстрируют номинальные траектории прямой видимости надводных и воздушных целей над гладкой земной сферой. Эти расстояния прямой видимости в пересчете на максимальные расстояния по Земле из-за кривизны Земли ограничивают зону обнаружения обзорных радаров наземного и воздушного базирования. На практике зона обнаружения обычными радиолокационными системами из-за неблагоприятных метеорологических условий, при которых возникают мешающие отражения и увеличивается затухание сигнала, а также затенений, обусловленных топографическими особенностями местности, например горами (верхняя часть рисунка), может быть гораздо меньше. © Commonwealth of Australia 2011

Как показано в средней части рис. 1.2, известное ограничение систем прямой видимости заключается в том, что эффективное обнаружение маловысотной цели обычным микроволновым радаром возможно на небольшой дальности от радара. Так как высоты h_r и h_t (за некоторыми исключениями) намного меньше, чем r_e , расстояние по длине дуги рассчитывается с помощью теоремы Пифагора в виде $d_m \approx \sqrt{2h_r r_e + h_r^2} + \sqrt{2h_t r_e + h_t^2}$. Поскольку $r_e \gg \max(h_r, h_t)$, то это выражение можно, в свою очередь, аппроксимировать известной формулой максимальной дальности обнаружения радаром прямой видимости (см. уравнение (1.2)). Эта формула подходит для большинства практических расчетов дальности обзорных радиолокаторов, за исключением только радиолокационных систем космического базирования.

$$d_m \approx \sqrt{2h_r r_e} + \sqrt{2h_t r_e} \quad (1.2)$$

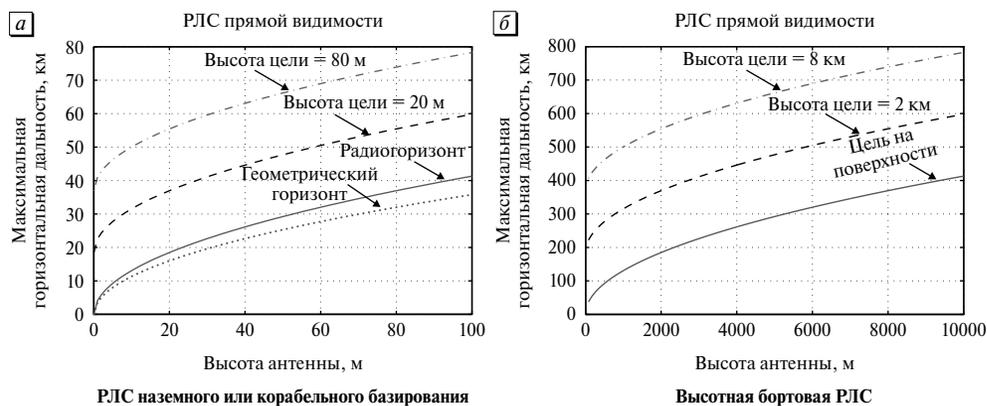


Рис. 1.3. Номинальная горизонтальная дальность зоны обзора РЛС прямой видимости в зависимости от высоты антенны и высоты цели и с ограничением дальности, обусловленной кривизной Земли

На рис. 1.3а представлены графики максимальной горизонтальной дальности d_m РЛС прямой видимости наземного или морского базирования, вычисленные в зависимости от высоты антенны и положения целей на малых высотах. Кривая, обозначенная как «геометрический горизонт», вычислена для радиуса Земли идеальной формы, принятого равным $r = 6380$ км, а кривая с надписью «радиогоризонт» вычислена в предположении эффективного радиуса Земли, равного $r_e = k_r$, где $k = 4/3$. Остальные две кривые вычислены для целей на высотах 20 и 80 м над поверхностью Земли. Для высот антенн радара ниже $h_r = 50$ м расстояние для целей на поверхности ($h_t = 0$) по земле — более $d_m = 30$ км, выходит за границы зоны обнаружения обычного радара прямой видимости. Поэтому микроволновые радары наземного или корабельного базирования имеют низкую эффективность обнаружения целей на поверхности и самолетов на малой высоте, использующих кривизну Земли в качестве «щита», избегая тем самым «освещения» радиолокационным сигналом.

На рис. 1.3б представлены графики максимальных горизонтальных дальностей, рассчитанные для высотных РЛС (воздушный борт), контролирующих по линиям прямой видимости цели на поверхности и на высоте 2 и 8 км. Авиационная платформа поднимает высоту антенн РЛС до нескольких километров и потенциально может расширить зону возможного обзора до нескольких сотен километров. Датчики обзора космического базирования на высотах в сотни километров в принципе могут увеличить зону обнаружения до тысяч километров. Однако согласно уравнению (1.2) дальность обзора растет пропорционально корню квадратному от высоты антенны, откуда следует, что увеличение размера зоны обзора на порядок требует подъема высоты антенны на два порядка. Очевидно, что попытки расширить обзор таким образом обеспечиваются при экспоненциальном росте стоимости и сложности оборудования в силу ограничений, внутренне присущих технологиям прямой видимости.

1.1.3. За горизонтом

Ограниченность дальности обзора обычной РЛС прямой видимости становится проблемой с появлением требований постоянного слежения за отдаленными районами в труднодоступных местах, вблизи которых невозможно или неудобно размещение постоянно действующей РЛС систем наблюдения прямой видимости. Это может относиться к труднодоступным материально-техническому обеспечению в труднодоступных и малонаселенных районах, в которых отсутствует инфраструктура жизнеобеспечения, или это могут быть открытые участки океана вдали от государственной береговой линии. Такие ситуации могут привести к нежелательным дополнительным проблемам в наблюдении за пространством

и/или во времени, поскольку такой контроль ограничен использованием возможностей наблюдения в зоне прямой видимости.

Мобильные платформы с возможностями наблюдения в зоне прямой видимости могут помочь в решении данной проблемы, но их развертывание без дополнительной информации в режиме реального времени от датчиков оповещения о появлении признаков подозрительной активности в контролируемых районах может быть неэффективным и дорогостоящим. Страны с большими территориями, такие как Австралия и США, должны регулярно наблюдать за обширными географическими площадями и объемами воздушного пространства эффективным и надежным образом в целях предоставления в режиме реального времени полной картины происходящего в воздухе и на поверхности для военных и гражданских потребителей. Системы радионаблюдения, основанные исключительно на развертывании большого числа РЛС прямой видимости, каждая из которых располагает ограниченной зоной обзора, могут оказаться неприемлемыми и с финансовой точки зрения, если очень большие и отдаленные регионы будут контролироваться традиционным способом.

Кроме того, с возрастанием в настоящее время скорости, скрытности и в ряде случаев непредсказуемости технологических угроз первостепенное значение приобретают системы наблюдения, способные своевременно получать информацию (раннее оповещение) о потенциальных угрозах с тем, чтобы минимизировать элемент неожиданности. Для того чтобы радарные системы были способны удовлетворять указанным выше целям с точки зрения экономической целесообразности, необходим принципиально иной подход, не ограниченный дальностью прямой видимости традиционных систем, работающих в УКВ- или СВЧ-диапазонах. В результате имеет место стремительное возрождение интереса к использованию радиолокационных систем, которые работают на более низких частотах, а точнее в КВ-диапазоне, потенциальные возможности которого позволяют обойти ограничения локации прямой видимости и намного превзойти возможности устаревших типов радаров.

Важное свойство КВ-диапазона (3–30 МГц), представляющее большой интерес для разработки РЛС, заключается в уникальной способности КВ-сигналов распространяться на очень большие расстояния и большую поверхность Земли и за горизонтом. Как показано на рис. 1.4, распространение КВ-сигналов за горизонт может происходить с помощью двух различных физических механизмов, известных как ионосферное отражение (Skywave) и распространение наземных, поверхностных волн. Ионосферное распространение относится к режиму, в котором КВ-сигналы «отражаются» в верхних слоях атмосферы, известных как ионосфера, в которых концентрация свободных электронов в пределах естественно сформированного ионизированного газа (плазмы) достигает высокого уровня, достаточного, чтобы существенно повлиять на распространение радиоволн КВ-диапазона. Ионосфера может отражать высокочастотные сигналы на одной или нескольких действующих высотах между 100 и 400 км, освещая поверхность Земли на расстояниях в тысячи километров сигналами с достаточно большой удельной мощностью.

С другой стороны, возможен режим распространения поверхностных волн с вертикальной поляризацией сигнала. В этом режиме значительная часть энергии сигналов КВ-диапазона может распространяться вдоль проводящей поверхности моря (солевой раствор) по границе, разделяющей море и воздух. Другими словами, в этом режиме сигнал фактически распространяется в удаленные области на расстояние сотен километров непосредственно над границей, разделяющей море и воздух, огибая поверхность Земли. Распространение поверхностных волн не следует путать с аномальным или волноводным распространением, которое возникает из-за атмосферной рефракции. Данный режим распространения, несомненно, зависит от электрических свойств поверхности Земли и может быть реализован даже при отсутствии атмосферы. Очевидно, что режим ионосферного распространения представляет основной интерес в вопросе сверхдальнего распространения. Режим поверхностных волн имеет ряд достоинств на коротких загоризонтных расстояниях, которые обсуждаются в главе 5. На рис. 1.4 проиллюстрирован также тракт прохождения

сигнала СВЧ-радара по «прямой линии», который из-за его более высокой частоты проходит через ионосферу.

Ниже КВ-диапазона, на средних частотах, сигналы (MF — Medium Frequency) в полосе 0,3–3 МГц испытывают сильное затухание из-за поглощения в нижних частях ионосферы, особенно в каналах дальнего распространения в дневное время, в то время как на более низких диапазонах частот (LF — Low Frequency, низкая частота / VLF — Very Low Frequency, очень низкая частота) их полосы пропускания едва хватает для нескольких каналов тональной частоты. Выше КВ-диапазона ионосфера редко обеспечивает отражение сигналов очень высоких частот (ОВЧ), значительно превышающих 30 МГц, хотя такие сигналы могут быть диффузно рассеяны неоднородностями в ионосфере.

В сущности, полосы частот, прилегающие к диапазону КВ снизу и сверху, вообще не обладают такими уникальными свойствами, которые позволяют коротковолновым сигналам свободно распространяться далеко за горизонт и обеспечивают тем самым возможность реализации для загоризонтной радиолокации. В результате вскоре после окончания Второй мировой войны большое внимание было уделено использованию сигналов КВ-диапазона применительно к задачам загоризонтной радиолокации. Примерно в это же время в Соединенных Штатах объединенными усилиями оборонных, коммерческих и учебных организаций начали проводиться первые исследования по применению РЛС КВ-диапазона для обнаружения целей за горизонтом с использованием преимуществ ионосферного распространения. Следует отметить, что к данному времени одностороннее ионосферное распространение уже давно, в течение многих лет, использовалось в коротковолновой связи и радиовещании. Действительно, первый междугородный «беспроводный» телеграфный сигнал был передан через Атлантический океан Гульельмо Маркони 12 декабря 1901 года. Тем не менее только 25 лет спустя существование ионосферы и ионосферного распространения радиоволн было доказано экспериментально. Это было достаточно давно, уже после того, когда основными радиоволнами, ответственными за распространение трансатлантических сигналов Маркони на расстояние около 3500 км от Полду на побережье Корнуолла в Англии до Сент-Джонс в Ньюфаундленде, Канада, ошибочно посчитали поверхностные волны.

С точки зрения перспективы радиолокационного наблюдения режим ионосферного распространения КВ-сигналов на дальние расстояния предоставляет радару возможность радионаблюдения поверхности или воздушных целей как далеко за горизонтом, так и по линии прямой видимости соответственно. В отличие от односторонней КВ-связи или радиовещания на коротких волнах эхо радиолокационного сигнала, отраженное от цели, для обеспечения обнаружения должно распространяться обратно в принимающую систему

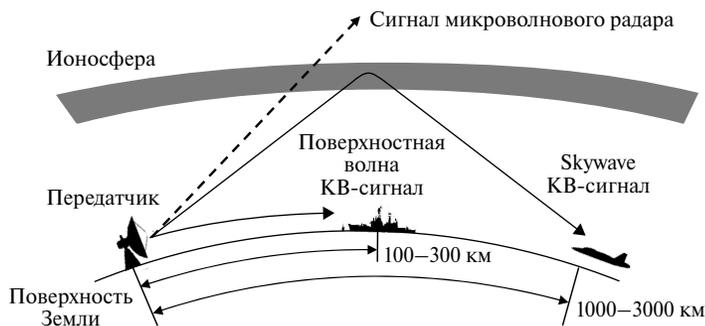


Рис. 1.4. КВ-сигналы могут распространяться за горизонт благодаря двум физическим механизмам, известным как режим ионосферного распространения волн (Skywave), отраженных от верхних слоев атмосферы, и поверхностных волн, причем первый, по существу, единственный в своем роде, поскольку проявляется только в диапазоне 3–30 МГц. Микроволновый сигнал радара имеет гораздо более высокую частоту, которая проходит через ионосферу. © Commonwealth of Australia 2011

тем же физическим механизмом для возможности обнаружения по двустороннему тракту распространения.

В сравнении с обзорными микроволновыми РЛС одна КВ РЛС ионосферного распространения способна обеспечить гораздо большую дальность обнаружения и наблюдение за огромными площадями поверхности и объемами воздушного пространства. Эти свойства служат убедительным аргументом, стимулирующим разработку и использование потенциала ЗГ РЛС. Первые революционные эксперименты в области загоризонтных ионосферных радаров состоялись примерно в начале 1950-х годов в научно-исследовательской лаборатории ВМС США. В 1956 году решающий цикл экспериментов убедительно показал, что такие системы могут успешно использоваться для дальнего обнаружения самолетов [Thomason, 2003]. Изначально проектирование и разработка загоризонтных ионосферных радаров велись ВМС США для обнаружения представлявших основную угрозу дальних и средних бомбардировщиков и ракетносцев боевой морской оперативной группы. Как пояснил Томасон [Thomason, 2003], системы видеонаблюдения, которые могли бы обнаруживать цели на всем пространстве оперативного театра боевых действий и своевременно предоставлять информацию для тактического реагирования, должны были противостоять именно этой угрозе.

После пионерских достижений Соединенных Штатов ряд других стран, включая Австралию, Россию (точнее, бывший Советский Союз), Китай и Францию, создали загоризонтные ионосферные РЛС гражданского и военного назначения. В частности, австралийская программа создания КВ-радаров (Jindalee) началась с 1970-х с разработки трех загоризонтных ионосферных радаров, которые сегодня составляют часть оперативной радиолокационной сети (JORN — Jindalee Operational Radar Network). JORN — это действующая сеть радаров Jindalee, которая и в настоящее время используется в качестве основного средства наблюдения за обширными территориями в системе организации обороны Австралии.

1.2. Принципы работы загоризонтных радаров

Исторически сложилось так, что загоризонтные ионосферные РЛС были разработаны под задачи различного назначения, использующие перспективные технологии и средства, не говоря уже о финансовой стороне вопроса. По этим причинам ранние и современные загоризонтные РЛС имели и имеют разнообразный спектр характеристик. Для общего знакомства с основополагающими, концептуальными положениями механизма работы, физическими характеристиками, а также уникальными возможностями таких систем основное внимание следует сосредоточить на рассмотрении номинальных режимов, которые в большей или меньшей степени характеризуют особенности некоторых используемых в настоящее время загоризонтных ионосферных РЛС. Придерживаясь этой цели, в качестве подходящего ориентира для начального описания загоризонтных ионосферных РЛС можно выбрать реализации самых последних систем, разработанных в Соединенных Штатах Америки и Австралии для наблюдения за воздушными и наземными целями. Различия между приводимыми в качестве примеров радиолокационными системами прошлых и настоящих поколений загоризонтных РЛС обсуждаются в третьей главе.

1.2.1. Принцип действия загоризонтных ионосферных РЛС

С помощью рис. 1.5 можно простыми словами пояснить принцип действия ионосферной ЗГ РЛС. Передающая антенна с электронным управлением диаграммы направленности посылает КВ-сигнал в выбранном направлении луча по азимуту обзора в различные секторы зоны ответственности (обзора) за горизонт. Для контроля участков зоны обзора на различном удалении от ионосферного радара передающая антенна обычно имеет

широкий диапазон изменения положения диаграммы направленности по вертикали, который позволяет изменять направление излучения от почти горизонтального угла возвышения (~5 градусов) до примерно 45 градусов. Излучаемые сигналы свободно распространяются по прямой вдоль выбранного направления излучения в нижних слоях атмосферы (игнорируя тропосферную рефракцию), пока не попадут под углом в нижние слои ионосферы, в которых концентрация свободных электронов достаточно высока для того, чтобы повлиять на распространение коротких волн. Как только электромагнитная волна попадает в ионосферу, она взаимодействует со свободными электронами, плотность которых увеличивается с высотой. В отличие от сигналов микроволнового диапазона, которые при прохождении через ионосферу продолжают распространение практически без отклонения траектории, коротковолновые сигналы из-за постепенного изменения (увеличения) с высотой плотности свободных электронов и, следовательно, изменения показателя преломления радиоволн достигают области критической концентрации, в которой преломляются и распространяются обратно к Земле.

В одном или нескольких слоях внутри ионосферы, как правило, в пределах выше 100 км и до 400 км, плотность электронов вдоль траектории луча может быть достаточно высокой для того, чтобы обеспечить полное внутреннее отражение. Благодаря этому отраженные сигналы направляются далее вниз с преломлением траектории распространения и выходят из слоя ионосферы, попадая в воздушное пространство и на поверхность Земли, «освещая» районы, лежащие за горизонтом на Земле и над ней. Действительно,

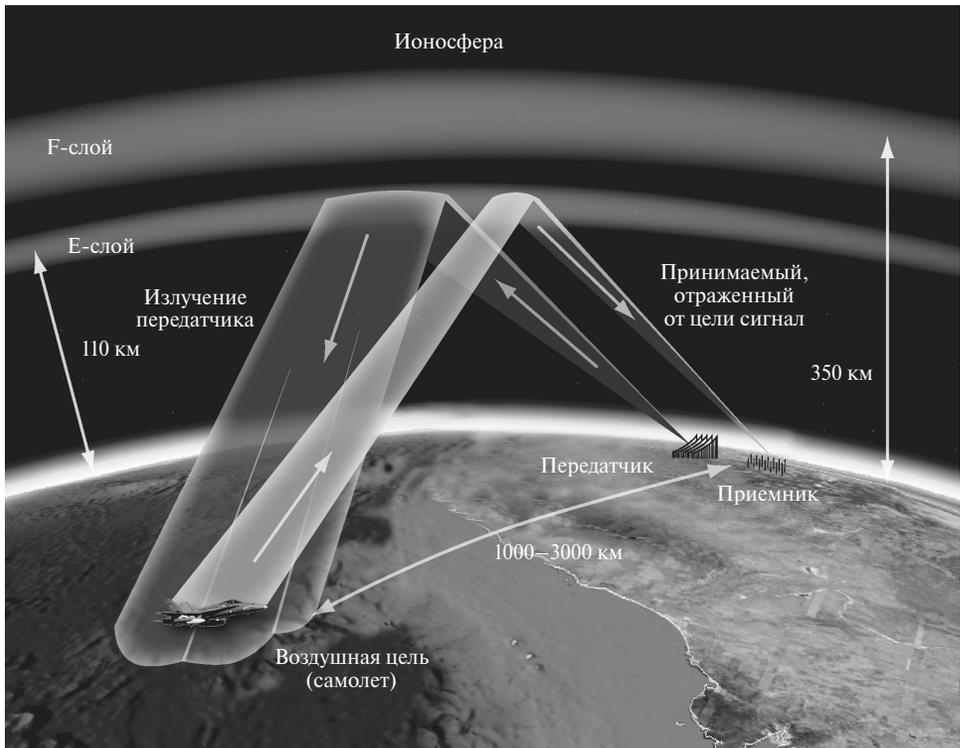


Рис. 1.5. Принцип работы радаров ионосферных загоризонтных РЛС (Skywave OTH) простой по сути, но претворение этой идеи в надежную систему наблюдения создает много серьезных технических трудностей. Обратите внимание, что на рисунке показано распространение только в слое E, тогда как проекция номинальной дальности обнаружения по Земле покрытия лежит в диапазоне 1000–3000 км, включая распространение в слое F. © Commonwealth of Australia 2011

передаваемые сигналы могут возвращаться на Землю на расстояниях в тысячи километров по земле от РЛС. Реальная траектория преломления сигнала, принимаемого радаром после прохождения через ионосферу, а следовательно, и пространство, которое радар «освещает» на поверхности Земли, зависят от ряда факторов, из которых одним из наиболее важных является частота сигнала. Поэтому, изменяя частоту и направление излучения сигнала передающей антенны, оператор может избирательно по дальности и по азимуту контролировать разные зоны обзора в различных географических районах.

Любая поверхность или воздушная цель в контролируемой зоне обзора будет препятствовать прохождению энергии падающего сигнала и отражать часть этой энергии во всех направлениях. *Ничтожно малая часть* этой энергии, отраженная от цели, возвращается обратно к высокочувствительному приемнику ЗГ РЛС по ионосферному тракту таким же образом, как и в прямом направлении при «освещении» цели. Приемник, получая отраженное от цели эхо в качестве полезного сигнала, в дополнение к нему получает мешающие отражения и сигналы, которые содержат в себе ненужные радару сигналы, а именно сигналы, отраженные обратно от земной или водной поверхности, от ионизированных метеорных следов и неоднородностей ионосферы. Время от времени могут приниматься сонаправленные, «попутные» сигналы, не зависящие от сигналов, излучаемых радаром, а создаваемые другими пользователями КВ-диапазона. И в завершение у загоризонтных радаров на входе неизбежно присутствуют высокочастотные шумы от атмосферных и галактических источников, которые по мощности намного превышают собственный (тепловой) шум приемника и обобщенно именуется фоновым шумом.

В частности, очень мощные мешающие отражения, возвращаясь, полностью перекрывают более слабые отражения от цели, которые не могут быть выделены непосредственно из всей совокупности сигналов, принятых загоризонтной радарной системой. По этой причине обработка сигнала применяется к необработанным данным таким образом, чтобы очень слабые полезные сигналы могли быть обнаружены с требуемой достоверностью. На различных этапах обработки сигналов при доплеровской обработке важно отличать отражения от движущихся целей от конструирующихся, мешающих отражений. Кроме обнаружения присутствия целей в зоне обзора, для локализации и сопровождения целей в течение долгого времени также применяется соответствующая обработка данных. Географическое отображение установленных траекторий, которые представляют диспетчеру РЛС четкую картину продвижения воздушных и наземных целей в зоне наблюдения, представляет собой конечный продукт работы загоризонтной радиолокационной системы.

Общая протяженность зоны обнаружения по дальности загоризонтной радиолокационной системы номинально находится в диапазоне между 1000 и 3000 км и зависит от проектных свойств системы. Угловые размеры зоны обнаружения могут составлять 60, 90, 180 или 360 градусов по азимуту. Дальность обнаружения загоризонтной РЛС в пределах тропосферы на порядок больше, чем у наземных радаров прямой видимости при обнаружении высотных целей. При обзоре низколетящих самолетов и надводных кораблей относительное увеличение дальности обнаружения в сравнении с обычным наземным микроволновым радаром фактически выше на два порядка. Это происходит потому, что загоризонтные радары «глядят вниз», освещая цели на всех высотах ниже ионосферы.

Важное свойство распространения КВ-сигнала (дифракционные эффекты в сочетании с позицией наблюдения «вид сверху» при ионосферном распространении) заключается в устранении (или значительном уменьшении) теневых областей в зоне наблюдения таким образом, что цели не могут использовать топографические особенности местности, такие как горы или впадины, чтобы умышленно избежать «освещения». Кроме того, относительно длинные волны, используемые ЗГ РЛС, обеспечивают им невосприимчивость к воздействию метеорологических явлений, с которыми часто сталкиваются микроволновые радары радиолокационных систем в том смысле, что из-за атмосферных осадков возрастают затухание сигнала и влияние мешающих отражений от метеообразований, что не является проблемой в КВ-диапазоне. Однако, строго говоря, характеристики загоризонтных радаров не совсем не зависимы от погоды: например, грозная активность может

значительно повысить уровень шума из-за грозных разрядов и в открытом море может повлиять на обнаружение медленно перемещающихся целей из-за мешающих отражений от поверхности.

Общая площадь зоны обзора одной загоризонтной РЛС может составлять 6–12 миллионов квадратных километров. Оценка такой огромной территории может быть сделана по рис. 1.6, на котором очерчена зона обзора трех австралийских загоризонтных РЛС, образующих сеть JORN, на географической карте расположенных рядом: Элис-Спрингс (Северная территория), Лавертон (Западная Австралия) и Лонгрич (Квинсленд). Для сравнения на рис. 1.6 показана зона обнаружения наземного микроволнового радара. Затененный внешний круг зоны обзора радара прямой видимости воздушных целей соответствует высоте полета коммерческих авиакомпаний, а меньший внутренний круг зоны обзора целей соответствует их нахождению на поверхности или на малой-низкой высоте. К слову, в данный момент уместно объяснить, что загоризонтный радар не может контролировать одновременно всю зону потенциального обзора. Вообще количество задач обзора (каждая из которых включает одну или несколько зон обзора) и график их исполнения планируются параллельно со временем проведения РЛС наблюдений в выбранной части общей зоны обзора и в заданный интервал времени.

