

ИНСТИТУТ РАДАРНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ
РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ
КОМПЛЕКСЫ «МЕТЕОЯЧЕЙКА»**



**Санкт-Петербург
Гидрометеоиздат
2007**

Авторский коллектив: Н. В. Бочарников, Г. Б. Брылев, Л. И. Кузнецова, А. Г. Линева, А. С. Лялюшкин, В. А. Оленев, Т. В. Паркин, А. С. Солонин, В. К. Устинов, В. И. Фролов, Е. С. Четверикова, Н. А. Якимайнен

Ответственные редакторы: Н. В. Бочарников, А. С. Солонин

Редакционная коллегия:

А. С. Солонин, д-р физ.-мат. наук (председатель)

Т. А. Базлова, канд. физ.-мат. наук

Н. В. Бочарников, канд. физ.-мат. наук

Г. Б. Брылев, канд. физ.-мат. наук

В. И. Фролов, канд. тех. наук

В. А. Оленев

Изложены сведения об основных функциях, техническом устройстве, программном и информационном обеспечении, процедурах обработки и особенностях эксплуатации автоматизированных метеорологических радиолокационных комплексов «Метеоячейка» и «Метеор—Метеоячейка», а также об их работе в составе единой многофункциональной автоматизированной радиолокационной сети Росгидромета.

Кроме того, приводятся основные понятия и научные достижения поляризационных методов метеорологических измерений с помощью доплеровских метеорологических радиолокаторов.

Information on main functions, a technical construction, software and informational support, procedures of processing and operation of automated meteorological radar complexes «Meteojacheika» and «Meteor-Meteojacheika», and also their operation in composition of the uniform multifunction automated radar network of Federal Hydrometeorology and Environmental Monitoring Service are presented.

Besides, the basic concepts and scientific reachings of polarization methods of meteorological measurements using Doppler meteorological radars are presented.

*Печатается по решению Научно-технического совета
Института радарной метеорологии от 29 декабря 2006 г.*

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	5
Предисловие	7
Глава 1. Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеоячейка»	10
1.1. Метеорологический радиолокатор МРЛ-5	11
1.2. Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеоячейка»	15
1.3. Основные технические характеристики	18
1.4. Функциональные возможности	23
1.5. Рабочая станция МАРС	29
1.6. Техническое обслуживание МРЛ-5	32
1.7. Проверка (калибровка) АМРК «Метеоячейка»	41
Глава 2. Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс «Метеор—Метеоячейка»	52
2.1. Основные физические особенности доплеровских радиолокационных метеорологических измерений	53
2.2. Первичная доплеровская обработка	67
2.3. Измерение отражаемости, пороги обработки и устранение мешающих отражений	75
2.4. Содержание процесса первичной доплеровской обработки и критерии его завершения	86
2.5. Конфигурация, принцип работы и технические характеристики АМРК «Метеор—Метеоячейка»	91
2.6. Вторичная обработка	114
2.7. Калибровка приемо-измерительных трактов АМРК «Метеор—Метеоячейка»	118
2.8. Эксплуатационные особенности	129

Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка»

Глава 3. Поляризационные методы измерений в доплеровских метеорологических радиолокаторах	139
3.1. Поляризационные параметры электромагнитных волн	139
3.2. Форма, ориентация и движение гидрометеоров	144
3.3. Энергетические характеристики отражений от метеорообъектов	
3.4. Поляризационные характеристики метеорологических радиолокационных целей	156
3.5. Поляризационные параметры радиолокационных антенн и их влияние на прием отраженных сигналов	167
3.6. Физическая интерпретация поляризационных характеристик метеорообъектов	170
3.7. Поляризационная информация в оперативном режиме работы ДМРЛ	179
3.8. Классификация гидрометеоров по данным поляриметрических ДМРЛ	189
3.9. Калибровка двухполяризационного ДМРЛ	203
Заключение	212
Список литературы	213
Приложение 1. Основные технические требования к системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологического радиолокатора	216
Приложение 2. «Сведения о фильтрах, применяемых при обработке информации в АМРК «Метеор—Метеоячейка»	227
Приложение 3. Вертикальная диаграмма излучения (ВДИ) АМРК «Метеор—Метеоячейка»	233

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АМРК	Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс
АПЧ	Автоматическая подстройка частоты
АСУВД	Автоматизированная система управления воздушным движением
АЦП, А/Ц	Аналого-цифровой преобразователь
БИХ	Фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (infinite impulse response, IIR)
БПФ	Быстрое преобразование Фурье
ВДИ	Вертикальная диаграмма излучения ДМРЛ
ВЧ	Высокая частота
ДМРЛ	Доплеровский метеорологический радиолокатор
ДНА	Диаграмма направленности антенны
ДПФ	Дискретное преобразование Фурье
ИКО	Индикатор кругового обзора
МАРС	Метеорологическая автоматизированная радиолокационная сеть
МРЛ	Метеорологический радиолокатор
ППЭ	Плотность потока энергии
ПЧ	Промежуточная частота
ПЭВМ	Персональная электронно-вычислительная машина
РПУ	Радиопрозрачное укрытие антенны МРЛ
СВЧ	Сверхвысокая частота
УВД	Управление воздушным движением
ЧСИ	Частота следования импульсов

Автоматизированные метеорологические радиолокационные
комплексы «Метеоячейка»

Z_z	Эквивалентная или эффективная радиолокационная отражаемость ($\text{мм}^6 \cdot \text{м}^{-3}$ или дБZ)
v_p	Средняя радиальная скорость ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$)
σ_v	Ширина спектра ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$)
Z_{DR}	Дифференциальная отражаемость (дБ)
CDR	Коэффициент круговой поляризации
LDR	Коэффициент линейной деполяризации
K_{DP}	Удельный дифференциальный фазовый сдвиг ($\text{град.} \cdot \text{км}^{-1}$)
c	Скорость света ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$)
f	Излучаемая частота (Гц)
f_D	Доплеровский сдвиг частоты
P_r	Принимаемая мощность (мВт или $\text{дБ} \cdot \text{мВт}$)
P_t	Излучаемая мощность (кВт)
λ	Длина излучаемой волны (см)
θ	Ширина диаграммы направленности антенны на уровне половины мощности (град.)
τ	Длительность импульса (мкс)
S	Радиолокационный частотный диапазон (2000—4000 МГц, $\lambda = 15...7,5 \text{ см}$)
C	Радиолокационный частотный диапазон (4000—8000 МГц, $\lambda = 7,5...3,75 \text{ см}$)
X	Радиолокационный частотный диапазон (8000—12 500 МГц, $\lambda = 3,75...2,4 \text{ см}$)
Φ_{DP}	Дифференциальный фазовый сдвиг (град.)
BITE	Встроенные средства диагностики состояния оборудования
COHO	Когерентный гетеродин
CPI	Интервал когерентной обработки (coherent processing interval)
FIR	Согласованные полосовые цифровые фильтры с заданной импульсной характеристикой (finite impulse response)
PLC	Программируемые логические контроллеры
RAVIS	Программа общего управления радиолокатором (radar visualization software)
SQI	Показатель качества сигнала (signal quality index)
STALO	Стабилизированный гетеродин

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первые наблюдения за облаками и осадками с помощью радиолокаторов были проведены более 60 лет назад. Примерно в то же время теоретические исследования показали, что из радиолокационного сигнала сантиметрового диапазона, отраженного от облаков и осадков, можно извлечь большой объем метеорологической информации.

Мощность отраженных от метеообразований сигналов на фиксированной дальности пропорциональна отражаемости метеообразований Z . Величина Z реагирует на изменение размеров отражающих частиц гидрометеоров и их концентрацию, которые, в свою очередь, возрастают по мере увеличения степени опасности явления (ливни, грозы, град).

Средняя скорость межимпульсного изменения фазы отраженных от метеообразований сигналов пропорциональна доплеровской частоте сигнала и через нее средней радиальной скорости метеообразований v_r . Ширина энергетического спектра отражений пропорциональна дисперсии скоростей метеообразования σ_v .

Поляризационные характеристики отраженных от метеообразований сигналов (дифференциальная отражаемость Z_{DR} , дифференциальный фазовый сдвиг Φ_{DR} , линейное деполяризационное отношение LDR и др.) позволяют определять микрофизическую структуру метеообъекта (форму и фазовое состояние частиц гидрометеоров, их преимущественную ориентацию в пространстве).

Следует подчеркнуть, что от первых научных сообщений о принципиальных физических возможностях получения информации с помощью радиолокатора до ее получения в процессе оперативных наблюдений прошло не менее тридцати лет. В этот период решались воп-

росы физической интерпретации отраженных сигналов, разработки специализированных метеорологических радиолокаторов и аппаратуры оперативной обработки отраженных сигналов, а также специального программного обеспечения процедур получения, обработки и передачи метеорологической информации потребителям.

Метеорологическая информация, извлеченная из радиолокационного сигнала, отраженного от метеообъектов, только тогда заслуживает внимания и уважения синоптиков и специалистов по чрезвычайным ситуациям в оперативном режиме их работы, когда полностью соблюдаются процедуры обеспечения ее качества.

К 2007 г. в оперативной практике нашли широкое применение современные автоматизированные метеорологические радиолокаторы — как обычные (Z), так и доплеровские (Z , v_p , σ_v). Близки к массовому внедрению в оперативную работу многопараметрические (поляризационные) радиолокаторы (Z , v_p , σ_v , Z_{DR} , Φ_{DP} , LDR).

Издание монографии «Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети» (СПб: Гидрометеиздат, 2002), подготовленной Институтом радарной метеорологии, способствовало проведению плодотворных дискуссий в подразделениях Росгидромета.

Усилиями ведущих НИИ Росгидромета (ГМЦ, ГВЦ и ГРМЦ) были разработаны единые требования потребителей автоматизированной метеорологической радиолокационной информации к разработчикам аппаратуры. Они приведены в приложениях к приказу руководителя Росгидромета А. И. Бедрицкого «О внедрении на радиолокационной сети Росгидромета „Основных технических требований к системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов”» (№ 95 от 21.06.2004 г.).

Следует отметить, что на момент издания приказа указанным требованиям удовлетворял только автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеоячейка». В этом нетрудно убедиться, прочитав главу 1, а также приложение 1, в котором изложены упомянутые «Основные требования».

Летом 2006 г. в истории отечественных метеорологических радиолокационных наблюдений произошло важное событие: в аэропорту Пулково (Санкт-Петербург) был смонтирован и введен в эксплуатацию первый в нашей стране доплеровский метеорологический радиолока-

тор. Им стал автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеор—Метеоячейка», который представляет собой серийно выпускаемый в Германии ДМРЛ «Метеор 500С», работающий с программным обеспечением рабочей станции метеоролога АМРК «Метеоячейка», серийно выпускаемым Институтом радарной метеорологии.

Необходимо подчеркнуть, что в процессе оперативной эксплуатации в течение 15 лет программное обеспечение АМРК «Метеоячейка» постоянно совершенствуется. Его последний вариант включает весь накопленный программистами Института радарной метеорологии и специалистами Росгидромета опыт практической работы.

Описанию структуры, принципов работы и эксплуатации доплеровского МРЛ АМРК «Метеор—Метеоячейка» посвящена основная часть настоящей монографии.

В последние годы в мире стремительно возрастает интерес к поляризметрическим исследованиям в диапазонах длин волн C и S . АМРК «Метеор—Метеоячейка» предоставляет возможность проведения поляризационных измерений. Поляризметрические радиолокационные методы вышли на стадию оперативного применения, и это побудило авторский коллектив монографии подготовить раздел, посвященный поляризметрическим измерениям на ДМРЛ.

Авторский коллектив надеется, что изложенные в предлагаемой монографии материалы помогут читателям расширить свой кругозор и найдут применение в их практической деятельности.

ГЛАВА 1

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС (АМРК) «МЕТЕОЯЧЕЙКА»

Метеорологические радиолокаторы (МРЛ-2, МРЛ-5) и автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы (АМРК «Метеоячейка») предназначены для обнаружения местоположения кучевых, мощных кучевых, кучево-дождевых и слоисто-дождевых облаков и связанных с ними опасных для авиации метеорологических явлений (гроза, дождь, турбулентность, сдвиг ветра и др.), а также для определения скорости и направления их перемещения относительно аэродрома (ВПП) с целью обеспечения безопасности полетов, захода на посадку, посадки и взлета воздушных судов.

На аэродромах гражданской авиации России используются:

радиолокаторы МРЛ-2 и МРЛ-5, выпущенные в период до 1991 г. предприятием «Электромаш» (Н. Новгород);

автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы АМРК «Метеоячейка», выпускаемые Институтом радарной метеорологии (С.-Петербург) по техническим условиям, утвержденным Центром испытаний и сертификации Госстандарта России «Тест, С.-Петербург».

Метеорологические радиолокаторы МРЛ-2 и МРЛ-5 приняты на оснащение подразделений гражданской авиации и Госкомгидромета на основании межведомственных эксплуатационных испытаний комиссией Минрадиопрома, МГА и Госкомгидромета СССР.

Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеоячейка» принят на оснащение подразделений гражданской авиации и Госкомгидромета СССР распоряжением Минрадиопрома, МГА и Госкомгидромета СССР за № 84/у/89-10-705-604 от 18.02.1991 г. на основании проведенных межведомственных эксплуатационных испытаний, в процессе которых была произведена оценка

соответствия АМРК «Метеоячейка» требованиям норм годности к эксплуатации оборудования аэродромов (НГЭО-81).

Межведомственные испытания на соответствие требованиям НГЭО-81 до образования МАК (1994 г.) являлись сертификацией.

1.1. Метеорологический радиолокатор МРЛ-5

МРЛ-5 — двухволновый высокопотенциальный метеорологический радиолокатор. Он выпускается в передвижном и стационарном вариантах [9, 10].

В передвижном варианте МРЛ-5 размещается в унифицированном прицепе ПАУ-1, разделенном на два отсека: индикаторный и приемопередающий. На крыше прицепа под ветрозащитной оболочкой устанавливается антенна.

В стационарном варианте МРЛ-5 размещается на втором этаже типового здания для МРЛ-5 либо на верхнем этаже нетиповых зданий в двух изолированных комнатах. Структурная схема МРЛ-5 представлена на рис. 1.1.

Метеорологическое назначение МРЛ-5 обуславливает ряд его особенностей, которые заключаются в следующем.

МРЛ-5 имеет два канала:

канал ($\lambda = 3,2$ см) с приемным устройством, имеющим чувствительность не менее -134 дБ/Вт;

канал ($\lambda = 10$ см) с приемным устройством, имеющим чувствительность не менее -136 дБ/Вт.

Коррекция сигнала на квадрат расстояния производится на $p-i-n$ -диодах.

Для измерения мощности отраженного сигнала применяется система ступенчатого изохса с клавишным переключателем, которая основана на внесении затухания в волноводный тракт по высокой частоте на $p-i-n$ -диодах, что повышает точность измерений.

Особенность антенны МРЛ-5 заключается в совмещении двух рабочих каналов в одном антенном блоке. Антенна состоит из большого и малого параболических отражателей и двоянного двухдиапазонного облучателя. Большой параболический отражатель представляет собой параболоид вращения с круговым раскрывом. Диаметр

**Автоматизированные метеорологические радиолокационные
комплексы «Метеоячейка»**

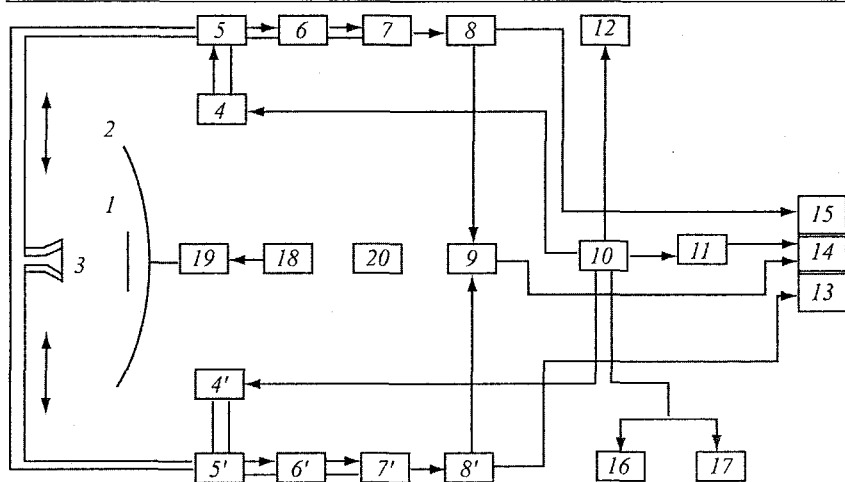


Рис. 1.1. Структурная схема радиолокатора МРЛ-5 [10].

1 и 2 — рефлекторы I и II каналов, 3 — двухдиапазонный волноводный облучатель, 4 — передатчики I и II каналов, 5 — антенные переключатели, 6 — диодные СВЧ аттенюаторы, 7 — СВЧ усилители, 8 — логарифмические усилители промежуточной частоты, 9 — устройство вычитания, 10 — шкаф угловой информации, 11 — блок управления маркером, 12 — аппаратура фоторегистрации, 13 и 15 — индикаторы ИКО/ИДВ (основной и фоторегистрации), 14 — индикатор типа А, 16 и 17 — световое информационное табло, 18 — блок управления антенной, 19 — привод антенны, 20 — кондиционер.

раскрыва отражателя 4500 мм, фокусное расстояние 1900 мм. Апертура отражателя выполнена из сплошного металлического листа. Малый параболический отражатель представляет собой также параболоид вращения с круговым раскрывом. Диаметр раскрыва отражателя 1400 мм, фокусное расстояние 590 мм. Рабочая поверхность малого отражателя выполнена из двух слоев поляризованной ткани, в которую вмонтирована сетка параллельных проводников. Малый отражатель прозрачен для волн II канала и эквивалентен металлической поверхности для волн I канала.

Описанная конструкция обеспечивает режим градозащиты с одинаковыми диаграммами направленности в обоих каналах, равными $1,5^\circ$. При переходе к режиму штормоповещения малый отражатель снимается; при этом оба рупора облучают всю поверхность большого отражателя, в результате чего диаграмма направленности I канала су-

жается до $0,5^\circ$, а диаграмма направленности II канала остается практически неизменной и равной $1,5^\circ$. Поляризация поля антенны в I канале вертикальная, во II канале горизонтальная.

В системах управления антенной МРЛ-5 используются двигатели постоянного тока серии 32ФТ, управление которыми осуществляется через электромашинные усилители серии ЭМУ-12А. Их применение существенно упростило силовую часть системы электропривода.

Электропривод МРЛ-5 позволяет решать следующий круг задач:

вращение по азимуту (I программа) с регулируемой скоростью от 0 до 6 об./мин;

сканирование по углу места (II программа) в пределах от -1 до 95° и обратно с регулируемым периодом сканирования от 24 до 72 с;

сканирование в секторе как по азимуту, так и по углу места (выбираемому) в любом углу с величиной сектора 45° и регулируемым периодом от 12 до 36 с;

режим ручного доворота с регулируемыми скоростями от 0 до 36° в секунду по азимуту и от 0 до 15° в секунду по углу места;

средняя квадратическая ошибка в отработке заданных углов в позиционном режиме не более $\pm 0,25^\circ$, что повышает точность измерения координат метеобъектов.

В передающих устройствах осуществляется плавный подъем высокого напряжения, стабилизация режима работы при изменении напряжения сети, автоматическое снижение напряжения при пробоях и пропусках магнетрона, что повышает надежность аппаратуры.

Контрольно-измерительная аппаратура обеспечивает оперативный контроль энергетического потенциала радиолокатора.

МРЛ-5 имеет два идентичных индикатора ИКО/ИДВ (для метеоролога и фоторегистрации). Для увеличения разрешающей способности, улучшения визуального и количественного анализа метеообразований в индикаторе применена электронно-лучевая трубка 45ЛМ1В с экраном диаметром 450 мм. Индикатор ИКО/ИДВ совмещает в себе функции индикатора кругового обзора в полярных координатах азимут—наклонная дальность (ИКО) и индикатора в прямоугольных координатах горизонтальная дальность—высота (ИДВ). Выбор режима работы индикатора осуществляется оператором с панели управления индикатором. При этом индикатор обеспечивает воспроизведение ви-

деосигналов I и II каналов РЛС или их отношения; на экране индикатора в масштабе до 100 км отображается подвижная мерцающая метка маркера дальности для точного отсчета дальности метеообразования (точность ± 100 м).

В качестве индикатора типа А (амплитудного) используется двухлучевой осциллограф С1-55, на экране которого может индицироваться любое радиоэхо.

Датчиками угловой информации по азимуту и углу места являются фотоэлектрические преобразователи вал-код (линейные и функциональные), соединенные точной зубчатой безлюфтовой передачей с валами. Циклические коды с преобразователей поступают в шкаф угловой информации, где преобразуются в двоичные функциональные коды, используемые для выработки разверток на индикаторах для определения координат, а также для индикации на световом табло и для использования в аппаратуре автоматической обработки метеоинформации.

В МРЛ-5 имеется световое табло, отображающее:

календарь (число, месяц, год) и время (часы, минуты);

характеристики каждого из двух работающих каналов (номер канала, степень затухания системы изозха, допусковый контроль потенциала, факт включения коррекции на квадрат расстояния);

координаты и параметры цели (масштаб дальности развертки, азимут, угол места, высота цели, наклонная дальность, горизонтальная дальность).

В МРЛ-5 для фоторегистрации используется автоматический фотоаппарат ПАУ-376-1, управляемый дистанционно. Он не требует специального тубуса для затемнения и обеспечивает фоторегистрацию открытого экрана индикатора и светового табло при включенном освещении на рабочем месте оператора. Емкость кассеты фотоаппарата 900 кадров.

Аппаратура МРЛ-5 выполнена из полупроводниковых элементов с широким применением интегральных микросхем на стандартных платах с печатным монтажом. Блоки, шкафы, узлы максимально унифицированы. Все это облегчает эксплуатацию аппаратуры и повышает надежность ее работы.

Благодаря применению электропитания от сети частотой 50 Гц не требуется механических преобразователей в частоту 400 Гц, что существенно облегчает эксплуатацию изделия.

Диаметр ветрозащитной оболочки МРЛ-5 составляет 640 см.

1.2. Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеоячейка»

Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеоячейка» предназначен для автоматизации метеорологического радиолокатора МРЛ-5 с целью обеспечения аэродромов и автоматизированных систем управления воздушным движением информацией об облачности и связанных с ней опасных явлениях погоды (сильные ливни, грозы, град, шквал) с высокой надежностью и оперативностью в наиболее удобном для потребителя виде. АМРК имеет повышенную помехозащищенность и позволяет эксплуатировать МРЛ в условиях аэропорта при дистанционном режиме управления с использованием обычных кроссовых линий связи [9].

Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс «Метеоячейка» состоит из двухволнового радиолокатора МРЛ-5 и средств автоматизации получения, обработки и передачи радиолокационной информации. Типовая схема АМРК приведена на рис. 1.2.

В состав оборудования АМРК «Метеоячейка» входят:

метеорологический радиолокатор МРЛ-5,

комплект технических средств автоматизации получения информации,

центральная система АМРК (ЦС),

специализированные рабочие станции потребителей информации.

АМРК является пространственно распределенной системой управления МРЛ. Центральная система по команде оператора при работе в штатном режиме или по таймеру при работе в автоматическом режиме формирует комплексные управляющие команды, которые по каналу связи передаются в устройство предварительной обработки сигналов дистанционное (УПО-ДМ).

Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка»

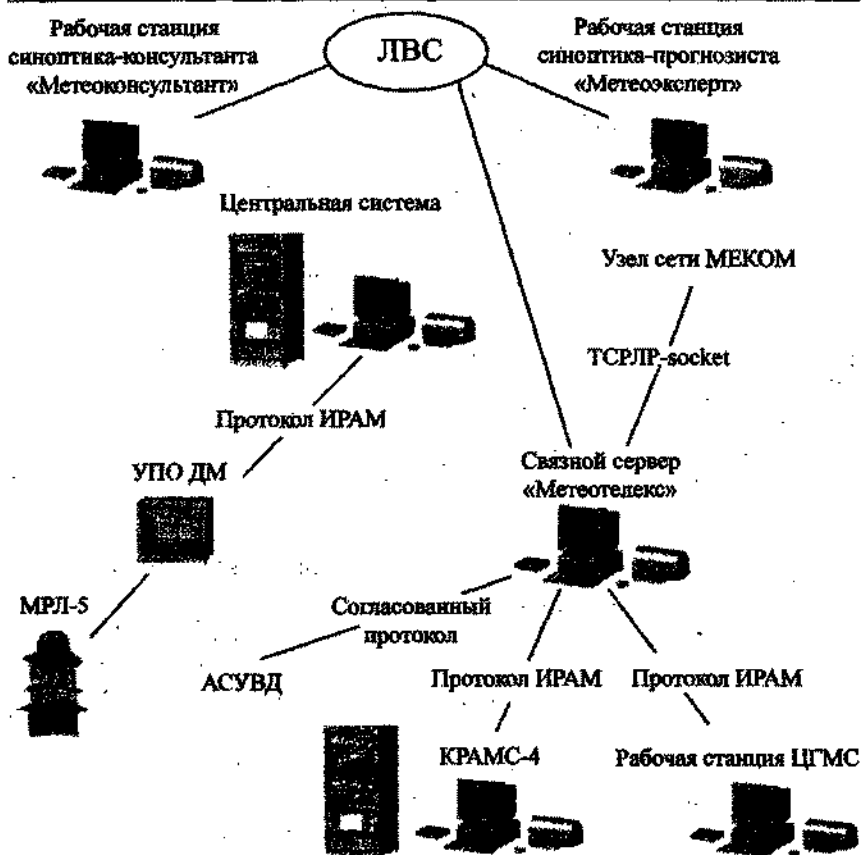


Рис. 1.2. Структурная схема АМРК «Метеоячейка» [9].

УПО-ДМ устанавливается в аппаратной кабине МРЛ. УПО-ДМ представляет собой специализированную ЭВМ, непосредственно управляющую МРЛ и выполняющую всю предварительную обработку и сжатие информации. По окончании сеанса наблюдений полученные данные передаются в центральную систему, где производится их анализ, архивация, визуализация и передача потребителям.

В процессе работы АМРК производит постоянный контроль всех устройств, входящих в его состав, и при необходимости формирует предупреждающие сообщения для оператора. Такое распределение функций управления и обработки данных позволяет размещать центральную систему АМРК на любом удалении от МРЛ. Как показала практика, такой распределенный вариант установки является типовым. Единственное требование — обеспечение скорости обмена по линии связи не ниже 4800 бит/с. Таким образом, при наличии обычной телефонной линии связи оператор может управлять МРЛ, который удален от него на десятки или сотни километров так же, как и при размещении центральной системы в здании МРЛ.