В зависимости от назначения и класса целей, которые влияют на требования, предъявляемые к ресурсам системы, загоризонтный радар может оперативно обнаруживать и отслеживать цели в режиме реального времени на областях от нескольких десятков тысяч до, возможно, более одного миллиона квадратных километров. Хотя капитальные затраты

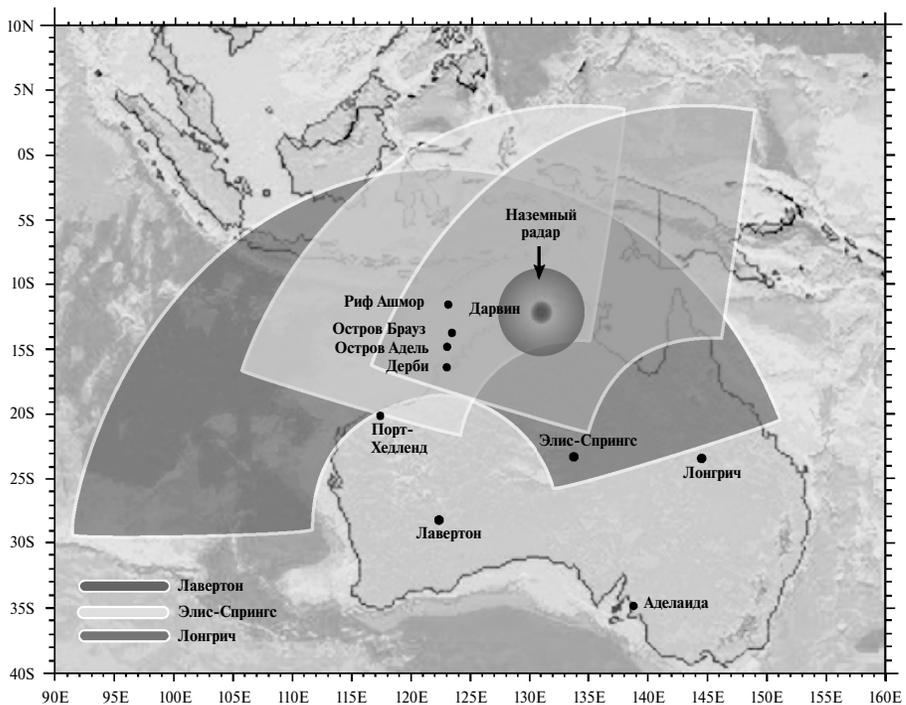


Рис. 1.6. Схема построения сети загоризонтных РЛС Австралии JORN с узлами в Элис-Спрингс (Северная территория), Лавертоне (Западная Австралия) и Лонгриче (Квинсленд). Для сравнения показана зона обзора наземной микроволновой РЛС недалеко от Дарвина. Три площадки JORN управляются дистанционно из центра, расположенного вблизи Аделаиды, Южная Австралия. © Commonwealth of Australia 2011

на развертывание ЗГ РЛС значительно выше, чем у обычной РЛС прямой видимости, она обеспечивает необыкновенно экономически эффективный обзор поверхности и воздушного пространства на единицу площади и объема соответственно. Главное преимущество, однако, заключается в возможности обеспечить раннее предупреждение и широкий обзор географических территорий, что невозможно сделать за счет развертывания РЛС СВЧ или других средств на прямой видимости.

На рис. 1.7 схематично представлены общая зона контроля загоризонтного радара и меньший район наблюдения внутри него, известный как «след» или проекция зоны обнаружения радара (или передатчика) — область земной поверхности, которая при конкретном выборе несущей частоты сигнала и направленности диаграммы излучения контролируется в текущий момент времени (мгновенно). Ограничение размера мгновенной проекции зоны обзора по дальности происходит из-за конечной высоты и уровня электронной концентрации ионосферного слоя, обеспечивающего распространение сигнала на фиксированной частоте, а ограничение по азимуту возникает из-за ограничения ширины луча диаграммы направленности передающей антенны радара по азимуту. Номинальная длина и поперечный размер проекции луча диаграммы передающей антенны радара на поверхности Земли количественно будут определены позже. Главное здесь то, что для поиска целей в одном районе наблюдения необходимо последовательно сканировать лучом радара по азимуту и дальности, чтобы обеспечить контроль всех районов в общей зоне наблюдения.

Как правило, ЗГ РЛС одновременно контролирует некоторое число активных районов наблюдения, которые географически расположены в местах, представляющих интерес

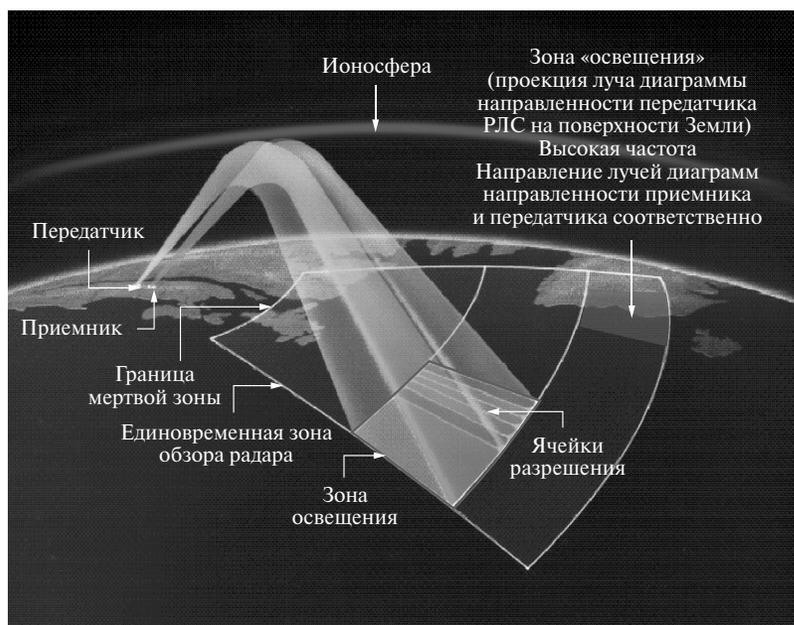


Рис. 1.7. Схематическое представление общей зоны наблюдения ЗГ РЛС и меньший текущий район наблюдения внутри него, известный как «след» или проекция мгновенной зоны обнаружения РЛС, область земной поверхности которой при конкретном выборе несущей частоты сигнала и азимутально-угломестного положения диаграммы излучения полностью освещается в данный момент времени. Принципиальный подход заключается в том, что вся общая зона наблюдения не может контролироваться одновременно, поэтому каждый район в общей зоне наблюдения опрашивается последовательно. РЛС опрашивает этот район в течение интервала времени наблюдения, равного длительности когерентного интервала при доплеровской обработке. © Commonwealth of Australia 2011

в данный конкретный момент времени. РЛС для сбора данных о конкретном районе наблюдения в течение определенного времени сканирует его, а затем этот процесс пошагово в установленной очередности повторяется в других активных регионах видеонаблюдения. Таким образом, ЗГ РЛС по нескольку раз в запланированной последовательности просматривает каждую из активных областей наблюдения. Размер каждой области наблюдения эффективно ограничивается размерами «освещенной» радаром площади — проекции на поверхности Земли. Чтобы подчеркнуть, что зона наблюдения (или проекция диаграммы направленности передатчика РЛС) полностью «освещается» в течение интервала радиолокационного зондирования, ее обычно называют также областью обзора, одновременно покрываемой лучом (DIR — Dwell Interrogation Region). Последовательность, в которой ЗГ РЛС проводит зондирование различных зон DIR, называют последовательностью или стратегией сканирования. Площадь обзора разбивается на набор участков зондирования DIR для проведения ЗГ РЛС согласованного во времени сканирования и может рассматриваться как процесс обнаружения и сопровождения целей в реальном времени.

При плановом зондировании число зон ограничено интервалом времени когерентного накопления каждой области обзора, одновременно покрываемой лучом всех зон DIR. Длительность когерентного накопления определяется процессом доплеровской обработки каждой зоны DIR, а время повторного зондирования определяется необходимостью эффективного сопровождения целей. Как уже упоминалось, эти противоречивые требования почти всегда означают, что время оперативного облучения в режиме реального времени ЗГ РЛС всегда меньше времени, нужного для наблюдения во всей потенциальной области. В связи с этим возникает ряд вопросов. Например, какие факторы определяют размеры потенциальной зоны наблюдения, такие как минимальный и максимальный диапазон, что такое физический размер зоны DIR и какова разрешающая способность РЛС (или ячейка разрешения) внутри нее? Ответы на эти вопросы дают предварительные сведения о номинальных возможностях загоризонтных радиолокационных систем и чуть позже будут обсуждаться в данной главе.

1.2.2. Общая характеристика

Хотя наличие ионосферы позволяет ЗГ РЛС обнаруживать и сопровождать цели на расстояниях, на порядок величин больших, чем обычные радиолокационные системы, на практике ионосфера как среда распространения также служит источником многих неопределенностей и трудностей. Следовательно, характеристики ЗГ РЛС определяются не только структурой системы и эксплуатационными параметрами, но также сильно зависят от свойств и состояния ионосферы, а также характеристик электромагнитного фона в частотном диапазоне работы радара (ЕМ — Electromagnetic). В продолжение введения к этой главе наряду с основными физическими характеристиками типичных загоризонтных радиолокационных систем ниже кратко представлены общие свойства ионосферы и окружающая электромагнитная обстановка в КВ-диапазоне.

1.2.2.1. Среда распространения

Естественно ионизированный газ (плазма) в ионосфере создается излучением частиц высокой энергии, испускаемых Солнцем. Это достаточная концентрация свободных электронов, образующихся в определенных слоях ионосферы, которая обеспечивает возвращение энергии КВ-сигнала на Землю с помощью так называемого ионосферного распространения. Концентрация свободных электронов, чаще упоминаемая как плотность электронов, в зависимости от высоты слоя ионосферы может изменяться более чем на два порядка. Высоты максимумов ионизации также изменяются в зависимости от времени и географических координат. Несмотря на то что в ночное время прямое излучение Солнца отсутствует, ионосфера никогда полностью не исчезает и всегда имеет плотность ионизации, достаточную для отражения КВ-сигналов и для работы ЗГ РЛС.

Хотя наличие ионосферы можно воспринимать как некоторую данность с обобщенными и в определенной степени достаточно часто предсказуемыми свойствами, но на практике и, в частности, при организации загоризонтной радиолокации эти свойства не всегда представляется возможным точно прогнозировать. Помимо присущей ей непредсказуемости, ионосфера обладает рядом уникальных свойств, способствующих распространению КВ-сигналов. Некоторые из них заметно отличаются от особенностей, рассмотренных в литературе, посвященной микроволновым РЛС. Ряд важных характеристик ионосферы, которые влияют на распространение КВ-сигнала и, следовательно, на работу ЗГ РЛС, приведены ниже. Более подробное описание ионосферы и ее свойств с точки зрения среды распространения КВ-сигналов представлено во 2 главе.

В отличие от канала распространения прямой видимости СВЧ-диапазона, ионосферные каналы отличаются высокой динамичностью, пространственной неоднородностью и анизотропностью среды распространения КВ-сигналов, частотно-зависимые характеристики которых существенно изменяются в полосе частот КВ-диапазона. Рабочие частоты, наиболее подходящие для зондирования конкретного региона обзора, существенно изменяются в зависимости от времени суток (суточный ход), месяца (сезонные колебания) и в течение 11-летнего цикла солнечной активности. Как правило, для отслеживания масштабных изменений в ионосфере рабочая частота должна корректироваться каждые 10–30 минут и, возможно, еще быстрее в утренние и вечерние часы по линии разделения света и тени и в периоды ионосферных возмущений.

Оптимальная частота для «освещения» конкретного района наблюдения днем может в два раза отличаться от частоты, которая требуется ночью. Кроме того, отношение частот, которое требуется для зондирования различных районов в заданной зоне контроля ЗГ РЛС в конкретный момент времени, может быть равно 2 к 1 или 3 к 1. Рабочая частота также может изменяться для районов наблюдения той же дальности, но в других азимутальных направлениях, в частности при прохождении зон линией солнечного терминатора (в часы рассвета или наступления сумерек). Обобщая вышесказанное, можно сказать, что качество обнаружения и сопровождения цели ЗГ РЛС, использующей ионосферное распространение, существенно зависит от изменений частоты, времени и места.

Кроме того, плотность электронов в ионосфере имеет характерную структуру горизонтальных слоев. Это создает условия для отражения КВ-сигнала от отличающихся по плотности электронов различных ионосферных слоев, расположенных на различной высоте. На практике отраженные сигналы часто состоят из суперпозиции нескольких составляющих или мод, распространяющихся по разным путям между двумя конечными пунктами на поверхности Земли. Четыре или более сильных типа волн — мод с, возможно, совершенно разными задержками времени, доплеровскими сдвигами частоты и углами падения, могут прийти на вход ЗГ РЛС от одной цели и сгруппированы для распознавания. Вообще условия многолучевого распространения сигналов КВ-диапазона при отражении от ионосферы намного сложнее интерференции, возникающей между прямым лучом и отраженным от поверхности, которые часто рассматриваются в радиолокационных системах прямой видимости.

Коэффициент преломления КВ-радиоволн в ионосфере неоднороден и изменяется как под влиянием магнитного поля Земли, так и по высоте. Эта зависимость коэффициента преломления оказывает влияние на поляризацию распространяющейся волны и направление ее распространения. Затухание сигналов КВ-диапазона из-за поглощения в ионосфере также может быть значительным, особенно в нижней части высот ионосферы, известной как D-область (ниже приблизительно 90 км). Помимо этого «нормального» поведения, ионосфера также подвержена волнообразным возмущениям, геомагнитным бурям и множеству других явлений, которые могут значительно повлиять на ее свойства в качестве среды распространения радиоволн [Davies, 1990]. Некоторые общие характеристики ионосферного канала распространения КВ приведены в табл. 1.2.

Как уже упоминалось ранее, для эффективной работы ЗГ РЛС необходимо, чтобы частота радиолокационного сигнала выбиралась в реальном масштабе времени таким

Таблица 1.2. Некоторые общие свойства каналов КВ ионосферного распространения, имеющие отношение к разработке и эксплуатации загоризонтных РЛС. Данные свойства далее обсуждаются во 2-й главе

Свойства	Ионосферное распространение
Динамичность	Широкий разброс параметров во времени: внутри интервала когерентной обработки ИКО, длительностей сроков предназначения — суточный, сезонный, 11-летний
Неоднородность	Мелкомасштабная неоднородность, непостоянство магнитной широты и изменчивость ионосферы по районам и зонам наблюдения радара
Рассеивание	Дисперсия частоты, времени задержки (по дальности), доплеровского сдвига и угла прихода сигнала
Анизотропность	Линейная поляризация разделяется на две отраженные по-разному эллиптически поляризованные характеристические волны
Многолучевость	Различные области E- и F-слоев создают несколько мод ионосферного распространения
Поглощение	В дневное время D-слой может вызвать сильное затухание сигнала (особенно при больших дальностях распространения)

образом, чтобы оптимизировать эффективность обнаружения цели в зоне наблюдения. А это требует, чтобы ЗГ-радар мог *динамично перестраивать частоту* в широком диапазоне КВ-спектра. Для эффективной работы ЗГ-радаром днем и ночью по всей зоне наблюдения могут потребоваться несущие частоты, отличающиеся на две или более октавы. Поскольку свойства ионосферы невозможно спрогнозировать с требуемой для работы систем ЗГ РЛС степенью точности, то необходима выделенная система управления частотой (FMS — Frequency Management System). Система управления частотой должна предоставлять главной ЗГ РЛС информацию и рекомендации по условиям распространения в реальном масштабе времени и с учетом особенностей местоположения РЛС либо с помощью баз эмпирических данных, либо с помощью основанных на них аналитических моделей. Кроме того, ЗГ РЛС отличается тем, что во избежание помех от большого числа пользователей КВ-диапазона необходимо непрерывно контролировать занимаемый спектр по уровню существующих в нем непреднамеренных помех.

Критерием оценки частотного канала служит отношение сигнал/шум — ОСШ (SNR — Signal-to-Noise Ratio), которое после доплеровской обработки мешающих отражений оказывает решающее влияние на обнаружение быстро движущихся целей. Самолеты размерами класса истребителей или больше могут быть легко обнаружены ЗГ РЛС. Ионосферный канал создает временную модуляцию сигнала радара порядка долей секунды, которая искажает амплитуду и фазовый состав эха на интервале когерентной обработки. Это явление складывается с доплеровским сдвигом и расширяет отраженный КВ-сигнал. Чистота доплеровского спектра представляет наиболее важный критерий при оценке частоты канала, особенно при обнаружении медленно движущихся целей, в которых полезные сигналы должны быть обнаружены преимущественно в мешающих отражениях, а не шумах. При благоприятных условиях ЗГ РЛС способна обнаруживать океанские корабли со стальным корпусом.

1.2.2.2. Характеристики системы

Если большинство обычных СВЧ-радаров системы однопозиционные¹, которые работают импульсными сигналами в классической моностатической конфигурации, многие ионосферные ЗГ радиолокационные системы используют непрерывные сигналы в двухпозиционной конфигурации, в которой передатчик и приемник находятся в различных местах. Двухпозиционная конфигурация берет свое начало от ЗГ РЛС, известной как (WARF — Wide

¹ То есть с размещением в одном месте, на одной площадке, на одной позиции. — Прим. пер.

Aperture Research Facility, широкоапертурная научно-исследовательская установка), которая была построена в центральной Калифорнии сотрудниками и студентами Стэнфордского университета в 1967 году, до того как он стал Стэнфордским научно-исследовательским институтом (Stanford Research Institute (SRI)). Этот новаторский ЗГ-радар, возможно, представляет первую РЛС, которая убедительно продемонстрировала непрерывную работу с использованием двух позиций для размещения оборудования. Другое наследие WARF, которое явно присутствует во многих ЗГ РЛС, состоит в использовании в приемнике элементов унифицированной линейной антенны с очень широкой апертурой и вертикальной поляризацией, а на передаче используется антенная решетка, имеющая относительно узкую апертуру с вертикально поляризованными логопериодическими диполями (ЛПДА, LPDA — Log-Periodic Dipole Array) [Barnum, 1993].

На рис. 1.8 показана передающая антенна ЗГ РЛС Jindalee, расположенного в Хартс, на расстоянии около 100 км к северо-востоку от Элис-Спрингс в Центральной Австралии, а на рис. 1.9 показана приемная антенна ЗГ радара Jindalee, расположенная на горе Эверард, примерно в 40 км к северо-западу от Элис-Спрингс. Хотя это и двухпозиционная архитектура ЗГ РЛС, но о ней часто говорят как о «квазимоностатической» конфигурации, потому что расстояние между передающей и приемной площадкой (~100 км) значительно меньше, чем диапазон действия радиолокатора (1000–3000 км).

Антенны СВЧ-радаров, как правило, имеют основной, самый крупный размер порядка нескольких метров, что делает возможным их размещение на различных платформах. А раскрыв приемной антенны ЗГ РЛС может иметь 2–3 км в длину и передающую антенну с апертурой 100–150 м. ЗГ РЛС нуждаются в очень больших площадях и открытых пространствах и при этом в зонах с низким уровнем внешних помех. Обычный микроволновый радар может быть легко построен в виде единой системы и сканированием луча диаграммы направленности с помощью механического вращения всей конструкции антенны. С другой стороны, ОТН РЛС должны работать с использованием антенных систем на основе многоканальных антенных решеток с электронным управлением и формированием диаграмм направленности на передачу и прием.

Кроме этих структурных различий, есть еще один важный аспект, который отличает ЗГ РЛС от ее микроволнового аналога. Конкретно загоризонтная радиолокационная



Рис. 1.8. Передающая антенна ЗГ РЛС Jindalee. Двухполосная линейная решетка с апертурой около 140 м состоит из 16 (ВЧ-полос) и 8 (НЧ-полос) равномерно разнесенных вертикально поляризованных ЛПДА-элементов. © Commonwealth of Australia 2011



Рис. 1.9. Приемная антенна ЗГ РЛС Jindalee. Приемная антенна состоит из однородного линейного массива 462 элементов с вертикальной поляризацией спаренных верных антенн. Апертура приемной антенны имеет длину приблизительно 2,8 км. © Commonwealth of Australia 2011

система работает более эффективно благодаря использованию специальной сети географически распределенных вспомогательных датчиков для мониторинга текущего состояния ионосферы. Этот дополнительный к главной РЛС набор датчиков, который раньше называли системой управления частотой (FMS), отслеживает также занятость каналов с тем, чтобы свободные от сильных радиочастотных помех (RFI — Radio Frequency Interference) каналы могли быть выделены и рекомендованы для дальнейшего использования. Система управления частотой — FMS, полезна не только для автоматизированного обеспечения главной РЛС рекомендациями по оптимальному выбору частоты при выполнении конкретной задачи или программы. Кроме этого, она облегчает преобразование траектории цели, сформированной из координат РЛС, угла прихода сигнала и дальности, в географические координаты цели (широта и долгота) в процессе, называемом *определением координат цели*.

Несмотря на то что ЗГ РЛС для обеспечения устойчивого распространения сигналов при изменяющихся условиях распространения необходима большая часть КВ-диапазона, излучаемые сигналы имеют относительно небольшую полосу частот и занимают очень узкие полосы спектра в любой заданный момент времени. Многие двухпозиционные ЗГ РЛС передают повторяющиеся непрерывные сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигнал, FMCW — Frequency Modulated Continuous Waveform) или ее вариант, который имеет нужные свойства функции неопределенности и в то же время минимизирует уровень внеполосных излучений. Сигнал радара «освещает» район наблюдения в течение интервала когерентной обработки ИКО (СРІ — Coherent Processing Interval) или периода фиксации, в течение которого излучается несколько линейных ЧМ-импульсов или качаний частоты, и система принимает отраженное эхо (сигнал от цели). Далее в главе 3 будут представлены основные радиолокационные подсистемы, свойства линейной ЧМ (ЛЧМ-сигнал) и система управления — FMS.

1.2.2.3. Обработка сигналов и условия распространения КВ-сигналов

На диаграмме (рис. 1.10) показаны различные виды сигналов, которые могут приниматься ЗГ РЛС. В левой и правой ветвях показаны классы радиолокационных сигналов когерентного и некогерентного типа соответственно. Когерентные сигналы излучаются передатчиком радара и могут дополнительно классифицироваться как мешающие отражения или

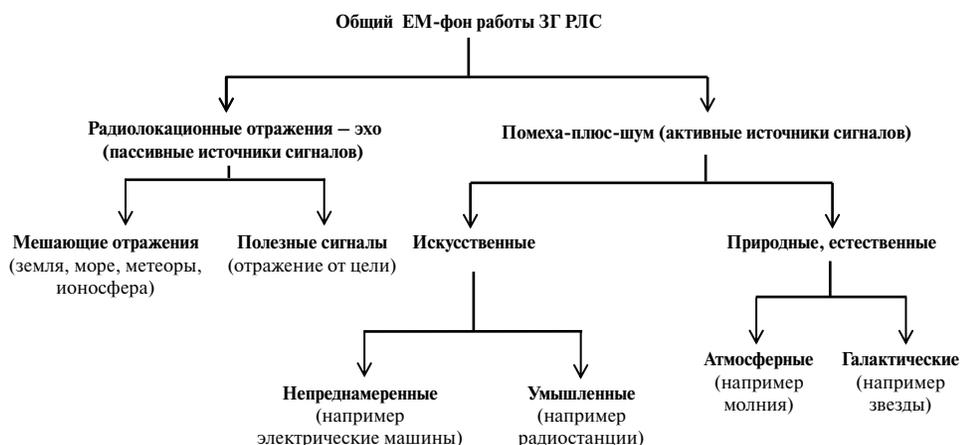


Рис. 1.10. Структура излучений среды, создающих окружающий фон КВ-сигналов загоризонтных РЛС. Относительно слабые отражения от цели должны быть обнаружены в аддитивной смеси мешающих отражений, помех и шумов, которые в совокупности образуют полный мешающий сигнал. © Commonwealth of Australia 2011

полезные сигналы (отражение от цели). В ЗГ РЛС мешающие отражения возникают из-за обратного рассеяния от пространственно распределенных участков поверхности Земли или обратного рассеяния от других пассивных источников, которые не принадлежат цели, например эхо вследствие кратковременной ионизации, создаваемой метеорными следами.

Некогерентные сигналы присутствуют независимо от того, включен радар или выключен, далее могут быть разделены на искусственные и естественные помехи, создающие фоновый шум. Природный фоновый шум может быть либо галактического происхождения (например Солнца и других звезд) или атмосферного происхождения (например грозовых разрядов). С другой стороны, искусственные помехи можно рассматривать как непреднамеренные (например электрические машины) или преднамеренные (например радиостанции с АМ). Вообще ЗГ РЛС разрешается использовать широкие полосы КВ-спектра на вторичной основе. Взамен такие системы, в соответствии с национальными стандартами и нормативными документами Международного союза электросвязи (МСЭ), применяют политику невмешательства, выбирая незанятые каналы, свободные от использования другими лицами (радиотехническими системами). Свойства помех и шума, принимаемых ЗГ РЛС, определяются не только природой и географическим расположением источников сонаправленных, попутных каналов, но и характеристиками среды распространения (ионосферных каналов), которые на выбранной рабочей частоте объединяют различные помехи и шумы источников в приемнике ЗГ-радаров. Полный составной сигнал на входе приемника содержит мешающие, паразитные отражения, помехи и шум. Характеристики обнаружения (то есть после применения методов подавления нежелательных сигналов) в отличие от энергии *на входе* приемника определяются остаточным уровнем и распределением энергии нежелательного сигнала на цели (доплеровская дальность и азимут) в области поиска.