Специальное программное обеспечение АМРК «Метеоячейка» реализовано в виде комплекта 32-разрядных приложений, работающих под управлением ОС Windows XP Pro в локальной вычислительной сети (ЛВС). Рабочие станции могут работать также в среде Windows 95/98/2000/NT4.0.

Информация с любого АМРК может передаваться в любую организацию Росгидромета по сети АСПД (сеть МЕКОМ) с использованием протокола TCP/IP-socket в коде BUFR, в том числе в любые центры объединения радиолокационной информации. Решение о передаче данных конкретному потребителю принимает владелец информации.

Устройство предварительной обработки сигналов УПО-ДМ, являющееся составной частью АМРК «Метеоячейка», обеспечивает выполнение следующих функций:

- дистанционное управление и контроль МРЛ-5 по телефонной линии связи;

- регистрацию, обработку и накопление данных, поступающих из приемников I и II каналов МРЛ-5;

- передачу накопленной информации по линии связи в центральную систему;

- диагностику всех устройств, входящих в состав УПО-ДМ.

Конструктивно УПО-ДМ состоит из кабинета-стойки стандарта 19 дюймов, основной и резервной секций обработки на базе высоконадежных промышленных ЭВМ, оптопанели для защиты от молниевых разрядов, устройства коммутации сигналов и комплекта модемов.

Основной задачей центральной системы является управление работой МРЛ, анализ и интерпретация полученных результатов измерений и передача данных потребителям в необходимом объеме.

Программное обеспечение центральной системы выполнено на базе Windows XP Pro.

Комплект технических средств центральной системы включает в себя основную и резервную ПЭВМ, устройство бесперебойного питания, коммутатор каналов, модемную стойку и коммуникационную секцию с защитой от молниевых разрядов, которые размещаются в кабине-стойке стандарта 19 дюймов.

В состав АМРК может входить набор специализированных рабочих станций. Конкретная конфигурация определяется заказчиком. Передача данных от центральной системы на рабочие станции может выполняться по локальной вычислительной сети или по телефонным каналам связи. Рабочие станции отличаются друг от друга объемом и формой представления информации. В настоящее время на сети АМРК работают следующие специализированные рабочие станции:

- синоптика-консультанта летного состава,
- синоптика-консультанта диспетчерского состава (синоптика РЦ),
- синоптика-прогнозиста АМСГ (АМЦ),
- синоптика-прогнозиста ЦГМС,
- руководителя полетов АС УВД,
- техника-метеоролога АМСГ,
- оперативного дежурного МЧС.

При большом числе рабочих станций передача данных выполняется через связной сервер «Метеотелекс». Специальное программное обеспечение связного сервера АМРК позволяет одновременно работать с 18 каналами связи, включая скоростные каналы с протоколом TCP/IP-socket.

1.3. Основные технические характеристики

Основные технические данные МРЛ-5 и АМРК «Метеоячейка» приведены в табл. 1.1 [9, 10] и 1.2 [9].

Таблица 1.1

Основные технические характеристики МРЛ-5 [10]

Параметр	Единица измерения	МРЛ-5	
		I канал	II канал
Несущая частота	МГц	9595 ± 15	2950 ± 15
Длина волны	см	3, 14	10, 15
Импульсная мощность на выходе магнетрона	кВт	250	800
Длительность импульса	мкс	1; 2	1; 2
Частота следования импульсов	Гц	500; 250	500; 250
Диаметр зеркала (параболоида вращения)			
в режиме градозащиты	м	1,4	4,5
в режиме штормоповещения	м	4,5	4,5
Ширина диаграммы направленности излучения			
в режиме градозащиты	град.	1,5	1,5
в режиме штормоповещения	град.	0,5	1,5
Коэффициент усиления антенны			
в режиме градозащиты	дБ	40	39
в режиме штормоповещения	дБ	49	40
Уровень боковых лепестков			
в режиме градозащиты	дБ	-23	-25
в режиме штормоповещения	дБ	-23	-25
Скорость вращения антенны			
по азимуту	об/мин	0—6	0—2
по углу места	Число сканирований в минуту	0—6	0—2
Чувствительность приемного устройства, не менее	дБ/Вт	-134	-136

**Автоматизированные метеорологические радиолокационные
комплексы «Метеоячейка»**

Продолжение табл. 1.1

Параметр	Единица измерения	МРЛ-5	
		I канал	II канал
Масштабы дальности индикатора кругового обзора (ИКО) индикатора дальность—высота (ИДВ)	км	25; 50; 100; 300 6,25/12,5; 12,5/25; 25/50; 50/100	25; 50; 100; 300 6,25/12,5; 12,5/25; 25/50; 50/100
Общая потребляемая мощность от сети 3 × 220 × 50 в том числе для кондиционеров	кВт	14 8	14 8
Точность позиционного режима по углу места	град.	±0,25	±0,25
Суммарное затухание, вносимое волноводно-фидерным трактом в режиме приема и передачи	дБ	6	5
Апертурная площадь	м ²	16	16

Таблица 1.2

Основные технические характеристики АМРК «Метеоячейка» [9]

Техническая характеристика	Единица измерения	Пределы измерения
<i>Обзор пространства</i>		
Продолжительность цикла обзора	мин	7
Скорость вращения антенны	об/мин	6 ± 0,5
Число углов обзора в цикле (от 0 до 85°)		42
Точность установки вертикального угла	град.	по ТУ на МРЛ-5
Автоматическое включение и выключение МРЛ-5 в режиме «Дежурство»		Предусмотрено

Продолжение табл. 1.2

Техническая характеристика	Единица измерения	Пределы измерения
<i>Преобразование радиолокационных сигналов</i>		
Число разрядов АЦП		8
Уровень видеосигнала на входе АЦП	В	0,0—2,5
Амплитуда импульса синхронизации	В	4
Протяженность элементарных ячеек дальности	м	250
Число интервалов дальности		1024
Шаг интегрирования по дальности	м	1000
Число осредняемых импульсов в режиме 2 мкс		8
<i>Точность измерения параметров облаков</i>		
Радиолокационная отражаемость, не более	дБ	± 1
Точность измерения дальности	м	± 250
Время измерения параметров комплекса	с	1
Вертикальный профиль измеряемых параметров в любом азимуте и по трассам		Предусмотрено
<i>Отображение горизонтальных сечений</i>		
Число слоев по высоте		12 ($11 + H_{\max}$)
Число основных цветовых градаций		16
Масштаб изображения	км	200, 100
Время вывода матрицы 100 × 100 ячеек	с	$1 \pm 0,5$
<i>Отображение вертикальных сечений</i>		
Шаг по азимуту	град.	1,0
Число цветовых градаций		16
Время вывода	с	1
Время перехода от одного сечения к другому	с	1

Автоматизированные метеорологические радиолокационные
комплексы «Метеоячейка»

Продолжение табл. 1.2

Техническая характеристика	Единица измерения	Пределы измерения
<i>Распознавание явлений погоды</i>		
Число категорий (гроза, град, ливень, обложные осадки, облака, шквал, смерч)		10
Время отображения карты явления погоды	с	1
Оправдываемость распознавания явлений погоды по сравнению с данными наземных метеостанций	%	Не ниже 90
Определение скорости и направления перемещения зон опасных явлений		Предусмотрено
<i>Режим измерения осадков</i>		
Интенсивность осадков по 19 градациям	ч	Каждый цикл обзора
Накопленный слой осадков за интервал		1, 3, 6, 12 и далее любой
Возможность изменения алгоритмов измерения осадков		Предусмотрена
<i>Контроль за эффективностью активных воздействий</i>		
Оценка изменения радиолокационных параметров облачности в районе и в процессе воздействия		Предусмотрена
<i>Документирование и архивация информации</i>		
Архивация радиолокационной информации		Предусмотрена на срок не менее 30 сут
Возможность работы с архивом данных		Предусмотрена в любое удобное для оператора время
Вывод на печать необходимой информации		Предусмотрен
Режим анимации		Предусмотрен за любой срок

1.4. Функциональные возможности АМРК «Метеоячейка»

1. АМРК «Метеоячейка» обеспечивает пространственное разрешение 128×128 элементов по горизонтали и 15 слоев по вертикали. Размер элемента пространственного разрешения по горизонтали составляет от 1 до 4 км, по вертикали — от 0,5 до 1,5 км. Разрешение в стандартном режиме штормоповещения — 100×100 элементов по горизонтали при размере элемента 4×4 км и 11 слоев по вертикали при толщине слоя 1 км.

2. Согласно техническим условиям на АМРК, стандартный режим работы АМРК автоматический с интервалом от 10 до 180 мин.

3. Интенсивность осадков на АМРК измеряется в каждый срок наблюдений и отображается для потребителей по элементам площади 4×4 км. Стандартные градации интенсивности осадков приведены в табл. 1.3.

При наличии специальных требований заказчика градации настраиваются в соответствии с этими требованиями.

4. Предусмотрен расчет количества осадков за любой выбранный интервал времени. 15 градаций количества осадков (мм) заданы в следующих интервалах: $\leq 0,5$; 0,6—1,0; 1,1—2,0; 2,1—3,0; 3,1—5,0; 5,1—10,0; 10,1—20,0; 20,1—30,0; 30,1—40,0; 40,1—50,0; 50,1—60,0; 60,1—70,0; 70,1—100,0; 100,1—150,0; $> 150,0$.

Таблица 1.3

Стандартные градации интенсивности осадков

Жидкие осадки		Твердые осадки	
Интенсивность, мм/ч	Характеристика	Интенсивность, мм/ч	Характеристика
0,5—2,9	Слабые	0,02—0,1	Слабые
3,0—25,0	Умеренные	0,11—1,0	Умеренные
25,1—140,0	Сильные	>1,0	Сильные
>140,0	Очень сильные		

Программное обеспечение предусматривает возможность использования любых градаций как по интенсивности, так и по количеству осадков в соответствии с требованиями потребителей информации АМРК.

Сумма осадков рассчитывается за любой заданный интервал времени по указанным выше градациям для элементов площади 4×4 км, например за 1, 3, 6, 12 ч и т.д. Функция расчета количества осадков предусмотрена как на центральной системе АМРК «Метеоячейка», так и на рабочих станциях (рис. 1.3)¹.

5. Определяется максимальная для каждой ячейки представления высота верхней границы радиоэха с дискретностью 250 м в диапазоне 0—20 000 м.

6. На каждой рабочей станции АМРК «Метеоячейка» пользователь имеет возможность получить распределение радиолокационной отражаемости по 11 горизонтальным сечениям с шагом 1 км для каждой ячейки 4×4 км для территории 400×400 км.

7. Явления погоды и формы облачности определяются на АМРК «Метеоячейка» по заданным алгоритмам распознавания. Алгоритмы настраиваются отдельно для каждого пункта установки по результатам сопоставления радиолокационной и наземной информации. Основная настройка алгоритмов выполняется в течение первого года эксплуатации. В процессе дальнейшей эксплуатации ежегодно оценивается качество распознавания и при необходимости выполняется корректировка алгоритмов.

Контроль оправдываемости распознавания опасных явлений погоды выполняет инженер-радиометеоролог АМРК путем сопоставления радиолокационной и наземной информации.

В результате применения алгоритмов распознавания информация об опасных явлениях и формах облачности отображается на экране ПЭВМ в виде карты метеоявлений (рис. 1.4).

Метеоявления отображаются по 16 градациям и зависят от сезона наблюдений и вида осадков. Например, для летнего сезона наблюдений и жидких осадков используются следующие градации метеоявлений: 1) облачность верхнего и среднего яруса С—А, 2) слоистообразная об-

¹ Рисунки 1.3—1.19 см. на цветной вкладке.

лачность, 3) осадки слабые, 4) осадки умеренные, 5) осадки сильные, 6) кучевая облачность, 7) ливень слабый, 8) ливень умеренный, 9) ливень сильный, 10) гроза с вероятностью 30—70 %, 11) гроза с вероятностью до 90 %, 12) гроза с вероятностью более 90 %, 13) град слабый, 14) град умеренный, 15) град сильный, 16) отсутствие радиоэха. При выводе карты метеоявлений выделяются зоны шквалистого усиления ветра со скоростью более 15 м/с.

8. После каждого цикла наблюдений на основе одного из вариантов кросс-корреляционного метода [9] производится расчет скорости и направления перемещения облачной системы. Для достоверного расчета этих характеристик период между сроками наблюдений не должен превышать 30 мин.

9. Большое разнообразие требований потребителей информации АМРК к формам ее представления и средствам доставки обусловило большое количество форматов представления данных. В настоящее время данные могут быть переданы потребителям в следующих форматах.

Цифровой формат представления данных. Для передачи данных потребителям может быть использован один из следующих кодов:

код RADOB для передачи в центр сбора с целью составления стыкованных карт МРЛ;

код BUFR для передачи по сети Росгидромета потребителям;

код, согласованный с заказчиком, для передачи в автоматизированные системы управления воздушным движением;

код ИРАМ для передачи на рабочие станции АМРК.

Графический формат представления данных для просмотра на экране ПЭВМ. Любые формы представления информации на экране рабочей станции АМРК могут быть переданы потребителям в виде изображений в одном из следующих форматов:

формате BMP для передачи и последующего просмотра данных АМРК «Метеоячейка» любыми стандартными программными средствами, используемыми в среде ОС Windows 95/98/NT/2000/XP Pro;

формате T4 для передачи и просмотра при наличии специального программного обеспечения.

Графический формат представления данных для вывода на печать. Любые формы представления информации как на экране центральной системы АМРК «Метеоячейка», так и на экране рабочей стан-

ции АМРК могут быть напечатаны на матричном, струйном или цветном лазерном принтере в следующем виде:

поле соответствующего вида информации (метеоявлений, отражаемости, высоты верхней границы радиозха, интенсивности осадков и т.д.);

бланк-карта МРЛ.

10. Для передачи данных потребителям используются следующие протоколы передачи данных.

Внутренний протокол ИРАМ, обеспечивающий передачу информации по телефонным линиям связи с гарантированной доставкой данных. Скорость передачи определяется качеством линий связи. Этот протокол используется при передаче радиолокационной информации с центральной системы АМРК на рабочие станции пользователей.

Телеграфный протокол, обеспечивающий передачу информации по телеграфным линиям связи. Скорость передачи составляет 50 или 100 бод. Этот протокол используется при передаче радиолокационной информации в коде RADOB с центральной системы АМРК «Метеоячейка» в сеть АСПД Росгидромета.

Протокол TCP/IP-socket для передачи данных по ведомственной сети МЕКОМ Росгидромета.

Протоколы для передачи данных в автоматизированные системы управления воздушным движением.

11. Циркулярная передача данных и передача данных по запросу (режим *запрос—ответ*) используются для передачи данных на рабочие станции пользователей.

12. Вся информация АМРК «Метеоячейка» может быть использована для проведения контроля за активными воздействиями в районе установки МРЛ-5. Такой режим работы применяется с 1996 г. противорадовой службой Республики Молдова на АМРК в Кишиневе.

13. АМРК «Метеоячейка» обеспечивает дистанционное управление работой МРЛ с использованием аэродромных кроссовых линий связи при удалении центральной системы от МРЛ на любое необходимое расстояние.

14. Согласно требованиям НМО ГА-95, в АМРК реализован режим архивации радиолокационных данных на жестком диске ПЭВМ за период от 30 дней и более. Архив используется инженером-радиометеорологом АМРК «Метеоячейка» для дальнейшей работы (например,

для сопоставления данных наземных метеостанций об опасных явлениях с данными АМРК с целью определения оправдываемости опасных явлений по АМРК для оценки работы комплекса). Режим архивации реализован также на рабочих станциях АМРК «Метеоячейка», с тем чтобы потребитель радиолокационной информации сам принял решение о необходимости использования данных для решения своих конкретных задач.

Как на центральной системе АМРК, так и на ее рабочих станциях реализован режим удаления архивов по мере необходимости.

Срок хранения архива реально ограничен только объемом жесткого диска ПЭВМ.

15. На рабочих станциях АМРК реализована возможность просмотра текущего прогноза и штормовых предупреждений, поступивших по каналам связи. Кроме того, АМРК обеспечивает:

на рабочих станциях (например, у синоптика-консультанта или синоптика-прогнозиста) возможность получения текущего прогноза погоды для заданных пунктов в виде таблицы со списком метеостанций, расположенных в радиусе 200 км от МРЛ (рис. 1.5). В прогнозе указывается время начала или окончания осадков любой интенсивности или других опасных явлений погоды (ливень, гроза, град, шквал) по требованию потребителей;

построение таблицы «Штормоповещение», в которой в полярных координатах указывается местоположение очагов опасных явлений погоды, расположенных в радиусе 200 км от МРЛ (рис. 1.6); вывод текста штормпредупреждений по данным АМРК для синоптиков АМСГ; вывод текстов прогнозов, штормовых оповещений и предупреждений в кодовых формах TAF, SPECI, WAREP, SIGMET, AIREP.

16. На рабочей станции синоптика-прогнозиста реализована возможность просмотра текущего штормового состояния региона в виде карты, обновляющейся в режиме поступления штормовой информации по каналам связи, и данных штормового кольца в виде текстов телеграмм. Эта информация дополняет радиолокационные данные и обеспечивает необходимую полноту и оперативность штормовой информации.

Для расчета оправдываемости ряда расчетных методов прогноза используются радиолокационные данные наряду с другими доступными видами информации.

Важное место в повышении эффективности гидрометеорологического обеспечения занимает сверхкраткосрочное (до 6 ч) прогнозирование. Радиолокационные данные, обладающие высоким пространственно-временным разрешением, используются для решения задач обнаружения и слежения за полями осадков и опасными явлениями погоды, связанными с кучево-дождевой облачностью.

Для прогноза возникновения и оценки тенденции развития существующих локальных опасных явлений погоды подсеточного масштаба на рабочей станции синоптика-прогнозиста «МетеоЭксперт» имеется возможность прогнозирования таких явлений, как грозы, град, шквал, обледенение, туман, гололед, низкая облачность, ветер, температура, осадки, с использованием численных моделей пограничного слоя атмосферы и конвективного облака. При этом в качестве исходных данных могут использоваться как фактические данные, так и прогностические поля метеорологических величин, полученные по результатам расчетов с использованием региональной модели.

АМРК «Метеоячейка» как метеооборудование аэропорта и одновременно система для единой многофункциональной сети автоматизированных МРЛ Росгидромета обеспечивает:

- проведение автоматизированной калибровки измерительных трактов комплекса «Метеоячейка»;

- возможность постоянного контроля параметров АМРК в допусковом режиме, что является особенно актуальным при дистанционном управлении МРЛ;

- постоянное информирование справочной системы о сбоях при работе комплекса, что позволяет оперативно реагировать и устранять неполадки в работе АМРК «Метеоячейка»;

- при необходимости оперативное изменение параметров обзора, таких как угол места на любом обороте, число оборотов антенны при обзоре, скорость по азимуту при обзоре и многих других;

- автоматический расчет и ввод поправок на ослабление радиоволн в осадках и газах атмосферы;

- контроль с центральной системы АМРК за передачей и поступлением радиолокационных данных на абонентские пункты независимо от их удаления от центральной системы АМРК;

- реализацию функции вывода на печать бланк-карты МРЛ за любой срок наблюдений с различными «подложками» (план воздушной

зоны, рельеф местности, метеостанции, административная карта) на ЦС АМРК и на абонентских пунктах;

архивацию телеграмм в коде RADOB (рис. 1.7);

автоматическое заполнение «Журнала регистрации событий АМРК «Метеоячейка», в котором фиксируются все действия штата МРЛ и контрольная информация функционирования комплекса; журнал, так же как и радиолокационный архив, хранится не менее 30 сут, и его можно просмотреть при анализе неисправностей и для контроля работы операторов АМРК (рис. 1.8);

ввод данных метеостанций об опасных явлениях погоды и сопоставление данных ГМС об опасных явлениях с данными АМРК;

вывод на печать результатов сопоставления;

запись и дополнение файла местников в реальном времени, а также его корректировка по архивным данным;

определение видимости в зоне осадков, приближающейся к аэропорту;

вывод контуров опасных явлений погоды на экран ПЭВМ (рис. 1.9, 1.10);

вывод карты скорости шквалов;

вывод карты вертикального сечения радиозеха в заданном азимуте или по выбранной воздушной трассе (рис. 1.11);

вывод карты обледенения в заданном азимуте или по выбранной трассе (рис. 1.12);

программное обеспечение для исключения помех от работающих наземных и самолетных РЛС.

1.5. Рабочая станция МАРС

1.5.1. Назначение РС МАРС

Ценность радиолокационной информации существенно возрастает при объединении данных нескольких радиолокаторов и построении «сшитых» (композиционных) карт. В этом случае появляется возможность оперативного слежения за развитием процессов синоптического масштаба (атмосферные фронты, линии шквалов, зоны осадков) с периодом обновления информации порядка 10—180 мин.

Рабочая станция Метеорологической автоматизированной радиолокационной сети (РС МАРС) является автоматизированным рабочим местом для составления серии объединенных карт на основе данных нескольких (двух и более) АМРК и использования радиолокационной метеоинформации при подготовке сверхкраткосрочных прогнозов и штормовых предупреждений об опасных явлениях погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью (Cb) и полями осадков.

1.5.2. Характеристики РС МАРС

Рабочая станция МАРС обеспечивает обмен радиолокационными данными в международном коде FM-94 BUFR (FM-94 BUFR Collected papers and specification / European Center for Medium-Range Weather Forecasts, February 1998. Изд. 2001 г., рек. 3 КОС-ХІІ). Использование международного кода для обмена данными позволяет использовать при построении композитных карт данные разных поставщиков радиолокационной информации.

Для обмена радиолокационными данными используются каналы глобальной системы телесвязи (ГСТ) (на территории РФ сеть МЕКОМ, протокол ТСР/ІР). При необходимости возможно использование других каналов связи (например, выделенных телефонных линий связи). Использование стандартных протоколов и существующих каналов связи позволяет резко снизить затраты на передачу информации. Радиолокационная информация становится доступна всем потребителям, имеющим выходы на сеть МЕКОМ Росгидромета. Каждый потребитель информации сам определяет необходимый ему набор радиолокационных продуктов. Маршрутизация сообщений выполняется в узлах сети ГСТ.

Специальное программное обеспечение РС МАРС работает в среде ОС Windows 2000 Pro, Windows XP.

1.5.3. Возможности РС МАРС

На рабочей станции МАРС реализованы следующие функции:
автоматический прием информации с отдельных АМРК по сети МЕКОМ в коде FM-94 BUFR (создание архива радиолокационной информации каждого АМРК);

объединение данных наблюдений нескольких АМРК (создание архива композитных карт);

возможность использования любого числа АМРК для составления композитных карт;

ретрансляция данных отдельных АМРК на другие рабочие станции;

формирование контуров опасных явлений для передачи в АС УВД в оперативном режиме работы;

вывод на экран (рис.1.17) и печать таблицы *Штормоповещение* с информацией об опасных явлениях погоды;

ведение *Архива радиолокационных данных* МАРС;

просмотр архива в режиме анимации;

выбор любого географического района для просмотра композитных карт;

представление информации в виде следующих карт с распределением метеообъектов и их радиолокационных характеристик в горизонтальной плоскости (размер ячеек представления 4×4 км, число цветовых градаций 16):

карты метеоявлений (рис.1.13),

карты высоты верхней границы радиоэха метеообъектов (рис.1.14),

карт отражаемости метеообъектов в 11 слоях (рис.1.15),

карты опасных явлений погоды,

карты контуров опасных явлений (рис.1.16),

карты контуров скоростей шквалов,

карты видимости в осадках,

карты интенсивности осадков,

карты обледенения в облаках;

представление информации в виде следующих карт с распределением метеообъектов и их радиолокационных характеристик в вертикальной плоскости:

карты вертикального сечения интенсивности радиоэха и метеоявлений по произвольному сечению (рис.1.18),

карты обледенения по произвольному сечению,

вертикального профиля радиоэха в выбранном квадрате 4×4 км (в виде таблицы);

возможность наложения на любую из объединенных карт (горизонтального сечения) «подложек»:

плана воздушной зоны,
метеостанций — сети ГМС ШК,
рельефа местности;
вывод композитных карт на печать;
возможность просмотра данных каждого отдельного АМРК;
расчет сумм осадков за любой заданный период времени
(рис.1.19).

1.6. Техническое обслуживание МРЛ-5

При техническом обслуживании МРЛ-5 [10, 14] производятся следующие работы:

проверка горизонтирования антенны и согласование следящей системы привода по углу места и азимуту,
проверка потенциала станции и его расчет,
настройка индикаторов,
калибровка тракта измерений.

1.6.1. Проверка потенциала

При проведении наблюдений, и особенно количественных измерений, важно поддерживать в определенных пределах частоту излучаемых сигналов (зондирующих импульсов), чувствительность приемника, коэффициент усиления приемника и точность настройки приемника на промежуточную частоту. Выход за допустимые пределы одного или нескольких из этих параметров может привести к резкому уменьшению радиуса обнаружения метеообразований и значительному занижению интенсивности отраженных сигналов.

Измерение чувствительности производится согласно Руководству [10, 14]. Чувствительность должна быть не хуже -134 дБ/Вт для I канала МРЛ-5.

На распределительном щите ЩЛ-039 переключатель *Род работы* установить в положение *Настройка*. При этом на лицевой панели управления станций загорается сигнальная лампочка *Настройка*.

На щите ЩЛ-040 установить в верхнее положение *Автомат I канала* и *Автомат II канала*. На лицевых панелях контрольно-распределительного устройства I и II каналов должны гореть сигнальные лампы

Настройка, сеть 27 В и 1 или 2 мкс (в зависимости от положения переключателей *М300* I и II каналов, расположенных на панели ИКО, и тумблера *В1* — длительность, расположенного на панели управления МРЛ).

Нажать кнопку *Накал вкл.* на лицевой панели передающего устройства одного из каналов. Должны загореться сигнальные лампы *Накал*, *Вентил.*, *Блокировка*. С выдержкой времени 6 ± 1 мин должна загореться лампа *Готовность*.

Нажать кнопку *Анод вкл.*, после чего должна загореться лампа *Анод*. Если загорается лампа *Авария*, необходимо устранить неисправность и вновь нажать кнопку *Накал вкл.* (лампа *Авария* должна погаснуть).

Контроль работы передающих устройств производится по встроенным приборам:

контроль напряжения согласно гравировке на переключателе;

напряжение преобразователя ($U_1 = 140$ В, $U_2 = 200$ В);

ток магнетрона ($I_1 = 10.15$ мкА, $I_2 = 30.40$ мкА);

мощность ($P_1 = 220...250$ кВт, $P_2 = 700...80$ кВт).