Для эффективного снижения уровня помех необходимы и совершенная обработка сигналов, и управление частотой в режимах реального времени, которые в загоризонтных радарных системах рассматриваются совместно, а не раздельно. Традиционно цифровые коды управления, полученные приемной антенной РЛС во время облучения, используются для формирования диаграммы направленности, оценки дальности и доплеровской обработки. Кроме этого, регулярно предпринимаются шаги по улучшению условий приема сигнала при наличии кратковременных помех, возникающих от грозовых разрядов или отражений от метеорных следов. Эти базовые этапы обработки сигналов описываются в 4 главе

при постоянном коэффициенте ложных тревог, максимальной оценке обнаружения, отслеживания и регистрации координат. Адаптивные методы обработки будут рассмотрены в III части.

Важность обработки сигналов для успешной работы ЗГ РЛС можно проиллюстрировать на простом примере. В отличие от наземных микроволновых радаров, которые благодаря приподнятой вверх диаграмме направленности могут в некоторых случаях избегать сильного влияния мешающих отражений в рабочем диапазоне, ЗГ РЛС должна обнаруживать эхо от цели при наличии мощного мешающего влияния отражений от больших площадей земной поверхности, которые одновременно занимают все представляющее интерес пространство. Хотя большая часть энергии КВ-сигнала, как правило, рассеивается в прямом направлении, относительно большая часть энергии в элементе разрешения ЗГ РЛС возвращается к приемнику в виде мешающих отражений, которые могут быть на 40 и до 80 дБ выше уровня отраженного от цели сигнала. Так как размеры этого элемента разрешения (ячейки клетки растра) из-за практического ограничения на максимум произведения ширины полосы частот и апертуры системы не могут быть уменьшены, то исключительно большое значение для обнаружения целей имеет доплеровская обработка сигналов.

К счастью, частота КВ-сигналов при ионосферном распространении на интервалах времени порядка секунд по большей части остается достаточно стабильной, а энергия помех, отраженных от поверхности Земли, в основном ограничена небольшой полосой доплеровских частот с центром около нуля герц и шириной менее нескольких герц¹. А с другой стороны, отражения от целей, движущихся с относительной скоростью v_r , имеют доплеровский сдвиг частоты, который определяется хорошо известным выражением $f_d = 2v_r f_c / c$, где f_c — несущая частота сигнала. Неманеврирующий самолет создает, как правило, отражение с хорошо определяемым доплеровским сдвигом, которое чаще всего находится в диапазоне между 5 и 50 Гц и обычно за пределами спектра помех отражения в занимаемом участке доплеровского спектра. Важно отметить, что приемник должен иметь достаточный динамический диапазон для точного сохранения спектральных

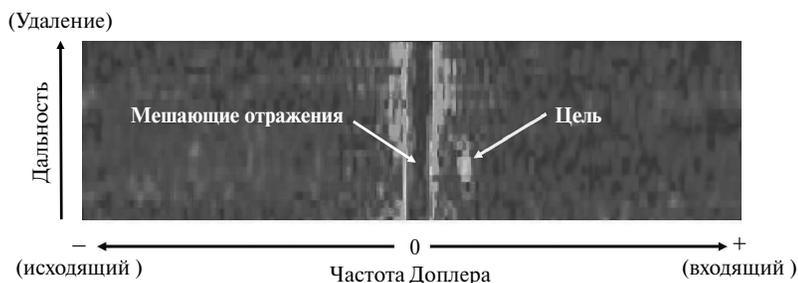


Рис. 1.11. Модулированное по интенсивности изображение на экране ЗГ КВ РЛС при доплеровском измерении дальности в направлении реальной воздушной цели. Доплеровская обработка эффективно отделяет относительно слабое эхо, отраженное от движущейся цели (отображена на дисплее) от отраженных от поверхности помех, которые сосредоточены вблизи нулевой доплеровской частоты. Это позволяет легко обнаружить входящий в зону обзора самолет на фоне маскирующих его и намного превосходящих по мощности помех. Обратите внимание, что мешающие отражения от поверхности Земли присутствуют по всей длине участка (показано на рисунке в виде вертикального «хребта» ограниченной ширины с центром около нуля герц доплеровской частоты), а цель — самолет — наблюдается как точечный отражатель и порождает эхо, которое локализуется по дальности (т. е. вдоль вертикальной оси на дисплее). © Commonwealth of Australia 2011

¹ Это вообще относится к КВ-сигналам, отраженным от «спокойной» ионосферы в умеренных широтах, а в низких (тропических) и верхних магнитных широтах ионосфера обычно более возмущена, что приводит к меньшей стабильности частоты.

характеристик сильных мешающих отражений и значительно более слабых отражений эха. Это может быть реализовано с помощью доплеровского метода обработки сигналов при соответствующем выборе конуса направленности, которые создают эффективные средства разделения спектров эха цели и помех отражения по разным частотным полосам. В идеальном случае это позволяет обнаруживать движущиеся цели на фоне более сильного внешнего шума, превышающего обычно уровень собственного шума приемника, который гораздо слабее уровня отраженных помех. На рис. 1.11 иллюстрируется на реальном примере возможность обнаружения эха цели среди мешающих отражений с помощью доплеровской обработки сигналов.

1.2.3. Практические приложения применения

Основные задачи обзорных загоризонтных радиолокационных систем ионосферного распространения преимущественно заключаются в обнаружении и сопровождении целей. Под эгидой обзорных приложений ионосферные ЗГ РЛС могут широко использоваться в оборонных и в гражданских целях с различными приоритетами и классами целей, как, например, самолеты и надводные корабли. Кроме задач наблюдения, ионосферные ЗГ РЛС могут быть задействованы в сфере дистанционного зондирования, в том числе океанографических или ионосферных исследований. В этом случае полезные сигналы представлены отражениями от естественных объектов, в то время как сигналы, отраженные от техногенных объектов (скрытые цели), создают мешающие отражения.

Последующие разделы настоящей главы в основном не связаны с задачами дистанционного зондирования, а преимущественно посвящены применению ЗГ РЛС в решении задач оборонного и гражданского характера. Прикладное дистанционное зондирование кратко рассмотрено ниже, но не обсуждается в деталях, так как эта тема достаточно обширна и заслуживает того, чтобы стать предметом отдельного издания. Несмотря на то что наблюдение и дистанционное зондирование представляют собой два наиболее распространенных примера использования ионосферных ЗГ РЛС, эта технология может найти и другие практические приложения и не ограничивается тем, что изложено далее.

1.2.3.1. Раннее обнаружение в обширной зоне наблюдения

Обзорные ЗГ РЛС и РЛС СВЧ прямой видимости имеют много общих типов целей. Представляющие интерес воздушные цели могут быть представлены крылатыми и баллистическими ракетами, вертолетами и частными самолетами, военными самолетами (с размерами истребителей или бомбардировщиков) и крупными гражданскими авиалайнерами. С другой стороны, представляющие интерес цели на поверхности Земли могут оказаться наземными транспортными средствами различного размера, маленькими быстроходными катерами, океанскими рыболовными судами и большими стальными военными кораблями (патрульные катера, крейсера, эсминцы и авианосцы). Загоризонтные РЛС и РЛС прямой видимости также имеют общие обзорные задачи, а именно обнаружение, локализация и сопровождение цели, в процессе сканирования зоны контроля и поиска других целей, то есть сопровождение в процессе сканирования. Важное различие между этими двумя системами заключается в том, что ЗГ РЛС обеспечивают более раннее предупреждение и в более широкой зоне обзора, хотя и с более низким разрешением и точностью, чем традиционные микроволновые РЛС.

Ограниченная точность ЗГ РЛС в общем означает, что такие системы не могут рассматриваться как законченное решение, удовлетворяющее государственным интересам и требованиям к наблюдению за воздушным и морским пространством. Роль ЗГ РЛС в организации обороны необходимо оценивать с точки зрения того вклада, который она предоставляет для национальной безопасности как одна из составляющих всего комплекса средств наблюдения. Например, возможности раннего предупреждения с широкой зоной обзора ЗГ РЛС могут быть использованы для подачи команд на подключение других ресурсов в районы, в которых обнаружена необычная активность. Такие ресурсы могут быть

представлены высокоточными средствами наблюдения и разведки, установленными на мобильных платформах, например на патрульных катерах или воздушных средствах дальнего радиолокационного предупреждения и управления самолетами. Возможность подачи команд на подключение средств, которые имеют большую точность, но более ограниченную зону обзора в режиме реального времени, создает предпосылки для структурных изменений в системе наблюдения. При наличии целостной системы контроля, сбора данных и управления создаются условия для более эффективного реагирования на потенциальные угрозы и более эффективного использования ресурсов, а возможно, и уменьшения числа систем, которые должны создаваться и эксплуатироваться.

Как уже упоминалось выше, ЗГ РЛС сканирует зону наблюдения в режиме реального времени, выполняя одно или несколько заданий, которые, как правило, сгруппированы. В свою очередь, каждое задание формирует соответствующие зоны наблюдения, одну или несколько. Рабочие параметры ЗГ РЛС могут изменяться от региона к региону. Рабочие параметры зависят от назначения и местоположения региона наблюдения. На рис. 1.12 показан набор типичных задач, соответствующих четырем основным видам гипотетических ЗГ РЛС. Различные виды задач обозначены буквами от А до D. РЛС облучает («освещает») каждую зону DIR на интервале времени когерентной обработки, а затем в запланированном порядке последовательно обходит различные зоны DIR. В зависимости от выбранных

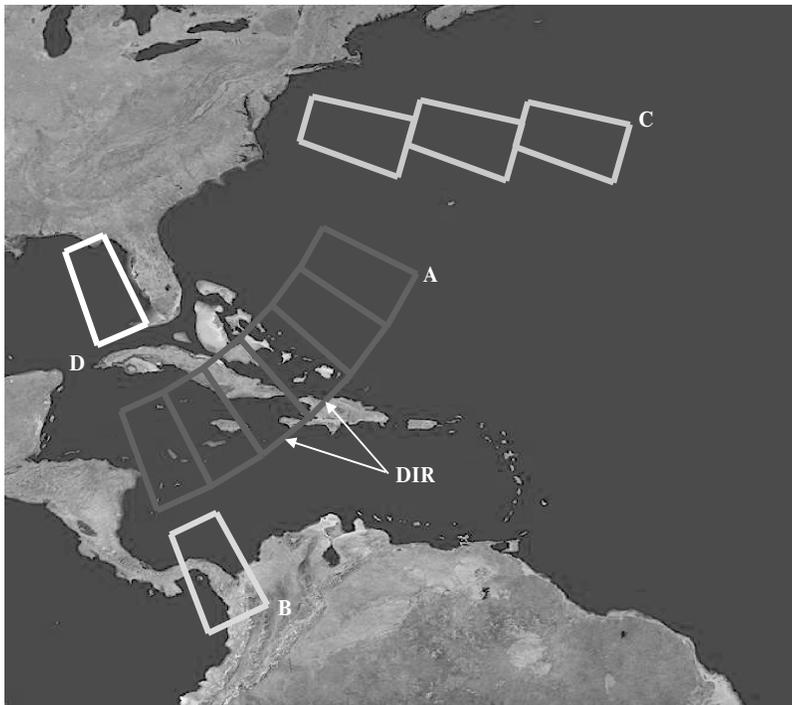


Рис. 1.12. Пример четырех задач ЗГ РЛС, обозначенных от А до D. Конкретная задача может включать одну или несколько зон наблюдения или DIR, просматриваемых в запланированном порядке. Для оптимизации условий ионосферного распространения в представляющей интерес географической области различные задачи и зоны, как правило, сконфигурированы на разных рабочих частотах. Различные параметры сигнала РЛС используются также в зависимости от назначения. РЛС может чередовать во времени выполнение нескольких задач, но задачи обнаружения авиационных и морских судов часто лучше всего проводить в разное время, поскольку они могут быть несовместимы с точки зрения планирования ресурсов.
© Commonwealth of Australia 2011

приоритетов во время последовательного обхода выполнение различных задач может чередоваться, но при этом необходимо гарантировать, что темп повторного облучения зоны будет достаточным, чтобы не допустить ухудшения показателей слежения.

Поскольку задачи ЗГ РЛС могут быть по-крупному разделены на воздушные цели и цели на поверхности, то их структура и использование могут иметь различное тактическое назначение. Задача А обычно упоминается под общим названием «барьерной задачи». Этот тип задач в основном предназначен для наблюдения за самолетами и должен обеспечивать обнаружение целей, движущихся в определенном месте, представляющем «барьер». Когда другие задачи не настолько активны, то задача В может рассматриваться как «задача взглядывания», поскольку она обеспечивает непрерывный контроль, сосредоточенный на одной области наблюдения. Данный тип задач может быть использован для сосредоточенного слежения за аэропортами, стратегическими морскими линиями или, например, за ракетными пусковыми установками.

Задачу С можно отнести к задаче «силовой защиты». Она может быть использована для обеспечения наблюдения за воздушными линиями или передвижениями военно-морского флота в заданных местах. Задача D — это дистанционное зондирование, которое может использоваться при составлении карт волнения моря и ветров или отслеживания циклонов. Поскольку эти задачи используют определенный радиолокационный ресурс, то, как правило, они решаются в отрыве от основных задач радиолокационного зондирования. Задачи воздушного и наземного зондирования часто несовместимы (из-за различий в длительностях временной выдержки) и проводятся отдельно, а разработчику системы необходимо обеспечить высокий темп проведения текущего и последующих обзоров. Выбор типа задачи зависит не только от планирования ресурса и совместимости задач, но также и от пригодности применения в данных условиях распространения.

Сформированную ЗГ РЛС картину воздушной и наземной обстановки можно использовать несколькими способами. Как показано в [Cameron, 1995], данные ЗГ РЛС могут использоваться вооруженными силами непосредственно до и после обработки. В последнем случае информация, собранная за определенный период времени, объединяется и создается систематизированная база знаний о происходящем в представляющей интерес области, либо во время боевых действий информация отслеживается в режиме реального времени и представляет живую картину происходящего в воздухе и на земле. Такой подход призван помочь военному командованию в постановке задач и тактическом развертывании оборонных средств наилучшим образом. Важно отметить то, что проведение ЗГ РЛС классификации целей очень широким диапазоном характеристик чрезвычайно затруднено, например оценивание высоты цели, хотя прогресс в последнем вопросе был достигнут. Возможности наблюдения посредством ЗГ РЛС дают не только ценную информацию для своевременного предупреждения о критических ситуациях, но и сведения для дальнего наблюдения, которые могут быть использованы в качестве сдерживающего фактора эскалации конфликтов [Cameron, 1995].

Данные, получаемые ЗГ РЛС, могут использоваться в гражданских целях, для контроля морского и воздушного пространства вне диапазона обычных РЛС прямой видимости. Например, данные радиолокационных наблюдений ЗГ РЛС могут помочь правоохранительным органам бороться с трафиком наркотиков, используя мониторинг стратегических воздушных и морских маршрутов, предпочитаемых поставщиками наркотиков. Например, небольшой частный самолет, который используется в качестве транспортного средства незаконного оборота наркотиков через международные границы, может быть обнаружен и отслежен ЗГ РЛС с последующим представлением береговой охране или другим органам государственной власти сведений для перехвата и изъятия наркотиков [Ciboci, 1998].

ЗГ РЛС могут быть также использованы для обнаружения незаконной рыбной ловли в прибрежных водах и для защиты морских буровых платформ, предупреждая патрульные средства о присутствии неопознанных морских целей. Данные о наземных и морских трассах могут помочь иммиграционным и таможенным органам в охране границы, в обнаружении

судов, используемых для незаконного перевоза людей — «контрабанды людей», особенно на подходах к малонаселенной береговой линии, неохваченной другими средствами контроля. ЗГ РЛС могут также использоваться для оказания помощи в поисково-спасательных операциях.

1.2.3.2. Дистанционное зондирование

В отличие от обнаружения и отслеживания техногенных целей, радиолокационные системы ЗГ РЛС также могут быть использованы для мониторинга окружающей среды в обширных или труднодоступных регионах. Известны по крайней мере два основных применения дистанционного зондирования, в которых методы КВ-радиолокации уже внесли существенный вклад: это формирование климатологических баз данных для исследования ионосферы, а также отображения состояния моря и связанное с этим картографирование поверхностных ветров. Более подробная информация относительно взаимодействия КВ-радиоволн с ионосферой и поверхностью океана появится в главах 2 и 5 соответственно. Хотя такое взаимодействие подразумевается при описывании приложений радиолокационного наблюдения ЗГ РЛС, большую часть информации уместно упомянуть в связи с дистанционным зондированием. В данном разделе кратко обсуждаются два основных аспекта применения КВ-радаров в дистанционном зондировании. Для более углубленного знакомства с вопросом сделаны соответствующие ссылки.

В середине 1920-х годов методы, которые предшествовали современным КВ-радарам, были использованы сэром Эдвардом Эпплтоном в Великобритании и Г. Брейтом и М. Туве в Соединенных Штатах для доказательства существования ионосферы. Более конкретно Эпплтон и его коллеги в 1924 году разработали ионозонд и с тем, чтобы убедительно доказать существование электрически заряженного слоя, который Эпплтон назвал Е-слоем, начали наземное зондирование с использованием частотно-модулированных непрерывных сигналов. В следующем году Эпплтон обнаружил второй отражающий слой, который он назвал F-слоем. Примерно в то же время Брейт и Туве для исследования свойств эха, отраженного от различных слоев ионосферы, используют оборудование ВЧ-зондирования, применяя импульсные сигналы. В настоящее время радиозондирование ионосферы, основанное на принципах радиолокации, проводится регулярно. Анализ высотной структуры и морфологии ионизации верхних слоев атмосферы в широком пространственном и временном диапазонах проводится современными средствами вертикального и наклонного зондирования.

Физические модели, описывающие распространение радиоволн через ионосферу, могут использовать обращенное эхо КВ-следов для оценки профиля плотности ионизации по высоте в разное время и в разных местах. Сбор информации всемирными сетями зондирующих станций способствовал созданию эмпирических баз данных и моделей поведения ионосферы как функции времени и географических координат. Такие инструменты используются также для изучения образований и движения неоднородностей плотности электронов и перемещающихся ионосферных возмущений. Подробные свойства распространения сигнала, такие как многолучевая временная дисперсия, скорость и глубина замирания и доплеровский сдвиг и/или расширение частоты, были проанализированы с точки зрения разработки КВ-систем, использующих ионосферное распространение. Уточняющие сведения по использованию методов радиозондирования для дистанционного сбора данных о структуре и динамике ионосферы можно найти в работе [Davies, 1990].

Основу дистанционного зондирования состояния моря КВ-радары составляет то обстоятельство, что детальная структура спектра эха Доплера содержит существенную информацию о характеристиках поверхности океана и связанных с ними поверхностных ветровых полях. В частности, сформулированная при относительно мягких предположениях [Barrick, 1972a] взаимосвязь между спектром высот направленных волн на морской поверхности и структурой доплеровского спектра рассеянного эха предоставляет теоретическую основу для оценки и сопоставления океанографических параметров с помощью КВ-радаров. Основываясь на физической модели рассеивающего поля поверхности океана,

предложенной Барриком, доплеровский спектр морского эха в элементе разрешения конкретной РЛС можно использовать для создания пространственно-ориентированных океанографических баз данных. По этим данным аналитическими средствами оцениваются характеристики поверхностных ветровых полей, связанные с волнением моря.

Ионосферные КВ РЛС и на поверхностных волнах использовались для оценки спектра направленной высоты океанских волн и картографирования поверхностных ветров по скорости и направлению. Системы на поверхностных волнах, как правило, считаются более подходящими ионосферными системами для выделения океанографических параметров. Первые системы относительно более восприимчивы к разнообразию ионосферных явлений, в то время как охват последних ограничивается относительно короткими расстояниями. Качество данных ионосферных ЗГ РЛС в значительной степени определяется сложностью многолучевого распространения и «загрязнением» спектра сигналов ионосферой. При измерении скорости течений в верхнем слое океана в ионосферном режиме необходима также опорная нулевая частота (0 Гц) Доплера (например эхо от земли) для отделения доплеровских сдвигов, внесенных ионосферой. Более подробную информацию по применению КВ-радаров в дистанционном зондировании поверхности океана можно найти в книге [Anderson, 1986] и в ее ссылках.

1.3. Основное уравнение КВ-радара

Общепринятая форма уравнения радиолокации ЗГ РЛС включает в качестве аргумента отношение сигнал/шум — ОСШ и для моностатической, однопозиционной (или квази-моностатической) системы может быть представлена в виде уравнения (1.3) [Сколник, 2015]. Исходя из приведенных на рис. 1.13 определений элементов уравнения, можно отметить, что уравнение ЗГ РЛС имеет *математическую* форму, аналогичную знакомой форме уравнения (импульсно-доплеровской) СВЧ РЛС. Тем не менее между этими двумя типами РЛС есть существенные различия, которые заключаются в деталях области назначения переменных и количественных показателей отдельных членов:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{ave} G_t G_r T \lambda^2 \sigma F_p}{N_o L (4\pi)^3 R^4} \quad (1.3)$$

В настоящем разделе в целях лучшего понимания существенных различий между загоризонтными и микроволновыми радарными обсуждается каждое слагаемое в правой части уравнения (1.3). Обратите внимание, что такая форма отношения сигнал/шум в уравнении радара подходит для оценки показателей обнаружения цели в условиях *ограниченных шумов*.

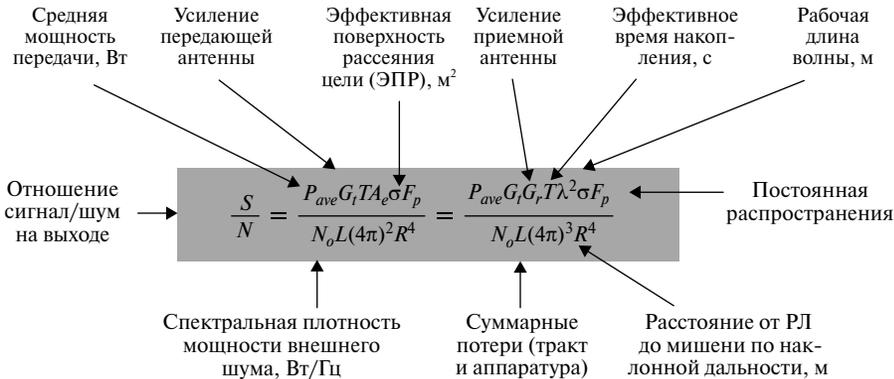


Рис. 1.13. Определение членов основного уравнения ЗГ РЛС в условиях ограничений шумами

То есть в тех случаях, когда радиальная скорость цели приводит к росту доплеровского сдвига настолько, что это достаточно для размещения эха цели в области доплеровской частоты отдельно от шума, которой превосходит паразитные отражения.

В практических ситуациях версия уравнения радара (1.3) с ограничением шума непригодна для оценки эффективности обнаружения целей. В этом случае доплеровская частота отражений от цели лежит в области спектра, в которой паразитные отражения превышают шум. В условиях ионосферного распространения со стабильной частотой сигнала ЗГ РЛС паразитные отражения, как правило, превышают шум в относительно небольшой полосе доплеровских частот (шириной в несколько герц и центром около нуля герц), характерных для судов и воздушных целей, которые, как правило, обнаруживаются на фоне мешающих, паразитных отражений и шума соответственно.

При неблагоприятных условиях распространения динамические нарушения в ионосфере со скоростями в сотни километров в час могут создавать сильные рассеивающие помехи с доплеровским расширением, которые ограничивают обнаружение движущихся медленных и быстрых целей. В условиях преобладающих паразитных, мешающих помех основным показателем эффективности обнаружения становится отношение сигнал/помеха — ОСП (SCR — Signal-to-Clutter Ratio) и следует использовать альтернативную форму уравнения радиолокации. Для удобства в этой главе будем ссылаться на уравнение (1.3), а версия уравнения радиолокации КВ РЛС с ОСП обсуждается в 5 главе.

1.3.1. Наклонная дальность

Член R в формуле (1.3) относится к длине пути ионосферного сигнала в одну сторону от РЛС до цели с отражением от ионосферы. Это расстояние известно как *наклонная дальность* трассы прохождения сигнала, в отличие от расстояния, измеренного по *поверхности Земли*. Помимо трудностей использования ионосферы в качестве среды распространения, серьезные проблемы проектирования создаются при определении чистой длины (вертикальной) пути радиолокационного сигнала ЗГ РЛС. Конкретно уравнение (1.3) показывает, что ОСШ падает в четвертой степени от наклонной дальности R , а это приводит к очень высоким потерям распространения, даже когда зона наблюдения ограничивается одним пролетом — скачком (то есть те области, которые освещаются при одном отражении от ионосферы).

Это означает, что для увеличения длины траектории R (по сравнению с обычным радаром прямой видимости) ЗГ РЛС из-за двустороннего распространения приобретает 40 дБ потерь в соотношении сигнала и шума — ОСШ (SNR). Для обнаружения целей на более дальних расстояниях ЗГ РЛС должна компенсировать эти дополнительные потери распространения. Другими словами, 40 дБ дефицита в ОСШ по сравнению с РЛС прямой видимости должны компенсироваться за счет распределения запаса мощности ЗГ РЛС с учетом других составляющих, которые входят в уравнение радиолокации и которые может изменять разработчик. Как будет видно далее в этом разделе, именно такие соображения формируют технические и эксплуатационные характеристики систем ЗГ РЛС.

1.3.2. Передаваемая мощность

Средняя мощность P_{ave} , излучаемая передающей системой ЗГ РЛС, может изменяться от примерно 10 кВт до 1 МВт и выше. Этот большой диапазон объясняет причины такого разнообразия конструкций систем, видов их назначения и требований к характеристикам. Высокая мощность передачи улучшает ОСШ и, следовательно, чувствительность радара в условиях, ограниченных действием шумов. На практике это главным образом повышает эффективность обнаружения быстро движущихся воздушных целей, особенно с небольшой эффективной отражающей площадью цели (или эффективной поверхностью рассеяния) — ЭПР (RCS — Radar Cross Section). В условиях, ограниченных действием мешающих, паразитных отражений, не ожидается, что увеличение P_{ave} приводит к улучшению

возможностей обнаружения целей. Для медленно движущихся по поверхности целей P_{ave} может быть в принципе понижена без ущерба для показателей обнаружения до цели (или эффективной поверхностью рассеяния), пока не будет достигнута точка, в которой шум начинает доминировать над мешающими отражениями во всем пространстве обзора скоростной цели. Высокая излучаемая мощность обычно дает наибольший положительный эффект при обнаружении самолетов, особенно ночью, когда частоты и размер ЭПР цели меньше, а атмосферный шум выше. Если медленные корабли, как правило, должны быть обнаружены в условиях сильных мешающих отражений, то высокая мощность излучения часто не играет существенной роли в улучшении показателей обнаружения таких целей.

Оперативные ЗГ РЛС, предназначенные в первую очередь для обнаружения и сопровождения воздушных целей, как правило, излучают сигналы со средним уровнем мощности в диапазоне от 200 до 600 кВт. Заметим, что такие величины в 100 раз (20 дБ) больше по сравнению с несколькими киловаттами средней мощности, используемой обычным радаром управления воздушным трафиком (АТС — Air Traffic Control). Согласно уравнению (1.3) это обеспечивает выигрыш ОСШ 20 дБ относительно ЗГ РЛС, что (само по себе) недостаточно для компенсации 40 дБ потерь в ОСШ из-за двунаправленного распространения. Тем не менее большая мощность на передаче существенно сокращает дефицит ОСШ в 40 дБ.

Когерентная последовательность одинаковых импульсов сигнала только с амплитудной, частотной или фазовой модуляцией может быть использована в работе ЗГ РЛС с совмещенными системами приема и передачи. Несмотря на то что конфигурация моноэлектронной, однопозиционной РЛС предоставляет ряд эксплуатационных и экономических преимуществ по сравнению с бистатической, двухпозиционной структурой, использование импульсных сигналов с низким коэффициентом заполнения способствует снижению средней мощности, которая должна излучаться реальным передатчиком с конечной *пиковой мощностью*. Поэтому в некоторых радиолокационных системах ЗГ РЛС для повышения их чувствительности при наличии шумов предпочтение было отдано непрерывным или импульсным сигналам с единичным коэффициентом заполнения. Кроме оптимального с точки зрения ОСШ использования ресурса на передаче, другие преимущества использования ЗГ РЛС непрерывных сигналов, связанные с контролем внеполосных излучений, будут представлены в главе 4.

Для эффективной работы ЗГ РЛС, как правило, требуется, чтобы во время единичного рабочего цикла радиотракты передачи и приема сигналов были физически разделены. Выбор способа повышения ОСШ при использовании таких сигналов, в свою очередь, приводит к бистатической (или квазимоноэлектронной) структуре ЗГ РЛС. Данный аспект структуры отличает большинство ЗГ РЛС от подавляющего большинства микроволновых радаров. Расстояние между позициями около 100 км над сушей, как правило, обеспечивает достаточную изоляцию между передатчиком и приемником ЗГ РЛС из-за сильного затухания сигнала при его непосредственном распространении поверхностной волной от точки передачи до точки приема. Такая конфигурация повышает чувствительность на фоне шума, но это увеличивает стоимость и исключает четкую идентичность двустороннего распространения. При квазимоноэлектронной конфигурации исходящие и входящие траектории распространения радиолуча проходят через близко расположенные друг к другу области отражения в ионосфере и часто могут рассматриваться как почти однопозиционная конфигурация из-за малых бистатических углов (как правило, менее 5 градусов).

1.3.3. Усиление антенны

Коэффициент усиления антенн (на передачу или прием) ЗГ РЛС определяется произведением коэффициентов усиления элемента и антенной решетки. Компоненты усиления решетки связаны с шириной основного лепестка диаграммы направленности и, следовательно, с пространственным (угловым) разрешением антенны. Более подробно характеристики антенн радиолокационной ЗГ РЛС обсуждаются в главе 3. В этом разделе рассмотрим

некоторые основные свойства ЗГ РЛС радиолокационных антенн в рамках уравнения (1.3), отметив, что различные антенны используются для передачи и приема в бистатической, двухпозиционной системе.

Для получения высокого коэффициента усиления и разрешения, сравнимого с обычными радиолокационными антеннами, ЗГ РЛС необходимы очень большие апертуры, так как длины волн КВ-сигнала на три порядка больше волн на сверхвысоких частотах. Например, апертура приемной антенны ЗГ РЛС может быть длиной до 3 километров, а это почти в 1000 раз больше основного размера радиолокационной антенны микроволнового диапазона обычного радара управления воздушным трафиком. Исходя из практических соображений радиолокационные антенны ЗГ РЛС реализованы исключительно в виде фиксированных многоканальных антенных массивов — решеток из элементов проволочного типа, которые позволяют синтезировать диаграмму направленности на передачу и прием электронными средствами.

Обычно приемная антенная решетка ЗГ РЛС имеет очень широкую апертуру с электронным (одновременным) управлением, формируя множество «пальцев» — лучей с высоким коэффициентом усиления и пространственным разрешением, позволяющим обнаружить цели в среде с ограниченным шумом и мешающими отражениями соответственно и, кроме этого, повысить точность локализации цели при сопровождении.

В зависимости от рабочей частоты приемной антенны ЗГ РЛС в КВ-диапазоне может иметь усиление $G_r = 25\text{--}35$ дБ и ширину (по уровню половинной мощности) главного лепестка диаграммы направленности $0,2\text{--}2$ градусов. Передающая антенна, как правило, имеет более низкий коэффициент усиления порядка $G_t = 15\text{--}25$ дБ и более широкий луч основного лепестка диаграммы шириной приблизительно $10\text{--}20$ градусов. Относительно низкий коэффициент усиления передающей антенны согласован с ОСШ для увеличения зоны одновременного (мгновенного) наблюдения или дальности наблюдения, поскольку чем шире луч, тем большая область может быть одновременно освещена ЗГ РЛС с использованием одной частоты на фиксированном временном интервале.

ЗГ РЛС на прием и передачу используют линейные антенны с апертурой, обеспечивающей обзор до 90 градусов по азимуту. Обзор может расширяться до 180 или 360 градусов с использованием нескольких линейных антенных решеток (ЛАР, ULA — Uniform Linear Array) вращением направления пеленга или двухмерной расстановки на земле решетки антенных элементов (например L-образной или Y-образной антенны). Если нет возможности независимого управления лучом по углу места, то вертикальные размеры диаграмм направленности передающей и приемной антенн должны быть относительно широкими. Вертикальная диаграмма обеспечивает высокий коэффициент усиления при углах места от почти скользкого до 40 градусов и, как правило, требуемую область наблюдения при изменении состояний ионосферы.

Диаграммы излучения КВ-антенны существенно зависят от электрических свойств подстилающей поверхности земли. Для стабилизации поверхностного импеданса и обеспечения реализации работы при малых углах места на земельных участках в основании и в передней части передающей и приемной антенных систем обычно устанавливают экраны. Для антенных систем с возможностью автономного управления диаграммой по углу места вертикальная диаграмма направленности может формироваться электронным способом при более эффективном использовании излучаемой мощности с увеличением угла места диаграммы при облучении области наблюдения. Это позволяет повысить чувствительность РЛС в таких специфических условиях ионосферы, когда область наблюдения облучается в сравнительно узком диапазоне углов места.

1.3.4. Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели

Основные размеры наблюдаемых объектов, таких как самолеты, ракеты, морские суда и вездеходы, соизмеримы с длиной волны КВ-сигналов $\lambda = 10\text{--}100$ м. Следовательно, ЭПР цели попадает в резонансную область рассеяния Рэлея ЗГ РЛС. С другой стороны, СВЧ-

сигналы имеют длину волны порядка сантиметров, что для обычных радиолокационных систем означает видимость ЭПР одних и тех же целей в оптической области. Большой разрыв между частотами сигнала приводит к принципиально разным характеристикам ЭПР цели для ЗГ РЛС и СВЧ-радаров.

Например, ЭПР самых маленьких пилотируемых или беспилотных целей соизмеримы с размерами ракет длиной 10 м и при работе ЗГ РЛС в нижней части КВ-диапазона лежат в области рэлеевского рассеяния. В этой области с уменьшением частоты (примерно до четвертой степени частоты) ЭПР цели резко падает и становится неразрешимой. И напротив, если РЛС работает вблизи высокочастотной части КВ-диапазона, то ЭПР таких целей имеет характеристики резонансной области. В области резонанса ЭПР цели может увеличиваться или уменьшаться с приближением частоты к границам диапазона, а также имеет большую, чем в области Рэля (но, как правило, выше в среднем), чувствительность к геометрии обзора.

Приведем некоторые числовые показатели. Скалярный усредненный угол ЭПР самолета такого размера, как истребитель, на характерных для ЗГ РЛС рабочих частотах может находиться в диапазоне $\sigma = 10\text{--}20 \text{ дБм}^2$ ¹. Большие самолеты, коммерческие авиалайнеры могут иметь средние значения ЭПР, $\sigma = 20\text{--}30 \text{ дБм}^2$, а крупные со стальным корпусом океанские суда могут иметь значения $\sigma = 30\text{--}40 \text{ дБм}^2$ или выше. За исключением упомянутых ранее мельчайших техногенных целей, величина ЭПР для целей с характеристиками рассеяния, которые попадают в резонансную область частот ЗГ РЛС, порой может быть больше, чем те, которые встречаются на одной и той же цели в режиме оптического рассеяния на сверхвысоких частотах [Сколник, 2015].

1.3.5. Время интеграции

Доплеровская обработка выполняется в течение интервала времени облучения — T , который также называется интервалом когерентной обработки — ИКО, равным периоду повторения сигнала, умноженному на полное число импульсов. Интервал ИКО ЗГ РЛС, как правило, изменяется от $T = 1\text{--}4$ секунд для обнаружения самолетов и $T = 10\text{--}40$ секунд или более для обнаружения судов. Эти ИКО от 100 до 1000 раз больше, чем обычно использующиеся в радиолокационных системах СВЧ, в которых время облучения, как правило, измеряется десятками миллисекунд. В сравнении с микроволновой РЛС это дает ЗГ РЛС дополнительный выигрыш от шума в 20–30 дБ. В сочетании с относительным выигрышем 20 дБ в средней мощности на передаче эти два фактора эффективно компенсируют дефицит в 40 дБ, обусловленный потерями в тракте распространения ЗГ РЛС при работе на большую дальность.

Стоит заметить, что ЗГ РЛС могут использовать такие длинные ИКО, не сталкиваясь с проблемой низкой разрешающей способности по дальности или азимуту. Длинные интервалы времени облучения ЗГ РЛС также способствуют чрезвычайно высокой разрешающей способности доплеровской частоты. Высокая доплеровская разрешающая способность необходима для разделения эха медленно движущейся цели от мешающих, маскирующих отражений от поверхности, особенно при обнаружении кораблей. Например, при самой низкой разрешающей способности доплеровской частоты 0,1 Гц в режиме обзора поверхности на несущей частоте 15 МГц обеспечивается радиальное разрешение скоростей 1 м/с (3,6 км/ч или 1,9 узла). Такая же степень разрешения скорости может быть получена при разрешающей способности доплеровской частоты 20 Гц (время обзора $T = 50$ мс) на несущей частоте 3 ГГц. Кроме этого, высокая доплеровская разрешающая способность нужна ЗГ РЛС для того, чтобы сформировать независимые группы многолучевого распространения, которые возникают от разных целей в том же самом или аналогичном пространстве ячейки разрешения, особенно в задачах авиационного обнаружения.

¹ дБм² — децибел относительно одного квадратного метра, характеризует эффективность отражения от поверхности. — Прим. пер.

1.3.6. Общие потери

Общие потери $L = L_p L_s$ в уравнении (1.3) включают в себя потери распространения L_p и стационарные потери L_s . При ограничении рассмотрения тракта с одним пролетом или «скачком», то есть без отражения от поверхности Земли, потери ионосферного распространения представляют результат двух основных процессов, известных как поглощение с изменением траектории (поглощение в отклоняющемся слое ионосферы — отклоняющее поглощение) и поглощение без изменения траектории (неотклоняющее поглощение). Последний вид происходит преимущественно в слое D ионосферы на высоте около 60–90 км. В слое D энергия падающей КВ-волны не отражается и несильно отклоняется, но при этом частично поглощается из-за столкновения возбужденных распространяющейся электромагнитной волной электронов с нейтральными молекулами воздуха. В диапазоне КВ степень поглощения без изменения траектории с хорошей точностью обратно пропорциональна квадрату рабочей частоты и, как правило, самая высокая в середине дня, когда плотность ионизации в D-области достигает своего максимума. При нормальных условиях (слой D в средних широтах) потери прохождения в обе стороны могут составлять $L_p = 3–6$ дБ. На характерных для ЗГ РЛС рабочих частотах и при распространении с одним скачком таких значений потерь можно ожидать при их усреднении за день.

Ночью в средних широтах слой D фактически исчезает и поглощение без изменения траектории часто становится пренебрежимо малым. С другой стороны, поглощение с отклонением происходит, когда эквивалентная вертикальная составляющая частоты радиоволны близка к критической частоте отражающего слоя. Этот тип поглощения и определение этих частот рассматриваются в следующей главе. Нижний слой также может мешать сигналам РЛС проходить в более высокие слои ионосферы и, следовательно, ограничивает энергию сигналов, которые могут распространяться на большие расстояния. Это явление, известное еще как «подушка», также обсуждается во 2 главе. При больших углах места неотклоняющее поглощение имеет место и при прохождении E-слоя (при отражении от F-слоя).

Стационарные потери в системе ЗГ РЛС аналогичны потерям в трактах аппаратуры микроволновой РЛС. Они включают в себя потери в аналоговых частях приемной системы (например антенны и блоки ВЧ-аппаратуры), а также потери цифровых этапов обработки сигналов (например окна, используемые для контроля утечек спектра спектральных составляющих). Стационарные потери могут быстро накапливаться до $L_s = 9–12$ дБ и более, особенно на низких боковых лепестках частотной характеристики, используемой для сжатия импульса, обработки Доплера и формирования диаграммы направленности антенной решетки. Эту оценку потерь в стационарной части системы можно добавить к оценкам потерь днем и ночью при распространении (за исключением поглощения с изменением траектории и подушки) и получить укрупненное, но типичное значение суммарных потерь L от 9 до 18 дБ.

1.3.7. Постоянная распространения

Коэффициент потерь F_p объединяет в себе различные явления, наблюдаемые при распространении волн и которые более основательно обсуждаются во 2 главе. Кратко этот член объединяет в себе: (1) влияние эффекта Фарадея на потери рассогласования по поляризации (несоответствие между простыми и экстраординарными магнитоионными компонентами), которые изменяют поляризацию сигнала во время двухстороннего ионосферного тракта, (2) фокусировку и дефокусировку лучей, падающих под большими и малыми углами, а также интерференцию неразличимых из-за отражений в различных слоях атмосферы составляющих многолучевого распространения сигнала и (3) замирания, вызванные флуктуацией неравномерности плотности электронов в слоях E и F ионосферы на высотах 100–600 км. При благоприятных условиях постоянная распространения может давать усиление плотности энергии $F_p = 3–6$ дБ.

1.3.8. Шум окружающей среды

В уравнении ЗГ РЛС в спектральной плотности мощности шума N_o доминирует вклад внешних источников, тогда как в радиолокационных системах СВЧ в N_o , как правило, преобладает собственный (тепловой) шум в приемном тракте станции. Спектральная плотность мощности внешнего фонового шума естественных источников, которая наблюдается в той части спектра КВ-диапазона, которая не занята другими пользователями, часто превышает уровень внутреннего шума приемника ЗГ РЛС на 10–30 дБ. В местах с низким уровнем шума естественных источников среди атмосферных, как правило, доминируют фоновые шумы в нижнем диапазоне ВЧ, а галактический шум, как правило, доминирует в верхней части ВЧ-диапазона. Принципиальное различие между КВ и СВЧ РЛС заключается в том, что величина N_o (и, следовательно, ОСШ) является функцией времени и существенно изменяется в течение суток и времени года, а также в зависимости от места расположения приемника, значения частоты, азимута и угла места диаграммы направленности антенны. Зависимость от азимута и угла места диаграммы можно наблюдать при крайне высокой направленности приемной антенны ЗГ РЛС.

В отдаленных районах спектральная плотность фонового шума в незанятом частотном канале в середине КВ-диапазона и в неизменных условиях на протяжении дня может составить величину, примерно равную -185 дБВт/Гц. Непреднамеренное воздействие искусственного излучения электрического оборудования или внеполосное излучение других пользователей в КВ-диапазоне неизбежно поднимает уровень фонового шума. Близость приемной станции к населенным пунктам может поднять спектральную плотность «фонового шума» более чем на 10 дБ в сельской местности и на 20 дБ и выше в жилых районах по сравнению с уровнем шума удаленных районов. Это подчеркивает важность размещения приемника ЗГ РЛС подальше от городов и промышленных районов.

Важно отметить, что спектральная плотность внешнего шума, представленная членом N_o в уравнении радара, не совсем независима от усиления приемной антенны G_r . Напомним, что коэффициент усиления приемной антенны выражается как $G_r = G_e \cdot G_a$, где G_e — усиление диаграммы направленности отдельного элемента антенной решетки (предполагается одинаковым для всех элементов), а G_a — множитель решетки, обусловленный электронным процессом управления направленностью луча. Так как диаграмма направленности отдельного элемента решетки достаточно широка, то она фактически одинаково усиливает и сигналы, и шум, а это означает, что увеличение G_e (а следовательно, и G_r) ведет к соответствующему увеличению N_o . Исходя из этого, пришли к выводу, что антенные элементы, хорошо согласованные с рабочей частотой на прием, не дают никакого выигрыша в ОСШ.

В случае пространственного распределения внешнего шума в виде «белого шума» этот вывод явно оправдан. На практике единственная составляющая усиления приемной антенны, которая может увеличить ОСШ в уравнении радара, — это множитель решетки (коэффициент установки), который зависит от числа элементов и их относительного размещения. Однако если внешний шум обладает достаточной пространственной структурой и приемные элементы хорошо согласованы с рабочей частотой, то установочный коэффициент может, в принципе, быть использован для снижения пространственного «цветного» внешнего шума, принимаемого из других направлений, отличающихся от направления полезного сигнала, до порогового уровня собственных шумов. Этот тонкий момент потенциально может привести к важным последствиям, связанным с улучшением ОСШ с помощью лучшего подбора элементов приемной антенны.

1.3.9. Численный пример

В первом приближении вычисление ОСШ на выходе для конкретного случая ЗГ РЛС может быть выполнено непосредственной подстановкой в уравнение (1.3) типичных числовых значений переменных. Уравнение (1.3) удобно представить в логарифмической форме

уравнения (1.4), в котором числовые значения всех членов выражены в логарифмических единицах, то есть в децибелах. Полученное в итоге ОСШ не следует рассматривать в качестве точного показателя реальной радиолокационной системы ЗГ РЛС, а только как простое упражнение, которое на простом примере дает лишь общее представление о практической реализуемости обнаружения цели:

$$\frac{S}{N} = \{P_{ave} + G_r + G_t + T + \lambda^2 + \sigma + F_p\} - \{10 \log(4\pi)^3 + L + N_o + R^4\} \quad (\text{дБ}). \quad (1.4)$$

Детальный анализ характеристик ОСШ нуждается в использовании сложных моделей радиолокационных систем, каналов распространения, рассеяния от целей и шума окружающей среды. Такие модели должны одновременно учитывать все статистические свойства всех членов уравнения ЗГ РЛС. Например, климатологические модели, опирающиеся на эмпирические базы данных, могут быть использованы как информационные справочники по состоянию ионосферы, условиям окружающей среды и статистическим данным шумов. Такой подход был использован [Root, Headrick, 1993], а также [Headrick, Root, Thomason, 1995] для получения реалистичных оценок работы ЗГ РЛС, учитывающих особенности места их размещения.

Рассмотрим ЗГ РЛС со средней мощностью передачи $P_{ave} = 200$ кВт (53 дБВт), работающую на несущей частоте $f_c = 20$ МГц, при коэффициенте усиления передающей антенны $G_t = 20$ дБ и коэффициенте усиления приемной антенны $G_r = 30$ дБ. Рабочая длина волны $\lambda = 15$ м ($\lambda^2 = 24$ дБм²). Предположим, что состояние ионосферы днем позволяет на этой частоте облучать область, содержащую одну цель при наклонной дальности $R = 3000$ км ($R^4 = 259$ дБм⁴). Это соответствует расстоянию по земле около 2900 км при распространении с одним пролетом — скачком — и виртуальной высоте отражения $h_v = 300$ км. Предположим, что в зоне обзора присутствует истребитель, который имеет усредненную ЭПР, равную $\sigma = 15$ дБм², и что на интервале когерентной обработки (ИКО) его радиальная скорость может считаться постоянной. Доплеровский сдвиг эха цели, как предполагается, достаточно большой для того, чтобы дать хорошее разрешение на фоне мешающих отражений от поверхности ИКО, равной $T = 1$ сек. ($T = 0$ дБсек).

Чтобы было ясно, предположим, что обнаружению эха цели противодействуют возмущения окружающей среды, которые после доплеровской обработки превышают внешний фоновый шум. Предполагается режим двустороннего распространения с выигрышем от фокусировки $F_p = 3$ дБ, а потери в тракте распространения за счет поглощения $L_p = 6$ дБ. Объединяя эти потери на трассе с потерями в системе $L_s = 10$ дБ, получим величину полных потерь $L = 16$ дБ. Номинальное значение спектральной плотности мощности фонового шума на входе приемника на протяжении полосы частот свободного канала около 20 МГц можно принять равным $N_o = -185$ дБВт/Гц. Подставляя эти числовые значения в формулу (1.4) и вычисляя, как показано в (1.5), получим значение ОСШ на выходе, равное 22 дБ. А если прочитать, что на «обратной стороне открытки», то расчет показывает возможность обнаружения воздушной цели с использованием уровня порога принятия решения на 15 дБ выше порогового уровня шумов, поддерживая при этом приемлемый уровень ложных тревог:

$$S/N = \{53 + 20 + 30 + 0 + 24 + 15 + 3\} - \{33 + 16 - 185 + 259\} = 22 \text{ дБ}. \quad (1.5)$$

1.4. Номинальные возможности системы

Уравнение радара не дает информации о минимальном и максимальном диапазоне действия радиолокатора ЗГ РЛС, о размерах одновременно освещаемой зоны DIR, размере отдельных элементов (ячеек) разрешения в DIR или географической точности, с которой система может идентифицировать обнаруженные цели. Для полного понимания

номинальных возможностей загоризонтных радиолокационных систем необходимы количественные показатели упомянутых аспектов их работы. В данном разделе перечислены основные факторы, которые ограничивают диапазон зоны наблюдения и размеры зоны следа DIR, а также разрешающую способность и точность ЗГ РЛС.

1.4.1. Минимальное и максимальное расстояния

Способность ионосферы отражать ВЧ-радиоволны обратно на Землю зависит от ряда факторов, основными из которых являются частота сигнала и угол, при котором волна сигнала падает на ионосферу. Эта зависимость дальности распространения при отражении от одного слоя ионосферы один раз (то есть за один скачок или один пролет) проиллюстрирована на рис. 1.14. На самом деле процесс сигнала отражения от ионосферы имеет много тонкостей, не представленных на рис. 1.14, на котором только предпринята попытка проиллюстрировать основную мысль. Более подробное описание ВЧ-сигнала отражения от ионосферы представлено в главе 2.

На рис. 1.14а показано три луча — три сигнала с одинаковой частотой, но выпущенные под разными углами возвышения (углами места) к горизонту. Лучи, выпущенные на больших углах места, возвращаются на Землю на малом удалении от передатчика, так как точки отражения расположены в более глубоких слоях ионосферы, в которых относительная электронная плотность выше. Лучи, которые падают на ионосферу с углами больше некоторого (в зависимости от частоты) критического угла, практически не преломляются в направлении Земли, проходят сквозь ионосферу и покидают ее по искривленной траектории. В простом примере, показанном на рис. 1.14а, предполагается частота сигнала f_1 выше максимальной частоты, которую может отразить ионосфера при вертикальном падении (т. е. на критической частоте слоя).