Для отключения передающего устройства необходимо:

нажать кнопку *Анод откл.*, после чего должна погаснуть лампа *Анод*;

нажать кнопку *Накал откл.*, после чего должна погаснуть лампа *Накал*, а через три минуты погаснет лампа *Вентил.*

Включение приемных устройств I и II каналов в режиме *Настройка* осуществляется непосредственно с лицевых панелей шкафа приемных устройств.

Перед включением приемных устройств тумблеры *АПЧ—РРЧ* необходимо поставить в положение *РРЧ*, а *АСУ—РРУ* — в положение *РРУ*.

Включить приемное устройство нажатием кнопки *Вкл.* После этого должна загореться лампа *Накал*; при этом стрелка прибора *Ток накала* отклонится от занятого положения, а на блоках приемника появятся все питающие напряжения, которые проверяются по прибору с помощью переключателя *Контроль напряжения и тока*.

Через 3 мин после включения лампы *Накал* должна загореться лампа *Анод*. Одновременно должны отклониться стрелки приборов *Ток коллектора*, *Контроль усиления* и *Коэффициент шума*.

При загорании лампы *Авария* следует устранить аварию и вновь нажать кнопку *Вкл.* Должна погаснуть лампа *Авария* и загореться лампа *Накал*, а через 3 мин лампа *Анод*.

Для отключения приемного устройства необходимо нажать кнопку *Откл.*, после чего должны погаснуть лампы *Накал* и *Анод*.

Измерение чувствительности приемных устройств МРЛ-5 производится в следующей последовательности:

включить приемопередающее устройство МРЛ в режиме *Настройка* и проверить настройку приемных устройств на частоту передающих устройств в режиме *АПЧ* и *РРЧ* (при необходимости отрегулировать);

выключить передающие устройства и собрать схему (рис. 1.20); кнопками РРУ *больше—меньше* установить по осциллографу уровень собственных шумов приемных устройств 0,2—0,3 В;

тумблер *Коррекция—Откл.*, расположенный на передней панели шкафа, поставить в положение *Откл.*;

в режиме внешнего запуска установить на генераторе Г5-26 длительность импульса 10 мкс, амплитуду импульса 10 В положительной полярности;

подключить вход делителя сигнала к контрольному гнезду *Выход ЛОГ УПЧ* на передней панели шкафа приемного устройства.

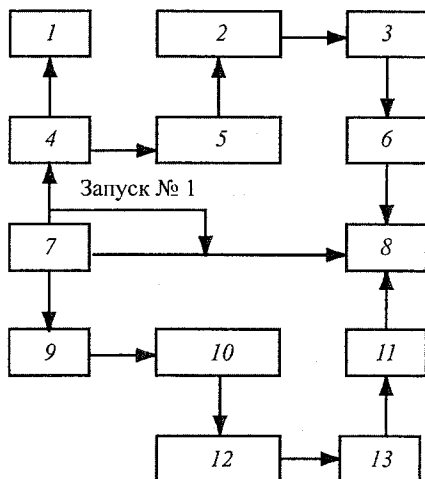


Рис. 1.20. Структурная схема подключения аппаратуры для измерения чувствительности приемных устройств, градуировки СВЧ аттенуаторов, блока обработки видео и системы коррекции на квадрат расстояния [10].

1 — волномер Ч2-37А; 2 — *p-i-n*-диодные секции аттенуаторов и системы коррекции; 3 — устройство приемное I канала; 4 — генератор Г4-83; 5 — волновод ЕУ2.060.331; 6 — делитель сигнала ЕУ2.208.260; 7 — генератор Г5-26; 8 — осциллограф С1-55; 9 — генератор Г4-80; 10 — переход ЕУ2.236.260; 11 — делитель сигнала ЕУ2.208.067; 12 — *p-i-n*-диодные секции аттенуаторов и системы коррекции; 13 — устройство приемное II канала.

подключить осциллограф С1-55, работающий в режиме ждущей развертки с внешней синхронизацией, к гнезду ГН1 делителя сигналов;

генератор Г4-83 (Г4-80) настроить согласно инструкции по эксплуатации прибора в качестве генератора стандартных сигналов в режиме внешней импульсной модуляции от генератора Г5-26 (установку частоты генератора Г4-83 производить с помощью волномера Ч2-37А);

изменяя частоту гетеродина кнопкой РРЧ *больше—меньше*, расположенной на передней панели шкафа, получить на экране осциллографа один максимум сигнала, что соответствует настройке гетеродина на основную частоту;

не изменяя частоты генератора Г4-83 (Г4-80), установить на его выходе импульсный сигнал мощностью 100 мкВт длительностью 10 мкс с частотой повторения 250 Гц в режиме 2 мкс на панели управления МРЛ;

проверить точность настройки преселектора и оптимального напряжения спирали ЛБВ по максимальному уровню шумов и неограниченного сигнала на экране осциллографа С1-55 в режиме РРУ;

вывести на нуль управляемые СВЧ аттенюаторы МРЛ;

путем плавного введения затухания с помощью СВЧ аттенюатора генератора Г4-83 довести сигнал до минимально обнаруживаемого (на фоне шумовой дорожки) уровня;

отсчитать чувствительность приемного устройства $P_{\text{пр min}}$ в дБ/Вт.

Величина чувствительности соответствует показанию аттенюатора генератора Г4-83 (Г4-80). (Отличие показаний шкалы децибел генератора Г4-83 (Г4-80) от 40 дБ, возникающее при калибровке опорного значения мощности, — ошибка аттенюатора, должно учитываться соответствующим знаком при отсчете чувствительности.) Для правильной оценки значения $P_{\text{пр min}}$ берется среднее нескольких результатов измерений. При каждом измерении проверяется точность подстройки генератора.

В процессе калибровки изохса при каждом изменении калибровочного сигнала прибора РИП перед регулировкой уровня изохса необходимо производить подстройку сигнала на максимум ручкой *Напряжение отражателя* на приборе РИП так, чтобы вершина импульса от

РИПа была плоской, а сам импульс имел прямоугольную форму. Следует проверить, чтобы калибровка на ИКО и ИДВ была одинаковой; в противном случае оправдываемость критериев в дальней и ближней зонах будет различной.

Следует обратить особое внимание на то, чтобы яркость разверток на индикаторах при калибровке и работе была одинаковой. Ручка *Яркость* должна выставляться в определенное положение по заранее нанесенным меткам.

1.6.2. Настройка индикаторов

Настройка индикаторов проверяется методом установки длительности разверток и положения меток дальности индикаторов ИКО и ИДВ, соответствующих значениям переключателей масштабов и масштабов шаблонов, с которых ведется съем информации. Необходимо проверить линейность разверток ИКО и ИДВ. Расстояния между метками дальности должны быть одинаковыми. Во время работы операторы не должны выводить яркость опорных меток дальности — это является грубейшим нарушением при ручном съеме данных.

1.6.3. Калибровка тракта измерений

Калибровка тракта измерений производится проверкой линейности амплитудной характеристики и калибровкой системы изоэха [10].

Проверка линейности амплитудной характеристики логарифмического УПЧ производится по ЭД. Отклонение амплитудной характеристики, построенной в полулогарифмическом масштабе, от линейного закона не должно превышать $\pm 3\%$.

При калибровке системы изоэха проверяется правильность подсчета сигнала РИПа, соответствующего первой ступени системы изоэха. Отсчет вне зависимости от величины чувствительности станции ведется от уровня —130 дБ/Вт.

Например, если 35 дБ — затухание, вносимое направленным ответвителем, 3 дБ — затухание в волноводно-коаксиальном переходе, 30 дБ — поправка на то, что сигнал с РИПа равен 1 мВт, то значение затухания, выставляемое аттенюатором РИПа при нажатой первой ступени системы изоэха $(-130 + 6 = -124)$, равно $-124 + (35 + 3 + 30) = -56$ дБ.

Примечание. В случае если значение затухания, вносимого направленным ответвителем, не указано на поверхности ответвителя, необходимо измерить его с помощью РИПа; измеренное значение затухания необходимо зафиксировать в формуляре станции.

1.6.4. Расчет потенциала МРЛ-5

В соответствии с РД [14] расчет метеорологического потенциала МРЛ производится по формуле

$$P_{\text{м}} = \frac{0,1\pi^6 P_{\text{и}} A_p h K_{\text{АВ}}}{P_{\text{ш}} \lambda^4}, \quad (1.1)$$

где $P_{\text{м}}$ — метеорологический потенциал ($\text{км}^2/(\text{мм}^6 \cdot \text{м}^{-3})$), $P_{\text{и}}$ — мощность зондирующего импульса (Вт), A_p — апертура антенны (м^2), h — протяженность зондирующего импульса (м), $K_{\text{АВ}}$ — коэффициент полезного действия высокочастотного тракта, λ — длина волны (см), $P_{\text{ш}}$ — чувствительность приемного устройства (Вт).

Расчет $P_{\text{м}}$ в децибелах ($10 \lg P_{\text{м}}$) производится по формуле

$$\begin{aligned} 10 \lg P_{\text{м}} = & 10 \lg A_p + 10 \lg P_{\text{и}} + 10 \lg h + \\ & + 10 \lg K_{\text{АВ}} - 10 \lg P_{\text{ш}} - 40 \lg \lambda - 110, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где $P_{\text{и}}$ — в киловаттах, $P_{\text{ш}}$ — в ваттах, A_p — в м^2 , λ — в сантиметрах, h — в метрах, $K_{\text{АВ}} = 0,16$ (−8 дБ).

В случае применения МРЛ при метеообеспечении авиации его потенциал $10 \lg P_{\text{м}}$, рассчитанный по формуле (1.2), должен составлять не менее 47 дБ.

Рекомендация для величины «метеорологического потенциала, который должен быть на диапазонах длин волн от 0,03 до 0,11 м не менее 270 дБ/м», основана на другом выражении для расчета метеорологического потенциала, который приведен в Дополнениях и изменениях к нормам годности к эксплуатации в СССР гражданских аэродромов (МОС НГЭА СССР).

Оценка соответствия требованиям НГЭА метеорологических радиолокаторов производится путем расчета метеорологического потенциала по формуле

$$P_M = 10 \lg \left(\frac{\pi^3 c}{4^5 \ln 2} \frac{P_n G^2 \theta_0 \varphi_0 \tau K_{AB}}{P_{\text{пр min}}} \right) \quad (1.3)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость распространения электромагнитных колебаний в атмосфере.

Расчет P_M в децибелах ($10 \lg P_M$) производится по формуле

$$10 \lg P_M = 10 \lg P_n + 20 \lg G + 10 \lg \theta_0 + 10 \lg \varphi_0 + \\ + 10 \lg \tau + 10 \lg K_{AB} - 10 \lg P_{\text{пр min}} - 20 \lg \lambda + 71,2, \quad (1.4)$$

где P_n — мощность зондирующего импульса МРЛ (Вт); G — коэффициент усиления антенны; θ_0 и φ_0 — ширина диаграммы направленности антенны в обеих взаимно перпендикулярных плоскостях, измеренная на уровне 0,5 мощности (радианы); τ — длительность зондирующего импульса (с); $P_{\text{пр min}}$ — минимальная обнаруженная мощность отражаемого сигнала (Вт).

Расчет P_M (дБ) проводится по формуле (1.4) в единицах СИ.

В табл. 1.4 и 1.5 приведены примеры расчета P_M (дБ) для обоих каналов МРЛ-5 (по формулам (1.2) и (1.4)).

Разница между значениями P_M (дБ), рассчитанными по формулам (1.4) и (1.2), составляет:

для 3-сантиметрового канала $280,7 - 59,9 = 220,8$ дБ;

для 10-сантиметрового канала $272,5 - 49,5 = 223$ дБ.

Таким образом, потенциалы P_M обоих каналов МРЛ-5, рассчитанные по формуле (1.4), заведомо превышают 270 дБ/м, и они могут применяться для метеобеспечения авиации.

Если у штата МРЛ-5 возникают сомнения в результатах расчета P_M , их можно легко проверить, повторив расчеты, проведенные по формулам (1.2) и (1.4), результаты которых приведены в табл. 1.4 и 1.5, для параметров МРЛ-5, при которых он эксплуатируется.

Все параметры МРЛ, входящие в формулы (1.2) и (1.4), неизменны, требуется измерить только P_n и $P_{\text{шт}}$.

Таблица 1.4

Расчеты потенциала МРЛ-5 для I канала

Параметр (X)	Обозначение	Значение X		10 lg X , дБ	
		Руководство по МРЛ	НГЭА СССР (ед. СИ)	Руководство по МРЛ	НГЭА СССР (ед. СИ)
Импульсная мощность на выходе магнетрона	$P_{и}$	250 кВт	250 000 Вт	+24	+54
Чувствительность приемного устройства	$P_{ш}$ $P_{пр\ min}$	-134 дБ/Вт	-134 дБ/Вт	-(-134)	-(-134)
Апертурная площадь	A_p	16 м ²	—	+12	—
Длительность зондирующего импульса	τ	—	$2 \cdot 10^{-6}$ с	—	-57
Длина зондирующего импульса	h	600 м	—	+27,8	—
Длина волны	λ	3,14 см	$3,14 \cdot 10^{-2}$ м	-19,9	+30,1
Коэффициент усиления антенны	G	—	49 дБ	—	98
Ширина диаграммы направленности антенны	θ_0	—	0,0087 рад.	—	-20,8
Ширина диаграммы направленности антенны	φ_0	—	0,0087 рад.	—	-20,8
Коэффициент полезного действия высокочастотного тракта	K_{AB}	0,16	0,16	-8	-8
Постоянные перевода формул (1.2) и (1.4)		—	—	-110	+71,2
10 lg $I_{M,}$ дБ		—	—	59,9	280,7

Таблица 1.5

Расчеты потенциала МРЛ-5 для II канала

Параметр (X)	Обозначение	Значение X		10 lg X , дБ	
		Руководство по МРЛ	НГЭА СССР (ед. СИ)	Руководство по МРЛ	НГЭА СССР (ед. СИ)
Импульсная мощность на выходе магнетрона	$P_{\text{и}}$	800 кВт	800 000 Вт	+29	+59
Чувствительность приемного устройства	$P_{\text{ш}}$ $P_{\text{пр min}}$	-136 дБ/Вт	-136 дБ/Вт	-(-136)	-(-136)
Апертурная площадь	A_p	16 м ²	—	+12	—
Длительность зондирующего импульса	τ	—	$2 \cdot 10^{-6}$ с	—	-57
Длина зондирующего импульса	h	600 м	—	+27,8	—
Длина волны	λ	10,15 см	$1,015 \cdot 10^{-1}$ м	-40,3	+19,9
Коэффициент усиления антенны	G	—	40 дБ	—	80
Ширина диаграммы направленности антенны	θ_0	—	0,026 рад.	—	-15,8
Ширина диаграммы направленности антенны	φ_0	—	0,026 рад.	—	-15,8
Коэффициент полезного действия высокочастотного тракта	K_{AB}	0,32	0,32	-5	-5
Постоянные перевода формул (1.2) и (1.4)		—	—	-110	+71,2
10 lg $\Pi_{\text{м}}$, дБ		—	—	49,5	272,5

1.7. Проверка (калибровка) АМРК «Метеоячейка»

Проверка АМРК производится в два этапа [9, 10]:

1) получение калибровочной характеристики измерительного тракта МРЛ-5 — АМРК с помощью штатных средств МРЛ-5 и специальной программы калибровки, которая входит в состав автоматизированного рабочего места инженера по радиолокации АМРК;

2) проверка оправдываемости и оценка достоверности информации АМРК «Метеоячейка» об опасных явлениях, связанных с облачностью и осадками, по данным наземных гидрометеостанций в радиусе 200 км от места установки МРЛ-5, которые регулярно производятся штатом АМРК.

Автоматизированная обработка сигналов, отраженных от метеоцелей, предусматривает операции, которые обеспечивают измерение средней мощности отраженных сигналов, их обработку по заданным алгоритмам, хранение измеренных значений, а также выдачу обработанной информации для ее дальнейшей обработки на ЭВМ.

Осреднение отраженных сигналов на МРЛ происходит по элементу наклонной дальности, угловому элементу и интервалу времени.

В измерительный тракт МРЛ-5 — АМРК входит сверхвысокочастотная (СВЧ) часть приемного устройства МРЛ-5, логарифмический усилитель промежуточной частоты (ЛУПЧ), видеоусилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), устройство предварительной обработки сигналов (УПО-Д) АМРК.

Для получения сквозных характеристик измерительного тракта используются штатные радиолокационные испытательные приборы (РИП) — генераторы стандартных СВЧ сигналов типа Г4-83 (для 3-сантиметрового канала МРЛ-5) и типа Г4-80 (для 10-сантиметрового канала МРЛ-5). Эти генераторы подключаются на вход СВЧ трактов МРЛ-5 через направленные ответвители волноводного тракта и запускаются в режиме внешней импульсной модуляции с частотой посылок МРЛ-5 по схеме измерения чувствительности (см. п. 1.6.1, рис. 1.20).

Калибровка измерительных трактов производится с целью установления соответствия между мощностью сигналов на входе приемного устройства МРЛ-5 и кодом на выходе АЦП блока обработки секции УПО-Д.

Оценка степени опасности метеорологических явлений, связанных с кучево-дождевой облачностью, производится по данным измерений их высоты и отражаемости на определенных уровнях с помощью физико-статистических критериев [9, 10, 14]. Влияние факторов, связанных с особенностями распространения радиоволн СВЧ диапазона, приводит к тому, что оценка степени опасности явлений имеет вероятностный характер. На основании опыта эксплуатации сети МРЛ установлены вероятностные оценки достоверности и оправдываемости информации МРЛ.

Штаты МРЛ-5 производят регулярное сопоставление информации наземных гидрометстанций о грозах и информации МРЛ-5. Результаты сопоставления вместе с калибровочными характеристиками измерительных трактов дают объективную оценку надежности работы АМРК и достоверности получаемой информации.

Поверка АМРК уполномоченными сторонними организациями производится один раз в год.

Все приборы, применяемые для поверки, должны ежегодно проходить метрологический контроль. Калибровка АМРК производится после измерения чувствительности приемных устройств МРЛ-5 и расчета метеорологического потенциала МРЛ-5. Калибровка АМРК рассмотрена на примере калибровки АМРК «Метеоячейка».

1.7.1. Калибровка приемо-измерительных трактов АМРК «Метеоячейка»

Число измерительных трактов определяется числом используемых каналов МРЛ-5 (один или два) и числом работоспособных секций УПО-ДМ. При использовании двух каналов МРЛ-5 и двух секций УПО-ДМ общее число измерительных трактов комплекса равно четырем [9, 10].

Калибровка каждого измерительного тракта комплекса «Метеоячейка» производится с использованием контрольно-измерительной аппаратуры из комплекта МРЛ и задачи *Калибровка*, вызываемой из главного меню АРМ-ИН по команде *Калибровка*.

Задача *Калибровка АРМ-ИН* обеспечивает:

автоматическое (после установки калибровочного сигнала) определение положения максимума калибровочного сигнала;

формирование опорного калибровочного массива, включающего связанные пары, значение калибровочного сигнала и осредненное значение сигнала на выходе АЦП;

расчет на основе опорного калибровочного массива полной калибровочной характеристики, где для каждого уровня АЦП определено значение мощности входного сигнала;

документирование калибровочной характеристики на диск в виде, удобном для автоматизированных расчетов в процессе наблюдений.

Управление задачей *Калибровка* осуществляется из меню *Калибровка* (рис. 1.21) выбором нужной функции.

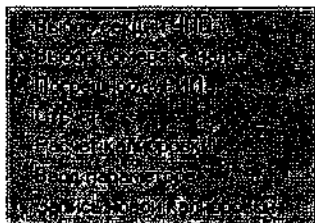


Рис. 1.21. Меню *Калибровка*.

Загрузка задачи *Калибровка* производится командой *Калибровка* из главного меню АРМ-ИН. После ввода команды на экране выводится меню *Калибровка*.

Необходимую для калибровки контрольно-измерительную аппаратуру (РИП) следует подключить к МРЛ и настроить согласно соответствующим инструкциям по эксплуатации.

Устанавливаются следующие параметры калибровочного сигнала: задержка запуска калибровочного сигнала относительно запуска МРЛ в пределах 30—400 мкс;

длительность калибровочного сигнала в пределах 10—20 мкс;

затухание на аттенуаторе радиолокационного испытательного прибора (РИПа), соответствующее значению сигнала на 40—60 дБ выше уровня чувствительности.

Для выбора секции УПО-ДМ требуется:

задать (выбрать) команду Выбор номера секции из меню *Калибровка* (см. рис. 1.21); при этом на экран выводится окно *Выбор секции УПО* (рис. 1.22);



Рис. 1.22. Окно *Выбор секции УПО*.

изменить номер секции, если он не совпадает с номером секции, выбранной для работы (номер 1 соответствует основной секции, номер 2 — резервной);

нажать кнопку *Ввод*.

Для выбора номера канала (измерительного тракта):

выбрать команду *Выбор номера канала* из меню *Калибровка* (см. рис. 1.21); при этом на экран выводится окно *Выбор канала МРЛ* (рис. 1.23);



Рис. 1.23. Окно *Выбор канала МРЛ*.

задать или подтвердить номер (номер 1 соответствует каналу МРЛ 3 см, номер 2 — каналу 10 см);

нажать кнопку *Ввод*.

Для ввода погрешности РИПа требуется:

выбрать команду *Погрешность РИПа* из меню *Калибровка* (см. рис. 1.21); при этом на экран выводится окно *Ввод погрешности РИПа* (рис. 1.24);



Рис. 1.24. Окно *Ввод погрешности РИПа*.

вести систематическую погрешность РИПа;

нажать кнопку *Ввод*.

После выполнения команды на экран выводится окно с контрольными и информационными сообщениями, содержащее следующие информационные данные:

дальность (расстояние до) калибровочного сигнала,

среднее значение сигнала АЦП,

среднее значение шума.

Кроме того, на экран ПЭВМ выводится график опорной калибровочной характеристики за предыдущий срок калибровки выбранного тракта (рис. 1.25).

Глава 1. Автоматизированный метеорологический
радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеоячейка»

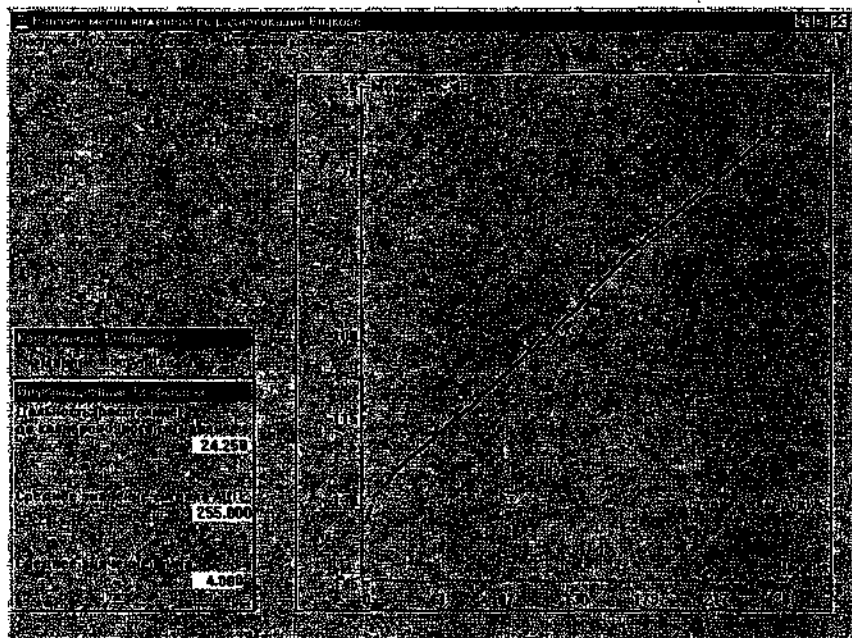


Рис. 1.25. График опорной калибровочной характеристики выбранного тракта.

В процессе выполнения команды производится подготовка задачи к формированию опорного массива:

- очистка рабочих массивов,
- определение положения максимума калибровочного сигнала,
- оценка уровня шума.

Если уровень шума меньше четырех или больше десяти уровней АЦП, следует произвести регулировку платы ПРВ в блоке обработки видеосигнала в МРЛ-5 с целью установки нормы шума, и только после этого проводить калибровку. Для этой цели используются два потенциометра, которые регулируют смещение и амплитуду сигнала на выходе *Видео АОМ*. Рекомендуемое значение уровня шума — от 4 до 10, а уровень сигнала при ослаблении на РИПе 60 дБ должен составлять от 220 до 230 ед. АЦП.

Для формирования одного элемента опорного калибровочного массива требуется:

выбрать команду *Отсчет* из меню *Калибровка* (см. рис. 1.21); при этом на экран выводится окно *Отсчет* (рис. 1.26) для установки значения сигнала на РИПе;

после появления запроса дать в аппаратную кабину МРЛ команду установить на РИПе требуемое значение затухания на аттенюаторе в децибелах;



Рис. 1.26. Окно *Отсчет*.

после получения из аппаратной кабины МРЛ подтверждения о том, что требуемое значение затухания на РИПе установлено и сигнал настроен, ввести с клавиатуры ПЭВМ значение затухания на РИПе и нажать кнопку *Ввод*.

По исполнении команды на экран выводится информационное сообщение, содержащее следующие данные:

значение установленного на РИПе затухания с учетом введенной ранее систематической погрешности РИПа,
среднее значение сигнала АЦП относительно шума,
среднее значение шума.

Каждый элемент опорного массива после получения анализируется на переполнение АЦП. Если переполнение АЦП имело место, на экран выводится предупреждение *Переполнение АЦП*, а элемент опорного массива исключается. Переполнение АЦП констатируется, если 25 % мгновенных отсчетов интенсивности калибровочного сигнала равны 255 уровням АЦП.

Каждый элемент опорного массива представляется на графике калибровочной характеристики в виде отдельной точки, что позволяет проводить визуальный контроль формирования опорного массива (см. рис. 1.27).

Рекомендуется проводить формирование опорного массива в диапазоне затухания на РИПе от 55 до 145 дБ по шкале аттенюатора с дискретностью 5 дБ.

Следует обратить внимание на следующее. Одним из условий пригодности опорного массива для последующей обработки является наличие в нем элемента, в котором осредненное значение сигнала на выходе АЦП меньше 1. Наличие такого элемента отслеживается в процессе формирования опорного массива, и при его появлении на экран выводится сообщение *Минимальный сигнал получен*. Отсутствие указанного сообщения при прохождении всего приведенного выше диапазона затухания на РИПе свидетельствует о возможной неисправности контрольно-измерительной аппаратуры МРЛ-5.

Для расчета калибровочной характеристики следует выбрать команду *Расчет калибровки* из меню *Калибровка* (см. рис. 1.21).

Признаком окончания выполнения команды *Расчет калибровки* является вывод на экран ПЭВМ графика с двумя калибровочными характеристиками: предыдущей и новой для визуального контроля (рис. 1.27).

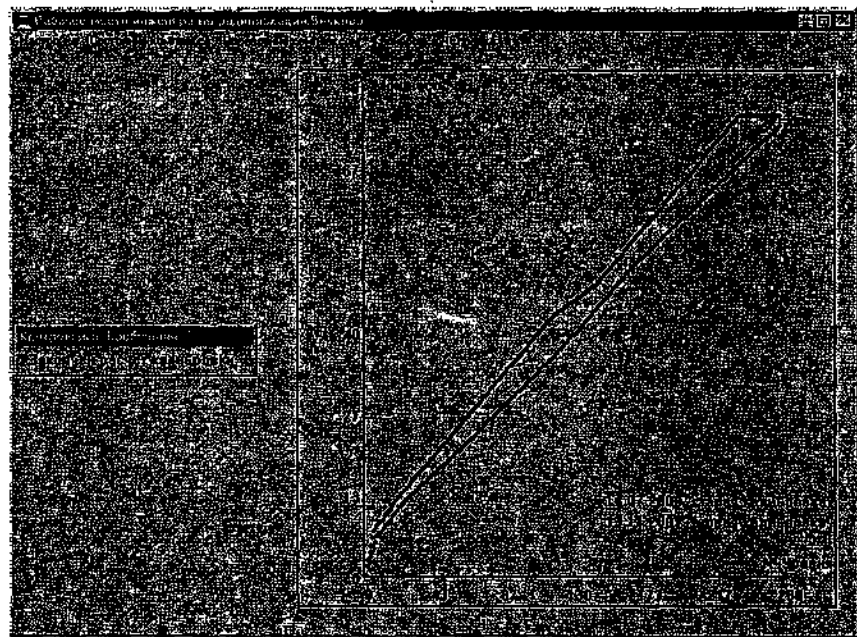


Рис. 1.27. Рабочий график калибровочной характеристики выбранного тракта.

При визуальном контроле следует обратить внимание на следующие отклонения:

нарушение монотонности калибровочной характеристики, т. е. наличие «провалов» или «плеч» (участков равновеликих значений протяженностью более двух уровней АЦП);

значительные, более 3 дБ, расхождения между предыдущей и новой характеристиками.

При обнаружении описанных выше отклонений следует повторить калибровку измерительного тракта.

Нарушение монотонности калибровочной характеристики при повторной калибровке указывает на неисправность в измерительном тракте МРЛ-5 — АМРК. Наблюдения с использованием неисправного измерительного тракта не должны производиться до выяснения и устранения причин неисправности.

Сохранение значительных расхождений характеристик при повторной калибровке указывают на устойчивость измерений в измерительном тракте, и новая калибровочная характеристика может быть использована в процессе наблюдений с соответствующей записью в журнале эксплуатации.

Для ввода параметров требуется:

выбрать команду *Ввод параметров* из меню *Калибровка* (см. рис. 1.21); при этом на экран выводится окно *Ввод параметров* (рис. 1.28);

изменить при необходимости значение чувствительности;

ввести значение мощности;

ввести значение потерь в тракте;

нажать кнопку *Ввод*.

После ввода параметров автоматически производится расчет значения потенциала.

Если новая калибровочная характеристика, по визуальной оценке, может быть использована в процессе наблюдений, следует произвести замену предыдущей характеристики в задаче АРМ-ОР на новую.

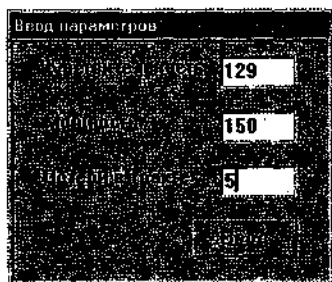


Рис. 1.28. Окно *Ввод параметров*.

Замена производится по команде *Запись новой калибровки* из меню *Калибровка*.

Выход из задачи производится по команде *Закончить работу* из меню *Калибровка* (см. рис. 1.21).

Калибровка используемых при наблюдениях измерительных трактов проводится в следующих случаях:

контрольная проверка калибровочных характеристик (один раз в квартал),

после проведения ремонтных и настроечных работ на приемопередающих устройствах МРЛ,

после ремонтных и настроечных работ в УПО-ДМ, если при этом проводилась замена или регулировка платы АЦП,

по указанию инженера-радиометеоролога при ухудшении качества радиолокационной метеорологической информации.

1.7.2. Методика сопоставления данных гидрометстанций об опасных явлениях с данными АМРК «Метеоячейка»

Сопоставление метеорологических данных наземных гидрометстанций (ГМС) об опасных явлениях (ОЯ) с радиолокационными данными АМРК «Метеоячейка» выполняется для оценки оправдываемости ОЯ по данным АМРК. Оправдываемость является основным показателем качества информации АМРК и оценки его работы [10, 14].

При сопоставлении данных ГМС с данными АМРК отношение числа случаев некоторого класса ОЯ по данным АМРК ($n_{\text{Мя}}$), совпавших с ОЯ этого же класса по данным ГМС, к числу случаев ОЯ этого же класса по данным ГМС ($N_{\text{ГМС}}$), выраженное в процентах, есть оправдываемость (P_0) этого класса ОЯ по данным АМРК:

$$P_0 = \frac{n_{\text{Мя}}}{N_{\text{ГМС}}} 100 \%. \quad (1.5)$$

Оправдываемость — характеристика, учитывающая объективные обстоятельства, по которым данный АМРК может не выявить какое-либо ОЯ.

При сопоставлении данных АМРК с данными ГМС отношение числа случаев некоторого класса ОЯ по данным ГМС ($n_{\text{ГМС}}$), совпав-

ших с ОЯ этого же класса по данным АМРК, к числу случаев ОЯ этого же класса по данным АМРК ($N_{\text{Мя}}$), выраженное в процентах, есть достоверность этого класса ОЯ по данным АМРК:

$$P_0 = \frac{n_{\text{ГМС}}}{N_{\text{Мя}}} 100 \%. \quad (1.6)$$

Достоверность — характеристика, учитывающая объективные обстоятельства невыявления АМРК каких-либо ОЯ, присущих данной местности, а также особенности радиолокационных условий наблюдений. К таким обстоятельствам могут относиться:

большие углы закрытия в азимуте (секторе) местонахождения ОЯ из-за наличия в радиусе обзора АМРК высоких «местников» (деревьев, башен, зданий, сооружений, как правило, на небольшом расстоянии от АМРК; холмов, горных массивов, хребтов), препятствующих наблюдению позади них метеообъектов из точки установки антенны МРЛ;

жидкие (смешанные) осадки в ближней зоне, особенно непосредственно в месте расположения антенны МРЛ, экранирующие тот или иной метеообъект из-за ослабления ими радиоволн с разной степенью — от уменьшения класса явления до полного исчезновения радиозаха;

временное или территориальное несоответствие данных ГМС и АМРК из-за рассогласования антенны МРЛ.

К сопоставлению привлекаются сведения гидрометстанций штормового кольца, расположенных в радиусе 200 км от МРЛ, об опасных, связанных с облачностью, явлениях погоды разного класса (шквал со скоростью ветра более 20 м/с, град, гроза, сильные осадки) и данные АМРК «Метеоячейка».

Оценка качества информации АМРК «Метеоячейка» проводится инженером-радиометеорологом АМРК ежемесячно, как правило, в первой декаде следующего за оцениваемым месяца.

Оценка проводится с помощью специальной программы, входящей в состав программного обеспечения (ПО) автоматизированного рабочего места инженера-радиометеоролога (АРМ-РМ).

Программа оценки качества информации данных ГМС и АМРК «Метеоячейка» состоит из двух частей:

создание архива наземных данных, который размещается на диске С в разделе SOP;

расчет процента совпадения информации об ОЯ по данным метеостанций и по данным АМРК в радиусе 200 км от места установки МРЛ.

Архив данных ГМС создается инженером-радиометеорологом с использованием раздела ПО (подменю главного меню АРМ-РМ) *Ввод данных штормового кольца*. В архив заносятся все ОЯ, отмечавшиеся ГМС, за период наблюдений на АМРК.

Оправдываемость ОЯ ≥ 95 % считается для АМРК отличной.

Представителями ССИ УГМС периодически производится проверка работы АМРК «Метеоячейка». Результаты проверки оформляются актом произвольной формы. В акте должно быть указано, кем и когда была проведена проверка и при необходимости юстировка, а также представлены результаты проверки, оправдываемость информации АМРК «Метеоячейка» между проверками и оценка работы АМРК методистами.

На основании результатов проверки делается вывод о соответствии или несоответствии информации АМРК предъявляемым требованиям.

ГЛАВА 2

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС (АМРК) «МЕТЕОР—МЕТЕОЯЧЕЙКА»

АМРК «Метеор—Метеоячейка» — это серийно выпускаемый фирмой Selex Si/Gematronik (Германия) доплеровский метеорологический радиолокатор «Метеор 500С» (частота излучения 5640 МГц) с программным обеспечением рабочей станции инженера-метеоролога (РС-М), серийно производимым ЗАО «Институт радарной метеорологии» (Россия).

АМРК «Метеор—Метеоячейка» сертифицирован Межгосударственным авиационным комитетом на соответствие типа оборудования аэродрома (Сертификат МАК № 407 от 21.04.2006 г.).

Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеор—Метеоячейка» предназначен для обнаружения облаков и связанных с ними атмосферных явлений (обложных и ливневых осадков, гроз, града и снегопада), а в доплеровском режиме работы — для определения параметров радиальных скоростей, а также передачи информации об обнаруженных опасных явлениях в прогностические службы Росгидромета и через АИС «Метеосервер» в автоматизированные системы управления воздушным движением для обеспечения безопасных условий взлета, посадки и полета воздушных судов.

АМРК «Метеор—Метеоячейка» является автоматизированным импульсным когерентным доплеровским метеорологическим радиолокатором. Он может работать как в некогерентном режиме (режим *Измерение отражаемости*), так и в когерентном (режим *Доплеровская скорость*).

Поскольку в отечественной технической литературе системное изложение основ доплеровских радиолокационных метеорологических измерений с использованием современной вычислительной техники отсутствует, авторы вынуждены кратко их изложить (для рассмот-

рения особенностей структуры и эксплуатации АМРК с магнетроном), следуя работам [1, 2, 5, 9, 13, 15, 19, 20].

2.1. Основные физические особенности доплеровских метеорологических радиолокационных измерений

2.1.1. Принцип измерения доплеровской скорости

Излучаемый сверхвысокочастотный импульс радиолокатора, падая на метеоцель, вызывает вынужденные колебания молекул синхронно с изменением во времени электрического и магнитного полей.

Если облачная частица покоится или движется вдоль поверхности постоянной дальности (при фиксированном удалении r), то ее молекулы колеблются с частотой излучения.

Если облачная частица будет двигаться по направлению к излучателю со скоростью v , частота ее колебаний увеличится на v/λ , так как молекулы облачной частицы будут чаще испытывать воздействие электрического и магнитного полей.

Колеблющиеся молекулы сами создают электромагнитные поля, которые, в свою очередь, излучаются за пределы цели.

Доплеровский радиолокатор может обеспечивать измерение скорости цели вдоль радиальной линии, проведенной в направлении от радиолокатора либо к нему (отрицательная скорость), либо от него (положительная скорость).

При совпадении положений передатчика и приемника величина доплеровского сдвига частоты движущегося объекта f_d определяется формулой

$$f_d = |f_{\text{пр}} - f_{\text{изл}}| = 2 \frac{v_p}{c} f_{\text{изл}} = \frac{2v_p}{\lambda}, \quad (2.1)$$

где $f_{\text{изл}}$ — излучаемая частота (Гц), $f_{\text{пр}}$ — принимаемая частота (Гц), c — скорость электромагнитного излучения ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с), λ — длина волны источника излучения, v_p — радиальная (доплеровская) составляющая скорости цели.

Коэффициент 2 в формуле (2.1) появляется в результате того, что увеличение частоты происходит в два этапа. Сначала на величину

v_p/λ возрастает частота электромагнитных колебаний в цели, а затем на такую же величину возрастает частота ее поля излучения в направлении приемника.

При обычных скоростях метеорологических целей доплеровский сдвиг частоты f_d является относительно малой величиной по сравнению с несущей частотой радиолокатора $f_{изл}$. В такой ситуации очень трудно добиться нужной точности частотных измерений. Например, при $f_{изл} = 5600$ МГц, $v_p = 15$ м/с $f_d = 560$ Гц, т. е. $(f_d/f_{изл}) \cdot 100\% = 10^{-5}\%$.

Для повышения точности измерения доплеровского сдвига частоты f_d частотные измерения в радиолокации заменяют фазовыми измерениями параметров отраженных сигналов.

Если рассматривать последовательность отраженных от метеорообразований импульсов как стационарный случайный процесс (т. е. процесс, статистические характеристики которого не зависят от начала отсчета времени), то формулу для фазы γ можно записать в виде [5]

$$\gamma = -\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right) + \psi - \psi_i, \quad (2.2)$$

где $2r$ — суммарный путь, проходимый падающей и рассеянной волной; ψ — начальная фаза излучаемого импульса; ψ_i — сдвиг фазы, который вносится метеорообразованием при рассеянии излучения радиолокатора.

Если путь r увеличивается со временем, то фаза радиоэха γ соответственно уменьшается, а скорость изменения фазы γ описывается формулой

$$\frac{d\gamma}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{dr}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda} v_p. \quad (2.3)$$

Таким образом, как следует из сравнения формул (2.1) и (2.3), скорость изменения фазы радиоэха (эхосигнала) движущегося объекта равна круговой частоте доплеровского смещения (сдвига) f_d .

На импульсном доплеровском радиолокаторе выборка сигнала (как по фазе, так и по амплитуде) осуществляется в моменты времени $t = \tau_s + (n-1)T_s$, где τ_s — время задержки между n -м излученным импульсом и сигналом радиоэха. Время $\tau_s = 2r/c$ называется временем отсчета по дальности.

Фазовые измерения $f_{\text{д}}$, так же как частотные, предъявляют очень высокие требования к стабильности частоты приемо-передатчика радиолокатора. Из этих требований следует, что время между гребнями волн для последовательно излучаемых СВЧ импульсов должно либо оставаться неизменным, либо быть известным.

Поскольку стабильные магнетронные генераторы не синхронизируются по фазе внешним сигналом, то фаза колебаний излучаемых ими импульсов должна измеряться и регистрироваться.

Применение в современном доплеровском радиолокаторе вычислительной техники позволяет зафиксировать в цифровом виде каждый излучаемый импульс магнетрона и определить его начальную фазу. Относительно этой случайной, но известной начальной фазы излучаемого импульса и проводятся фазовые измерения импульсов, отраженных от метеообразований.

Не вдаваясь в подробности, определение радиальной скорости v_r можно представить следующим образом:

фиксируют и запоминают фазу излучаемого импульса,
сравнивают ее с фазой принятого импульса,

определяют изменение фазы между последовательными импульсами,

скорость изменения фазы между последовательными импульсами непосредственно связывают с радиальной (доплеровской) скоростью цели v_r .

Для импульсного доплеровского радиолокатора изменение фазы отраженных от метеообразований сигналов анализируется в каждом бине (дискрете) дальности вдоль оси радиолокационного луча. Для расчетов v_r в каждом бине получается временной ряд цифровых данных (подробнее о расчете v_r см. п. 2.2.3).

Размер бина (дискрета) дальности в радиальном направлении выбирается равным или меньшим длительности зондирующего импульса $\tau_{\text{зонд}}$, а по углу — равным или меньшим ширины диаграммы направленности антенны ($0,5—1^\circ$). Например, при $\tau_{\text{зонд}} = 0,8$ мкс бин дальности равен 125 м. Вдоль оси луча радиолокатора в радиусе обзора, равном 125 км, таких бинов дальности будет 1000.

Относительная нестабильность частоты передатчика $\Delta f_{\text{п}}/f_{\text{п}}$ при проведении доплеровских измерений определяется необходимым раз-

решением по доплеровской скорости Δv_p на выходе когерентного приемопередатчика. Это следует из формулы [15]

$$\frac{\Delta f_{\Pi}}{f_{\Pi}} \leq \frac{\sqrt{2} \Delta v_p T_s}{c \tau_{\text{зонд}}},$$

где f_{Π} — несущая частота магнетрона, T_s — период повторения импульсов, $\tau_{\text{зонд}}$ — длительность излучаемого импульса. При типичных значениях $\Delta v_p = 1$ м/с, $T_s = 10^{-3}$ с, $\tau_{\text{зонд}} = 10^{-6}$ с получаем $\frac{\Delta f_{\Pi}}{f_{\Pi}} \leq 4,7 \cdot 10^{-6}$.

Использование магнетрона коаксиального типа обеспечивает выполнение указанных требований.

Средняя радиальная (доплеровская) скорость в пределах импульсного объема радиолокатора равна средней скорости движения рассеивающих частиц, взвешенной по их эффективным площадям рассеяния. Для углов возвышения антенны радиолокатора, близких к 0° , она близка к скорости движения воздуха в направлении на радиолокатор (–) или от него (+).

2.1.2. Ограничения радиолокационных доплеровских измерений

Если фаза радиоза γ изменяется более чем на $\pm 180^\circ$ (π), оценка радиальной скорости становится неоднозначной.

Все доплеровские частоты, заключенные в интервале $\pm f_N = (2T_s)^{-1}$ (f_N — частота Найквиста), могут быть однозначно измерены, тогда как частоты, превышающие f_N , невозможно отличить от частот из этого интервала.

Во избежание неопределенности радиальные скорости v_p целей должны лежать в пределах интервала однозначного определения скоростей:

$$v_{p \max} = \pm \frac{\lambda}{4T_s}. \quad (2.4)$$

Максимальная однозначная скорость $v_{p \max}$ — это скорость, которая вызывает межимпульсное фазовое изменение радиоза, равное π .

Другими словами, самая высокая однозначная скорость, которая может быть измерена импульсным доплеровским радиолокатором, это скорость $v_{p \max}$, с которой цель может переместиться между последовательными импульсами на расстояние, превышающее четверть длины волны радиолокатора:

$$v_{p \max} = \pm \frac{\text{ЧСИ} \cdot \lambda}{4}. \quad (2.5)$$

Например, для $\lambda = 5,3$ см это расстояние равно 1,5 см.

Фазовое изменение $\pi + \phi$ неотличимо от изменений $(-\pi + \phi)$. Поэтому скорости $v_{p \max} + v$ будут ошибочно приниматься за $v_{p \max} - v$, т. е. скорости накладываются. Наложения скоростей можно избежать за счет достаточно высокой частоты следования импульсов (ЧСИ) (см. формулу (2.5)). Однако такой подход приводит к уменьшению максимальной однозначной дальности $r_{\max}$:

$$r_{\max} = \frac{c}{\text{ЧСИ} \cdot 2} = \frac{cT_s}{2}. \quad (2.6)$$

Способность радиолокатора, излучающего последовательность равноотстоящих импульсов, однозначно измерять и скорость, и дальность определяется следующим соотношением неопределенности [5]:

$$v_{\max} r_{\max} = \pm \frac{\lambda}{8} c. \quad (2.7)$$

Соотношение (2.7) означает, что при заданной длине волны увеличение дальности наблюдений приводит к уменьшению максимальной измеряемых скоростей, и, наоборот.

Проиллюстрируем формулы (2.4)—(2.7) расчетами для $\lambda = 5,32$ см, результаты которых приведены в табл.2.1.

Диапазон однозначного измерения $v_{\max}$ можно заметно увеличить, облучая метеоцель попеременно (в шахматном порядке) с помощью двух последовательностей зондирующих импульсов с разными ЧСИ (метод изменения межимпульсных интервалов, или метод вобуляции ЧСИ).

Таблица 2.1

Зависимость между $v_{\max}$, $r_{\max}$ и ЧСИ для длины волны радиолокатора
 $\lambda = 5,32$ см

$v_{\max}$ м/с	5	7,3	12	16	60
$r_{\max}$ км	400	272	166	125	33,4
ЧСИ, Гц	375	550	900	1200	4500

Максимальная однозначная скорость $v_{p \max}$ в этом методе определяется формулой [5]

$$v_{p \max} = \pm \frac{\lambda \cdot \text{ЧСИ}_1}{4 \left(1 - \frac{\text{ЧСИ}_1}{\text{ЧСИ}_2} \right)} \quad (2.8)$$

Как следует из (2.8), пара ЧСИ в соотношениях 3/2, 4/3, 5/4 расширяет диапазон измерения скорости $v_{p \max}$ соответственно в 2, 3 и 4 раза.

На $\lambda = 5,32$ см при $\frac{\text{ЧСИ}_1}{\text{ЧСИ}_2} = \frac{1200}{900} = \frac{4}{3}$ значение $v_{\max} = \pm 48,0$ м/с. Послед-

нюю величину можно было измерить на одной ЧСИ, равной 3600 Гц. Если соотношение ЧСИ превышает 5/4, это приводит к большим погрешностям измерения $v_{\max}$. По этой причине отношения $\frac{\text{ЧСИ}_1}{\text{ЧСИ}_2} > \frac{5}{4}$

применяются редко.

На практике в каждом бине (дискрете) дальности измеряются две доплеровские скорости: v_{pm_1} и v_{pm_2} . Далее по простому логическому алгоритму, следующему из (2.8), эти измерения распространяются на больший интервал скоростей v_{pm} . Например, если при ЧСИ₁ максимальная измеренная радиальная скорость равна v_{pm_1} , а при ЧСИ₂ — v_{pm_2} , то максимальная восстанавливаемая по этим измерениям скорость v_{pm} описывается формулой

$$v_{pm} = \frac{v_{pm_1} v_{pm_2}}{|v_{pm_1} - v_{pm_2}|} \quad (2.9)$$

На рис. 2.1 и 2.2 представлены примеры расчетов по формуле (2.9) и коррекции расчетов истинной радиальной (доплеровской) скорости в дискрете дальности при работе радиолокатора на двух ЧСИ.

Рис. 2.1. Расчеты истинной радиальной (доплеровской) скорости в дискрете дальности при работе радиолокатора на двух ЧСИ [1].

1 — высокая ЧСИ, 2 — низкая ЧСИ.

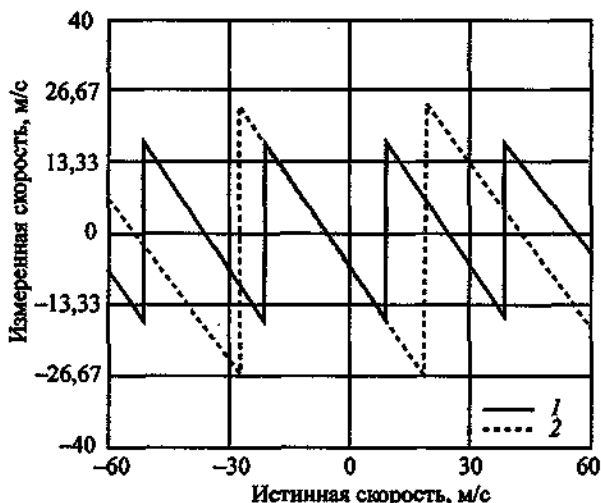
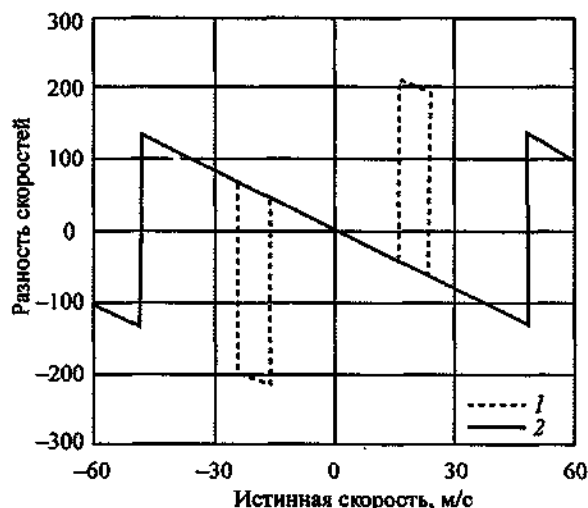


Рис. 2.2. Коррекция расчетов истинной радиальной (доплеровской) скорости в дискрете дальности при работе радиолокатора на двух ЧСИ [1].

1 — истинная скорость некорректированная, 2 — истинная скорость скорректированная (устранены выбросы, противоречащие здравому смыслу).



2.1.3. Случайные процессы. Когерентность

Оценка когерентности

Когерентность — свойство случайных процессов, которое характеризует их способность взаимно усиливать или ослаблять друг друга при сложении [5].

При сложении случайного процесса $\xi_1(t)$ с его запаздывающим на время τ повторением $\xi_1(t - \tau)$ средняя мощность P суммарного процесса $\xi(t) = \xi_1(t) + \xi_1(t - \tau)$ равна

$$P = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\xi_1(t) + \xi_1(t - \tau)]^2 dt = 2[P_1 + R(\tau)],$$

где P_1 — средняя мощность каждого из складывающихся процессов:

$$P_1 = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi_1^2(t) dt = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi_1^2(t - \tau) dt,$$

а $R(\tau)$ — функция автокорреляции случайного процесса $\xi_1(t)$:

$$R(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi_1(t) \xi_1(t - \tau) dt. \quad (2.10)$$

Принимая во внимание, что $P_1 = R(\tau)|_{\tau=0} = R(0)$, выражение для P можно представить в виде

$$P = 2P_1[1 + \rho(\tau)], \quad (2.11)$$

где $\rho(\tau)$ — нормированная функция автокорреляции, или коэффициент когерентности:

$$\rho(\tau) = \frac{R(\tau)}{R(0)}. \quad (2.12)$$

Коэффициент когерентности имеет максимальное значение $\rho(\tau) = 1$ при полном тождестве складывающихся процессов, т. е. при $\tau = 0$. В этом случае все мгновенные значения результирующего сигнала удваиваются, а его средняя мощность возрастает в 4 раза. При $\tau \rightarrow \infty$ $P = 2P_1$. Процессы полностью некогерентны и складываются энергетически.

Таким образом, случайные процессы считаются некогерентными, если функция их взаимной корреляции равна нулю, и когерентными, если она отлична от нуля.

Спектр частот

Как известно, автокорреляционная функция $R(\tau)$ используется для описания скорости протекания (изменения) случайного процесса и оценки схожести случайных процессов [5, 6].

Для количественной оценки такой скорости вводится понятие *времени корреляции* τ — такой интервал времени $T_1 = 0 \dots \tau_0$, по истечении которого $R(\tau)$ убывает до пренебрежимо малого значения, например до 1—5 % своего максимального значения.