При работе на частоте выше критической и при стабильном состоянии ионосферного отражения существует конечное минимальное расстояние от передатчика, ближе которого лучи не могут возвратиться на Землю. Это минимальное расстояние по земле соответствует лучу с углом возвышения ψ_2 на рис. 1.14а и известно как *skip-ray* — «проскок луча» (выше которого не наблюдается отражения от ионосферы на данной частоте). При нормальном ионосферном распространении расстояние меньше этой минимальной горизонтальной

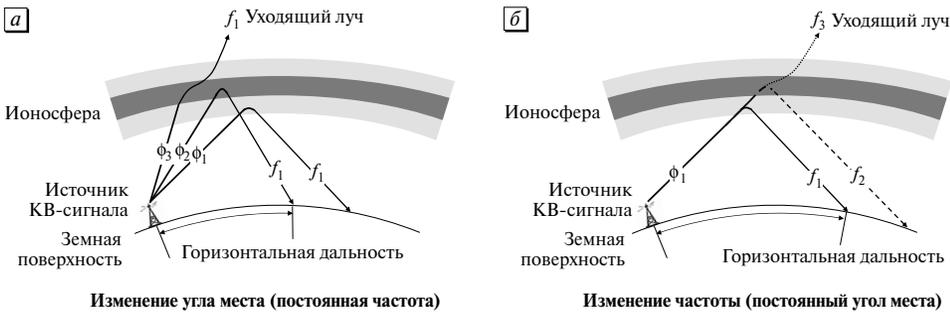


Рис. 1.14. Плотность электронов максимальна в средней части ионосферы (выделена темно-серым цветом) и снижается на более высоких и на более низких высотах (светло-серый цвет). При неизменной частоте сигнала (сплошные линии) лучи с большими углами места отражаются от больших высот ионосферы с большей плотностью электронов и распространяются на более короткое расстояние по земле до тех пор, пока не будет достигнут критический угол, при котором луч проходит через ионосферу. При постоянном угле места КВ-сигнал отражается от ионосферы на большей высоте, в которой электронная плотность больше, и распространяется на большее расстояние по земле (горизонтальная дальность) до тех пор, пока не происходит проникновение (т. е. когда частота сигнала такова, что угол возвышения представляет критический угол)

дальности называют *границей отсутствия облучения*. Площадь на поверхности Земли, которая охватывает район, окружающий местоположение передатчика до границ отсутствия облучения по всем направлениям, известна под названием «мертвая зона». ЗГ РЛС не может вести обзор внутри «мертвой» зоны потому, что плотность мощности сигналов, облучающих этот регион, слишком мала для эффективной работы. Следует отметить, что потенциально для обзора участков «мертвой» зоны могут быть использованы поверхностные волны.

Дальность до границы «мертвой» зоны фактически определяет минимальную горизонтальную дальность наблюдения ЗГ РЛС. Дальность отсутствия облучения зависит от частоты сигнала и состояния ионосферы. В принципе, для обеспечения облучения поближе к РЛС дальность можно сократить за счет снижения частоты сигнала. Однако на практике использование частот вблизи нижнего края ВЧ-диапазона нежелательно, так как неблагоприятное сочетание различных факторов может привести к снижению эффективности ЗГ РЛС на низких рабочих частотах¹. Плотность мощности сигнала, отраженного на Землю, как правило, достигает максимума непосредственно сразу за «мертвой» зоной. Если ОСШ рассматривается как наиболее важный показатель, то желательно для обзора ЗГ РЛС использовать области, лежащие недалеко от границы «мертвой» зоны.

У большинства ионосферных ЗГ РЛС для обеспечения приемлемой чувствительности обнаружения и точности регистрации координат граница «мертвой» зоны находится обычно на расстоянии примерно 1000 км. Эта граница представляет собой номинальное значение минимальной горизонтальной дальности системы и может браться за начало обратного отсчета при определении места установки ЗГ РЛС в качестве ближайшей точки предполагаемой зоны обзора. Такое ограничение на выбор площадки может представлять серьезные проблемы для небольших по размеру стран, если только представляющая интерес зона наблюдения не выходит далеко за государственные границы. Поскольку номинальное значение минимальной горизонтальной дальности относится к номинальному значению частоты в нижней части диапазона, которая ограничивает режим работы ЗГ РЛС с непрерывным генерированием сигналов, то ее значение постоянно и при изменении условий распространения может доходить до сотен километров. В этом состоит отличие от обычных микроволновых РЛС, у которых минимальная дальность чаще всего постоянная и определяется длительностью излучаемого импульса, в течение которого приемник должен оставаться закрытым.

Как показано на рис. 1.14б, при неизменном угле места с увеличением частоты сигнала поднимается и высота отражающего слоя в ионосфере (в котором плотность электронов больше). При этом точка отражения находится на значительной горизонтальной дальности. На рис. 1.14б показано также, что при постоянном угле возвышения существует максимальная частота, выше которой луч не будет отражаться при наклонном падении и, пройдя сквозь ионосферу, исчезает в пространстве. Таким образом, максимальная горизонтальная дальность ионосферного распространения с одним скачком определяется излучением сигналов (с достаточным усилением) под самым низким углом места выхода луча антенны и действующей высотой отражения в ионосфере, от которой эти лучи отражаются при максимальной частоте, выше которой происходит проникновение.

Например, луч сигнала с углом места 5 градусов (направленность передающей антенны по отношению к плоскости Земли) после однократного отражения от ионосферы на действующей (виртуальной) высоте 300 км возвращается на Землю на расстоянии около 3000 км. На практике максимальная горизонтальная дальность ионосферного распространения с однократным отражением для сезонно-суточного изменения состояния ионосферы может изменяться на 1000 км и более. При условии, что передающая и приемная антенны имеют достаточное усиление на низких углах места в 5 градусов, максимальная горизонтальная дальность ЗГ РЛС номинально составляет около 3000 км.

¹ По ряду причин, которые разъясняются в 3 главе, от работы ЗГ РЛС на частотах намного ниже примерно 7 МГц часто отказываются.

Типовая дальность облучения ионосферной ЗГ РЛС имеет диапазон, заключенный, как правило, между 1000 и 3000 км. В принципе при благоприятных условиях распространения максимальная граница, как правило, может быть расширена почти до 4000 км при условии, что антенны имеют высокий коэффициент усиления при очень низких углах места. С другой стороны, тип ЗГ РЛС, который позволяет использовать относительно низкие рабочие частоты КВ-диапазона, потенциально позволяет сократить минимальный предел диапазона, скажем, до 500 км. Тем не менее попытки увеличить зону облучения ЗГ РЛС одним скачком за пределы типовых значений минимальных и максимальных границ часто происходят за счет снижения качественных показателей.

Типовая зона облучения ЗГ РЛС охватывает 1000–3000 км, что соответствует ионосферному распространению с помощью одного отражения от ионосферы (скачка) вблизи средней точки траектории. Поверхность Земли рассеивает значительную часть падающей энергии вперед после первого скачка. Это направленное вперед отражение может быть отражено от ионосферы вторично и вернуться на Землю после двух скачков на расстоянии 6000 км или более. Этот процесс может повторяться, создавая процесс распространения с множеством скачков. Распространение с несколькими скачками и другие экзотические ионосферные режимы, которые будут описаны позже, позволяют КВ-сигналам распространяться на чрезвычайно большие расстояния, в том числе по всему миру. Тем не менее с каждым скачком двусторонний тракт распространения вносит большие потери и сильно ослабляет сигнал. Многократное прохождение через ионосферу (в частности «солнечный» слой D) и промежуточные отражения от Земли также сильно рассеивают энергию сигнала. По этим соображениям ионосферные ЗГ РЛС, как правило, дают удовлетворительные характеристики при ионосферном распространении с одним скачком при горизонтальной дальности приблизительно от 1000 до 3000 км.

1.4.2. Зона выдержки интервала зондирования

На рис. 1.15 показаны веерные траектории ионосферного распространения КВ-сигналов, излучаемых с постоянной частотой, но с изменением угла места, и поэтому лучи входят в ионосферу под разными углами и взаимодействуют со слоями с различной плотностью электронов. Траектории распространения различных сигналов были рассчитаны с использованием разработанного DSTO программного обеспечения под названием PHaRLAP [Severa, 2010]. Сразу после «мертвой» зоны плотность мощности сигнала (интенсивность облучения) резко возрастает и, как правило, именно в этой части достигает своего максимального значения благодаря явлению, известному как «зона фокусировки». За отметкой дальности с максимальной интенсивностью облучения плотность энергии сигнала, падающего на Землю, по мере увеличения дальности, как правило, монотонно убывает.

При большой дальности (далеко от края «мертвой» зоны) интенсивность облучения слабеет и в конечном итоге становится слишком слабой для эффективной работы ЗГ РЛС; а внутри «мертвой» зоны плотность мощности сигнала при нормальном состоянии ионосферы почти полностью исчезает. Таким образом, для определенных частот существует полезный интервал дальности, в котором плотность мощности сигнала отражается от поверхности Земли в объеме, достаточном для эффективной работы ЗГ РЛС. Этот интервал определяет глубину по дальности области обзора, одновременно покрываемой лучом в области наблюдения ЗГ РЛС. Напомним, что область обзора, одновременно покрываемая лучом, упоминалась также как область наблюдения или «след» передатчика в номенклатуре ЗГ РЛС. Среди других факторов диапазон глубины зависит от состояния ионосферы, рабочей частоты и усиления диаграмм направленности приемной и передающей антенн на заданном угле места. На практике глубина распространения обычно колеблется между 500 и 1000 км, хотя временами ионосфера может обеспечивать гораздо более широкий диапазон расстояний, особенно в дневное время и для зондирования целей с большой ЭПР.

С другой стороны, размер поперечного сечения области наблюдения определяется шириной основного лепестка передающей антенны по азимуту и однозначно увеличивается

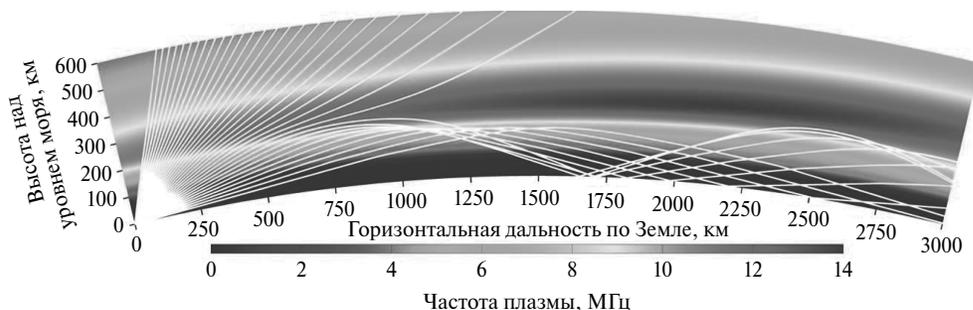


Рис. 1.15. Траектории прохождения сигналов в виде веера траекторий распространения сигналов, излучаемых передатчиком под разными углами (генерируются с использованием разработанного DSTO алгоритма трассировки лучей PHaRLAP). На экране отчетливо просматриваются уходящие лучи, возникающие при больших углах места, а также «мертвая» зона, которая в этом случае простирается по земле примерно на 1600 км. Луч с самым низким углом места первый раз возвращается на Землю на расстоянии, чуть большем 3000 км. На рисунке показаны также вторичные скачки отражений, которые распространяют сигнал далеко за пределы горизонтальной дальности 3000 км по Земле. © Commonwealth of Australia 2011

пропорционально расстоянию. Во многих существующих системах основной лепесток диаграммы направленности луча передатчика ЗГ РЛС намеренно расширен с тем, чтобы вести поиск в более широкой области, но в то же время поддерживая усиление, достаточное для обнаружения цели в шумах. Лучи диаграмм направленности передающих антенн ЗГ РЛС имеют номинальную ширину около 10 градусов по азимуту в зависимости от размера апертуры данной антенны, рабочей частоты и направления излучения. В результате области наблюдения имеют в поперечном сечении размер примерно 200–500 км и глубину облучения 1000–3000 км. В итоге зона DIR ЗГ РЛС может приблизительно составлять 500–1000 км по горизонтальной дальности и 200–500 км по ширине поперечного сечения. Размеры DIR определяют размер зоны обзора, в которой цели могут быть одновременно облучены и, возможно, обнаружены загоризонтной РЛС с использованием одной частоты.

Мгновенная зона обзора может быть перемещена по общей области наблюдения ЗГ РЛС с помощью электронного управления лучом передатчика по азимуту. ЗГ РЛС, использующие апертуру одной линейной антенны на передачу (и прием), обычно обеспечивают 90 градусов охвата по азимуту и ± 45 градусов от биссектрисы зоны наблюдения. В то же время несущая частота радиолокационного сигнала может быть увеличена или уменьшена, чтобы сместить область наблюдения соответственно дальше или ближе в пределах минимальной и максимальной дальности обнаружения системы. Основываясь на указанных выше номинальных размерах DIR, для наблюдения во всей зоне в диапазоне (1000–3000 км) используют 2–4 передатчика с шагом мгновенных зон обзора по глубине расстояний на 500–1000 км¹, при этом границы зон DIR расположены вплотную друг к другу по расстоянию. Для контроля сектора в 90 градусов по азимуту может потребоваться десять или более лучей, при этом все главные лепестки диаграмм направленности должны быть расположены вплотную друг к другу. Таким образом, для радиолокационного облучения заданной области наблюдения ЗГ РЛС может потребовать 40 или больше DIR.

Поскольку РЛС требуется определенное время для когерентного накопления по каждой мгновенной области наблюдения и для эффективного сопровождения возможного маневрирования целей, необходимо достаточно быстро повторно просматривать эти регионы, поэтому РЛС одновременно могут отсканировать только ограниченное количество различных участков общей зоны наблюдения. Как следствие, одна ЗГ РЛС вообще

¹ На практике диапазон дальностей DIR может быть в разы меньше из-за ограничений обработки в реальном масштабе времени и оператор обнаружит ограничение раньше, чем проявится подлежащая обнаружению цель (физическое явление).

не может одновременно вести наблюдение по всей зоне наблюдения без ухудшения чувствительности системы. Поэтому ЗГ РЛС работают по графику, выполняя одну или несколько задач в ограниченном числе зон обзора, расположенных в выбранных областях общей области наблюдения. График просмотра приоритетных областей предусматривает чередование РЛС во времени и в порядке облучения, используя, в свою очередь, политику сканирования, которая определяется требованиями к скорости повторного посещения области, приоритетом каждой задачи или ее назначением.

1.4.3. Разрешение и точность

Зоны обзора DIR ЗГ РЛС, в свою очередь, состоят из множества ячеек разрешения, которые разбивают мгновенную зону обзора по дальности и азимуту. Разрешающая (групповая) способность по дальности ΔR определяется по половине времени задержки, умноженной на скорость света в свободном пространстве c , известной формулой $R = c/2B$, где B — ширина полосы зондирующего сигнала радара. В диапазоне КВ полоса частот, которая может успешно использоваться для работы РЛС ЗГ, ограничивается в первую очередь загрузкой данной полосы другими пользователями, а это ограничивает доступ к свободным каналам с относительно малой шириной, обычно не намного большей, чем 5–10 кГц ночью и 20–30 кГц в течение дня. Второе (физическое) ограничение связано с частотной дисперсией ионосферы, которая резко снижает когерентное (устойчивое) ионосферное распространение в полосе пропускания больше примерно 100 кГц. На практике ЗГ РЛС чаще всего можно использовать узкую полосу пропускания, порядка 5–50 кГц. Поэтому разрешающая способность по дальности в ЗГ РЛС может колебаться от 3 до 30 км. Это, как правило, в 1000 раз хуже, чем разрешение по дальности в обычной микроволновой РЛС.

Разрешение по азимуту $\Delta\theta$ изменяется обратно пропорционально длине апертуры приемной антенны D , измеренной в длинах волн λ . Для линейной протяженности антенны ширина классического луча диаграммы направленности по половинной мощности (–3 дБ), направленной в пределах ± 45 градусов по азимуту от биссектрисы зоны наблюдения, может быть аппроксимирована при $\Delta\theta = \lambda/D$ радианах. Например, линейная апертура длиной 3 км в полосе частот КВ обеспечивает разрешение от 0,2 до 2,0 градусов. Так, при средней частоте в КВ-диапазоне $f_c = 15$ МГц ($\lambda = 20$ м) для ЗГ РЛС, облучающей центр зоны наблюдения ($R = 2000$ км), 3-километровая апертура дает угловое разрешение $\Delta l = r\Delta\theta$, приблизительно равное 15 км, что эквивалентно разрешению по дальности $\Delta R = c/2B$, характерному для ЗГ РЛС с шириной полосы частот $B = 10$ кГц.

Как показано на рис. 1.16, такая комбинация апертуры и ширины полосы частот обеспечивает размеры ячейки разрешения ЗГ РЛС, которые имеют размеры на поверхности Земли примерно 15 км в длину и 15 км в поперечном сечении при назначенной выше рабочей частоте и горизонтальной дальности. В этом случае площадь каждой ячейки разрешения равна 225 миллионов квадратных метров. Такая очень большая площадь обратного рассеяния и является одним из основных источников, создающих очень высокое превышение, порядка 40–80 дБ, мощности помех над мощностью полезного сигнала. Чаще всего эти ячейки не квадратные, а удлиненные в том или другом измерении в зависимости от относительных величин разрешения по дальности и поперечному сечению. На рис. 1.16 показан пример области обзора, одновременно покрываемой лучом ЗГ РЛС глубиной 900 км (60 сечений по дальности) и шириной 300 км (20 сечений по азимуту), что дает в общей сложности 1200 ячеек пространственного разрешения.

После того как цель обнаружена в определенной ячейке с известным азимутом и дальностью, для определения местоположения цели требуется преобразование радиолокационных координат в координаты географического положения. Из-за неоднозначности прохождения КВ-сигналами ионосферы это преобразование далеко от прямолинейного пересчета одних координат в другие. В режиме реального времени информация о состоянии тракта распространения сигналов предоставляется вспомогательными датчиками.

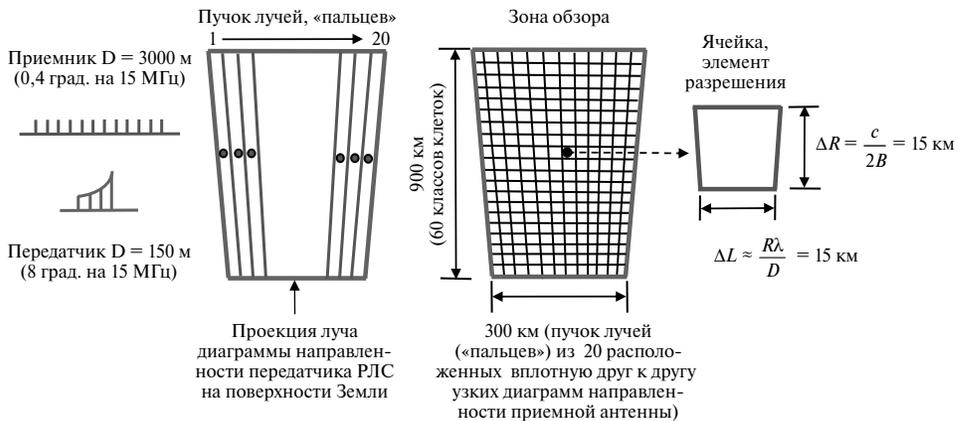


Рис. 1.16. Пример расчета (определения) области обзора, одновременно покрываемой лучом ЗГ РЛС по дальности, в поперечном сечении (по ширине). На двух изображениях слева показаны апертуры передающей и приемной антенны и пучок из 20 лучей с высоким разрешением, формируемые на прием по проекции луча диаграммы направленности передатчика на поверхности Земли. Два изображения справа показывают ячейки элементов разрешения (растра) в рамках зоны DIR и укрупненный вид одной ячейки разрешения с размерами по дальности и азимуту при полосе $B = 10$ кГц и дальности $R = 2000$ км. © Commonwealth of Australia 2011

Эта информация совместно с данными регистрационных таблиц координат и сведениями о радиолокационной дальности и угле прихода сигнала на позицию ЗГ РЛС используется для вычисления координат цели по широте и долготе. Больше на тему совмещения координат будет сказано в главе 4.

Что касается точности ЗГ РЛС, то термин «точность» определяет то, насколько близко обнаруженная цель (или точка отражения) находится к ее истинной позиции в географических координатах. Если эхо цели регистрируется относительно идентифицируемых отражений от известной опорной точки — ориентира или репера (KRP — Known Reference Point), который находится в непосредственной близости от цели, и сигналы от цели и репера принимаются одновременно одним и тем же радаром, то точность может быть в пределах 5 км. В отсутствие репера диапазон абсолютной погрешности может составлять около 10–20 км при условии, что в режиме реального времени доступна информация о текущем состоянии и характеристиках канала распространения. Угловая погрешность, как правило, менее 0,5 градуса, но при неблагоприятных условиях, особенно из-за наличия рефракции и волноводного эффекта, вызванных возмущениями в ионосфере, может превысить 1 градус.

Способность ЗГ РЛС обеспечить раннее предупреждение в дальней зоне наблюдения обеспечивается, очевидно, за счет снижения пространственного разрешения и точности определения местоположения цели по сравнению с обычными микроволновыми радаром. Несмотря на то что загоризонтные РЛС неспособны обеспечить детальную информацию о позиции цели, их точность, как правило, достаточна для своевременной подачи команд на радары прямой видимости контролируемой цели. Это придает особое значение возможностям координированного использования дополнительных типов датчиков в интегрированных системах наблюдения, что может привести к более эффективным результатам (и к более эффективному использованию информационных ресурсов), чем в системах, рассчитанных на одиночное использование одного типа датчиков. Номинальные характеристики и возможности гипотетической загоризонтной ионосферной РЛС, которая представляет действующие в настоящее время системы, приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Номинальные характеристики и потенциальные возможности типичных образцов ионосферных загоризонтных радиолокационных систем ЗГ РЛС (Skywave OTH radar), составленные на основе существующих систем Австралии и США

Параметры/ Характеристики	Номинальные значения	Примечания
Рабочие частоты	3–30 МГц	В течение дня выше, например 15–20 МГц, а ночью ниже, например 7–12 МГц
Длины волн	10–100 м	Соизмеримы с размерами лоцируемых целей, например воздушных и морских судов
Зона наблюдения	6–12 млн км ²	Одновременный охват территории зоной мгновенного обзора DIR ~200 000 км ²
<i>Ионосфера</i>		
Высота слоя	100–600 км	Требуются режим реального времени и мониторинг с учетом особенностей расположения площадки/платформы с использованием специализированной сети ионозондов
Количество мод распространения	1–4	Доминирующие моды распространения, которые РЛС, как правило, определяет для одной цели
Быстрая перестройка частоты	5:1	Перестройка необходима для изменения времени сканирования (DIR) по дальности при изменении состояния ионосферы
<i>Зона наблюдения</i>		
Минимальный диапазон	500–1000 км	Определяется размером зоны молчания, «мертвой» зоны (т. е. отсутствия приема) на самой низкой частоте радара ЗГ РЛС
Максимальный диапазон	3000–4000 км	Для одного пролета (скачка) трактов ионосферного распространения и величины коэффициента усиления передающей/приемной антенн при малых углах возвышения
Глубина зоны DIR	500–1000 км	Зависит от условий распространения в ионосфере и от рабочей частоты
<i>Покрывтие по азимуту</i>		
Линейная апертура	60–90 град.	Электронное управление лучом используется для сканирования TX- и RX-массивов по азимуту (угол конуса)
Апертура 2D	180–360 град.	Зависит от конструкции элементов и геометрии массива (например L-образная форма, Y-образная)
Площадь отражения на интервале опроса – DIR	200–500 км	Определяется шириной главного лепестка передающей антенны и расстоянием до района наблюдения
<i>Передача</i>		
Размер апертуры	100–150 м	Широкий главный лепесток диаграммы увеличивает величину одновременного облучения на интервале опроса (DIR), снижая при этом отношение сигнал/шум (ОСШ)
Раствор луча по азимуту	8–12 град.	Требуется формирование небольшого числа лучей для контроля всей зоны наблюдения по азимуту

Таблица 1.3. (Продолжение)

Параметры/ Характеристики	Номинальные значения	Примечания
Размер луча диаграммы направленности по углу места	~40 град.	Требуются для облучения на различных расстояниях в пределах всей зоны наблюдения
Коэффициент усиления антенны	15–25 дБ	Компромисс между дальностью облучения и периодом повторения при сопровождении цели
Средняя мощность	200–600 кВт	Обнаружение и сопровождение быстро движущихся целей с малой эффективной площадью рассеивания ЭПР в шумах
Прием		
Размер апертуры	2–3 км	Широкая приемная апертура повышает чувствительность радара при наличии шумов и паразитных отражений
Размер луча диаграммы направленности по азимуту	0,2–2,0 град.	Вычислен для 3-километровой линейной апертуры в КВ-диапазоне (предел разрешения Рэлея)
Коэффициент усиления антенны	25–35 дБ	Зависит от коэффициента усиления элементов антенны на рабочей частоте и множителя решетки
Сигнал		
Полоса	5–50 кГц	Часто ограничивается наличием мешающих излучений пользователей КВ-диапазона, принимаемых в районе дислокации РЛС
СИТ	1–40 с	Воздух (1–4 сек.), поверхность (10–40 сек.), ограничивается дальностью облучения и стабильностью частоты в канале распространения
ЧПИ	2–60 Гц	Воздух (20–60 Гц), поверхность (2–8 Гц), компромисс между дальностью и неопределенностью Доплера
Коэффициент заполнения	100 %	Двухпозиционные (квазимоностатические) системы, как правило, основанные на работе LFMCW (Linear Frequency-Modulated Continuous Waveform, непрерывный линейный частотно-модулированный сигнал) — непрерывного ЛЧМ-сигнала
Разрешение		
По дальности	3–30 км	Точнее, для обнаружения судов (например, 5–10 км), чем для обнаружения воздушных целей (например, 15–20 км)
По поперечному сечению	10–50 км	Зависит от ширины луча приемной антенны, разрешение увеличивается с уменьшением размера элемента разрешения — ячейки разрешения
Доплеровская частота	0,025–1 Гц	Интервал времени СИТ часто ограничивается требованиями к частоте повторного обзора района сопровождения цели
Относительная скорость	0,25–10 м/с	Скорость изменения продольного эха оценивается на рабочей частоте 15 МГц

Таблица 1.3. (Окончание)

Параметры/ Характеристики	Номинальные значения	Примечания
Неопределенность		
Дальность	2500–75000 км	Диапазон неопределенности радара (мешающее эхо), как правило, представляет проблему для задач воздушных режимов
Относительная скорость	90–900 км/час	Воздушный режим — 900 км/час, 50 Гц (ЧПИ, PRF — Pulse-Repetition Frequency, частота повторения импульсов), наземный, надводный режимы — 90 км/час (5 Гц ЧПИ) на частоте 15 МГц
Пеленг курса	Возможно, отсутствует	Структура антенной решетки подавляет дифракционные максимумы и обеспечивает высокий коэффициент обратного излучения (малый уровень излучения в задней полусфере) унифицированной линейной антенны — ЛАР
Точность определения местонахождения		
Абсолютная	10–20 км	Требуется хорошее качество специфической информации в режиме реального времени о трассе распространения
Относительная	<5 км	Для целей, расположенных вблизи реперной точки, отражение от которой наблюдается одновременно с обнаруженной целью, при этом географические координаты цели известны

Часть I. Основные принципы

ГЛАВА 2

ИОНОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

При конструировании и эксплуатации загоризонтных радиолокационных станций (ЗГ РЛС) необходимо алгоритмически отображать изменчивость характеристик ионосферы как среды распространения дециметровых (высокочастотных) радиоволн. Именно поэтому в данной главе приведены основные справочные сведения, относящиеся к: 1) процессам образования ионосферы, ее структуре и протекающим в ней динамическим явлениям; 2) описанию принципов распространения вертикально и наклонно падающих на нее дециметровых радиоволн при условии размещения на земной поверхности как передающей, так и приемной антенн.

Данная глава не ставит своей целью дать полное описание свойств среды и механизмов распространения в ионосфере дециметровых радиоволн. Подробную информацию по этим вопросам заинтересованный читатель может легко почерпнуть из ряда надежных источников. Материалы главы скорее предназначены для читателя, приступающего к конструированию или эксплуатации ЗГ РЛС. Учитывая вышесказанное, основное внимание будет обращено к кругу вопросов, характеризующих прямое влияние свойств среды на тактико-технические характеристики (ТТХ) ЗГ РЛС. Именно это является главной целью главы 2. Детальное рассмотрение физических и химических процессов в ионосфере, а также математические методы построения траекторий дециметровых радиоволн в неоднородной среде выходят за рамки данного материала. Исчерпывающие данные по результатам соответствующих теоретических и экспериментальных исследований можно найти в ряде опубликованных работ, в частности академических монографиях [Davies, 1990], [Budden, 1985a], [Ratcliffe, 1972] и [McNamara, 1991], а также в отличных книгах [Schunk и Nagy, 2009] и [Kelly, 2009] (часть этих материалов опубликована на русском языке; кроме того, см. [Яковлев и др., 2009]). При изучении предмета может использоваться предлагаемый в вышеупомянутых публикациях богатый аналитический материал.

Глава состоит из четырех разделов. Первый раздел представляет собой краткий исторический экскурс по ранним экспериментальным исследованиям распространения радиоволн, которые привели к открытию ионосферы. Затем идет описание процессов формирования ионосферы и особенностей ее многослойной структуры. Выделяются основные характеристики ионосферы применительно к работе ЗГ РЛС. Второй раздел посвящен описанию пространственно-временной структуры ионосферы, для получения информации о которой используются в основном радиотехнические средства вертикального и наклонного зондирования (ионозонды ВЗ и НЗ). Здесь, в частности, уделяется особое внимание динамическим процессам, протекающим в ионосфере, и их влиянию применительно к задаче конструирования и эксплуатации ЗГ РЛС. Рассматриваются данные вертикального зондирования ионосферы, позволяющие диагностировать возникновение возмущений и магнитных бурь, которые могут оказывать сильное влияние на рабочие характеристики радиотехнических систем КВ-диапазона.

Третий раздел посвящен вопросам наклонного отражения радиоволн от ионосферы, имеющим существенное значение для работы ЗГ РЛС. Для заданных геофизических условий (ГФУ), определяющих параметры регулярных слоев ионосферы, рассматриваются такие характеристики процесса распространения радиоволн, как рабочая частота, углы места излучения и приема, дальность от места расположения ЗГ РЛС до заданной точки пересечения траектории волны, отраженной от ионосферы с земной поверхностью.

В последнем, четвертом разделе рассматриваются вопросы многомодового (многолучевого) распространения КВ-радиоволн, включая магнитоионное расщепление радиоволн на два луча — обыкновенный и необыкновенный. Далее дается описание различных механизмов замирания (фединга) радиосигналов КВ-диапазона. Существующие модели процессов замирания КВ-радиоволн рассматриваются во второй части данной книги, включая экспериментальное обоснование.

2.1. Ионосфера

Ионосферой называют область атмосферы Земли на высотах 60–600 км, содержащую ионизированный газ (плазму) естественной природы с концентрацией зарядов, достаточной для влияния на распространение радиоволн КВ-диапазона. Плазма возникает в результате воздействия электромагнитного излучения Солнца и высокоэнергетических частиц солнечного ветра на нейтральные частицы атмосферы Земли. То есть происходит ионизация нейтральных атомов и молекул, что приводит к образованию электронов и ионов. Следует отметить, что наличие ионосферы характерно не только для Земли, но и для других планет, удерживающих атмосферу из нейтральных газов под действием планетарной гравитации.

Образующаяся в результате ионизации плазма может участвовать и в других процессах, включая химические реакции, диффузию, волновые возмущения и т.д. Определение характеристик этих процессов в широком пространственно-временном интервале требует применения результатов, полученных в таких научных дисциплинах, как физика плазмы, химическая кинетика, механика текучих сред. Предлагаемое в этом разделе описание ионосферы и ее главных характеристик, влияющих на распространение КВ-сигнала, подается в достаточно простой манере, исключающей наличие специальной подготовки у читателя (или с учетом неискренности читателя).

Известно, что на распространение КВ-радиоволн в ионосфере главным образом оказывают влияние свободные электроны. Количественной мерой этого влияния служит так называемая концентрация электронов. Реакция свободных электронов на высокочастотные колебания электромагнитной волны значительно сильнее, чем реакция более тяжелых ионов. Доказано, что в широком спектре частот, от крайне низких (ELF — Extremely Low Frequency) до очень высоких (ОВЧ), характеристики распространения радиоволн зависят от распределения концентрации свободных электронов по высоте. Временная и пространственная зависимости концентрации свободных электронов в ионосфере характеризуются значительными и резкими вариациями. Описанию свойств ионосферы как среды распространения КВ-сигналов посвящен представленный ниже материал.

Как уже отмечалось, наибольший интерес с точки зрения ионосферных ЗГ РЛС представляет область ионосферы, находящаяся в интервале высот 60–600 км от земной поверхности. В этой области наиболее ярко выражены процессы поглощения, преломления и отражения лучей КВ-сигналов. Преломление лучей КВ-сигналов обычно происходит на высотах более 100 км, а за поглощение энергии радиоволн отвечает в основном область ионосферы, находящаяся на высотах 60–120 км. Перед тем как приступить к более подробному изучению вопросов образования ионосферы, ее структуры и морфологии, представляется уместным получить сведения об исследованиях, связанных с открытием феномена ионосферы и ее роли в работе ЗГ РЛС.

2.1.1. Исторический экскурс

Возможно, первым видимым человеческим глазом проявлением существования ионосферы стало северное полярное сияние (северное сияние) в верхних слоях атмосферы. Понятие северного сияния возникло с подачи Галилео Галилея приблизительно в 1621 году [Eather, 1980]. А первое инструментальное наблюдение полярного сияния в южном полушарии было зарегистрировано Джеймсом Куком в 1773 г. Первый исторически подтвержденный факт — формулировка гипотезы о существовании электропроводящего слоя в земной атмосфере, впоследствии получившей название ионосферы, датируется 1839 годом. Именно тогда математик и физик Карл Гаусс предположил, что каждодневное наблюдение малых регулярных и нерегулярных изменений магнитного поля Земли может быть объяснено наличием в атмосфере электрических токов. Подтолкнуло Гаусса к такому выводу наблюдавшееся им «загадочное» явление — северное сияние. Однако физическая природа захватывающих воображение произвольно меняющих форму разноцветных всполохов в ночном небе была установлена только ближе к концу девятнадцатого века.

2.1.1.1. Ранние радиоэксперименты

В период с 1864 по 1873 гг. шотландский физик-теоретик и математик Джеймс Клерк Максвелл развивал элегантную теорию объединенного электромагнитного поля, ставшую классической. Эта знаменитая работа широко признана в качестве одного из самых великих научных достижений, сравнимого по своей значимости с работами Исаака Ньютона и Альберта Эйнштейна. Существование электромагнитных полей, предсказанных с помощью уравнений Максвелла, было экспериментально подтверждено в 1887 г. немецким физиком Генрихом Герцем — первым создателем аппаратуры возбуждения и регистрации радиоволн. Десятилетием позже Гульельмо Маркони, молодому итальянскому изобретателю, удалось на основе разрозненных знаний и технических возможностей своей эпохи разработать и продемонстрировать первую беспроводную систему радиосвязи, получившую впоследствии название телеграфа. С помощью этой системы в 1899 г. удалось реализовать передачу кодированных сообщений через пролив Ла-Манш.

В своем наиболее знаменитом эксперименте 12 декабря 1901 г. Маркони обеспечил трансатлантическую передачу радиосигнала на расстояние приблизительно в 3500 км — между местечком Полдху, Корнуолл, Англия и г. Сэйнт-Джон, Ньюфаундленд, Канада. Маркони услышал в наушнике шелчки буквы S по азбуке Морзе, принимая сигнал с помощью проволочной 120 м антенны, удерживаемой в соответствующем положении с помощью змейкового азростата. Из работ Максвелла и Герца было известно, что радиоволны распространяются по прямой, связывающей излучатель и приемник. Они отклоняются от прямой только при встрече со средами, имеющими различные диэлектрические свойства в поперечном направлении. Возможность беспроводной связи на расстоянии 3500 км оказалась принципиальным техническим открытием. Поэтому неудивительно, что данное событие вызвало огромный научный интерес к загадке распространения радиоволн на такое огромное трансатлантическое расстояние.

2.1.1.2. Предлагавшиеся физические интерпретации

Поначалу казалось естественным предположение, что распространение радиоволны на такое большое расстояние объясняется ее дифракцией (огибанием земной поверхности). В связи с этим внимание некоторых физиков и математиков оказалось обращенным к нахождению решения уравнений Максвелла для задачи дифракции волн на сферической поверхности с конечной проводимостью. Первые попытки объяснения полученных Маркони результатов основывались на схеме так называемых поверхностных радиоволн. При этом значительная часть излучаемой энергии «растекается» вдоль выпуклой земной поверхности. Толщина «потока» (канала) определяется высотой области, простирающейся вниз от источника непосредственно до границы раздела воздушной среды с морской поверхностью. Одними из самых первых авторов теории распространения поверхностных волн

были Дж. Зеннек, А. Зоммерфельд. Однако, согласно расчетным данным, дифракционный эффект, которым мог бы быть обусловлен этот механизм распространения, оказался не в состоянии объяснить наблюдаемую большую мощность принимаемого радиосигнала. На самом деле феномен распространения поверхностной волны представляет большой прикладной интерес в области радиолокации на загоризонтных дальностях, но существенно меньших, чем в эксперименте Маркони. К этому вопросу вернемся в главе 5.

В 1902 г. независимые исследования Оливера Хэвисайда в Великобритании и Артура Кеннелли в США привели к тому, что существование в верхней части атмосферы проводящего слоя стали считать бесспорным фактом [Ratcliff, 1967]. Это произошло на следующий год после постановки знаменитого эксперимента Маркони по трансатлантической передаче сигнала. Согласно Кеннелли и Хэвисайду получалось, что проводящий слой характеризуется наличием свободных электронов, чем обусловлено отражение радиоволн и их прием за горизонтом. В результате происходит загоризонтное распространение радиоволн в пространстве под ионосферой, вдоль выпуклой земной поверхности. Их представления были в дальнейшем развиты физиком Экклсом, связавшим зависимость концентрации ионизированных частиц от высоты (см. [Mac Namara, 1991]) с изменением направления распространения волны. Экклс предполагал, что радиоволны, наклонно падающие на ионосферу, попадая в области с положительным вертикальным градиентом ионизации, будут отклоняться, приближаясь к горизонтальному направлению, в итоге распространяясь с огибанием земной поверхности. Однако в ту пору не существовало прямых экспериментальных данных, которые могли бы подтвердить предположение об увеличении концентрации заряженных частиц с увеличением высоты. Не существовало экспериментальных данных о наличии проводящего слоя. Ситуация изменилась более чем через два десятилетия после провозглашения Хэвисайдом и Кеннелли концепции проводящего слоя.

В 1902 г. Маркони тщательно задокументировал эксперимент по ежедневному приему передаваемых станцией Полдху радиосигналов, находясь на борту судна S. S. Philadelphia, удаляющегося от Великобритании в западном направлении. В дневное время Маркони смог получать сообщения на дальностях порядка 1000 км и вплоть до 3000 км — в ночное. Маркони первым отметил, что средние и длинные радиоволны могут распространяться гораздо дальше именно в ночное время. Возможно, что самая первая физическая теория проводящего слоя появилась непосредственно после опубликования результатов этих наблюдений (см. [Lodge, 1902]), а также была предложена в независимой работе [J. E. Taylor, 1903]. Было выдвинуто предположение, что образование проводящего слоя обусловлено ионизацией пространства в результате воздействия на верхнюю часть атмосферы ультрафиолетового солнечного излучения. Эффективность распространения радиоволн в зависимости от солнечного излучения была подтверждена позже.

2.1.1.3. Радиосвязь и радиовещание

В ходе ранних экспериментов выяснилось, что дальность распространения тем выше, чем больше длина волны. Поэтому сначала стремились к созданию систем, работающих на частотах ниже КВ-диапазона. При этом беспроводный телеграф использовался по большей части для связи корабль — берег в диапазоне средних волн. Эта технология сыграла драматическую роль при попытках спасти «Титаник» в 1912 г.

Маркони вернулся к экспериментам на более высоких частотах в 1915 г. Его возобновленный интерес к КВ-диапазону был главным образом обусловлен возможностью использования направленных антенн меньшего размера, способных фокусировать энергию в более узкие пучки лучей. Позднее Маркони обнаружил, что КВ-радиоволны могут обеспечить устойчивую связь на тысячекilометровых дальностях при гораздо меньшей мощности передатчиков, чем сотни киловатт, необходимые при использовании более длинных волн. В ходе дальнейших экспериментов он обнаружил, что при правильном выборе рабочей частоты существует возможность установления радиосвязи с любой точкой мира почти в любое время дня и ночи.



а Марчезе Гульельмо Маркони (1874–1937) **б** Сэр Эдвард В. Эпплтон (1892–1965)

Рис. 2.1. Марчезе Гульельмо Маркони и Сэр Эдвард В. Эпплтон, получившие Нобелевские премии за вклад в развитие беспроводного телеграфа и исследование ионосферы соответственно

Этими наблюдениями ознаменовался переход от высокомошных систем НЧ-связи, слишком дорогих для организации в крупные сети, к маломощным КВ-станциям с узким главным лепестком диаграммы направленности. Такая система была внедрена в Имперскую сеть беспроводной связи в середине 1920-х годов, соединяя между собой Великобританию, Австралию, Южную Америку и Индию. Подобные системы нуждались в операторах высокой квалификации, использующих знания об условиях распространения радиоволн. Также обострился вопрос, как избежать приема сигнала от других радиостанций в связи с ростом их числа и соответствующей перегрузкой линий беспроводной связи. Для обеспечения удовлетворительной работоспособности системы потребовалось наладить синхронизацию работы всех станций сети по частоте и времени. В 1927 г. английская радиовещательная система («Би-би-си») начала работу на всех территориях империи в КВ-диапазоне. Маркони как главный идеолог и организатор, на которого пришлось основная часть работ, стал лауреатом Нобелевской премии в 1909 г. Это был факт признания его вклада в разработку беспроводного телеграфа. Помимо разнообразного наследия, оставшегося после Маркони, нужно отметить *центр экспериментальной радиоэлектроники* в Торре Чиаручия возле Санта-Маринелла, Италия. В этом центре Маркони проводил эксперименты по радиопеленгации своего судна *Elettra*.

2.1.1.4. Открытие ионосферы

Л. Ф. Фуллер и Ли де Форест из Американской федеральной телеграфной компании в период между 1912 и 1914 гг. провели ряд экспериментов по распространению радиоволн на расстояние 500 км, разделяющее Лос-Анджелес и Сан-Франциско. Передающее устройство излучало радиосигнал на фиксированной частоте. На приемном устройстве наблюдалось биение сигналов разных частот, которое трактовалось как интерференция между радиолучом, отраженным от проводящего слоя, и прямым лучом поверхностного распространения. Эффективная высота отражающего слоя была рассчитана на основании характеристик интерференции и составила 99 км. Это оказалось первой оценкой высоты проводящего слоя, концепцию которого выдвинули Хэвисайд и Кеннелли.

Еще одно косвенное подтверждение существования отражающего слоя в верхней части атмосферы было получено в 1924 г. Эпплтоном и Барнеттом в ходе экспериментов

со сменой частоты. Зондирование производилось с помощью передатчика незатухающих сигналов, расположенного в Борнмуте. При этом медленное изменение несущей частоты использовалось таким образом, что характеристики замираний, обусловленные интерференцией между поверхностной и отраженной от гипотетического слоя волнами, могли быть измерены на станции рядом с Кембрижем. Путем сравнения мощностей сигналов, одновременно принятых рамочной и вертикальной антеннами, Эпплтон и Барнетт подтвердили существование отраженной пространственной волны, которую теперь принято называть ионосферной. Высота слоя в 100 км была вычислена с помощью выражения для разности длин пробега радиоволн и известного значения разности между передатчиком и приемником; см. [Appleton and Barnett, 1925].

Выяснилось, что высота отражающего слоя резко меняется ближе к закату Солнца. На основании этого наблюдения зимой 1925 г. Эпплтон сделал заключение о слоистой природе ионосферы. Ему же и обязаны общепринятой теперь классификацией различных ионосферных слоев: E, F и D. Выбор подобной системы обозначений сэра Эдвард Эпплтон разъяснил в своем письме от 20 марта 1943 г., переопубликованном в [Silberstein, 1959]. Эпплтон обозначил первый слой буквой E, признавая особую роль электрического поля пространственной отраженной волны. Соответственно второму отражающему слою, находящемуся на большей высоте, он присвоил букву F.

В 1925 г. Брейт и Тув провели независимое экспериментальное исследование на основе методики почти вертикального зондирования, в ходе которого подтвердилось существование множественных отраженных пространственных волн. В частности, Брейт и Тув показали, что при вертикальном излучении короткого импульса в расположенном на удалении нескольких километров приемнике регистрировался приход двух, а иногда и большего числа эхо-сигналов. Первый эхо-сигнал был связан с прямым распространением поверхностной волны, а последующие — за счет отражения радиолуча от ионосферных слоев. Этот метод обеспечил возможность отличать волны, отраженные ионосферой, от волн прямого поверхностного распространения. Классификационными параметрами волн были задержки по времени импульсных сигналов. Это были первые прямые измерения высоты ионосферных слоев, в отличие от косвенных, основанных на анализе явления интерференции.

Метод импульсного зондирования может считаться самой ранней формой применения радиолокации, получивший широкое распространение в качестве главного метода исследования структуры и динамики ионосферы. Так как изначально предполагалось, что отражающие слои состоят из электрически заряженных частиц — так называемых ионов, то прижилось название ионосферы. Подробная история возникновения термина «ионосфера» изложена в работе [Gillmor, 1998]. Термин «ионосфера» был впервые использован Робертом Уотсоном-Уоттом, как оказалось в дальнейшем, первым разработчиком РЛС. Это было в письме, адресованном в 1926 г. научно-исследовательской комиссии Великобритании. Первое официальное появление этого термина в литературе произошло несколькими годами позднее, см. [Watson-Watt, 1929]. В 1927 г. Сидни Чепменом была разработана физическая теория, описывающая структуру ионосферных слоев. К этому времени физика ионосферы выделилась в отдельное научное направление. На ее развитие оказал большое влияние Эпплтон (см. рис. 2.1б), получивший в 1947 г. Нобелевскую премию за вклад, сделанный в развитие теории ионосферы [Clark, 1971].

2.1.1.5. Послевоенные годы

Несмотря на отсутствие полного понимания физики и химии ионосферы, к началу второй мировой войны многие свойства формирования, структуры и динамики ионосферы уже были описаны [Green, 1946]. Война дала сильный толчок развитию технологий радиосвязи и радиолокации. Огромное расширение работ по зондированию ионосферы в эти годы было продиктовано необходимостью прогнозирования условий распространения радиоволн в разных частях мира. Это соответствовало научным задачам, которые были поставлены перед первыми станциями ионосферного зондирования, которые заключались в выявлении причин возникновения и характеристик различных ионосферных слоев. Собираемые в военное время данные об ионосфере использовались почти исключительно

в практических целях, и только очень малое число исследований проводилось в целях выяснения геофизической природы ионосферы.

Важный шаг в направлении накопления и систематизации глобальных ионосферных данных был сделан в рамках программы геофизических исследований, действовавшей в период с 1957 по 1958 гг. (Так называемый МГГ — международный геофизический год, IGY — International Geophysical Year, год, который длился восемнадцать месяцев.) Помимо данных, собираемых наземными станциями, для проведения инструментальных измерений устанавливалась соответствующая аппаратура на ракетах и спутниках, позволявшая получать данные о плотности, составе, температуре, электрических/магнитных полях и прочих характеристиках ионосферы. Возобновленный интерес научного сообщества к подобным данным в послевоенные годы привел к выработке более глубокого понимания физических и химических процессов, протекающих в ионосфере.

Использование ионосферы, помимо решения традиционных задач дальней двухсторонней коротковолновой связи и вещания, осуществлялось в системах двойного назначения (военного и гражданского). Речь идет о системах определения координат КВ-передатчиков за счет разнесенного приема сигналов двумя или большим числом приемных станций. По сравнению с существовавшими КВ-системами связи системам пеленгации требовалось большее количество данных о состоянии ионосферы, получаемых в реальном масштабе времени (в процессе проведения измерений). С появлением в конце 1950-х ЗГ РЛС, предназначенных для контроля состояния морской поверхности, требования к скорости получения данных о состоянии ионосферы в реальном масштабе времени стали ужесточаться.

2.1.2. Образование ионосферы и ее структура

Как сказано выше, образование ионосферы связано с ионизацией нейтральных молекул и атомов в верхней части земной атмосферы под воздействие солнечного электромагнитного излучения и заряженных частиц солнечного ветра. В результате такого воздействия появляется электронно-ионный газ. Он представляет собой слабо ионизированную плазму, максимальная концентрация заряженных частиц в которой обычно составляет менее 1%. Можно утверждать (с минимальной погрешностью), что ионосфера обладает свойством квазинейтральности, поскольку появление и рекомбинация свободных электронов и положительных ионов происходят одновременно.

Способность ионосферы к отражению КВ-радиоволн обусловлена наличием свободных электронов. А их концентрация, в свою очередь, зависит от физико-химических процессов, которыми, повторимся, обусловлены появление, исчезновение и перенос свободных электронов. Следовательно, успешная эксплуатация ЗГ РЛС ионосферной волны в значительной мере зависит от знания характеристик вышеупомянутых процессов. Таким образом, следует приступить к изучению основных схем образования, исчезновения, структуры и переноса заряженных частиц ионосферы.

2.1.2.1. Процессы, отвечающие за образование ионосферы

Возникновение ионосферы связано с ионизацией нейтральных атомов и молекул и появлением свободных электронов и положительно заряженных ионов. Процесс передачи фотон своей энергии $h\nu$ электрону, в результате которого происходит ионизация нейтрального атома или молекулы P с образованием пары — свободного электрона e^- и положительно заряженного иона P^+ , называется фотоионизацией. Процесс символически представлен выражением (2.1), где h постоянная Планка, ν — частота фотона:



В наиболее важных реакциях, протекающих на более низких высотах, участвуют молекулярный азот N_2 , молекулярный кислород O_2 и одновалентный оксид азота NO . А на больших высотах главную роль играют атомарный кислород O и водород H . Следует отметить, что

ионизация молекулярных и атомных частиц разного химического состава может происходить при воздействии фотонов с определенной частотой. Выяснено, что длины волн фотонов, излучаемых Солнцем и участвующих в реакциях фотоионизации, соответствуют спектральным линиям и непрерывному излучению в коротковолновой ультрафиолетовой (КУФ, EUV — Extreme Ultra-Violet, коротковолновое ультрафиолетовое излучение) и рентгеновской областях электромагнитного спектра.

Скорость образования электронов, связанная с реакцией фотоионизации определенного типа, пропорциональна как интенсивности ионизирующего излучения, так и плотности ионизируемых химических частиц. Следовательно, скорость образования с учетом всех реакций фотоионизации зависит не только от интенсивности солнечного излучения во всем спектре длин волн, но и от концентрации нейтральных частиц в атмосфере, имеющих разный химический состав. Так как интенсивность ионизирующего излучения и концентрация изменяются по высоте, скорость образования также зависит от высоты.

В исходном виде теория Чепмена описывает скорость ионизации в слоистой атмосфере отдельного компонента изотермического газа за счет поглощения параллельного пучка солнечного монохроматического излучения. Как было показано в работе [Matsushita и Campbell, 1967], для получения формулы скорости ионизации многокомпонентной атмосферы во всем спектре частот солнечного излучения вышеупомянутые упрощения не используются. Однако это связано с усложнением уравнений, что затрудняет понимание пути решения главной задачи, которая заключается в изучении основных принципов теории Чепмена.