Для решения большинства практических задач последовательность отраженных от метеообразований радиолокационных сигналов в дискрете дальности обычно рассматривают как стационарный случайный процесс.

Это допущение справедливо во всех случаях, когда продолжительность наблюдения за процессом мала (обычно ≤ 1 с) по сравнению со временем, необходимым для проявления значительных изменений статистических характеристик процесса (таких, например, как среднее значение, дисперсия и параметры корреляции).

Для описания скорости протекания случайного процесса, помимо функции $R(\tau)$, используется энергетический спектр $S(f)$, который представляет собой распределение мощности гармоник процесса, приходящейся на интервал 1 Гц. Кроме того, спектр показывает, какого рода колебания преобладают в данном случайном процессе, т. е. спектр позволяет оценить, какова внутренняя структура случайного процесса.

Для стационарных случайных процессов спектр $S(f)$ является прямым преобразованием Фурье автокорреляционной функции $R(\tau)$:

$$S(f) = \frac{1}{\pi} \int_0^T R(\tau) e^{-if\tau} d\tau. \quad (2.13)$$

Спектр характеризуют шириной спектра Δf .

Согласно экспериментальным данным [5], время корреляции радиолокационных сигналов, отраженных от метеообразований, находится в диапазоне $(3 \dots 15) \cdot 10^{-3}$ с. Это означает, что для получения надежных

оценок $R(\tau)$ и $S(f)$ в дискрете дальности эквивалентное число независимых отсчетов в пределах временной реализации отраженных сигналов должно составлять не менее 30—60 при ЧСИ, равном 1000 Гц.

Проиллюстрируем взаимосвязь $\rho(\tau)$ и $s(f)$ [6].

Пусть стационарный случайный процесс $x(t)$ имеет нормированную корреляционную функцию $\rho(\tau)$, которая описывается выражением

$$\rho(\tau) = e^{-\alpha\tau^2}, \quad \alpha > 0.$$

Нормированная спектральная плотность $s(f)$ при этом определяется в виде

$$s(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\tau) e^{-if\tau} d\tau = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha}} e^{-f^2/4\alpha}.$$

На рис. 2.3 приведены зависимость $\rho(\tau)$ и $s(f)$ для значений α , равных 0,5; 1 и 3 [6]. Из них следует, что с увеличением α , т. е. с уменьшением времени корреляции, спектральная плотность $s(f)$ изменяется бо-

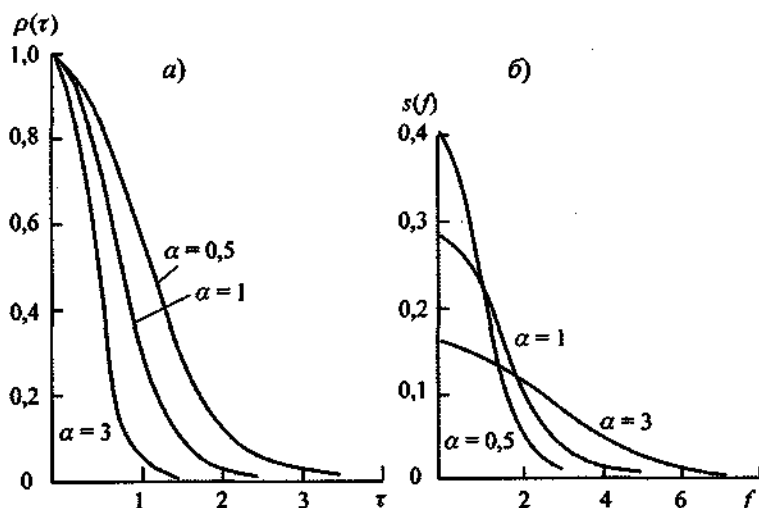


Рис. 2.3. Нормированная корреляционная функция $\rho(\tau)$ (а) и соответствующая ей нормированная спектральная плотность $s(f)$ (б) для стационарного случайного процесса [6].

лее плавно, убывая с ростом частоты f . Для больших значений α спектральная плотность с увеличением f убывает весьма медленно. При $\alpha = 0,5$ случайные процессы называются узкополосными (энергия процесса сосредоточена в узкой полосе частот), при $\alpha = 3$ — широкополосными.

Доплеровский спектр

Доплеровский спектр $S(v)$ — спектр скоростей, который описывает поле скорости большого числа гидрометеоров в пределах импульсного объема радиолокатора. Ширина спектра σ_v^2 является мерой дисперсии доплеровской скорости в пределах импульсного объема.

Во многих практических случаях, если не в большинстве, доплеровский спектр можно аппроксимировать гауссовым (нормальным) распределением. Это важное допущение значительно упрощает расчеты и имеет следующее обоснование:

распределение мощности излучения в диаграмме направленности параболических антенн (их главном лепестке) описывается гауссовой кривой;

распределение скоростей частиц в турбулизированной атмосфере также описывается гауссовой кривой.

Как и в нормальном (гауссовом) распределении, гауссовский доплеровский спектр радиоэха метеообразований зависит только от двух параметров: средней частоты спектра $\bar{f}_d$ и его среднеквадратической ширины σ_f .

При переходе к доплеровским скоростям получаем

$$\bar{v}_p = \frac{\lambda}{2} \bar{f}_d, \quad \sigma_v^2 = \frac{\lambda}{4} \sigma_f^2.$$

Необходимое условие коррелированности последовательности импульсов, отраженных от метеообразований, определяется выражением [5]

$$\frac{c\lambda}{4r_{\max}} \geq 2\pi\sigma_v, \quad (2.14)$$

где σ_v — ширина спектра скоростей целей, расположенных на удалении $r_{\max}$.

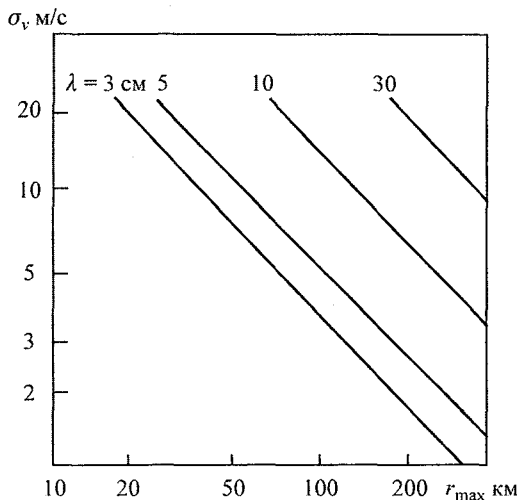


Рис. 2.4. Зависимость максимальной ширины спектра σ_v от максимальной дальности однозначного обнаружения $r_{\max}$ в пределах которой эхосигналы когерентны [5].

λ — длина волны РЛС.

наоборот, данной ширины спектра σ_v определяется максимальное значение r (рис. 2.4).

В процессе оперативной работы при подготовке радиолокатора к измерениям задается параметр *CPI* (coherent processing interval) — интервал когерентной обработки. Например, 1° — ширина интервала когерентной обработки в режиме синхронизации углов и число импульсов, определяющее *CPI* в режиме временной синхронизации (до 256) (см. рис.2.8).

2.1.4. Когерентный прием радиолокационных сигналов

Как известно, когерентный радиоприем основан на когерентности принимаемых сигналов. Он применяется для увеличения чувствительности и повышения помехозащищенности приемных устройств. Особенностью когерентного радиоприема является корреляционная обработка принимаемого сигнала.

Упрощенная блок-схема когерентного приемника импульсного доплеровского радиолокатора АМРК «Метеор—Метеоячейка» приведена на рис. 2.5 [1].

Стабилизированный гетеродин (STALO) обеспечивает колебания на частоте излучаемого сигнала $f_{\text{СВч}}$ минус малый, но фиксированный

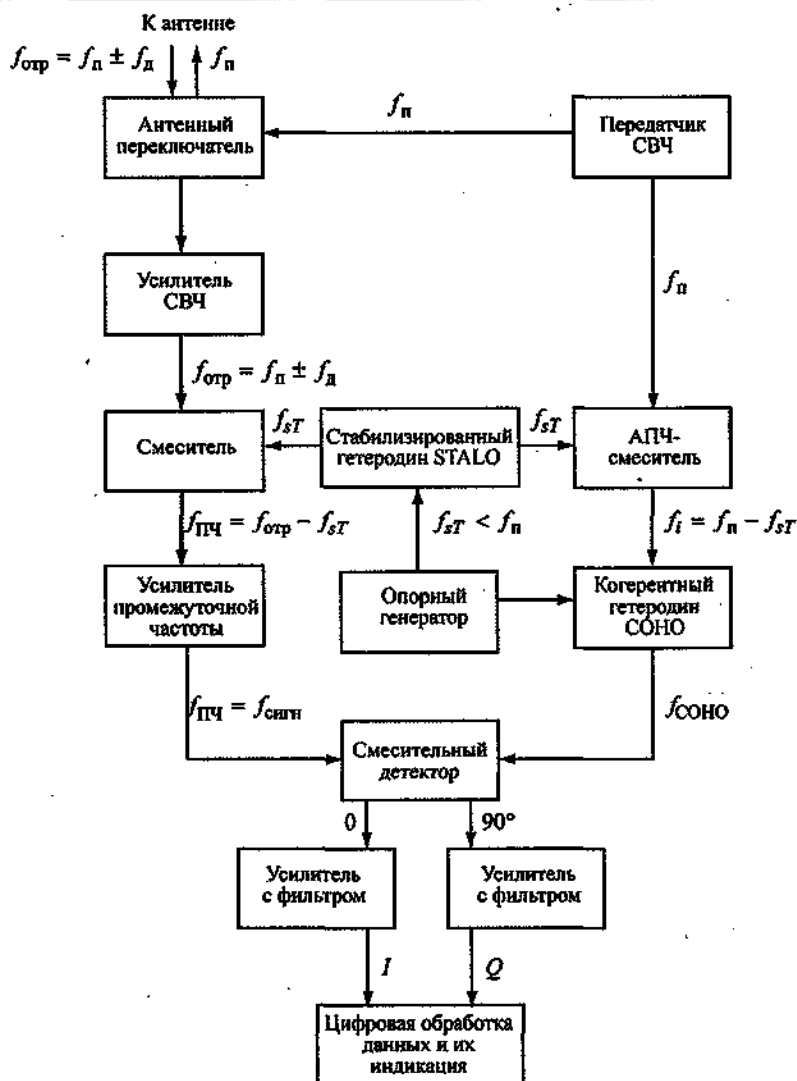


Рис. 2.5. Блок-схема когерентного радиоприемника-супергетеродина для импульсного доплеровского радиолокатора АМРК «Метеор—Метеочейка» [1].

сдвиг частоты f_{Δ} . Часть этого сигнала суммируется с сигналом радиоза, интенсивность которого мала по сравнению с интенсивностью сигнала стабилизированного гетеродина. При этом условии сумма двух сигналов может быть хорошо аппроксимирована выражением, в котором сигнал STALO модулируется другим сигналом, в точности повторяющим сигнал радиоза как по фазе, так и по амплитуде с той лишь разницей, что его частота равна f_{Δ} .

Просуммированные сигналы поступают в первый двойной балансный смеситель-преобразователь с нелинейной передаточной характеристикой, на выходе которого получается сумма и разность их частот и гармоник.

Когерентный гетеродин служит для выделения модулирующего сигнала и удаления смеси сигналов стабилизированного гетеродина и гармоник.

Напомним, что гетеродинирование служит только для того, чтобы преобразовать (сместить) несущую частоту, оставляя неизменной огибающую принимаемого сигнала, из дальнейшей обработки которой «извлекают» метеоинформацию.

Основная задача блока стабилизированного гетеродина — обеспечить смесители частотой для ее преобразования с понижением, чтобы разница между STALO и ВЧ соответствовала первой промежуточной частоте.

STALO в АМПК работает на частоте 5000—5300 МГц. Первая промежуточная частота $f_{\text{ПЧ I}}$ выбрана равной 540 МГц, вторая $f_{\text{ПЧ II}}$ — равной 60 МГц.

Необходимую стабильность частоты когерентного гетеродина за промежуток времени, равный $T_s \approx 10^{-3}$ с, оценим по формуле [15]

$$\frac{\Delta f_{\text{кг}}}{f_{\text{кг}}} \leq \frac{f_{\text{п}}}{f_{\text{кг}}} \frac{\sqrt{2}\Delta\nu}{c} = 4,4 \cdot 10^{-7},$$

где $f_{\text{п}}$ — несущая частота магнетрона (5640 МГц), $f_{\text{кг}}$ — частота когерентного гетеродина (60 МГц), $\Delta\nu = 1$ м/с — величина разрешения по доплеровской скорости.

Величина $f_{\text{ПЧ II}} = 60$ МГц выбрана в АМПК так, чтобы она намного превышала частоты, содержащиеся в спектре принимаемого сигнала.

В STALO АМРК высокая стабильность и низкий фазовый шум обеспечиваются фазовой синхронизацией с высококачественным опорным генератором. Вследствие этого сам STALO состоит из двух генераторов: высокочастотного и внешнего опорного. Для высокочастотной части STALO используется ВЧ генератор с фазовой синхронизацией, а опорная частота создается сверхмалошумящим кварцевым генератором. Последний служит для исключения помех и синхронизации источников частоты STALO и когерентного гетеродина.

В качестве цифрового контролируемого генератора для когерентного гетеродина служит синтезатор частоты с малым фазовым шумом, выходная частота синтезатора 520—540 МГц. Для преобразования ПЧ I (520—540 МГц) в ПЧ II (~60 МГц) с когерентного гетеродина на второй смеситель в виде тройного балансного смесителя сигналов подается необходимая им частота.

Фаза колебаний когерентного гетеродина жестко связана с фазой приходящего сигнала промежуточной частоты.

Для получения опорной фазы при корреляционной обработке отраженных от метеообразований сигналов используется выборка излучаемого передатчиком импульса. Эта выборка также преобразуется в импульс промежуточной частоты (60 МГц).

Таким образом, в когерентном приемнике АМРК «Метеор—Метеоячейка» обеспечивается определение фазы путем сдвига отраженного сигнала на 90° для получения синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих сигнала при фиксированной дальности (в бине дальности).

2.2. Первичная доплеровская обработка

2.2.1. Цель первичной обработки

Как уже отмечалось, при доплеровских измерениях множественной цели (метеоцели) на импульсном радиолокаторе непрерывные отраженные сигналы представляются последовательностью значений сложного эхосигнала $V(t)$, отсчитываемых в дискретные моменты времени τ_s .

Сложный комплексный сигнал $V(t)$ на выходе фазовых детекторов когерентного приемника представляет собой стационарный случайный нормальный процесс. Это положение лежит в основе первич-

ной обработки отраженных сигналов, которая должна производиться в каждом дискрете (бине) дальности радиолокационного луча.

Цель первичной обработки — измерить отражаемость и два параметра спектра радиозоха облаков и осадков: его среднюю частоту $\bar{f}_d$ и дисперсию σ_f^2 . Однако для этого необходимо сначала выделить радио-эхо метеообразований на фоне отражений от поверхности Земли на основе различия их радиальных скоростей, а также подавить сигналы воздушных целей.

После подавления мешающих отражений измерение параметров спектра $\bar{f}_d$ и σ_f^2 заключается в следующем:

проводится оценка параметров спектра в каждом дискрете дальности на радиолокационном луче;

устраняются неоднозначности измерений, возникающие при импульсной работе радиолокатора:

устраняются наложенные сигналы на разных дальностях, возникающие в протяженных метеообразованиях.

2.2.2. Расчет параметров спектра

Комплексный сигнал $V(t)$ на выходе фазовых детекторов приемника запишется в виде

$$V(t) = I(t) + jQ(t) = |V|(\cos \varphi + j \sin \varphi) = |V| e^{j\varphi},$$

а комплексный сигнал $V^*(t)$ — в виде

$$V^*(t) = I(t) - jQ(t) = |V|(\cos \varphi - j \sin \varphi) = |V| e^{-j\varphi}. \quad (2.15)$$

где $V(t)$ и $V^*(t)$ называют сопряженными комплексными сигналами, $I(t) = |V| \cos \varphi$ — синфазная составляющая сигнала, $Q(t) = |V| \sin \varphi$ — квадратурная составляющая сигнала, $\varphi = \arg V$ — аргумент, $\operatorname{tg} \varphi = Q/I$, величина $\operatorname{arctg} I/Q$ пропорциональна фазе отражения, амплитуда $|V| = \sqrt{I^2 + Q^2}$ — модуль $V(t)$.

На рис. 2.6 [5] представлены идеализированные линии развертки для синфазной составляющей $I(\tau_s)$, которые соответствуют эхосигналам от метеоцели. Каждая кривая характеризует эхосигналы, обусловленные одним высокочастотным зондирующим импульсом P_t . Мгновенные выборочные значения сигнала берутся в моменты τ_{s1} , τ_{s2} и т. д. Время τ_c представляет собой временной интервал корреляции вдоль оси τ_s .

Для пояснения обработки сигнала в дискрете дальности введем временную шкалу — ось выборок. В ней отсчеты проводятся через интервал T_s в дискретные моменты времени, которые соответствуют выборкам сигнала при фиксированном времени задержки $t = \tau_s$.

Анализ изменения фазы и амплитуды непрерывного сигнала случайного процесса производится вдоль временной оси выборок для дискретных моментов $(n-1)T_s$. Они соответствуют определенному времени отсчетов по дальности $\tau_s = 2r/c$, т. е. привязаны к конкретному бину дальности.

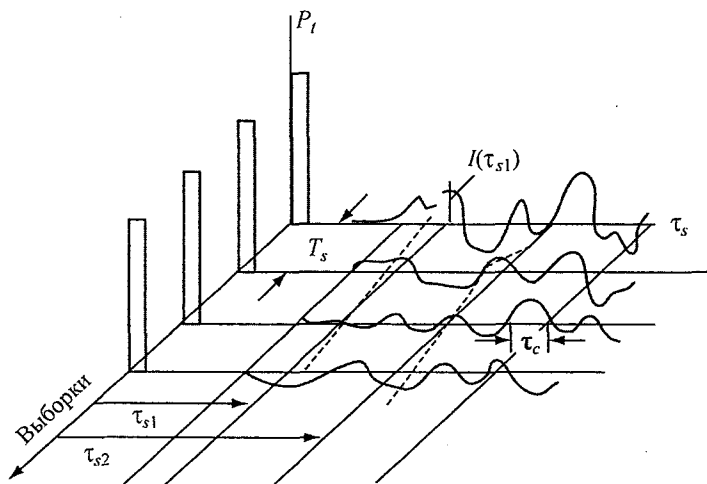


Рис. 2.6. Идеализированные линии развертки для синфазной составляющей $I(\tau_s)$, соответствующие эхосигналам от множества целей [5].

Штриховой кривой указано возможное изменение выборочного сигнала при фиксированном τ_{s1} , когда частота стробирования T_s^{-1} возрастает и не имеется целей на неоднозначно считываемых дальностях.

Величины $I(\tau_s, T_s)$ и $Q(\tau_s, T_s)$ распределены по нормальному закону с нулевым средним и являются независимыми случайными величинами. Фаза φ не зависит от амплитуды $|V|$ и распределена равномерно, а амплитуда $|V| = (I^2 + Q^2)^{1/2}$ имеет распределение с плотностью вероятности, подчиняющейся закону Рэлея.

Хотя I и Q являются независимыми случайными величинами, стохастические процессы $I(\tau_s, nT_s)$ и $Q(\tau_s, nT_s)$ нельзя считать независимыми. Это означает, что в общем случае при $k \neq m$ для математического ожидания E получаем [5]

$$E[I(\tau_s, mT_s)Q(\tau_s, kT_s)] \neq 0.$$

Расстояние между выборками на временной оси отсчетов дальности выбирается так, чтобы они служили независимыми оценками отражаемости и скорости в направлении зондирования.

Автокорреляция комплексного стационарного случайного процесса $R(l)$ определяется следующим образом [5]:

$$R(l) = E[V^*(m)V(m+l)] = E[V^*(m-l)V(m)], \quad (2.16)$$

где $E[\]$ — математическое ожидание по ансамблю [5].

Ансамбль представляет собой совокупность случайных последовательностей, в которых $V(m)$ изменяется от члена к члену, даже если значение m фиксировано.

Автоковариация представляет собой автокорреляцию с исключенным средним значением сигнала $E[V(m)]$. Для большинства сигналов, отраженных от метеобразований, $E[V(m)] = 0$, а для сигналов от наземных целей $E[V(m)] \neq 0$.

Полагают, что все ансамбли величин сигналов $V(m)$ являются эргодическими. Это означает, что статистические свойства ансамбля могут быть получены из осреднения выборочных по времени значений. С учетом конечности числа выборок M функцию автокорреляции случайных процессов можно оценить по следующей формуле:

$$\hat{R}(l) = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-|l|-1} V^*(m)V(m+l) & \text{при } |l| \leq M-1, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (2.17)$$

На рис. 2.7 [5] изображен модуль автокорреляционной функции $|R(l)|$.

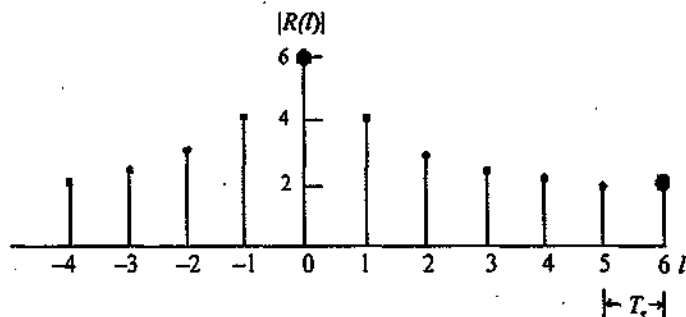


Рис. 2.7. Модуль автокорреляционной функции [5].

Мощность, соответствующая последовательности данных, равна 6.
Через время примерно $3T_s$ выборки становятся некоррелированными.
Модуль среднего значения $E[V(m)]$ равен $\sqrt{2}$.

Спектр мощности $\hat{S}(f)$ (энергетический спектр) определяется как дискретное преобразование Фурье автокорреляционной функции $\hat{R}(l)$ [5]

$$\hat{S}(f) = T_s \sum_{l=-(M-1)}^{M-1} \hat{R}(l) e^{-j2\pi f T_s l}, \quad (2.18)$$

где $\hat{S}(f)$ — непрерывная функция с периодом T_s^{-1} , а $\hat{R}(l)$ — комплексные коэффициенты ее разложения в ряд Фурье. Используя быстрое преобразование Фурье временной последовательности $V(m)$ спектр мощности $\hat{S}(f)$ можно определить следующим образом:

$$\hat{S}(f) = \frac{T_s}{M} \left\{ \sum_{m,n}^{M-1} V^*(m)V(n) e^{-j2\pi f T_s l} \right\}, \quad (2.19)$$

где $l = n - m$, а суммирование ведется по двум индексам.

Возросшие возможности вычислительной техники позволяют в оперативном режиме работы АМРК рассчитывать энергетический спектр или *плотность спектра мощности* и по формуле (2.18), и по формуле (2.19). Считается, что метод (2.18) — пульсарный (ковариационный) — более надежен, чем (2.19), для расчета $\hat{S}(f)$ при небольших значениях отношения сигнал/шум, но уступает (2.19) при устранении мешающих отражений от местных предметов, поскольку расчет энергетического спектра по формуле (2.19) дает возможность провести в процессе расчетов спектральную фильтрацию.

Расчет автокорреляционной функции сводится к расчету коэффициентов корреляции двух смещенных случайных стационарных процессов (временной последовательности) в интервалах $0 - R(0) \equiv R_0$, $1 - R(1) \equiv R_1$, $2 - R(2) \equiv R_2$, где $R(l)$ оценивается в дискретные моменты через интервал T_s (см. рис. 2.7).

Плотность доплеровского спектра мощности $S(\nu)$ можно выразить через среднюю радиальную скорость $\hat{\nu}_p$ и ширину доплеровского спектра σ_ν [21] по формуле

$$S(\nu) = \frac{P_0}{\sqrt{2\pi}\sigma_\nu} \exp\left(-\frac{(\nu - \hat{\nu}_p)^2}{2\sigma_\nu^2}\right), \quad (2.20)$$

где P_0 — мощность принимаемых сигналов (см. формулу (2.34)).

2.2.3. Метод комплексной автоковариации (пульсарный)

Если излучается последовательность M равноотстоящих импульсов, то автокорреляционная функция последовательности отраженных комплексных сопряженных сигналов для времени запаздывания T_s может быть оценена с помощью суммы

$$\hat{R}(T_s) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} V^*(m) V(m+1). \quad (2.21)$$

Оценка средней доплеровской скорости $\hat{\nu}_p$ (м/с) будет описываться выражением [5]

$$\hat{\nu}_p = -\left(\frac{\lambda}{4\pi T_s}\right) \arg \hat{R}(T_s). \quad (2.22)$$

Аргумент функции $\hat{R}(T_s)$ выражен в радианах, а знак минус означает, что положительным доплеровским сдвигам частоты соответствуют отрицательные скорости.

Средняя доплеровская скорость может, как предлагается в [21], рассчитываться следующим образом:

$$\hat{v}_p = - \left(\frac{\lambda}{4\pi T_s} \right) \arg[R(1)] \quad (2.23)$$

При допущении, что спектр аппроксимируется кривой Гаусса, ширина спектра σ_v определяется формулой [5]

$$\sigma_v = \left(\frac{\lambda}{4\pi T_s \sqrt{2}} \right) \left| \ln \frac{1}{|R(T_s)|} \right|^{1/2} \quad (2.24)$$

или, как предлагают разработчики АМРК [1] при том же допущении, формулой

$$\sigma_v = \left(\frac{\lambda}{4\pi T_s} \right) \sqrt{\frac{2}{3} \ln \left(\frac{R(1)}{R(2)} \right)}, \quad (2.25)$$

где $R(1)$ и $R(2)$ — оценки автокорреляционной функции, или, как предлагают авторы [21], формулой

$$\sigma_v = \frac{\lambda}{2\sqrt{2}\pi T_s} \sqrt{\ln \left| \frac{R(1)}{R(2)} \right|}. \quad (2.26)$$

Показатель качества сигнала оценивается величиной SQI (*signal quality index*):

$$SQI = \frac{|R(1)|}{R(0)}. \quad (2.27)$$

SQI используют так же, как порог ограничения при первичной обработке отраженных сигналов: $SQI = 0$ — совершенно некоррелированные данные, $SQI = 1$ — совершенно коррелированные данные. Оператор АМРК сам задает порог в единицах SQI , выше которого производится доплеровская обработка. SQI иногда обозначается у других авторов как NCP (нормированная мощность когерентности).

2.2.4. Метод спектральной обработки

При использовании метода спектральной обработки для каждого дискрета дальности процедура расчетов заключается в следующем:

1) расчет дискретного преобразования Фурье (ДПФ) для данных временного ряда $V(t)$:

$$f_m = \text{ДПФ}(V(t_m)); \quad (2.28)$$

2) определение энергетического спектра по преобразованию Фурье (2.19):

$$\hat{S}_m = f_m f_m^*; \quad (2.29)$$

3) применение спектрального фильтра (при необходимости):

$$\hat{S}'_m = \text{filter}(\hat{S}_m); \quad (2.30)$$

4) расчет дискретного преобразования Фурье для энергетического спектра:

$$R_{m-1} = \text{ДПФ}(\hat{S}'_m). \quad (2.31)$$

Здесь индекс $m = 1 \dots M$ относится к одному дискрету дальности, а звездочкой обозначена сопряженная величина.

В результате обработки по формуле (2.31) получаются значения коэффициента автокорреляции на разных интервалах: $R(0)$, $R(1)$, $R(2)$ и $R(3)$ и т. д.

2.2.5. Расчет параметров спектра при использовании метода изменения межимпульсных интервалов

В методе, основанном на изменении межимпульсных интервалов от отсчета к отсчету, используют комбинацию автоковариационных оценок [5]: $\hat{R}(T_{s1})$ при запаздывании T_{s1} и $R(T_{s2})$ при запаздывании T_{s2} . Скорость в этом случае определяется разностью их фаз (см. формулу (2.9)).

В методе вобуляции скорость определяется по формуле

$$v_p = \frac{\lambda}{4\pi(T_{s2} - T_{s1})} \arg \left(\frac{\hat{R}(T_{s1})}{\hat{R}(T_{s2})} \right). \quad (2.32)$$

Оценка ширины спектра может быть получена из отношения модулей ковариаций:

$$\hat{\sigma}_v = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{2(T_{s2}^2 - T_{s1}^2)}} \left[\ln \left| \frac{\hat{R}(T_{s1})}{\hat{R}(T_{s2})} \right| \right]^{1/2}. \quad (2.33)$$

2.3. Измерение отражаемости, пороги обработки и устранение мешающих отражений

2.3.1. Отражаемость

Цифровой приемник GDRX АМРК выдает данные о коэффициенте шума N и данные I/Q , которые затем обрабатываются процессором сигналов. Существуют типы данных I и Q упорядоченные по дальности и по выборке [1].

На рис. 2.8 показано различие между данными по дальности и данными по выборке для одного СРЛ. Данные по выборкам создаются в АМРК только в том случае, если оператором выбран конкретный сектор дальности.¹

Большой динамический диапазон приемника АМРК и практически идеальная линейность его амплитудной характеристики позволяют выполнять оценку всех параметров сигнала без нелинейных преобразований. В связи с этим оценка интенсивности комплексного линейного сигнала состоит из простого суммирования мощности $(II^* + QQ^*)$ на заданной дальности и в азимуте.

Оценка средней мощности сигнала $P_{\text{ср}}$, интегрированная по M выборкам дальности и азимута и скорректированная на мощность шума системы N , может быть получена по следующей формуле:

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (I_m I_m^* + Q_m Q_m^*) - N. \quad (2.34)$$

Если результат вычитания оказался отрицательным, тогда $P_{\text{ср}} = 0$.

¹ Селектирование, стробирование — процесс выделения отраженных сигналов или импульсов, возникающих спустя определенное время после излучения импульса.

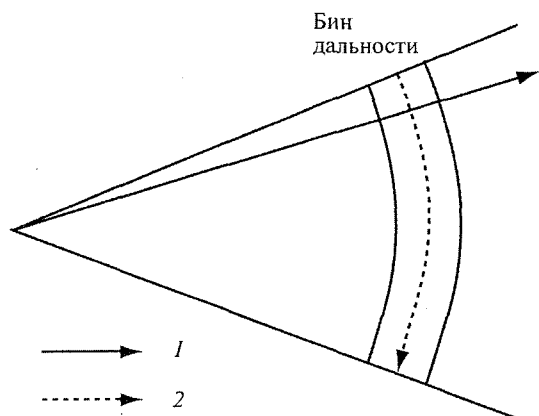


Рис. 2.8. Различия данных синфазных I и квадратурных Q составляющих сигнала упорядоченных по дальности (1) и по выборке (углу) (2) для одного интервала когерентной обработки (СРГ).

Выборки, проинтегрированные по M , состоят из фиксированного значения по дальности, заданного оператором.

ром, плюс значения по азимуту. Интегрирование по азимуту может быть фиксированным, например 1° , или определяется азимутальным интервалом, заданным оператором.

Если включена фильтрация местников, тогда $P_{\text{ср}}$ будет оцениваться по отфильтрованным данным I/Q . В этом случае из данных будут удаляться отражения от осадков, имеющие скорость, близкую к нулю.

Если в АМПК включена статистическая фильтрация местников, тогда для ввода поправки в $P_{\text{ср}}$ на «засорение местниками» используются статистические методы.

После оценки $P_{\text{ср}}$ с учетом результатов калибровочных измерений приемного тракта АМПК в каждом селекторе дальности рассчитывается ее отражаемость Z (дБЗ). Она может быть двух типов:

нескорректированная UZ (uncorrected), рассчитанная по нефльтрованным данным I/Q

$$UZ = 10 \lg (T_0 - N) + C_r(r^2) + C_{\text{атм}}(r) + C_{\text{radar}}, \quad (2.35)$$

скорректированная CZ (corrected), рассчитанная по фильтрованным данным I/Q , если оператором установлен выбранный фильтр местников

$$CZ = 10 \lg (R_0 - N) + C_r(r^2) + C_{\text{атм}}(r) + C_{\text{radar}}. \quad (2.36)$$

Здесь T_0 — средняя мощность отраженных сигналов без коррекции местников; R_0 — средняя мощность отраженных сигналов, из которых в результате фильтрации исключены сигналы от местников; N — коэффициент шума; $C_r(r^2)$ — поправка на удаление; $C_{\text{атм}}(r)$ — поправка на ослабление в атмосфере; C_{radar} — радиолокационная постоянная, с помощью которой измеренная мощность переводится в отражаемость.

Особенности расчета C_{radar} рассмотрим в п. 2.7, посвященном калибровкам АМРК.

Поправка $C_{\text{атм}}(r)$ на двустороннее ослабление в атмосфере для длины волны АМРК, равной 5,3 см, принимается равной $0,013 \text{ [дБ/км]} \cdot r \text{ [км]}$ или $0,013 \cdot r \text{ [дБ/км][км]}$.

2.3.2. Пороги обработки

Для повышения качества первичных данных в АМРК предусмотрена двухступенчатая процедура введения порогов обработки. Испытания порогов проводятся для каждого селектора дальности. При испытании порогов селектор дальности может пройти или не пройти тест.

Оператор АМРК имеет полную свободу при задании величины порогов. Если же у оператора появились сомнения, то ему рекомендуется использовать установки порогов по умолчанию, которые предлагаются разработчиками АМРК.

Описание порогов обработки, установленных разработчиками АМРК [1], приводится ниже.

LOG. Порог LOG (логарифмический) используется для ограничения данных по отражаемости. Временной ряд логарифма мощности определяется как $10 \lg (I^* + QQ^*)$. Значения даны в единицах мощности (дБ/мВт). Для этого данные каналов I и Q оператору нужно перевести из линейных произвольных единиц в единицы мощности, используя информацию, полученную в результате калибровки приемника радиолокатора. Тест ограничения LOG полезен для фильтрации данных со значениями отражаемости, близкими к шуму системы. Типичные значения порога LOG: от 1 до 3 дБ.

CCOR. Порог коррекции местников (clutter correction) проверяется по значению CCOR в селекторе дальности. Коэффициент коррекции местников определяется как мощность нескорректированного ра-

диоэха, деленная на мощность скорректированного. Величина CCOR дает оценку отношения между сигналом осадков и местниками. Этот порог полезен при удалении оценок интенсивности из данных, слишком сильно засоренных местниками.

В RAVIS установлено значение по умолчанию 30 дБ. Это означает, что мощность местников и оцененная мощность метеорологического сигнала находятся в соотношении 1000:1. Типичные значения порога CCOR: от 10 до 50 дБ.

SQI1. Порог SQI1 проверяется на показатель качества сигнала (signal quality index, SQI) в селекторе дальности. Показатель качества сигнала является мерой когерентности данных и определяется как отношение значения первого коэффициента автокорреляции сигнала к значению нулевого коэффициента. Отражения с низкой когерентностью могут получаться в результате низкого уровня сигнала или за счет сигналов с очень широким разбросом скоростей. Когда у сигнала низкая когерентность, оценки скорости и ширины спектра имеют плохое качество. Используется для фильтрации некогерентных данных. Типичные значения порога SQI1: от 0,3 до 0,5.

SQI2. Для порога SQI2 применяется тот же алгоритм оценки, что и для порога SQI1. Это означает, что проверяются те же данные и тот же показатель качества сигнала (SQI) в селекторе дальности. Определение дополнительного SQI предоставляет большую гибкость. Типичные значения для порога SQI2: от 0,3 до 0,5.

Рекомендация. Не используйте одно и то же значение для SQI1 и SQI2.

Следующий шаг введения порогов заключается в введении с помощью матрицы результата испытания порогов, который будет использоваться при обработке определенного типа данных (моментов). В каждой строке матрицы указывается обрабатываемый тип данных. В каждой колонке указывается тест порога. Один и тот же порог LOG применяется в двух тестах:

UZ-LOG: проверка порога LOG применяется к данным UZ,

CZ-LOG: проверка порога LOG применяется к данным CZ.

Отдельные результаты испытания порогов объединяются в один результат испытания. Не выдержавший хотя бы один тест селектор дальности получает значение «нет данных».

В качестве примера можно привести следующие установки:

UZ	UZ LOG	CZ LOG	SQI1	CCOR	SQI2
☐	☒	☐	☒	☒	☐

В данном примере тип данных о моменте — это нескорректированная отражаемость *UZ*, выбранные пороговые фильтры *UZ-LOG*, *SQI1* и *CCOR*. Это значит, что будут проведены следующие испытания порогов:

- данные о *UZ* проверяются на порог *LOG*,
- данные *SQI* проверяются на порог *SQI1*,
- данные *CCOR* проверяются на порог *CCOR*.

Если одна из этих проверок порогов закончится неудачно для какого-то селектора дальности, значение *UZ* этого селектора дальности будет «нет данных». Если все испытания пройдены успешно, значение *UZ* селектора дальности останется прежним.

2.3.3. Фильтрация первичных данных как способ устранения мешающих отражений

Сигналы от местных предметов характеризуются большими временами корреляции и, следовательно, имеют узкий спектр. Средняя скорость источников помехи равна нулю и поэтому легко выделяется в спектре доплеровских частот.

Если перед получением оценок моментов из доплеровского спектра сигналов удалить нулевую и ближайшие к ней частотные составляющие, то можно будет восстановить истинный спектр мощности при достаточно большом (>90 дБ) динамическом диапазоне приемника.

Для подавления сигналов от местных предметов используются рекурсивные фильтры, работающие с цифровыми значениями *I* и *Q* составляющих сигнала, а также эллиптические цифровые трехполосные или четырехполосные заграждающие фильтры.¹ Последние обеспечивают уровень отсечки до 30 дБ при работе с магнетроном, пульсации в полосе пропускания 1 дБ и ширину интервала отсечки, равную 2—4 % интервала Найквиста.

¹ Основные сведения о фильтрах, применяемых при обработке информации АМРК, приведены в приложении 2 [4, 16—18].

Параметры фильтра местников для АМРК. Фильтр местников используется для удаления отражений от земли во время обработки данных. На этом этапе обработки данных из некорректированных данных об отражаемости получаются скорректированные данные об отражаемости. Имеются фильтры местников для временной области и частотной. Какой из фильтров активируется, зависит от заданного режима обработки. Фильтрация местников предпочтительнее в частотной области, так как в результате фильтрации лучше сохраняется отношение сигнала к шуму.

Фильтрация местников основана на свойствах скорости в нескорректированных данных об отражаемости. Поэтому ширина фильтра определяется в терминах скорости. Ширина фильтра (м/с) зависит от выбранной ЧСИ (а также от излучаемой частоты). Значения ширины фильтров по умолчанию, начиная с всечастотного фильтра, следующие: 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 м/с.

Доплеровские фильтры временной области реализованы в виде четырехполосных цифровых эллиптических фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) с глубиной подавления от 30 до 50 дБ.

Коэффициенты фильтрации должны изменяться оператором или изготовителем, так как они зависят от файлов конфигурации.

В фильтре DFT используется фильтр частотного домена, основанный на вычислении спектра сигнала с использованием быстрого преобразования Фурье. Как и для доплеровских БИХ-фильтров местников, имеется также ряд фильтров местников на базе DFT. Спектр DFT может взвешиваться оконными функциями: прямоугольной (Rectangular), Хэмминга (Hamming) и Блэкмана (Blackman). Соответственно заданной ширине фильтра ряд спектральных линий у центра выбрасывается. Далее для каждой стороны образовавшейся лакуны выбираются ближайшая пропущенная линия и две ближайшие оставленные линии и вычисляются их средние значения. По этим средним значениям с помощью линейной интерполяции восстанавливается плотность спектра мощности выброшенных линий.

Статистическая фильтрация местников. Как уже отмечалось, доплеровские фильтры местников почти полностью удаляют отражения осадков, имеющие нулевую радиальную скорость. Этот нежела-

тельный побочный эффект фильтров местников может создавать серьезные ошибки в суммарных значениях накопленных осадков в некоторых азимутах. Единственный способ избежать таких систематических ошибок, создаваемых фильтром местников при измерении осадков, — использование методов исключения местников, не зависящих от спектральных свойств сигнала. Существуют два таких метода: простая карта местников, используемая на большинстве радиолокаторов, и статистическая фильтрация местников.

Статистическая фильтрация местников основана на различиях между распределением вероятности радиоэха осадков, которое хорошо описывается распределением Рэлея, и отражениями от местников, которые имеют малую дисперсию и меньшее спектральное содержимое, нежели отражения от осадков.

Отметим, что цифровой приемник позволяет проводить либо доплеровскую, либо статистическую фильтрацию — одновременно оба метода не применяются. Статистическая фильтрация местников допускается только в режиме *Отражаемость*.

Обработка трехмерной карты местников. Трехмерная карта фильтра местников описывается как фильтр трехмерной структуры [азимут] [угол места] [дальность]:

[азимут] определяет угловую ширину разрешения (1°),

[угол места] определяет пять секторов в пределах от -2 до 15° ,

[дальность] определяет 1-километровые промежутки максимум до 255 км.

Каждое полученное пятно фильтра позволяет определить ширину фильтра. В фильтрах частотной области отдельные пятна можно изменять по дальности, углу места и азимуту. При обработке фильтрами временной области изменение коэффициентов фильтрации в азимутальном направлении при стабилизации фильтра может приводить к различным переходным процессам, и, следовательно, при обработке во временном домене изменение коэффициентов поддерживается только по дальности и углу места.

Трехмерный фильтр можно автоматически инициализировать соответствующим трехмерным образцовым сканированием в хорошую погоду. Процессор сигналов создает интенсивность и ширину спектра для этого образцового сканирования и автоматически конфигурирует

отдельные справочные карты с номерами фильтров, полученными во время образцового сканирования.

При самом простом варианте оператор может выбрать один фильтр местников для всех дальностей, азимутов и углов места.

Расширенная фильтрация местников. Процессор GDRX может дополняться фильтрацией местников, для которой используются комбинированные методы оптимального удаления местников без удаления радиозна осадков с нулевой скоростью. В этом усовершенствованном методе используются интенсивность сигнала, скорость, когерентность, статистические параметры и адаптируемая карта местников.

Пороги. Оценки интенсивности сигнала, скорости и ширины спектра можно различить по числу пороговых тестов с различными параметрами. Эти тесты позволяют оператору отбраковывать оценки моментов низкого качества. Когда тест не достигает порога, сомнительные данные помещаются в разряд *отсутствие данных*, и последующая обработка данных ведется с исключением таких данных (см. подробнее в п. 2.3.2).

Удаление спеклов. Спеклами называют оценки сигналов (интенсивности, скорости или ширины спектра), окруженные значениями «данных нет». Такие изолированные отражения зачастую оказываются просто шумовым выбросом или отражением от самолетов или местников. Они могут быть также обусловлены небольшими изолированными дождевыми ливнями, однако такие однопиксельные измерения редко используются в метеорологии, поэтому их потеря при удалении спеклов не существенна.

По этой причине для удаления всех изолированных измерений на основе анализа только дальности (не азимута) в программу GDRX включен алгоритм удаления спеклов. Алгоритм включается как опция пользователя для освобождения дисплеев радиолокатора от случайных точечных целей.

В программное обеспечение процессора сигналов включен алгоритм удаления спеклов для удаления всех изолированных объектов на основе анализа только дальности или дальности и азимута (2D). Чтобы на дисплей радиолокатора не выводились случайные точечные объекты, нужно включить фильтр спеклов.

Он применяется к данным об отражаемости и доплеровских моментах.

Оператор может выбрать тип фильтра спеклов:

none — фильтр спеклов не будет применен к данным;

radial — фильтр спеклов будет применен к данным; используется информация только о дальности в том же СРІ; это означает, что будут проверены все соседние селекторы дальности на наличие значений «нет данных»; если это так, то значение будет исправлено на «нет данных»;

spatial — фильтр спеклов будет применен к данным, в которых есть информация о дальности в том же СРІ или в двух соседних СРІ.

На рис. 2.9 показаны три СРІ и типичный селектор дальности с соседними селекторами дальности. Фильтр проходит по СРІ и проверяет каждый селектор дальности по отношению к восьми его соседям. Он ведет проверку на недействительность и на подстановку.



Рис. 2.9.

При выборе пространственного фильтра *invalid neighbours* число недействующих соседей («нет данных») указывает, когда селектор дальности стал недействующим. Если оно слишком большое, селектор дальности обозначается «нет данных».

Число действующих соседей (*valid neighbours*) указывает, когда значение селектора дальности подставляется. В случае подстановки селектора дальности его значение заменяется средним из действующих окружающих селекторов.

Расчеты после фильтрации. Для каждого селектора дальности обработка парных импульсов дает оценки автокорреляции в разные интервалы времени. Если число выборок радиоэха в одном селекторе дальности равно M , значения автокорреляции рассчитываются следующим образом:

по интервалу 0 без коррекции местников

$$T_0 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M V_m^* V_m,$$

по интервалу 0 с коррекцией местников

$$R_0 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M U_m^* U_m,$$

по интервалу 1 с коррекцией местников

$$R_1 = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} U_m^* U_{m+1},$$

по интервалу 2 с коррекцией местников

$$R_2 = \frac{1}{M-2} \sum_{m=1}^{M-2} U_m^* U_{m+2},$$

где V_m — временной ряд сигналов до коррекции местников, а U_m — временной ряд сигналов после коррекции местников. Звездочкой отмечены сопряженные комплексные амплитуды парных сигналов. Число импульсов, необходимое для расчета автокорреляции в одном селекторе дальности, зависит от режима синхронизации процессора сигналов. Обработка парных импульсов должна производиться для каждого селектора дальности одного CPI.

Работа с двумя ЧСИ. Выбор алгоритма для работы АМРК с двумя ЧСИ описан в табл. 2.2.

На рис. 2.10 показано соотношение между CPI, ЧСИ-High (B1) и ЧСИ-Low (B2) в режиме угловой синхронизации, когда CPI представляет собой угловой диапазон.

Фиксированный и стандартный режимы (см. табл. 2.2) рекомендуются для *обработки и фильтрации местников в частотной области (DFT)*. В обоих режимах уравниваются ЧСИ и число импульсов в группе, что лучше всего отражается на обработке DFT фильтром местников, так как он компенсирует вариации ширины фильтра. При заданной фиксированной скорости антенны фиксированный режим даст вдвое больше импульсов, чем стандартный. При таком увеличении числа импульсов в группе повысится и качество данных. С другой стороны, в фиксированном режиме каждая группа соответствует одному CPI, что идеально соответствует диаграмме направленности антенны. Разворачивание скорости в этом режиме базируется на двух смежных диаграммах направленности, а не выполняется в пределах одной диаграммы направленности, как в стандартном режиме.

Таблица 2.2

Выбор алгоритма режима для работы АМРК с двумя ЧСИ [1]

Режим	Описание
Стандартный	В режиме угловой синхронизации угловая ширина CPI разбивается на равные части. Обе группы, ЧСИ-High (B1) и ЧСИ-Low (B2), имеют одинаковый угловой размер. В режиме временной синхронизации разницы между стандартным и адаптивным режимами нет. Структура параметров ЧСИ в этом режиме B1B2B1B2
Адаптивный	Каждая группа, ЧСИ-High (B1) и ЧСИ-Low (B2), содержит одинаковое число импульсов. Это означает, что размер группы вычисляется по отношению параметров ЧСИ. Структура параметров ЧСИ в этом режиме B1B1B2B2
Фиксированный	Каждая из двух групп, ЧСИ-High (B1) и ЧСИ-Low (B2), занимает весь CPI. Структура параметров ЧСИ в этом режиме B1B2B1B2

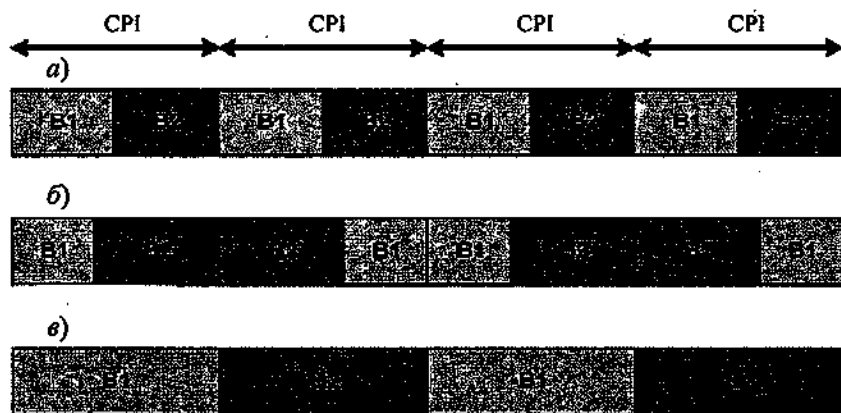


Рис. 2.10. Соотношение между интервалами когерентной обработки (CPI), высокой ЧСИ (High (B₁)) и низкой ЧСИ (Low (B₂)) в режиме угловой синхронизации (CPI в виде выборки) при работе радиолокатора с двумя ЧСИ [1] в стандартном (а), адаптивном (б) и фиксированном (в) режимах.

Адаптивный режим рекомендуется для обработки и фильтрации местников во временной области. Он обеспечивает одинаковое число импульсов в группе, что повышает качество результатов по скорости и ширине спектра, так как разворачивание, вычисление SQI и фильтрация базируются на одинаковом количестве данных в группе. Второе преимущество адаптивного режима при использовании БИХ-фильтров во временной области заключается в том, что, как правило, между каждым изменением ЧСИ определенное число импульсов удаляется из обработки и используется только для повторной инициализации БИХ-фильтров. Однако использование схемы B1B1B2B2 уменьшает число изменений ЧСИ в два раза. В результате из обработки исключается в два раза меньше импульсов, что опять же повышает качество вторичных метеоданных.

2.4. Содержание процесса первичной обработки и критерии его завершения

Подытожим кратко информацию, изложенную в п. 2.1—2.3.

Радиолокационные измерения производятся посредством излучения в определенном направлении электромагнитных микроволновых импульсов и последующего приема и анализа созданных ими отражений.

После излучения каждого импульса приемник обычного радиолокатора выдает зависящий от времени сигнал мощности $S(t)$, пропорциональный логарифму мощности каждого отражения $P(r)$ на радиолокационной дальности r .

Когерентный приемник выдает два сигнала — $I(t)$ и $Q(t)$; синфазный сигнал I пропорционален амплитуде отражения и синусу его фазы (относительно излученной волны), квадратурный сигнал Q пропорционален косинусу его фазы. Сумма $I^2 + Q^2$ пропорциональна мощности отражения, а арктангенс (I/Q) пропорционален фазе отражения.

Выходные данные S , I и Q на выходе радиолокационного приемника, будь он обычный или когерентный, сопровождаются сведениями о синхронизации, калибровке, времени, положении антенны и состоянии радиолокатора и называются первичными радиолокационными данными.

Первичные данные, полученные от последовательных радиолокационных импульсов, излученных в одном направлении, поступают в процессор радиолокационных сигналов.

По каждому бину (дискрету, стробу, селектору) дальности вдоль оси радиолокационного луча получается временной ряд цифровых данных. Сигналы мощности в каждом бине дальности осредняются по времени, и осредненные по времени сигналы от нескольких соседних бинов — ячейки дальности — осредняются по пространству.

Аналогично обрабатываются синфазные и квадратурные сигналы из каждой ячейки дальности, после чего получается энергетический спектр отраженных сигналов, средняя оценка межимпульсного изменения фазы — доплеровская частота и ширина спектра.

При определенных условиях *мощность отражений пропорциональна отражаемости метеоцели Z , доплеровская частота — средней радиальной скорости цели v_p , а ширина спектра — дисперсии скорости цели σ_v^2* .

Первичная обработка начинается с подавления в каждом селекторе дальности отражений от местных предметов следующим образом:

путем фильтрации пяти—семи гармоник спектра вблизи нулевой частоты $|\Delta v| \leq 1$ м/с;

исключением селекторов дальности, в которых ширина доплеровского спектра $\sigma_v \leq \pm(0,5 + 0,7)$ м/с;

исключением селекторов дальности, в которых отмечены сигналы, отраженные от местных предметов и точечных целей.

Первичную обработку после устранения отражений от местных предметов можно считать законченной, когда в каждом селекторе дальности выполнены следующие операции:

оценка ширины спектра доплеровских скоростей гидрометеоров σ_v с допустимой точностью ± 1 м/с в диапазоне от 0 до 10—15 м/с (по $R(1)$ и $R(2)$ (формула (2.24));

оценка радиальной скорости v_p с точностью $\pm 0,25$ м/с (по $\arg R(1)$) (формула (2.22));

расчет мощности отраженных сигналов (по $R(0)$);

расчет отражаемости с учетом потенциала АМРК и поправок на затухание в антенно-волноводном тракте, РПУ и атмосфере с точностью ± 1 дБZ;

устранение неоднозначности при измерении радиальных скоростей.

После проведения первичной обработки все массивы данных должны пройти редактирование алгоритмами автоматического контроля качества с уничтожением информации в селекторах дальности с высказывающими данными Z , σ_v , v_p .