Используем гидростатическое уравнение для вертикального распределения давления идеального газа под воздействием гравитации. При этом можно показать, что плотность атмосферы (плотность нейтральных частиц) на высоте h от земной поверхности в формуле (2.2) определяется через ρ . Здесь ρ_0 — плотность нейтрального газа на земной поверхности ($h = 0$). $H_p = KT/mg$ — давление по шкале высот, зависящее от массы частицы m , абсолютной температуры T , постоянной Больцмана K и ускорения свободного падения g .

$$\rho = \rho_0 e^{-h/H_p} \quad (2.2)$$

Обозначим символом I_∞ плотность потока падающего солнечного излучения (интенсивность излучения). Эта величина выражается через количество фотонов на единичную площадь, входящих в атмосферу под углом χ к вертикальной оси — так называемым зенитным углом. По мере прохождения лучей через атмосферу интенсивность излучения I_∞ падает за счет поглощения и, соответственно, становится функцией высоты $I(h)$. Дифференциал интенсивности излучения $dI(h)$ по высоте определяется приводимой ниже формулой (2.3). В ней σ — удельный коэффициент поглощения, называемый также вертикальным сечением атмосферы.

$$dI(h) = I(h) \sigma \rho \sec \chi dh \quad (2.3)$$

Подстановка выражения (2.2) в уравнение (2.3) с последующим интегрированием по высоте h приводит к формуле (2.4) для вертикального профиля интенсивности излучения $I(h)$. В формуле (2.4) приняты обозначения: приведенная высота $z = (h - h_0)/H_p$ и эталонная высота $h_0 = H_p \ln\{\sigma \rho_0 H_p\}$.

$$I(h) = I_\infty \exp[-\sec \chi e^{-z}] \quad (2.4)$$

Следует учесть, что скорость образования свободных электронов q на заданной высоте пропорциональна скорости поглощения на этой высоте. Поэтому можно определить, что $q = \eta \cos \chi dI(h)/dh$, где η — число электронно-ионных пар, выбиваемых одним фотоном. Продифференцировав выражение (2.4), получаем, что скорость образования пар является функцией $q(z, \chi)$ в приводимом ниже выражении (2.5), где $q_0 = I_\infty \eta / H_p e$ — константа, а $\ln e = 1$.

$$q(z, \chi) = q_0 \exp[1 - z - \sec \chi e^{-z}] \quad (2.5)$$

Это соотношение называется функцией или формулой Чепмена. Оно выражает скорость ионизации $q(z, \chi)$ как функцию приведенной высоты z , зенитного угла χ и константы q_0 . Степень ионизации будет максимальной на такой высоте, которой соответствует наибольшее значение произведения интенсивности излучения и плотности нейтрального газа. Интенсивность излучения снижается с высотой из-за поглощения, а плотность нейтрального газа уменьшается на больших высотах из-за гравитации (барометрическая формула). В результате двух противоборствующих эффектов максимум ионизации приходится на некоторой промежуточной высоте. Можно убедиться, что характеристикой формирования ионосферного слоя служит максимальная концентрация свободных электронов на данной промежуточной высоте.

Продифференцировав уравнение (2.5), можно получить, что высота h_m , на которой происходит образование максимального количества электронов, определяется приводимой ниже формулой (2.6). Отметим, что эталонная (опорная) высота h_0 соответствует максимальной концентрации электронов, когда Солнце находится в зените ($\chi = 0$). Максимальное значение концентрации электронов на высоте h_m в формуле (2.6) обозначено величиной q_m . Отметим, что q_0 представляет собой максимальную концентрацию электронов при зенитном солнечном излучении.

$$\begin{cases} h_m = h_0 + H_p \ln \{\sec \chi\} \\ q_m = q_0 \cos \chi \end{cases} \quad (2.6)$$

Изменение плотности потока солнечного излучения I_∞ влияет на максимальное значение ионизации, но не на ее высоту. Изменение зенитного угла влияет как на максимальное значение ионизации, так и на ее высоту. Процесс фотоионизации происходит исключительно в дневное время, когда Солнце освещает атмосферу. Однако фотоионизация — не единственный процесс, отвечающий за возникновение свободных электронов. Иной механизм образования свободных электронов реализуется при «бомбардировке» нейтральных частиц в атмосфере потоком заряженных частиц от Солнца. Столкновения между энергичными частицами, переносимыми через межпланетное пространство солнечным ветром, и нейтральными частицами земной атмосферы могут также привести к образованию свободных электронов и положительно заряженных ионов. Такой процесс получил название *ударной ионизации*.

2.1.2.2. Процессы, обуславливающие снижение концентрации свободных электронов

Падение плотности свободных электронов может быть обусловлено процессами *рекомбинации* и *присоединения* (в отечественной литературе употребляется термин «прилипание»). В отличие от фотоионизации, происходящей исключительно в дневное время, оба вышеупомянутых процесса существуют как в дневное, так и в ночное время. Несмотря на отсутствие фотоионизации в ночное время, оба механизма убыли заряженных частиц не могут привести к окончательной деионизации. На высотах более 210 км концентрация свободных электронов в ионосфере остается на достаточно высоких уровнях, чтобы оказывать влияние на распространение КВ-радиоволн в ночное время до момента наступления фотоионизации с восходом Солнца. Проще говоря, несмотря на падение степени ионизации в ночное время, она никогда не исчезает полностью.

Убыль свободных носителей заряда за счет механизма рекомбинации свободного электрона с положительно заряженным ионом с последующим образованием нейтральной частицы P и излучением кванта энергии $h\nu$ символически представляется формулой (2.7):



Важно отметить, что скорость рекомбинации свободного электрона с молекулярным ионом приблизительно на *пять порядков выше*, чем с атомарным ионом (ионизированным атомом). Поэтому следует ввести в рассмотрение следующее соотношение:



Как видно из соотношения (2.8), перед рекомбинацией, обусловленной реакцией переноса заряда, сначала имеет место переход ионизированных атомов A^+ в молекулярные ионы M^+ . Реакции переноса заряда можно рассматривать как промежуточную ступень процесса рекомбинации. В качестве примера можно привести реакцию переноса заряда, в которой ионизированные атомы кислорода $A^+ = O^+$ обмениваются зарядом с молекулярным кислородом $M = O_2$. Существует много различных реакций переноса заряда, и не все из них ограничиваются видом соотношения (2.8). В одних реакциях обмен зарядами происходит между разными молекулярными частицами, в то время как другие реакции заканчиваются образованием молекулярных ионов, имеющих химический состав, отличающийся от участвующих в реакции частиц. Ряд реакций переноса заряда описан в работе [Davies, 1990].

Диссоциативная рекомбинация относится к специфической реакции, описываемой приводимым ниже соотношением (2.9):



В ходе этого процесса происходит рекомбинация свободного электрона e^- и положительно заряженного молекулярного иона M^+ с образованием нейтральной молекулы M и излучением избыточной энергии. Излучение обуславливает атмосферное свечение в ультрафиолетовом, инфракрасном, оптическом диапазонах. Следует отметить, что убыль свободных электронов за счет процесса рекомбинации определяется скоростью диссоциативной рекомбинации. Как уже отмечалось, эта скорость на пять порядков выше, чем скорость рекомбинации между электроном и ионизированным атомом. В главных реакциях диссоциативной рекомбинации участвуют молекулярные ионы NO^+ , O_2^+ и N_2^+ . Скорость рекомбинации характеризуется вертикальным профилем и зависит от концентрации молекулярных ионов на разных высотах. Концентрация молекулярных ионов, в свою очередь, зависит от концентрации ионизированных атомов и нейтральных молекул, переходящих в молекулярные ионы посредством реакций переноса заряда на первом этапе описанного выше двухступенчатого процесса рекомбинации. Реакции переноса заряда протекают быстрее в областях ионосферы с более высокой молекулярной концентрацией. В результате на более низких высотах преобладают более тяжелые молекулярные ионы, а на больших высотах — легкие.

Из-за относительно высокой концентрации молекулярных частиц ниже 140 км реакции переноса протекают очень быстро, в связи с чем убыль свободных электронов определяется этапом диссоциативной рекомбинации согласно соотношению (2.9). В этом случае скорость убыли L пропорциональна произведению концентраций свободных электронов и молекулярных ионов соответственно. Так как концентрации свободных электронов и положительно заряженных ионов в электронейтральной плазме равны, то скорость убыли из-за диссоциативной рекомбинации в соотношении (2.10) имеет квадратичную зависимость

$$L = \alpha N_e^2, \quad (2.10)$$

где α — коэффициент диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов.

С другой стороны, на больших высотах значительную роль начинает играть гораздо более медленный процесс рекомбинации между свободными электронами и положительно заряженными ионизированными атомами, так как последних гораздо больше из-за более низкого содержания тяжелых молекулярных частиц. В ионосферных областях выше 210 км реакции переноса заряда протекают относительно медленно, тогда как время жизни положительно заряженного ионизированного атома в отсутствие такой реакции является достаточно продолжительным. Поэтому скорость убыли свободных электронов в большей степени зависит от этапа переноса заряда на больших высотах, где преобладают более легкие ионизированные атомы. В этом случае скорость убыли свободных электронов находится в линейной зависимости от N_e и определяется по формуле

$$L = \beta N_e. \quad (2.11)$$

Переход от формулы квадратичной зависимости потерь к линейной, которыми определяется скорость диссоциативной рекомбинации на низких и больших высотах, носит

не скачкообразный, а постепенный характер, будучи плавной функцией высоты. Согласно [Davies, 1990] в промежуточном интервале высот от 140 до 210 км скорость убыли может быть выражена через усредненное соотношение, задаваемое формулой

$$L = \beta \alpha N_e^2 / (\beta + \alpha N_e). \quad (2.12)$$

Здесь β — коэффициент линейных потерь, пропорциональный концентрации нейтральных молекул. Следует отметить, что при $\beta \gg \alpha N_e$ соотношение (2.12) преобразуется обратно в формулу квадратичной зависимости (2.10). А при $\beta \ll \alpha N_e$ — в формулу (2.11) для линейных потерь. Убыль свободных электронов может происходить за счет другого процесса, характеризуемого соотношением (2.13), — присоединения электрона к нейтральным молекулам с образованием отрицательно заряженных ионов:



Скорость уменьшения концентрации электронов, обусловленная этим процессом или так называемым *присоединением*, зависит от концентрации нейтральных частиц на заданной высоте. Отсюда следует, что обусловленная этим процессом скорость уменьшения концентрации электронов имеет линейную зависимость, как видно из формулы (2.11). Прилипание электронов носит более выраженный характер в нижней ионосферной области с более высокой концентрацией нейтральных частиц. Если преобладающей причиной уменьшения количества электронов является механизм прилипания, то вариации концентрации молекул в атмосфере могут оказывать заметное воздействие на концентрацию свободных электронов.

2.1.2.3. Образование слоя

Применительно к работе ЗГ РЛС и другим КВ-системам ионосферного типа наиболее важной характеристикой ионосферы является концентрация свободных электронов. Она определяется взаимодействием процессов образования, убыли и переноса заряда по высоте. При этом зависимость концентрации электронов от высоты, так называемый $N_e(h)$ -профиль, параметрически зависит от пространственных координат и времени. Согласно закону сохранения количества частиц изменение концентрации электронов определяется уравнением непрерывности

$$\frac{dN_e}{dt} = \{\text{Production}\} - \{\text{Loss}\} - \{\text{Transport}\}^1. \quad (2.14)$$

Пренебрегая пока механизмами переноса, результирующую скорость изменения концентрации свободных электронов можно определить разностью между скоростью образования и убыли соответственно. Когда скорость убыли свободных электронов определяется квадратичной зависимостью по формуле $L = \alpha N_e^2$, уравнение непрерывности принимает вид формулы (2.15):

$$\frac{dN_e}{dt} = q - \alpha N_e^2. \quad (2.15)$$

Квазиравновесное состояние (полная производная равна нулю) достигается при приблизительном равенстве скоростей образования и убыли. Тогда скорость изменения концентрации свободных электронов близка нулю. Подставляя функцию Чепмена $q = q(z, \chi)$ в уравнение (2.15) и полагая $dN_e/dt = 0$, получаем вертикальный профиль концентрации свободных электронов $N_e(h, \chi)$ как решение тривиального алгебраического выражения:

$$N_e(h, \chi) = N_{e0} \exp \left[\frac{1}{2} (1 - z - \sec \chi e^{-z}) \right]. \quad (2.16)$$

¹ Production — образование, loss — убыль (обычно это рекомбинация в нашей литературе по образованию ионосферы), transport — перенос заряда по высоте. — Прим. ред.

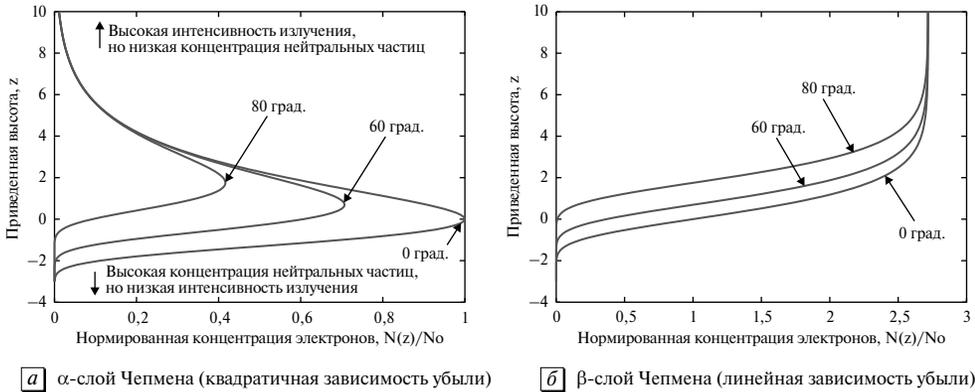


Рис. 2.2. Вертикальные профили концентрации электронов в слоях как функция приведенной высоты и зенитного угла χ , полученные с помощью формулы Чепмена и с учетом процессов убыли на основе линейного и квадратичного закона

Дифференцируя вертикальный профиль $N_e(h, \chi)$ по высоте и приравнявая производную к нулю, получаем выражение для максимальной концентрации свободных электронов $N_m(\chi)$, формула (2.17). Максимальное значение $N_m(\chi)$ для α -слоя Чепмена соответствует максимальной высоте h_m в формуле (2.6).

График профилей нормированной концентрации электронов в α -слое Чепмена как функция приведенной высоты для различных значений зенитного угла представлен на рис. 2.2а.

Формула (2.17) для $N_m(\chi)$ имеет вид

$$N_m(\chi) = N_{e0} \sqrt{\cos \chi}. \quad (2.17)$$

Очевидно, что α -слой Чепмена будет наиболее подходящей моделью для нижней области ионосферы — ниже отметки 140 км, где скорость убыли свободных электронов лучше всего описывается квадратичным законом. С другой стороны, при линейном законе убыли $L = \beta N_e$ уравнение непрерывности принимает вид формулы (2.18), в которой коэффициент линейных потерь (убыли) β пропорционален концентрации молекулярных частиц:

$$\frac{dN_e}{dt} = q - \beta N_e. \quad (2.18)$$

При равновесном состоянии вертикальный профиль концентрации электронов принимает вид соотношения (2.19), которое иногда называют β -слоем Чепмена. Как видно из рис. 2.2б, данный профиль не имеет максимума за исключением очень больших высот, характеризующихся недостаточным количеством молекул, которые могли бы оказаться ионизированными [Davies, 1990]. Как показала практика, более сильное влияние эффекта переноса заряда на высотах, где считается приемлемым использование линейного закона (выше 210 км), указывает на то, что этот профиль, описываемый соответствующей функцией Чепмена, см. формулу (2.19), зачастую не может обеспечить точное описание фактического распределения концентрации свободных электронов на таких высотах:

$$N_e(h, \chi) = N_{e0} \exp(1 - \sec \chi e^{-z}). \quad (2.19)$$

Несмотря на то что вертикальные профили для α - и β -слоя были получены для достаточно идеализированных физических условий, теория Чепмена является основой для более совершенных и точных методов моделирования вертикального профиля концентрации свободных электронов. В работе [Davies, 1990] можно ознакомиться с рядом альтернативных параметрических моделей вертикального профиля концентрации свободных электронов для случаев одного или двух слоев. В частности, в области ионосферного моделирования

нашла широкое применение квазипараболическая сегментация для описания профиля слоя, что дает определенные преимущества благодаря простоте математического аппарата.

Структура и морфология вертикального профиля ионизации на высотах до 140 км тоже зависят главным образом от процессов образования и убыли заряженных частиц. Кинетика процессов ионизации приобретает все большее значение с точки зрения возникновения максимумов на высотах более 210 км. В частности, существует три главных механизма переноса плазмы, как-то: нейтральные (термосферные) ветры, диффузия и электромагнитный дрейф. Ниже предлагается краткая справка по этим процессам переноса. Дополнительное описание их физической природы и характеристик можно почерпнуть в работе [Davies, 1990].

Нейтральные ветры обусловлены наличием системы перепадов атмосферного давления из-за температурной разницы между нагреваемой Солнцем дневной стороны Земли и ночной соответственно¹. Ниже 140 км движение нейтрального ветра обеспечивает перенос плазмы за счет соударений ионов с нейтральными частицами ветра и затем электронам посредством электростатического притяжения. Благодаря таким процессам кинетика плазмы определяется движением нейтральных частиц. Однако на больших высотах, характеризующихся меньшей концентрацией нейтральных частиц, атмосферные ветры уже фактически не могут обеспечить перенос плазмы в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля. В ночное время, когда ветер дует в направлении экватора, плазма будет следовать вдоль силовых линий магнитного поля, поднимаясь на большие высоты, характеризующиеся более низкой скоростью рекомбинации. Этим физическим механизмом объясняется значительная ионизация на больших высотах в ночное время. В дневное время нейтральные ветры дуют в направлении полюсов, что сопровождается снижением плазмы до низких высот с более высокой скоростью рекомбинации, между тем как за счет фотоионизации в это же время происходит восстановление уровня концентрации свободных электронов.

Диффузия электронов и положительно заряженных ионов в ионизированном газе (амбиполярная диффузия) отличается от диффузии в нейтральном газе как из-за влияния магнитного поля Земли, так и электростатического поля, возникающего в результате разделения зарядов. Резкое нарастание скорости диффузии на больших высотах объясняется тем, что она изменяется обратно пропорционально концентрации нейтральных частиц. Она также достигает максимального значения вдоль линий магнитного поля, так как свободные электроны не могут их «покинуть» без воздействия внешнего электрического поля. Этот процесс получил название диффузии (продольной) вдоль магнитного поля. Например, вертикальная компонента переноса плазмы вдоль силовых линий магнитного поля исчезает на магнитном экваторе, где направление геомагнитных силовых линий имеет горизонтальную ориентацию.

Электромагнитным дрейфом называется процесс переноса плазмы перпендикулярно силовым линиям магнитного поля Земли из-за наличия внешнего электрического поля. Из-за наличия скрещенных электрических и магнитных полей электроны и ионы дрейфуют в одном направлении, перпендикулярном плоскости, содержащей силовые линии. В отличие от вертикальной диффузии, исчезающей на магнитном экваторе, механизмом электромагнитного дрейфа может быть обусловлен очень быстрый вертикальный перенос плазмы на очень большие высоты. Данное явление особенно важно в дневные часы, когда за счет действия нейтральных ветров рядом с экватором возникает направленное на восток электрическое поле.

2.1.3. Области D, E и F

Ранее уже упоминалось, что концентрация свободных электронов в ионосфере обусловлена наличием многокомпонентного газа и спектра ионизирующего излучения. При этом

¹ Нейтральные ветры также обусловлены разными скоростями вращения земной поверхности на разных широтах.

возникновение ионизации может быть обусловлено столкновением нейтральных и энергичных частиц, заносимых в земную атмосферу солнечным ветром. В зависимости от времени и географического положения точки наблюдения результатом суммарного влияния процессов является вертикальный профиль концентрации свободных электронов, обычно характеризующийся местными максимумами на разных высотах. Число, величины и высоты образования локальных максимумов электронной концентрации зависят от времени и географического положения точки наблюдения. Но для наземных КВ-систем наибольший интерес представляют регулярные максимумы концентрации свободных электронов в трех главных областях ионосферы разной высоты — так называемые D-, E- и F-области.

На рис. 2.3 показан пример вертикального профиля концентрации электронов, который можно считать характерным для среднеширотной ионосферы в дневное время. Несмотря на то что ионосфера представляет собой область слабо ионизированной плазмы, вариации концентрации свободных электронов вертикального профиля могут достигать двух и более порядков по величине. Окрестности локальных максимумов концентрации в областях D, E и F принято называть ионосферными слоями. Вертикальные профили

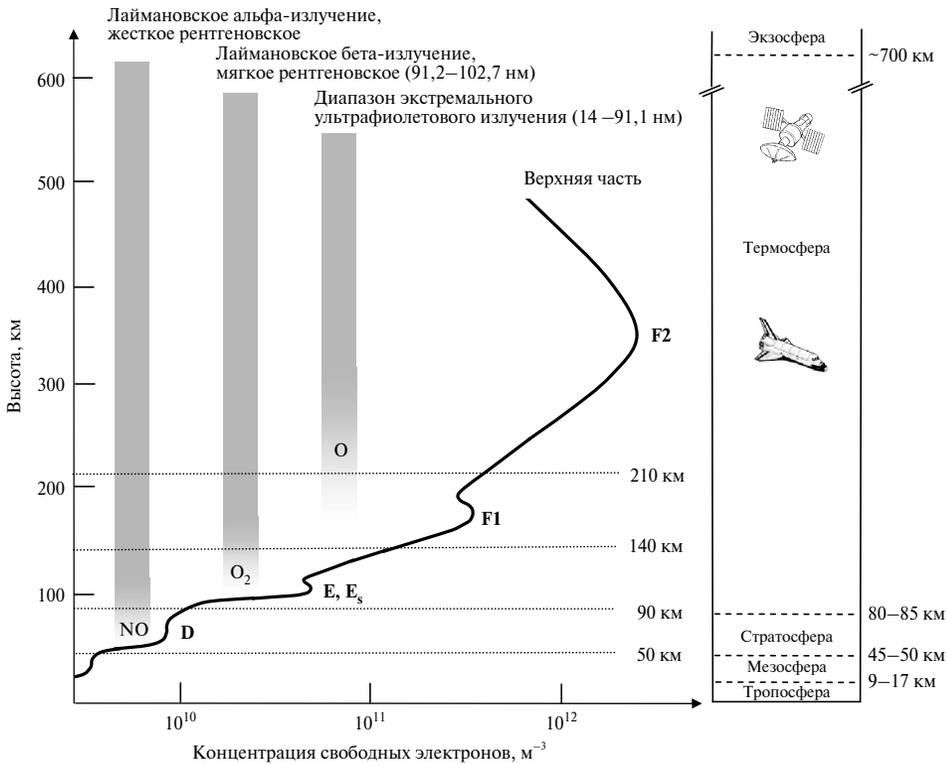


Рис. 2.3. Предполагаемый вид вертикального профиля дневной концентрации свободных электронов для ионосферы в средних широтах, характеризующийся распределенным по высоте рядом локальных максимумов. Также указаны главные компоненты солнечного излучения (линейчатого и непрерывного), отвечающие за образование ионизации в атмосфере. Там же приводятся несколько примеров ионизируемых химических соединений. С точки зрения распространения радиоволн, излучаемых наземными КВ-системами, практическое значение для них имеет только внутренняя часть ионосферы, расположенная ниже высоты главного максимума электронной концентрации, а именно слоя F2. Для некоторых систем с точки зрения рабочих характеристик представляют интерес структура и динамика ионосферы в более широком интервале высот — от 60 до 600 км. © Commonwealth of Australia 2011

концентрации электронов различных слоев, как показывают ракетные эксперименты, имеют структуры, лишенные разрывов и изломов. Поэтому при наличии нескольких слоев их визуальное разделение невозможно осуществить единственным образом. Как видно из рис. 2.3, область D можно обнаружить только по изгибу кривой, а не по локальному максимуму вертикального профиля электронной концентрации.

Морфология вертикального профиля электронной концентрации по времени и пространству зависит не только от изменения скорости образования или убыли свободных носителей зарядов. Подобные процессы с большей вероятностью преобладают в областях D и E. В случае области F ключевую роль в образовании глобальных максимумов электронных концентраций играет обусловленное механизмами переноса перераспределение ионизации. Исследование крупномасштабных пространственно-временных вариаций параметров ионосферы осуществляется в следующем разделе. Теперь приступим к изучению основных характеристик ионосферных слоев, образующихся на различных высотах.

2.1.3.1. Область D

Как правило, самой низшей областью, участвующей в распространения ВЧ-сигнала в ионосфере, считается область D. Область D формируется на высотах от 50 до 90 км, что обусловлено ионизацией молекул за счет их облучения жестким рентгеновским солнечным излучением в диапазоне длин волн 0,1–1,0 нм, а также ионизацией окисла азота в спектральной линии Лаймана- α (121,6 нм). Солнечная радиация с большой длиной волны почти полностью поглощается атмосферой на больших высотах.

Плотности свободных электронов в области D обычно на два три порядка меньше по сравнению со встречающимися в областях E и F. Такие уровни ионизации недостаточны для отражения или значительной рефракции ВЧ-радиоволн. Главное значение области D с точки зрения распространения ВЧ-радиоволн состоит в *поглощении* их энергии оных. Другими словами, область D, не обеспечивая эффективного отклонения направления распространения ВЧ-сигнала, может, однако, значительно снижать удельную мощность проходящего через нее к верхним слоям ионосферы сигнала.