Цифровой выход процессора радиолокационных сигналов по каждой ячейке дальности в каждом направлении хранится в памяти компьютера в виде трехмерных полей в полярных координатах (r , φ , θ) относительно местоположения радиолокатора. Обычные радиолокаторы создают поля радиолокационной отражаемости, тогда как когерентные радиолокаторы дополнительно создают поля радиальной скорости и дисперсии скорости. Поля Z , v_p и σ_v в полярных координатах называются базовыми (или вторичными) радиолокационными данными.

Базовые данные служат отправной точкой для расчетов по заданным алгоритмам различных величин, представленных трех-, двух- и одномерными полями в прямоугольных координатах (x , y , z) различных плоскостей проекции, и называются продуктами радиолокационной станции.

Эти продукты можно разделить на три группы: отражаемость, осадки и ветер [5, 9].

Наиболее важными продуктами по отражаемости являются отражаемость на постоянной высоте, верхняя граница радиоэха и вертикальный профиль отражаемости. Все они рассчитываются по базовой отражаемости на прямой линии.

Главные продукты по осадкам включают в себя интенсивность осадков у земли и накопление осадков у земли за разные промежутки времени. Интенсивность осадков получается по функциональной зависимости между интенсивностью дождя и отражаемостью.

Основным продуктом по ветру является вертикальный профиль горизонтального ветра. Он рассчитывается по радиальным скоростям и их пространственным градиентам.

**Глава 2. Автоматизированный метеорологический
радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеор—Метеоячейка»**

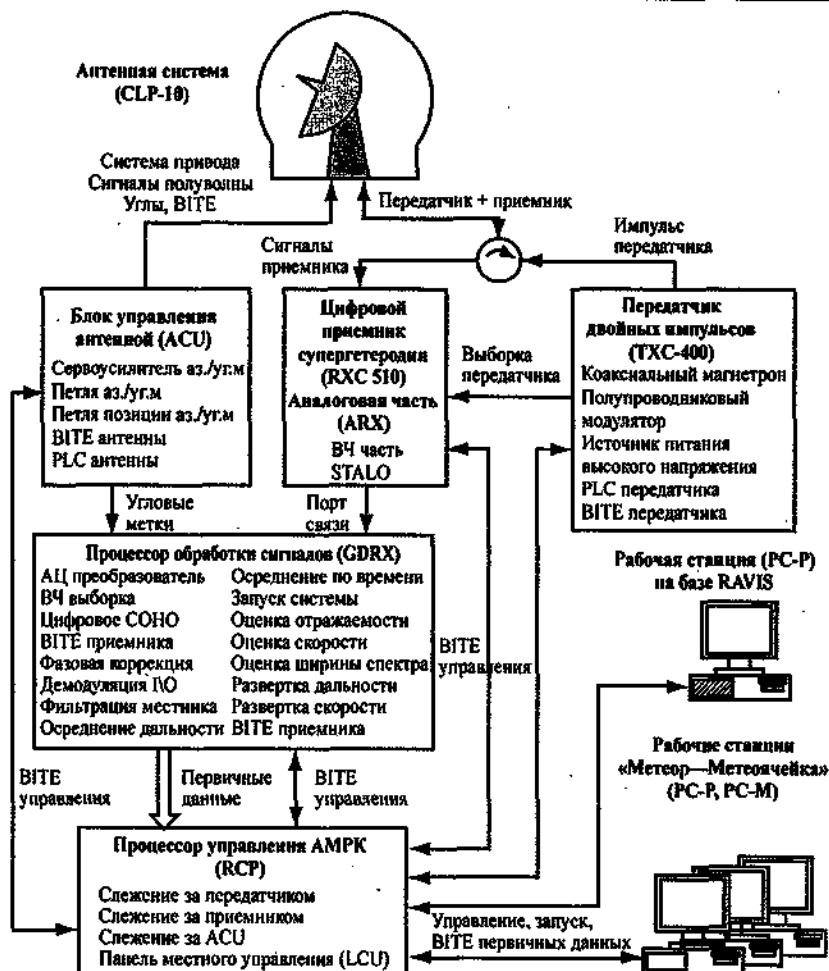
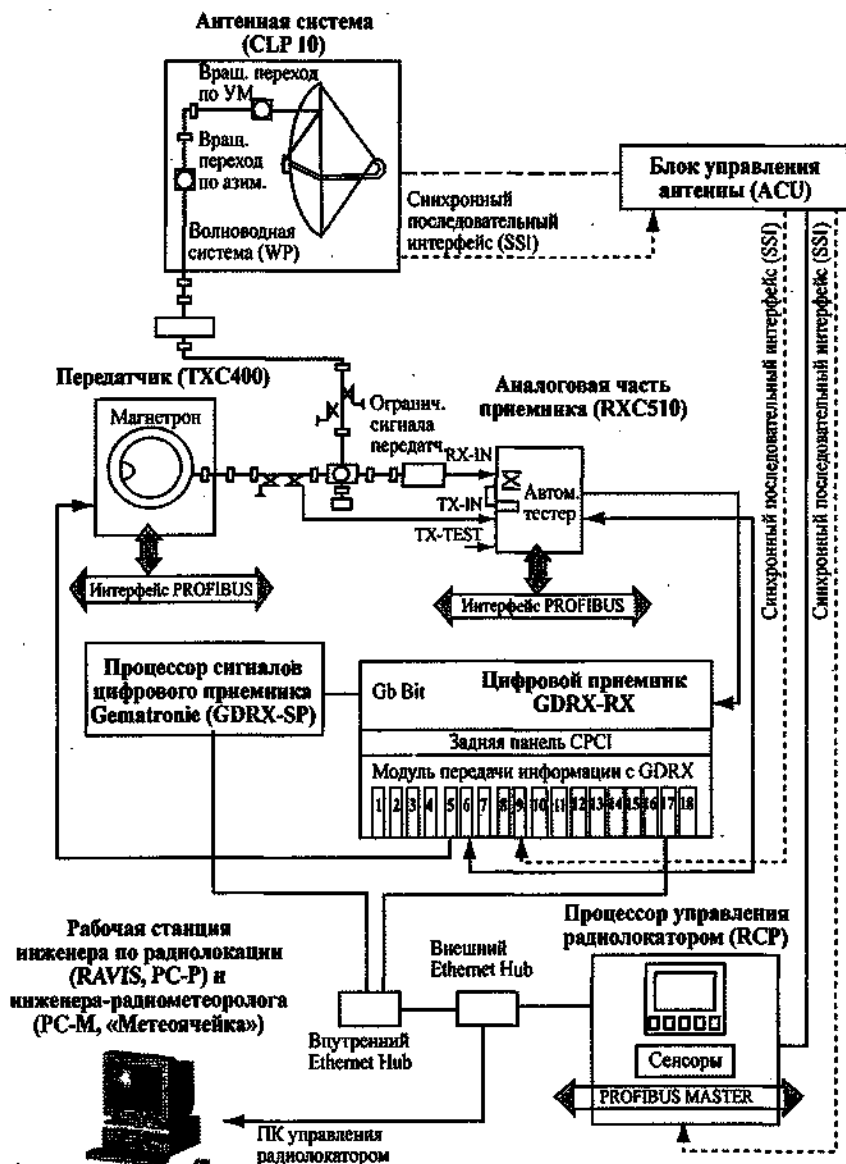


Рис. 2.11. Функциональная структура автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса «Метеор—Метеоячейка» [1].

STALO — стабилизированный гетеродин, СОНО — когерентный гетеродин, PC-P — рабочая станция инженера по радиолокации (оперативный программный контроль за работой системы на базе RAVIS), ВЧЕ — встроенные средства диагностики состояния оборудования, PLC — программируемые логические контроллеры, PC-M — рабочая станция инженера-радиометеоролога.

Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка»



2.5. Конфигурация, принцип работы и технические характеристики АМРК «Метеор—Метеоячейка»

2.5.1. Состав (конфигурация) изделия

АМРК «Метеор—Метеоячейка» (рис.2.11, 2.12) состоит из следующих систем [1].

Основные системы:

- 1) антенная система (CLP-10),
- 2) блок управления антенной (ACU),
- 3) волноводная система (WP),
- 4) процессор управления (RCP),
- 5) передатчик TXC400,
- 6) приемник RXC510 (аналоговая (ARX) и цифровая (GDRX) части),
- 7) рабочая станция инженера по радиолокации (PC-P) (RAVIS),
- 8) рабочая станция инженера-радиометеоролога (PC-M),
- 9) рабочие станции потребителей информации (PC MAPC).

Примечание. PC MAPC представляет собой отдельное изделие и не входит в состав АМРК «Метеор—Метеоячейка».

Рабочая станция радиоинженера (PC-P):

- 1) персональная ЭВМ типа HP (одна) с предустановленной операционной системой Windows XP Pro,
- 2) сетевой фильтр Pilot,
- 3) устройство бесперебойного энергоснабжения Back-UPS,
- 4) мультиплексор 8RS232,
- 5) программа RAVIS,

Рис. 2.12. Блок-схема АМРК «Метеор—Метеоячейка» [1].

В блоке модуля передачи информации цифрового приемника: 1 — VSWR (коэффициент стоячей волны по напряжению, КСВН) (мера безопасности); 2 — Door SW (дверной выключатель); 3 — WG ARC (гнутый волновод); 4 — GUNARC; 5 — Trigger (триггер); 6 — AFC (АПЧ); 7 — POL_SW (поляризационный переключатель); 8 — SSI down (интерфейс SSI); 9 — SSI up (интерфейс SSI); 10 — ANGLE parallel (угловая параллель); 11 — dCLK (дифференциальный датчик времени); 12 — CLK50R (часы); 13 — Share Link Ports (порты связи Share); 14 — GPIO Ports (порты); 15 — I2C (интерфейс I2C); 16 — RS232 (интерфейс RS232); 17 — 10/100 Enet (интерфейс Ethernet 100 Мбайт); 18 — GB Enet (интерфейс Gigabit Ethernet).

- 6) соединительные кабели,
- 7) комплект эксплуатационной документации.

Рабочая станция метеоролога (PC-M):

- 1) персональная ЭВМ типа HP (одна) с предустановленной операционной системой Windows XP Pro,
- 2) сетевой фильтр Pilot,
- 3) устройство бесперебойного энергоснабжения Back-UPS,
- 4) мультиплексор 8RS232,
- 5) специальное программное обеспечение PC-M (ИТАВ 416311.008

Метеоячейка 2.0),

- 6) соединительные кабели,
- 7) комплект эксплуатационной документации,
- 8) шкаф телекоммуникационный стандарта 19",
- 9) модем с комплектом разъемов для связи с абонентами,
- 10) печатающее устройство (принтер десятидюймовый) формата

A4.

Технические характеристики PC AMPK приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Технические данные PC AMPK «Метеор—Метеоячейка»

PC-P	RAVIS®
Минимальные требования к аппаратуре	ПЭВМ 2 ГГц, 1 Гб RAM
Операционная система	Windows XP Pro
PC-M	Метеор—Метеоячейка
Минимальные требования к аппаратуре	P4/512 M6/40Гб/CD/LAN/19"LCD
Операционная система	Windows XP Pro

Встроенные системы AMPK

В AMPK используются сложные алгоритмы управления и обрабатываются большие объемы данных в режиме реального времени. Для решения таких задач используются готовые коммерческие решения (commercial off-the-shelf, COTS), такие как встроенные системы, промышленные компьютеры, стандартные промышленные интерфейсы для взаимодействия различных компонентов системы, специализиро-

ванное программное обеспечение, включая операционные системы [4, 16—18]. Принятый разработчиками АМРК подход упрощает разработку системы как целого и позволяет с легкостью расширять и адаптировать радиолокатор под конкретные нужды заказчика.

Под встроенной системой понимается любая компьютерная система, работающая совместно с другим оборудованием и размещаемая с ним либо в одном конструктиве, либо внутри данного оборудования. Обычно она представляет собой решение на базе микропроцессора или микроконтроллера и реализует какую-либо специальную функциональность, но может быть и полноценным стоечным компьютером, обладающим всеми привычными возможностями и компонентами обыкновенного компьютера. Основные системы АМРК «Метеор—Метеоячейка», связанные с управлением или обработкой данных, реализованы в виде встраиваемых систем — это процессор управления RCP-L, блок управления антенной ACU, цифровой приемник GDRX и сигнальный процессор.

Процессор управления RCP представляет собой стоечный компьютер, состоящий из пассивной объединительной платы с шиной CompactPCI и двух плат стандарта CompactPCI. Первая плата — это одноплатный компьютер с процессором PowerPC MPC 8245, базирующимся на RISC-архитектуре¹. На плате располагаются оперативная память SDRAM, флэш-память для хранения операционной системы и приложений, разъемы Fast Ethernet для связи с цифровым приемником, сигнальным процессором и клиентами, интерфейсы COM, USB, IDE и PS/2. Также имеются разъемы для расширения возможностей компьютера посредством подключения дополнительных карт, удовлетворяю-

¹ RISC-архитектура (reduced instruction set computer) процессоров построена на основе сокращенного набора команд (порядка 50). Характеризуется наличием команд фиксированной длины, большого числа регистров, операций типа регистр—регистр, а также отсутствием косвенной адресации. Ее типичные представители — это семейства процессоров SPARC и PowerPC. RISC-архитектуре противопоставляется CISC-архитектура (complex instruction set computer) — традиционная архитектура процессоров с широким набором (несколько сотен) различных машинных команд переменной длины и разным временем их исполнения. Типичный представитель — семейство процессоров x86; хотя, начиная с 486-го, в эти процессоры стали включать RISC-ядро для выполнения простых команд [17, 18].

щих стандартам M-Module, PC-MIP (multiple-in-line package) и PMC (PCI Mezzanine Card). Процессор управления RCP работает под управлением операционной системы реального времени¹ VxWorks (разработка американской фирмы Wind River) и программного обеспечения Racon (Selex-Gematronik).

Вторая плата процессора управления используется для подключения М-модулей для управления различными подсистемами радиолокатора и сбора диагностической информации. Один из этих модулей выполняет функции управления шиной Profibus (process field bus — спецификация открытой высокоскоростной шины для цифрового технологического оборудования), по которой процессор управления получает с аналоговых и цифровых датчиков информацию о состоянии всех узлов радиолокатора. В этом модуле используется один из процессоров семейства MC86000 (производства Motorola) на базе CISC-архитектуры.

Блок управления антенной ACU включает в себя одноплатный компьютер на базе процессора PowerPC MPC 8245 с шиной VME (Versa Module Europe), аналогичный одноплатному компьютеру, используемому в процессоре управления. Также через общую шину VME к компьютеру подключены модуль управления шиной Profibus (такой же, что и в процессоре управления) и контроллер синхронного последовательного интерфейса для считывания показаний кодировщиков положения антенны.

Цифровой приемник GDRX (см. рис. 2.16 и 2.17) управляется процессором PowerPC MPC 8540, который, помимо того, что является вы-

¹ Система реального времени — это компьютерная система, способная гарантированно удовлетворять временным ограничениям, накладываемым на нее ею же управляемыми процессами. Такая система должна быть быстрой и предсказуемой, т. е. она должна отвечать на запросы в короткое время и точно определять время окончания выполнения заданий. Различают ОС с жесткой и с гибкой системой реального времени. Они применяются в различных системах управления или обработки данных, например при управлении производством, в телекоммуникационных системах, при работе с мультимедийными данными. Помимо ОС, изначально созданных как системы реального времени (QNX, LynxOS, VxWorks и другие), существуют различные модификации Linux, в той или иной степени являющиеся системами реального времени, например RTLinux, RTAI, RED-Linux, KURT, QLinux и т. д. [16—18].

сокопроизводительным процессором, включает в себя широкий набор контроллеров (памяти DDR SDRAM ECC, Ethernet различных скоростей, шины PCI, локальной шины, последовательных интерфейсов и пр.). Процессор отвечает за прием и выполнение управляющих команд, форматирование и передачу данных сигнальному процессору или клиентам, управление сигнальными процессорами, обеспечение взаимодействия с платами расширения и внешними интерфейсами. В качестве операционной системы используется дистрибутив Linux с поддержкой RTAI (real time application interface — интерфейс приложений реального времени).

Обработка данных в цифровом приемнике производится в основном тремя цифровыми сигнальными процессорами TigerSHARC ADSP-TS101S. Первый отвечает за получение данных I/Q -каналов от АЦП или выборки сигнала передатчика, преобразование данных в числа с плавающей запятой, коррекцию значений по результатам калибровки, выбор используемого канала приемника (низкой или высокой чувствительности), преобразование порядка следования данных, синхронизацию с положением антенны и при необходимости предварительную фильтрацию. Два других цифровых сигнальных процессора вычисляют моменты комплексной корреляционной функции и метеопараметры и передают результаты центральному процессору.

Все параметры обработки и сами микропрограммы, используемые цифровыми сигнальными процессорами, загружаются центральным процессором.

2.5.2. Принципы работы АМРК

Работу АМРК изложим по функциональной схеме, приведенной на рис. 2.11. Активно стабилизируемый коаксиальный магнетрон передатчика генерирует СВЧ импульс, который проходит через антенный переключатель и излучается антенной. Антенна излучает СВЧ импульс передатчика с симметричной узконаправленной диаграммой направленности антенны. Сканирование антенны по азимуту и углу места происходит в соответствии с программой метеорологических наблюдений (рис. 2.13).

На этом этапе передачи СВЧ импульса приемник блокируется ограничителем приема—передачи антенного переключателя, что



Рис. 2.13. Внешний вид антенны и антенной колонки АМРК «Метеор—Метеоячейка» без радиопрозрачного укрытия [1].

предотвращает попадание энергии из циркулятора антенного переключателя на чувствительный приемник.

После передачи импульса ограничитель приема—передачи открывается и соединяет тем самым через циркулятор приемник с антенной. Начинается этап приема, на котором приемник принимает сигналы, отраженные гидрометеорами. Этот этап

продолжается до излучения следующего микроволнового импульса.

Принятый сигнал оцифровывается и двоично кодируется. Оцифрованные выборки передаются по высокоскоростной линии на процессор радиолокационных сигналов для дальнейшей обработки и анализа.

Цифровой приемник с процессором обработки сигналов GDRX (фирмы Selex Si./Gematronik) выполняет четыре главные функции: создает фазовый эталон по имеющийся выборке импульсов передатчика и вырабатывает комплексный модулирующий сигнал, предварительно обрабатывает принятые комплексные модулирующие сигналы, генерирует импульсы для запуска радиолокатора и вводит в принятые данные информацию об угловом положении антенны, создавая таким образом пространственный эталон информации.

Процессор обработки отраженных сигналов производит их быструю оцифровку с высоким разрешением, гибкую фильтрацию сигналов отраженных от местников, осреднение отраженных сигналов по времени и дальности и их пульсарную обработку.

Выполняя обычные функции приемника в программируемой среде, GDRX обеспечивает полную гибкость формирования полосы пропускания ПЧ (для максимальной чувствительности к излучаемому сигналу), фильтрацию полосы частот видеосигнала, управление частотой стабилизированного гетеродина STALO и генерацию излучаемых импульсов.

Благодаря тому что процессор обработки сигналов производит подробный анализ каждого излученного импульса, есть возможность на постоянной основе контролировать частоту радиолокационного передатчика.

Процессор управления (RCP) с локальным контролем управляет и следит за функционированием АМРК. В частности, под его контролем находятся встроенные средства диагностики (BITE). В целом контролируется состояние большого числа параметров подсистем АМРК, и в случае сбоя процессор управления RCP действует по заданным приоритетам в соответствии с важностью сбоя.

Кроме всего прочего, процессор управления (RCP) обеспечивает совместную работу радиолокатора и рабочей станции инженера-радиометеоролога РС-М. Главной задачей РС-М является получение (извлечение) метеорологической информации (продукции) из сигналов, отраженных от метеообразований.

Радиопрозрачное укрытие (РПУ) антенны создает комфортные условия для работы антенной системы и представляет собой сферическую конструкцию без плоскостей, вторгающихся в полезную площадь обтекателя или создающих систематические отражения. Поверхность обтекателя гидрофобна и устойчива к солнечному облучению, пыли, граду и ветру с песком.

Радиопрозрачное укрытие антенны устанавливается на крыше здания или на вышке, снабжается молниезащитой и сигнальными фонарями согласно спецификации ИКАО. Обтекатель укрепляется на металлическом кольце, забетонированном в фундамент здания или установленном на металлической платформе вышки (рис. 2.14 и 2.15).

Сканирование объема пространства

Антенная система АМРК имеет следующие характерные особенности:

- узкая диаграмма направленности антенны и малые боковые лепестки,

- большая точность наведения,

- быстрая реакция срабатывания системы управления антенны по углу места при увеличении скорости сканирования,

- жесткая механическая конструкция и минимальные требования к обслуживанию.

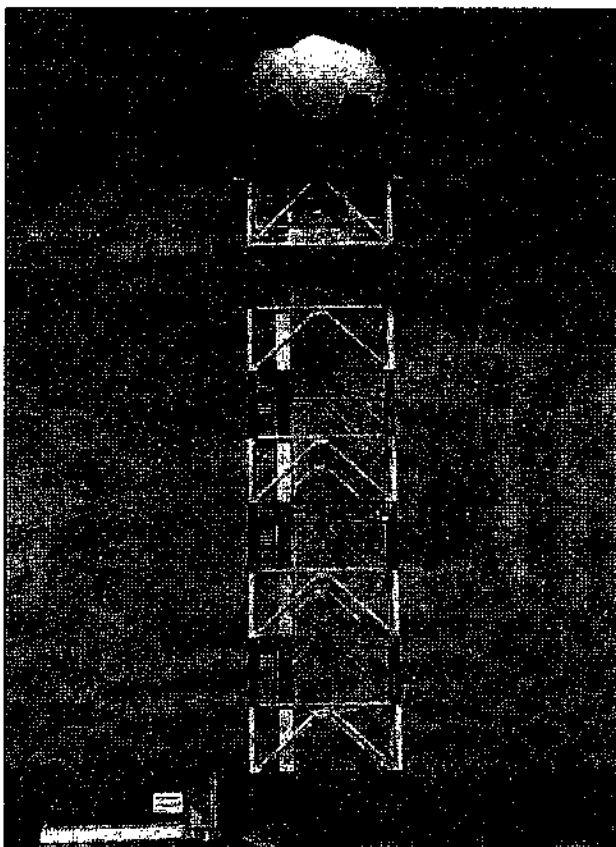


Рис. 2.14. Размещение АМРК «Метеор—Метеоячейка»
на 30-метровой металлической вышке в аэропорту Пул-
ково (Санкт-Петербург).

Современные метеорологические радиолокаторы с цифровой обработкой данных почти 99 % своего рабочего времени эксплуатируются в режиме сканирования.

Под объемным сканированием понимается вращение антенны по азимуту на 360° при ступенчатом изменении ее положения по углу места.

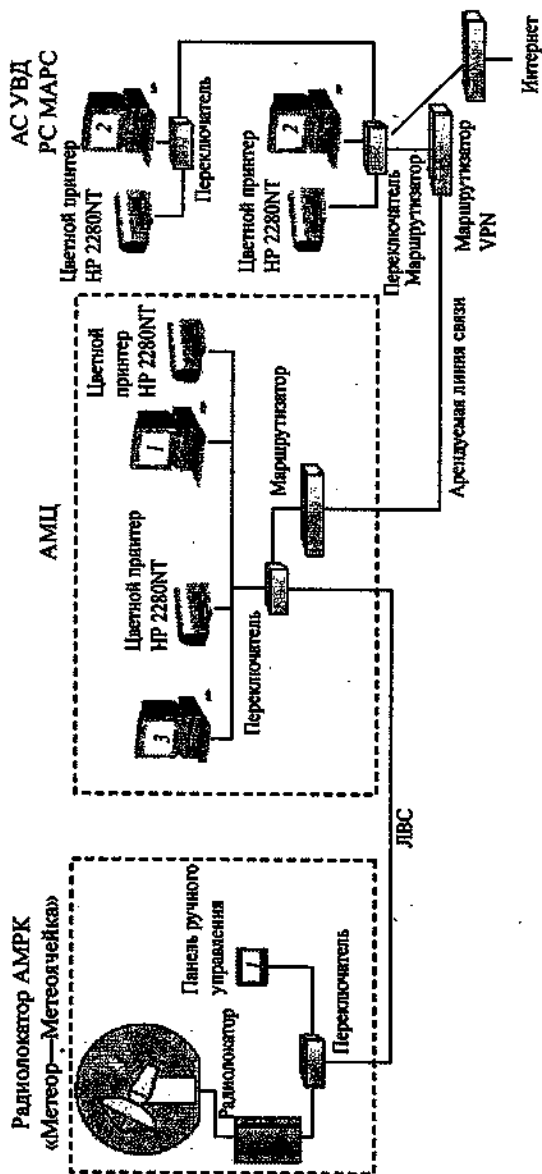


Рис. 2.15. Типовая конфигурация АМРК «Метеор—Метеочейка» с рабочими станциями в аэропорту.
1 — рабочая станция инженера по радиолокации (РС-Р), 2 — РС МАРС, 3 — рабочая станция инженера метеоролога (РС-М).

Угол места должен меняться как можно быстрее, чтобы минимизировать общее время сканирования. Антенная система АМРК оптимизирована по времени реакции на изменение угла места для повышения скорости получения данных по объему пространства.

Схема и конфигурация АМРК

В месте установки радиолокатора «Метеор 500С» присутствие обслуживающего персонала во время оперативной работы не требуется.

Процессор управления радиолокатором (RCP) обеспечивает интеллектуальную связь между радиолокатором и рабочей станцией инженера-радиометеоролога (РС-М) и связан с процессором обработки сигналов (см. рис. 2.15).

Связь радиолокатора с удаленными рабочими станциями АМРК «Метеор—Метеоячейка», находящимися в авиаметеоцентре, осуществляется по арендованной линии связи.