Относительно высокая плотность воздуха на высотах D-области, по сравнению с таковой для областей E и F, увеличивает частоту соударений между электронами и нейтральными частицами. Обусловленную этими соударениями диссипацию энергии электромагнитного сигнала принято считать *неотклоняющим поглощением* потому, что направление распространения радиосигнала остается практически неизменным. Степень поглощения зависит от уровня ионизации в области D, характеризующейся достаточно регулярной зависимостью от $\cos \chi$ на средних широтах. В результате максимальное поглощение имеет место в полдень, причем в летние месяцы максимум приходится в районе подсолнечной точки.

Неотклоняющее поглощение в диапазоне ВЧ изменяется *обратно* пропорционально квадрату радиочастоты с достаточно хорошей аппроксимацией. Таким образом, работа таких ВЧ-систем, как ЗГ РЛС, будет предпочтительной, по мере возможностей, на более высоких частотах. Более высокая частота минимизирует аттенюацию сигнала в области D и, следовательно, увеличивает мощность сигнала, падающего на более высокие отражающие слои. Ряд других преимуществ использования более высоких частот при эксплуатации ЗГ РЛС будут рассмотрены в главе 3.

Усиленная ионизация в области D частиц всех типов может возникать из-за мощных солнечных вспышек. Подобные события могут привести к значительному усилению поглощения на траекториях распространения сигнала, проходящих через области пространства, попавших под их воздействие (вспышки на Солнце). Кроме того, поглощение имеет место каждый раз при прохождении радиосигнала вверх или вниз через область D, что означает относительно меньшую аттенюацию радиосигнала при односкачковом, а не многоскачковом ионосферном его распространении вдоль освещенной Солнцем траектории. При неблагоприятных условиях (например высокой ионизации D-слоя и низкой рабочей частоте) неотклоняющее поглощение может привести к снижению уровня сигнала

на 10–20 дБ на скачок при двунаправленном распространении, что подразумевает наличие существенных последствий в работе ЗГ РЛС, ограниченных по уровню шумов локальных источников, которые не распространяются через ионосферу.

D-слой полностью исчезает в ночное время из-за процессов быстрой рекомбинации и присоединения, преобладающих после заката Солнца. Отсутствие поглощения в области D способствует более эффективному ионосферному распространению ВЧ-радиосигналов на более протяженные расстояния в ночное время. Данный эффект может способствовать как увеличению рабочей дальности обнаружения ЗГ РЛС в ночное время в нижней части ВЧ-диапазона, так и приему шума и помех от очень удаленных источников естественно-го и искусственного происхождения.

2.1.3.2. Область E

Интервал высот (90–140 км) занимает область E. Помимо обычного слоя E в ионосфере может периодически возникать аномальный слой E_s , который будет рассмотрен ниже в отдельном подразделе. Формирование обычного слоя E обусловлено мягким рентгеновским излучением с длиной волны 0,8–1,4 нм, эмиссией на длине волны лаймановской β -линии (102,6 нм) и непрерывным излучением в крайнем УФ-спектре, отвечающим за ионизацию молекулярного кислорода в диапазоне длин волн 91,2–102,7 нм.

Максимальная плотность электронов в области E обычно на два порядка выше, чем в области D и обычно возникает в дневные часы на высоте около 100 км. Степень ионизации в освещаемой Солнцем области E в ряде случаев оказывается достаточно высокой для отражения КВ-радиосигналов. Более того, теперь считается общепризнанным, что слой E обеспечивает распространение электромагнитного сигнала, наиболее эффективного для загоризонтного обнаружения целей. Этот фактор особенно важен при обнаружении и сопровождении медленных целей с помощью ЗГ РЛС, когда полезный сигнал приходится выделять посредством доплеровской обработки на фоне отражений от неоднородностей земной поверхности.

Отметим, что по сравнению со слоями в области F высота слоя E является относительно небольшой, порядка 100 км. Таким образом, наклонное отражение радиоволн от слоя E ограничивает распространение КВ-радиосигнала дальностями, не превышающими величину 2000 км для траектории с однократным отражением. Высота отражения от слоя E при наземной дальности распространения радиоволны порядка 2000 км составляет 100 км. Угол места траектории излучения — не более одного градуса. Фактически для антенн, расположенных на земной поверхности, дальность распространения радиолуча с однократным отражением от слоя E может быть ограничена величиной 1500 км.

С закатом Солнца степень ионизации слоя E за счет диссоциативной рекомбинации между электронами и молекулярными ионами, включая NO^+ и O_2^+ , практически сводится на нет. А механизмы переноса отвечают только за перемещение ионизации слоя E на большие высоты в вечерние или ночные часы. За исключением сохраняющейся всю ночь остаточной ионизации, обычный слой E полностью исчезает после захода Солнца.

Структура ионизации слоя E может быть приблизительно описана профилем α -слоя Чепмена. Возникающие на практике отклонения от данного теоретического профиля обусловлены такими факторами, как наличие неучтенных крупномасштабных градиентов и механизмов переноса плазмы. В нижней части области E, характеризующейся относительно высокой концентрацией нейтральных частиц, имеет место некоторое неотклоняющее (радиолуч) поглощение, которое значительно ниже, чем в области D.

Существует и так называемое *отклоняющее* поглощение. Оно имеет место при отражении радиолуча на высоте слоя с почти максимальной степенью ионизации. Здесь происходит значительное изменение направления траектории распространения радиоволны. Другими словами, отклоняющее поглощение имеет наиболее выраженный характер при отражении радиосигнала в точке ионосферы, где скорость изменения электронной концентрации по высоте стремится к нулю. Это явление в областях E и F будет в дальнейшем выражено через понятие критической частоты.

2.1.3.3. Спорадический слой E (E_s)

Слой E_s возникает нерегулярно на высотах области E, но его появление гораздо сложнее прогнозировать, чем обычного слоя E. В отличие от обычного слоя E, существующего только в дневное время, спорадическая ионизация в области E может иметь место как в дневное, так и в ночное время. Как отображено в названии, спорадический слой E_s имеет нерегулярный характер и существует в течение непродолжительного времени, обычно несколько часов или менее.

Его происхождение не вполне понятно. Согласно одной из теорий происходит возникновение в средних широтах очень узких сильно отражающих слоев из металлических частиц, оставшихся в атмосфере после сгорания метеоритов. Имеет место уплотнение концентрации частиц в результате взаимодействия ветровых градиентов (сдвигов) с геомагнитным полем Земли [Whitehead, 1989]. Толщина спорадического слоя E_s относительно невелика, обычно несколько километров. Сам слой может хаотически распадаться на облака или так называемые бесформенные образования с аномально высокой степенью ионизации. Протяженность «облаков» может составлять от десятков до сотен километров с вкраплениями частично «радиопрозрачных» областей, через которые КВ-сигнал может проходить до области F.

Попытки прогнозирования условий возникновения спорадического слоя E_s в средних широтах и его характеристик по большей части заканчивались неудачно. Однако было установлено, что возникновение спорадического слоя E_s носит более выраженный характер в дневные и предвечерние периоды в летний сезон. Несмотря на то что спорадический слой E_s зачастую обеспечивает чуть ли не самую высокую стабильностью КВ-сигнала (почти зеркальное отражение и очень слабое искажение спектра), его сильная пространственная изменчивость, связанная с вероятностью возникновения разрывов канала распространения, может привести к множественным траекториям распространения радиосигнала.

Механизмы возникновения спорадического слоя E_s , по-видимому, совершенно разные на низких и высоких широтах. Считается, что возникновение спорадического слоя на низких широтах обусловлено нестабильностью плазмы из-за циркулирующих в атмосфере нейтральных ветров вследствие градиентов давления, способствующих образованию потоков заряженных частиц на высотах слоя E — так называемой экваториальной электроструи [Davies, 1990]. Экваториальный спорадический слой E_s обычно существует в дневное время с небольшими сезонными колебаниями. Образование спорадического слоя на высоких широтах обусловлено поглощением магнитосферой электронов высоких энергий. Небольшие сезонные вариации спорадического слоя E_s , случающиеся большей частью в ночное время, также существуют на высоких широтах.

Временами спорадический слой E может оказываться «непроницаемым» в связи с более высокой плотностью его ионизации по сравнению с любым другим ионосферным слоем. В этом случае его высокая отражающая способность полностью экранирует прохождение КВ-сигналов к области F. Данный механизм известен как экранирующий слой E_s . С другой стороны, с его помощью может обеспечиваться стабильный режим работы ЗГ РЛС при одномодовом распространении сигнала на частотах в верхней части КВ-диапазона (или даже выше, чем 30 МГц). Это может значительно улучшить характеристику обнаружения и сопровождения медленных надводных судов. Опять же экранировка прохождения сигнала спорадическим слоем E_s может привести к временному прекращению распространения радиосигнала через F-область. Это ограничивает дальность действия ЗГ РЛС при однократном отражении от ионосферы дальностью, не превышающей 2000 км.

2.1.3.4. Область F

Максимальная концентрация свободных электронов обычно возникает в области F — самой высокой области ионосферы. В дневное время область F может «расщепляться» на два слоя, а именно слой F1 — на высоте от 140 до 210 км, и слой F2, как правило, выше 210 км. Расслоение вертикального профиля электронной концентрации в области F с двумя явно выраженными максимумами (слоев F1 и F2 соответственно) показано на рис. 2.3.

Образование слоя F1 с отчетливым максимумом концентрации свободных электронов в интервале высот от 140 до 210 км зависит главным образом от характеристик вышележащего слоя F2. Довольно часто толщина и максимум ионизации слоя F2 настолько велики, что он «поглощает» в себя относительно слабый нижележащий слой F1. Другими словами, слой F1 зачастую «тонет» в нижней части слоя F2. В результате это может быть причиной наблюдения днем в вертикальном профиле электронной концентрации только максимума ионизации слоя F2.

Большая высота слоя F1 по сравнению со слоем E, как правило, обеспечивает большую, чем 2000 км, дальность ионосферного распространения КВ-сигналов. По сравнению со слоем E слой F1 в меньшей степени похож на теоретический α -слой Чепмена, но так же, как и слой E, полностью исчезает в ночное время — за исключением некоторой остаточной ионизации. В связи с этим обычные слои E и F1 соответственно считаются зависимыми от солнечного излучения.

В отличие от гелиогенных слоев E и F1 высокие уровни ионизации в слое F2 поддерживаются всю ночь за счет механизмов переноса плазмы, что оказывается достаточным для эффективной работы ЗГ РЛС. Электронная концентрация в слое F2 может быть на один или два порядка выше, чем в обычном слое E. На средних широтах максимальная электронная плотность слоя F2 имеет место в интервале высот 210–350 км, хотя в экваториальной области она значительно выше. Слой F2 обеспечивает наземную дальность односкачкового распространения радиосигнала порядка 3000–4000 км. Таким образом, для ЗГ РЛС и прочих КВ-систем, использующих эффект отражения ЭМВ от ионосферы, наиболее важным является слой F2. Это определяется тремя главными его особенностями.

Во-первых, слой F2 обычно отражает самые высокочастотные сигналы. Этим зачастую обусловлен ряд эксплуатационных преимуществ ЗГ РЛС, включая более низкий уровень шумового фона, более высокое пространственное разрешение и, следовательно, повышенные характеристики обнаружения малоразмерных целей. Во-вторых, так как слой F2 наиболее высотный, он обеспечивает наибольшую наземную дальность для односкачкового распространения радиосигнала. В частности, по сравнению со слоем E распространение радиосигнала с отражением от слоя F2 может увеличить дальность действия ЗГ РЛС практически до 3000 км (то есть в два раза). В-третьих, слой F2 всегда присутствует в дневное и в ночное время, что обеспечивает круглосуточный режим работы ЗГ РЛС.

Из всех ионосферных слоев спорадический слой E_s и слой F2 считаются наименее соответствующими теоретическому слою Чепмена. Максимальная ионизация в слое F2 является равным воздействием механизмов переноса и рекомбинации [Davies, 1990]. По сравнению с дневными слоями E и F1 слой F2 характеризуется гораздо меньшей регулярностью. Поэтому прогнозирование параметров слоя F2 является более трудной задачей по сравнению с прогнозированием характеристик слоев, которые зависят только от солнечного излучения и величины зенитного угла χ . Кроме того, известно, что слой F2 зависит от *геомагнитной обстановки*. Дело обстоит именно таким образом потому, что влияющие на степень ионизации определенные механизмы переноса плазмы в слое F2 сильно зависят от магнитного поля Земли.

Причина круглосуточного существования слоя F2 состоит в переносе свободных электронов на большие высоты в ночное время из-за совокупного эффекта действия нейтральных ветров, диффузии вдоль силовых линий магнитного поля и электромагнитного дрейфа. Другая причина продолжительного существования слоя F2 заключается в относительно более медленной скорости диссоциативной рекомбинации на высоте более 210 км из-за относительно более низкой концентрации нейтральных молекулярных частиц на больших высотах.

На «долговечности» слоя F2 сказывается более высокая доля более легких ионизированных атомов на больших высотах (в частности атомов кислорода, ионизированных излучением с длиной волны 14–91,1 нм), а также очень маленькая скорость рекомбинации свободных электронов с положительно ионизированными атомами. Этими же причинами объясняется (хоть и в несколько упрощенном виде) сохранение концентрации электронов

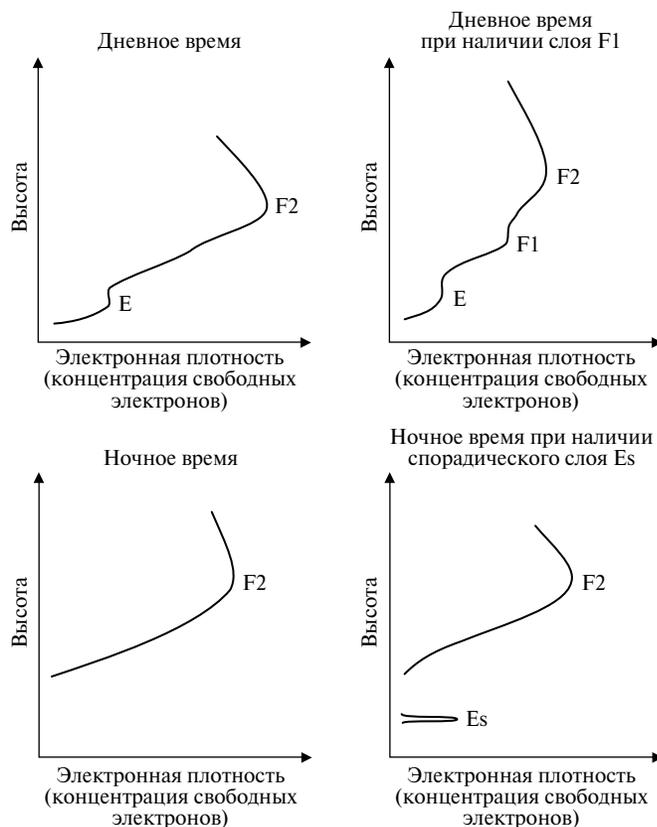


Рис. 2.4. Четыре схемы, дающие количественное представление о дневных колебаниях электронной плотности вертикального профиля области F2 ионосферы. Слой F1 может оказаться видимым в дневное время, если не находится в «тени» слоя F2, в то время как спорадический слой Es может наличествовать как в дневное, так и в ночное время

слоя F2 в ночное время до наступления следующего дня, сопровождающегося возобновлением процесса фотоионизации.

Несмотря на возможность в известной мере прогнозировать первоначальные характеристики и поведение слоя F2, его подробная структура и динамика не подлежат такому же точному расчету, как в случае зависимых от солнечного излучения слоев. На рис. 2.4 предлагается сводная справка по вариациям электронной плотности для вертикального профиля слоя F2 ионосферы в дневное и ночное время.

Более того, заблаговременное моделирование свойств слоя F2 с точностью, необходимой для оптимизации рабочих характеристик ЗГ РЛС, не представляется возможным. Вследствие этого для более эффективной работы ЗГ РЛС необходимо точное определение преобладающих параметров состояния ионосферы, которое невозможно без развертывания сетей на основе радиотехнических средств зондирования ионосферы.

Использование подобных средств имеет практический смысл как при определении характеристик слоя F2 (в реальном масштабе времени с привязкой к конкретной станции зондирования), так и для более низких слоев, в особенности поведения спорадического слоя Es. Подобные радиотехнические средства можно рассматривать в качестве дополнительных подсистем в составе оборудования ЗГ РЛС, главные функции которых будут рассмотрены в главе 3.

2.1.3.5. Солнечная активность

До сих пор во внимание не принимался факт существенной зависимости электронной плотности ионосферного слоя F2 от вариаций солнечной активности, влияющих на интенсивность солнечной радиации и попадающих в атмосферу Земли, излучаемых Солнцем быстрых частиц. Вариации солнечной активности принято определять по числу солнечных пятен. Инструментальные наблюдения солнечных пятен начались с изобретением Галилеем телескопа в 1610 г. На рис. 2.5 представлена зависимость от времени числа солнечных пятен за период 1954–2010 гг. Когда выяснилось, что число наблюдаемых пятен характеризуется непостоянством, Гаусс предположил наличие связи между числом солнечных пятен (число Вольфа, SSN — Sunspot Number) и изменением магнитного поля Земли.

Приблизительно в 1840 г. астроном-любитель Генрих Швабе отметил очевидную 10-летнюю цикличность числа солнечных пятен. Данное наблюдение подтолкнуло Рудольфа Вольфа — профессионального астронома из Цюрихской обсерватории, к изучению обширных исторических данных наблюдений начиная с 1700 года. В 1856 году исследовательская группа под руководством Вольфа установила наличие 11-летнего цикла солнечной активности. В 1890 году Маундер привлек внимание научного сообщества к 70-летнему периоду с 1645 по 1715 гг., в течение которого солнечные пятна практически не наблюдались. Считается, что данный период, получивший название минимума Маундера, является частью более крупномасштабной вариации. Как видно из рис. 2.5, в течение 11-летнего солнечного цикла число солнечных пятен колеблется в диапазоне от нуля до нескольких единиц при солнечном минимуме, до 100 и более — при солнечном максимуме.

Рост числа солнечных пятен обуславливает более высокий уровень ионизации ионосферы. Более высокое число солнечных пятен сопровождается не только максимальными концентрациями свободных электронов в окрестностях максимумов ионосферных слоев, но и большей высотой максимумов, особенно в области F2. Эти факторы могут значительно влиять на рабочие характеристики ЗГ РЛС. Например, во время солнечного максимума ЗГ РЛС может работать на более высоких частотах, что оказывает благоприятное воздействие на ее рабочие характеристики.



Рис. 2.5. Ежемесячное число солнечных пятен (число Вольфа) и 12-месячное скользящее среднее R_{12} (округленные значения числа Вольфа), наблюдаемые с середины 1950-х. Годы, соответствующие циклам максимальной и минимальной солнечной активности (максимумы и провалы), называются солнечным максимумом и минимумом соответственно

Более высокая степень ионизации также ведет к уменьшению размера мертвой зоны для заданной частоты. Это увеличивает размеры зоны обзора ЗГ РЛС за счет эффективного уменьшения минимальной дальности обнаружения на минимальной рабочей частоте заложенного в РЛС диапазона рабочих частот. С другой стороны, более высокое расположение слоя увеличивает наземную дальность односкачкового распространения сигналов с более высокими частотами, что способствует увеличению максимальной дальности обнаружения ЗГ РЛС. В конечном итоге высокое число солнечных пятен улучшает характеристики распространения, обеспечивая как расширение зоны обзора ЗГ РЛС, так и улучшение ее рабочих характеристик.

Однако с усилением солнечной активности возрастает число индетерминированных гелиогеофизических явлений (солнечных вспышек, магнитных бурь), что оказывает негативное влияние на качество и «бесперебойность» ионосферного распространения радиосигнала. Несмотря на то что солнечные возмущения могут иметь место в любое время солнечного цикла, частота и интенсивность их повторения увеличиваются в районе солнечного максимума. Другими словами, преимущества более высокой степени ионизации и более высокого расположения слоя в периоды высокой солнечной активности зачастую сопровождаются ухудшением условий распространения радиосигналов.

За редкими исключениями солнечные возмущения обычно негативно влияют на рабочие характеристики ЗГ РЛС. Причины и характеристики различных типов солнечных возмущений, а также их влияние на работу КВ-систем будут рассмотрены в следующем разделе.

2.2. Пространственная и временная изменчивость

При обсуждении пространственно-временной морфологии ионосферы принято различать вариации двух видов. Во-первых, это вариации, обусловленные Солнцем, находящимся в обычном, *спокойном* состоянии. Во-вторых, менее типичные вариации, обязанные своим происхождением случающимся время от времени переходам определенных областей Солнца в возбужденное или *активное* состояние. Вариации обоих типов оказывают значительное влияние на распространение КВ-сигналов и, следовательно, должны учитываться при эксплуатации ЗГ РЛС. В данном разделе речь пойдет о крупномасштабных вариациях ионосферы при спокойном состоянии Солнца.

Первая часть данного раздела посвящена описанию базовой теории вертикального радиозондирования в целях измерения ключевых параметров ионосферы применительно к работе ЗГ РЛС. Пространственные и временные вариации ионосферы применительно к измерению и моделированию ключевых параметров рассматриваются во второй части данного раздела. В третьей части раздела предлагается краткий обзор влияния ионосферных возмущений и бурь, обусловленных различными типами солнечных событий.

Изменчивость ключевых параметров ионосферы при спокойном Солнце имеет место в широких пространственно-временных интервалах. В контексте эксплуатации ЗГ РЛС оператор реагирует на крупномасштабные изменения ионосферы соответствующим выбором таких параметров зондирующего сигнала (ЗС), как несущая частота, ширина эффективной полосы и частота повторения. В том числе могут приниматься решения на обзор всей зоны контроля ЗГ РЛС или на обзор части зоны контроля. Выбор параметров ЗС осуществляется для оптимального решения поставленной задачи. При обзоре части зоны контроля пространственно-временные изменения ключевых характеристик ионосферы могут иметь незначительный масштаб. В этом случае параметры ЗГ РЛС могут изменяться на интервале времени радиолокационного контакта с целью и при обработке радиолокационных данных.

При обзоре всей зоны контроля пространственно-временная изменчивость ключевых параметров ионосферы характеризуется почасовым изменением концентрации свободных

электронов (при определенных условиях концентрация электронов может изменяться в течение даже нескольких минут). Эта изменчивость приблизительно пропорциональна времени принятия решения по обнаружению надводного объекта в заданной части зоны контроля. Обнаружение в этой части зоны контроля проводится при заданных параметрах зондирующего сигнала и параметрах обработки радиолокационных данных. Поэтому режим сканирования пространства заданной диаграммой направленности антенной системы ЗГ РЛС должен находиться в соответствии с параметрами крупномасштабной пространственно-временной изменчивости условий скачкового распространения КВ-волн с необходимой перестройкой по частоте в процессе решения задачи, поставленной перед ЗГ РЛС.

На более грубом уровне временная изменчивость ионосферы включает как сезонные колебания ключевых параметров, так и вариации параметров, обусловленные изменением цикла солнечной активности. Перечисленная изменчивость накладывается на суточную вариацию ключевых параметров ионосферы. В свою очередь, пространственная изменчивость ионосферы в глобальном масштабе может рассматриваться для трех основных областей широт, а именно низких или экваториальных (в пределах ± 20 градусов от магнитного экватора), высоких широт (полярные области в пределах полярных шапок и зоны полярных сияний¹) и средних широт. Следует отметить, что магнитное поле Земли хорошо аппроксимируется полем диполя², ориентация которого не совпадает с осью вращения Земли. Поэтому имеет место несовпадение географического и магнитного экваторов Земли.

Крупномасштабной ионизацией определяется усредненное состояние ионосферы в заданном месте в заданный момент времени. Такая изменяющаяся по времени усредненная структура ионосферы может считаться квазистационарной в течение относительно коротких временных интервалов, не превышающих на средних широтах величину порядка 10 минут. Глобальные характеристики ионосферы еще быстрее изменяются на средних широтах рядом с границей света и тени (на рассвете и закате) или при наличии ионосферных возмущений и магнитных бурь.

Колоссальное количество данных о крупномасштабных вариациях ионосферы было собрано с помощью наземного радиозондирующего оборудования — так называемых ионосферных станций. Статистическое описание пространственно-временной морфологии ионосферы было получено на основании результатов регулярных замеров параметров ионосферы, осуществленных с помощью международной сети зондирующих станций. По сравнению с крупномасштабной вариацией ионосферы, которую можно рассматривать как постепенно формирующуюся усредненную структуру ионизации, мелкомасштабные пространственные и временные вариации можно рассматривать в качестве «произвольных» флуктуаций электронной концентрации.

В этом разделе рассматриваются основные особенности вертикального отражения радиоволн от ионосферы в целях объяснения главных свойств регистрируемых этими системами треков на так называемой ионограмме. Затем изучается значение нескольких ключевых параметров ионосферы, выделенных из накопленных данных и эмпирических моделей, через которые описывается крупномасштабная временная и пространственная вариация ключевых параметров ионосферы.

2.2.1. Вертикальное радиозондирование

Существует несколько экспериментальных методик исследования параметров ионосферы. Эти методики можно разделить на две большие категории: дистанционное зондирование и прямые измерения. Прямые измерения параметров ионосферы осуществляются с помощью установленной на ракетах или спутниках аппаратуры прямого сбора информации о физических свойствах ионосферной плазмы, например концентрации частиц,

¹ Области вокруг магнитных полюсов Земли на широтах $65-70^\circ$.

² В данном случае термин «отклонение» относится к величине смещения магнитной оси Земли относительно оси ее вращения.