2.5.3. Технические характеристики

Основные характеристики подсистем автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса «Метеор—Метеоячейка», которые относятся к «Метеор 500С» и РС-М, представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

<i>1. Характеристики антенной системы</i>	
<i>Характеристики антенны</i>	
Рабочая частота	От 5,60 до 5,65 ГГц
Калибровочная ширина спектра	От 5,420 до 5,825 ГГц
Поляризация	Линейная горизонтальная
Ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) в точках –3 дБ	1,0° макс. без РПУ
Усиление мощности	44,5 дБ мин., 45 дБ типично
Уровень первого бокового лепестка по азимуту и углу места	–28 дБ макс., –30 дБ типично
Диаметр	4,2 м

<i>Характеристики антенной колонки по азимуту</i>	
Скорость вращения	от 0,5 до 6 об./мин (от 1 до 36 град./с)
Вариации скорости вращения	$\pm 0,5$ град./с
Ускорение	16 град./с ² макс.
Точность позиционирования	$\pm 0,1^\circ$
Время перемещения на 2°	1,5 с
Точность перемещения на 2°	$\pm 0,1^\circ$
<i>Характеристики антенной колонки по углу места</i>	
Угловой диапазон	От -2 до $+182^\circ$
Скорость подъема и опускания	36 град./с макс.
Ускорение	12 град./с ² макс.
Время перемещения на 2°	1,5 с
Точность перемещения на 2°	$\pm 0,1^\circ$
Концевые выключатели	От -2 до 182°
<i>Характеристики блока управления антенны</i>	
Тип сервопривода	Усилитель, модулируемый по длительности импульса
Контроль скорости	Аналоговая цепь
Контроль позиционирования	Цифровая цепь
Разрешение позиционирования	14 бит (LSB = $0,021^\circ$, где LSB (least significant bit) — наименее значимый бит)
Процессор управления	16 бит, 10 МГц
Интерфейс	Profibus Dp
<i>Характеристики РПУ</i>	
Тип	Сэндвич
Форма сегмента	Панель
Диаметр	6,7 м
Высота	5,77 м
Диаметр основания	4,62 м
Число сегментов	12
Потери при передаче	0,3 дБ макс., в одну сторону
Смещение луча	$\leq \pm 0,01^\circ$
Поверхность	Гидрофобная, покрыта гелем
Цвет	Белый, RAL 9010

2. Характеристики приемопередатчика

Характеристики передатчика

Частотный диапазон	От 5450 до 5850 МГц
Пиковая мощность в импульсе	≥ 250 кВт на выходе передатчика
Длительность длинного импульса в точке 3 дБ	$(2 \pm 0,1)$ мкс
Длительность короткого импульса в точке 3 дБ	$(0,83 \pm 0,05)$ мкс
Частота следования импульсов (ЧСИ)	
2 мкс	От 250 до 550 Гц
0,83 мкс	От 250 до 1200 Гц
Отношение ЧСИ	5/4, 4/3, 3/2

Характеристики приемника

Рабочая частота	5640 МГц
Коэффициент шума	2 дБ или менее
Эффективная ширина полосы	
2 мкс	$0,6 \text{ МГц} \pm 5 \%$, согласованный фильтр
0,83 мкс	$1,5 \text{ МГц} \pm 10 \%$, согласованный фильтр
Чувствительность (MDDS)	
2 мкс	-112 дБ/мВт на входе приемника
0,83 мкс	-108 дБ/мВт на входе приемника
Эффективный динамический диапазон	100 дБ мгновенно

3. Характеристики цифрового приемника GDRX

Получение данных

Выборка по ПЧ	2 канала, 14 бит, 80 МГц
Динамический диапазон	более 95 дБ, до точки сжатия -1 дБ
Мин. интервал между бинами (дискретами) дальности	30 м
Селекторов дальности на раз- вертке	До 2000

4. Управление	
Импульсы запуска	15, программируются по отдельности
Частота следования импульсов (ЧСИ)	От 250 до 1200 Гц
Длительность импульса	0,83 мкс (короткий), 2 мкс (длинный)
Рабочие характеристики	
Доплеровский режим с двойной ЧСИ	Отношение ЧСИ 3/2, 4/3 и 5/4 соответствует увеличению радиальной скорости в два, три и четыре раза
Фильтры местников на доплеровском канале ¹	Четырехполосные эллиптические БИХ-фильтры; три набора по 16 фильтров, включая всепроходный (нулевой ширины); затухание в полосе подавления 30, 40, 50 дБ; ДПФ-фильтры (фильтры дискретного преобразования Фурье)
Фильтр местников в канале отражаемости	Статистический фильтр по месту установки, ослабление местников по месту установки и ситуации, 15—20 дБ
Осреднение в бине (дискрете) дальности	От 2 до 16 последовательных бинов
Временное осреднение	От 2 до 256 импульсов

¹ Подробнее основные сведения о фильтрах приведены в приложении 2.

2.5.4. Сводка рабочих характеристик и оценка метеорологической эффективности

Основные рабочие характеристики АМРК приведены в табл. 2.5.

АМРК «Метеор—Метеоячейка» имеет две длительности импульса, которые выбираются в зависимости от режима работы. Для получения высокой чувствительности используется длинный импульс в 2 мкс, что соответствует разрешению по дальности 300 м, а для доплеровского режима — стандартный короткий импульс в 0,83 мкс с более высоким разрешением по дальности, равным 125 м, что усиливает подавление местников, но уменьшает потенциал АМРК «Метеор—Метеоячейка».

Таблица 2.5

Основные рабочие характеристики АМРК

Рабочая характеристика	Режим	
	Доплеровская скорость	Измерение отражаемости
Длительность импульса ЧСИ	0,83 мкс От 250 до 1200 Гц	2 мкс От 250 до 550 Гц
Отношение ЧСИ	3/2, 4/3, 5/4	
Минимальное разрешение по дальности и углам обзора	125 м, $\leq 1^\circ$	300 м, $\leq 1,0^\circ$
Диапазон дальности для однозначного измерения скорости ¹	До 125 км	
Дальность штормового оповещения		До 256 км
Диапазон однозначного измерения скорости	До ± 65 м/с	
Максимальный диапазон обнаружения метеобъектов		≥ 500 км
Ширина спектра	От 0,1 до 15,8 м/с	
Диапазон измерения отражаемости		От -31,5 до 95,5 дБZ
Пиковая мощность	250 кВт	250 кВт
MDDS (чувствительность цифрового приемника)	≤ -108 дБм/Вт ≤ -138 дБ/Вт	≤ -112 дБ/мВт ≤ -142 дБ/Вт
Коэффициент полезного действия высокочастотного тракта (величина ослабления)	-1,5 дБ	-1,5 дБ
Метеорологический потенциал P_m оптимальный, в ед. СИ дБ·м ⁻¹	281,6	289,4
оптимальный по Руководству для МРЛ, дБ·км ⁻¹	57,2	64,7
Минимальная отражаемость на расстоянии 50 км	$\leq -4,7$ дБZ	$\leq -12,5$ дБZ
Подавление местников	≥ 40 дБ типично	Вычитание, статистическая фильтрация

¹ Типичный пример: однозначная дальность и однозначная скорость зависят от установленного отношения ЧСИ; здесь отношение 4/3 при 1200/900 Гц.

В таблице 2.6а—2.6в приведены расчетные характеристики метеорологической эффективности АМРК «Метеор—Метеоячейка», полученные в процессе сертификационных испытаний на основании измеренных технических характеристик АМРК и уравнения радиолокации атмосферных образований [9, 13, 14].

Таблица 2.6а

**Эффективный расчетный радиус радиолокационного обнаружения
облаков $R_{\text{эф}}$ (км) и связанных с ними атмосферных явлений
для АМРК «Метеор—Метеоячейка»**

Форма облаков	Атмосферные явления	Теплое полугодие	Холодное полугодие
Кучево-дождевые	Град, гроза, ливневые дожди или снег	250	160
Мощные кучевые	Без осадков	60—70	20—30
Слоисто-дождевые	Обложные осадки	150—200	100
Слоистые, слоисто-куче- вые, высокослоистые	Обложные морозящие осадки	30—70	20—50

Таблица 2.6б

Максимальный расчетный радиус (км) обнаружения облаков

Форма облаков по радиолокационной классификации	Теплое полугодие	Холодное полугодие
Верхний ярус (С)	150	80
Средний ярус (А)	200	100
Нижний ярус (S)	120	120
Слоисто-дождевые (N)	250	200
Кучево-дождевые (Q)	300	200

Таблица 2.6в

**Расчетные средние вероятные погрешности определения границ
кучево-дождевых облаков в пределах эффективного радиуса их
обнаружения**

Удаление от МРЛ, км	10	30	50	100	150	200	250
Средняя вероятная погрешность, м . . .	30	85	142	283	427	570	710

2.5.5. Расчет потенциала АМРК «Метеор—Метеоячейка»

Результаты расчета по формулам (1.2) и (1.4) потенциала АМРК «Метеор—Метеоячейка» приведены в табл. 2.7 и 2.8.

Таблица 2.7

Расчеты потенциала АМРК «Метеор—Метеоячейка» в режиме
Измерение отражаемости

Параметр (X)	Обозначение	Значение X		10 lg X , дБ	
		Руководство по МРЛ	НГЭА СССР (ед. СИ)	Руководство по МРЛ	НГЭА СССР
Импульсная мощность на выходе магнетрона	P_H	250 кВт	250 000 Вт	+24	+54
Чувствительность приемного устройства	$P_{ш}$ $P_{пр min}$	-142 дБ/Вт	-142 дБ/Вт	-(-142)	-(-142)
Апертурная площадь	A_p	13,85 м ²	—	+11,4	—
Длительность зондирующего импульса	τ	—	$2 \cdot 10^{-6}$ с	—	-57
Длина зондирующего импульса	h	600 м	—	+27,8	—
Длина волны	λ	5,32 см	$5,32 \cdot 10^{-2}$ м	-29	+25,1
Коэффициент усиления антенны	G	—	45,5 дБ	—	91
Ширина диаграммы направленности антенны	θ_0	—	0,0171 рад	—	-17,7
Ширина диаграммы направленности антенны	φ_0	—	0,0171 рад	—	-17,7
Коэффициент полезного действия высокочастотного тракта	K_{AB}	0,7	0,7	-1,5	-1,5
Постоянные перевода формул (1.2) и (1.4)		—	—	-110	71,2
10 lg Π_m , дБ		—	—	64,7	289,4

Таблица 2.8

Расчеты потенциала АМРК «Метеор—Метеоячейка» в режиме
Доплеровская скорость

Параметр (X)	Обозначение	Значение X		10 lg X, дБ	
		Руководство по МРЛ	НГЭА СССР (ед. СИ)	Руководство по МРЛ	НГЭА СССР
Импульсная мощность на выходе магнетрона	P_n	250 кВт	250 000 Вт	+24	+54
Чувствительность приемного устройства	$P_{\text{ш}}$ $P_{\text{пр min}}$	-138 дБ/Вт	-138 дБ/Вт	-(-138)	-(-138)
Апертурная площадь	A_p	13,85 м ²	—	+11,4	—
Длительность зондирующего импульса	τ	—	$0,83 \cdot 10^{-6}$ с	—	-60,8
Длина зондирующего импульса	h	250 м	—	+24,3	—
Длина волны	λ	5,32 см	$5,32 \cdot 10^{-2}$ м	-29	+25,1
Коэффициент усиления антенны	G	—	45,5 дБ	—	91
Ширина диаграммы направленности антенны	θ_0	—	0,0171 рад	—	-17,7
Ширина диаграммы направленности антенны	ϕ_0	—	0,0171 рад	—	-17,7
Коэффициент полезного действия высокочастотного тракта	K_{AB}	0,7	0,7	-1,5	-1,5
Постоянные перевода формул (1.2) и (1.4)		—	—	-110	71,2
10 lg Π_m , дБ		—	—	57,2	281,6

Все параметры АМРК, входящие в формулы (1.2) и (1.4), неизменны, и для расчета потенциала требуется измерить только P_n и $P_{\text{ш}}$.

Анализ таблиц 1.4, 1.5, 2.7 и 2.8 позволяет сделать следующие выводы.

1. Потенциалы I и II канала МРЛ-5, а также потенциалы АМРК «Метеор—Метеоячейка» в режимах *Измерение отражаемости* и *Доплеровская скорость* превышают 47 дБ на 2,5—17,7 дБ. Таким образом, в каждом режиме работы радиолокаторов их информация может применяться при метеообеспечении авиации.

2. Площади радиоэха облаков и осадков, наблюдаемые на АМРК «Метеор—Метеоячейка», должны быть больше площадей, наблюдаемых на любом канале МРЛ-5, а также больше дальности обнаружения облаков и осадков и выше точности определения их верхних границ.

3. Уменьшение влияния ослабления радиоволн в атмосфере на $\lambda = 5,3$ см по сравнению с $\lambda = 3,2$ см и возможность более точного учета такого ослабления обеспечивают получение более репрезентативных данных по отражаемости на АМРК «Метеор—Метеоячейка» по сравнению с первым каналом МРЛ-5.

2.5.6. Обработка информации цифровым приемником GDRX

Основная обработка отраженных сигналов в АМРК производится цифровым приемником фирмы Gematronik (GDRX) и процессором сигналов.

Основные задачи первичной обработки перечислены в п. 2.2.1.

Остановимся подробнее на схеме движения обрабатываемых данных, приведенной на рис. 2.16 и 2.17.

Цифровой приемник GDRX обрабатывает данные I/Q с разрешением 16/32 бит с возможностью коррекции данных по фазе и амплитуде в 2048 селекторах (стробах) дальности с минимальным разрешением селекторов по дальности 30 м. Число селекторов можно увеличить за счет конфигурации, а минимальное разрешение можно довести до 15 м.

В GDRX можно осреднять информацию селекторов дальности (от 2 до 16 последовательных селекторов) и поддерживать угловую синхронизацию при работе на двух ЧСИ.

Механизм обработки GDRX базируется на трех процессорах для обработки сигналов Tiger Sharc DSP (240 МГц, до 4,5 gflops на плате, расширение через модуль PMC, 128 Мбайт SDRAM — synchronous dynamic RAM).

Глава 2. Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеор—Метеоячейка»

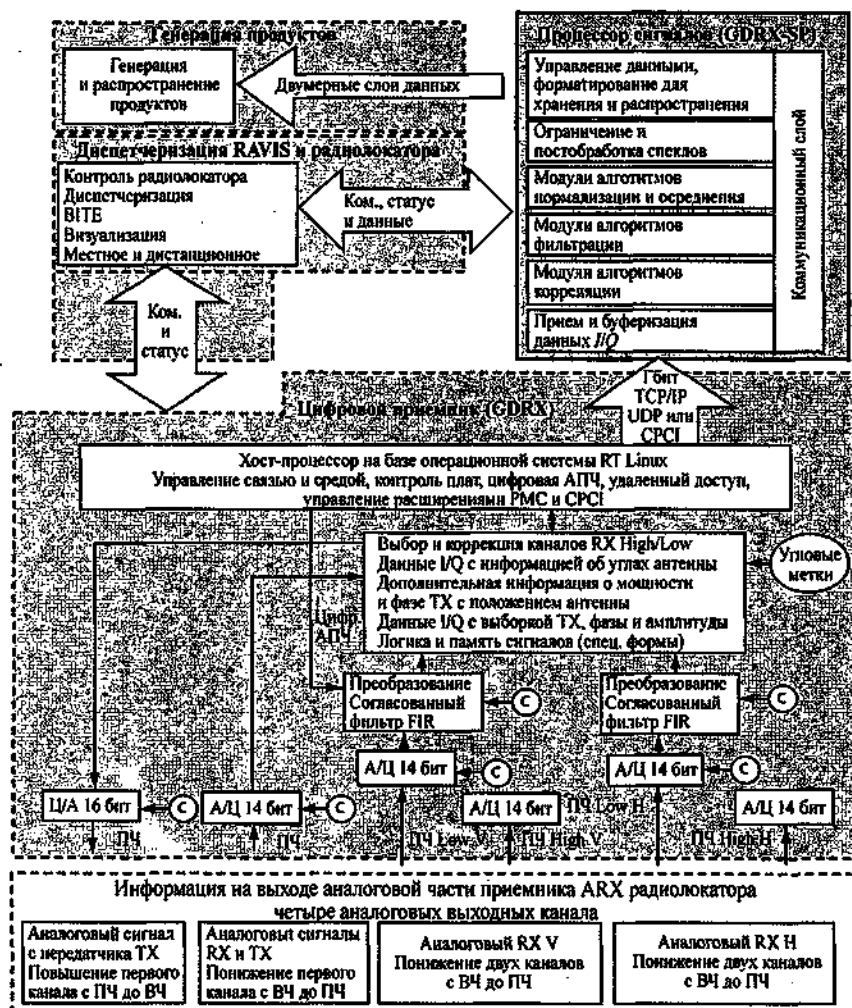


Рис. 2.16. Схема движения данных в АМРК «Метеор—Метеоячейка» [1].

А/Ц 14 бит — 14-бит аналого-цифровой преобразователь со скоростью выборки 80 МГц, TCP/IP или UDP — стандартные протоколы связи, FIR (finite impulse response) — согласованные полосовые цифровые фильтры с заданной импульсной характеристикой, PCI — локальная шина, RAVIS (radar visualization software) — программа общего управления радиолокатором, С — контроль.

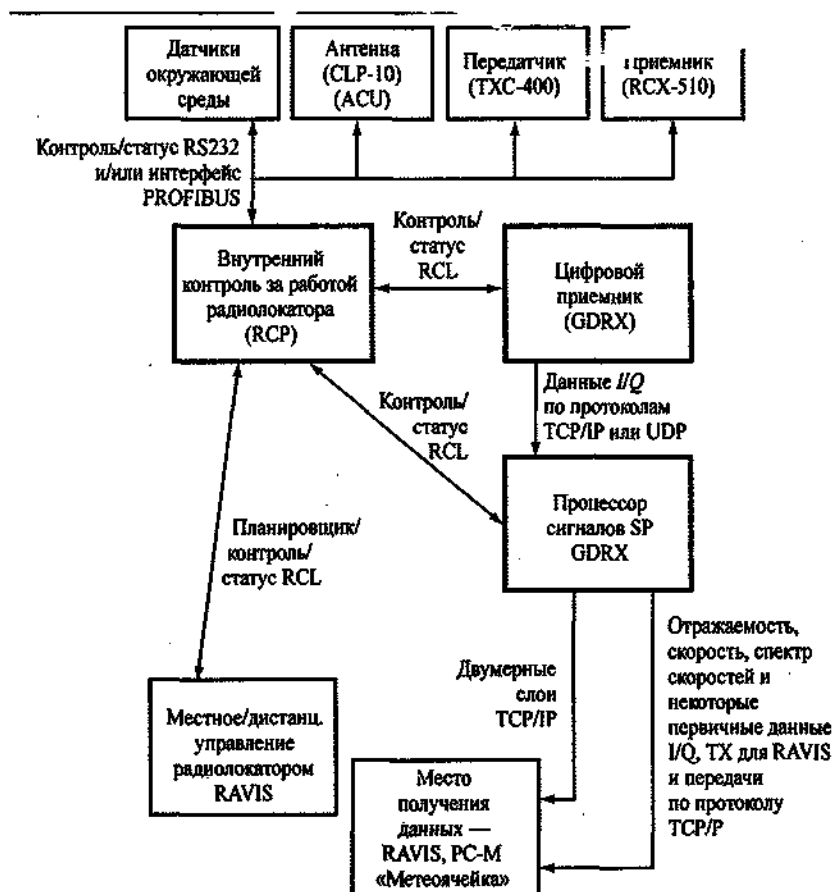


Рис. 2.17. Блок-схема радиолокатора с точки зрения программиста [1]. Место цифрового приемника GDRX в структуре АМРК «Метеор—Метеоячейка». RCL (radar control language) — язык команд для осуществления межузловой и межпроцессорной связи в АМРК

В качестве системного контроллера и механизма вывода данных в GDRX используется управляющий процессор Power PC Network Processor MPC 8540. Он обслуживает интерфейс SDRAM, контроллеры Ethernet, два асинхронных интерфейса, локальную шину и интерфейс локальной шины PCI.

Power PC как интегрированный процессор (управляющий и коммуникационный), по мнению разработчиков GDRX, идеален для взаимодействия с Gigabit Ethernet. Под последним понимается развитие сетевой технологии Ethernet, основанное на использовании специальных высокопроизводительных сетевых плат и высокоскоростных каналов.

GDRX имеет четыре аналоговых входных канала, предназначенных для поддержки сигналов ПЧ на частотах 60 МГц. Два канала используются для приема сигналов горизонтальной поляризации (H), а два других — для приема сигналов с вертикальной поляризацией (V). Для каждой поляризации существуют каналы высокой ($High$) и низкой (Low) чувствительности. Если используется только одна (горизонтальная) поляризация, то вертикальный канал не рассматривается.

Конструкция GDRX с двумя каналами поляризации используется для расширения линейного динамического диапазона по сравнению с конструкцией приемника с одним каналом и одной поляризацией. Принцип этого расширения можно объяснить следующим образом.

Предположим, что линейный динамический диапазон 14-бит АЦ преобразователя составляет 85 дБ. В конструкции цифрового приемника с одним каналом это является ограничивающим фактором для всего линейного динамического диапазона.

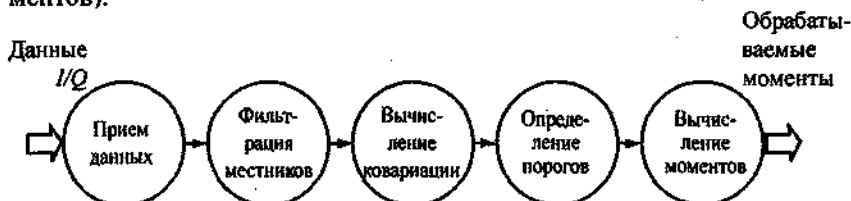
В конструкции с двумя каналами применяется второй канал, ослабленный, например, на 20 дБ и получающий с приемника тот же самый сигнал ПЧ. В такой ситуации, если первый (не ослабленный) канал АЦП (канал высокой чувствительности) насыщен, то второй (ослабленный) канал АЦП (канал низкой чувствительности) ниже насыщения на 20 дБ. Оба канала объединены логикой обнаружения канала от строб-импульса к строб-импульсу, которая, строб за стробом решает, с какого канала взять данные — с высокого или низкого.

Линейный динамический диапазон в приведенном примере охватывает $85 + 20 = 105$ дБ.

Рассмотрим, как в АМРК осуществляются *первичная обработка отраженных сигналов*, а также *процесс формирования коммуникационного слоя* и различные конфигурации обработки в процессоре сигналов (SP) [1].

В среде обработки сигналов (SPE) на вход поступают первичные радиолокационные данные типа I/Q , а на выходе получают данные в виде моментов (например, отражаемость, скорость).

Цепочка обработки данных процессором сигналов (SP) состоит из нескольких модулей обработки, которые взаимосвязаны в соответствии с заданным режимом обработки. Типичная цепочка состоит из приемника данных I/Q и нескольких модулей (например, для фильтрации местников, вычислений ковариации, порогов ограничения и моментов).



Выбранный режим обработки может определять как простую последовательную цепочку вычислений, так и более сложную, с ответвлениями и слияниями.



Вообще, цифровой приемник может быть как приемником данных I/Q , так и приемником, загружаемым ранее зарегистрированными данными I/Q . Обработанные данные могут направляться непосредственно на устройство просмотра данных в реальном времени (например, RAVIS) и/или обрабатываться двумерными слоями.

Обработка сигналов инициируется передачей на SP новой команды RSP на обработку. В зависимости от включенного режима SP останавливает, запускает или перезапускает нужные модули обработки. Модули обработки получают команды с использованием команд на языке RCL (radar control language), например модуль обработки фильтрации местников с параметром фильтрации (см. рис. 2.17).

Обработка может быть частью функций задания оператора на сканирование или задаваться интерактивно с использованием команд RCL (например, с использованием рабочей таблицы сканирования RAVIS).

Цепочка обработки данных процессором сигналов целиком определяется файлами конфигурации в формате XML:

файлы, определяющие модуль процессора сигналов, описывают модуль обработки данных;

файлы, определяющие режим процессора сигналов, определяют цепочку обработки, состоящую из нескольких модулей процессора сигналов.

Программы процессора сигналов (SP) написаны на языке Java и работают в среде исполнения Java 5 (а.к.а. 1.5) и выше. Свободная конфигурация режимов обработки базируется на строгой модульной структуре.

SP может работать в двух режимах: *Real Time Nexus* (ядро реального времени) и *Management Nexus* (ядро управления).

Режим *Real Time Nexus* отвечает за обработку сигналов и поэтому оптимизирован для быстрой и надежной передачи информации.

В режиме *Management Nexus* находятся настройка SP, сетевой сервер для слоев и данных наблюдений в реальном времени.

Процессор сигналов SP предоставляет доступ к набору библиотек, оптимизированных для обработки преобразования Фурье и фильтрации во временной области (IIR). Эти библиотеки доступны на чистом Java или с использованием JNI (Java Native Interface) и библиотеки Intel IPP (Intel Integrated Performance Primitives — оптимизированная библиотека для обработки сигналов).

Конструкция процессора сигналов (SP) рассчитана на расширение.

В структурные рамки процесса обработки входит ряд модулей алгоритмов. Один модуль алгоритма состоит либо из одного алгоритма (например, фильтрация местников на основе БПФ), либо из набора алгоритмов, относящихся к одному логическому этапу (например, установке порогов). Каждый модуль можно полностью конфигурировать средствами сигнального процессора. Параметры конфигурации доступны для интерфейса пользователя. Модули, введенные в структуру обработки, зависят от заданной оператором процедуры обработки.

Фрагменты первичных данных I/Q принимаются по выбранному оператором протоколу связи (TCP/IP, UDP). Модуль приема передает данные на синхронизацию CPI.

Перед обработкой первичные данные I/Q корректируются на изменения фазы и мощности передатчика. Связанная с этим информация входит в состав информационного заголовка данных I/Q .

Режим синхронизации — это выполнение указания оператора АМПК связать ряд принимаемых импульсов в рамках заданных оператором углов с интервалом когерентной обработки (Coherent processing interval, CPI). В другом режиме (блочном) заданное пользователем число импульсов связывается с CPI ширины угла, вытекающей из ЧСИ, необходимого для обработки числа импульсов и скорости движения антенны по выбранному режиму сканирования (см. рис. 2.8).

Другие алгоритмы первичной обработки изложены в п. 2.2.

2.6. Вторичная обработка

Базовые данные — отражаемость Z , средняя радиальная скорость $\bar{v}_r$, ширина спектра σ_v — обрабатываются на АМПК с помощью алгоритмов распознавания метеорологических явлений и образцов для получения набора метеорологических продуктов. Последние доставляются потребителям в согласованных с ними форматах, протоколах и объемах для отображения на АРМ потребителей.

Рассмотрим основные особенности информации АМПК «Метеор—Метеоячейка» [9, 10].

2.6.1. Режим Измерение отражаемости

На автоматизированном метеорологическом комплексе АМПК «Метеор—Метеоячейка» в режиме *Измерение отражаемости* облаков и осадков в радиусе обзора 256 км вся площадь разбивается на квадраты 4×4 км. Для каждого квадрата определяются максимальная высота верхней границы радиоэха и радиолокационная отражаемость в одиннадцати слоях, средняя толщина которых составляет 1000 м.

Радиолокационные характеристики, а именно высота верхней границы радиоэха конвективной (РКО) и слоистообразной (РСО) облачности H (км); радиолокационная отражаемость Z ; площадь, занятая

радиозхом; скорость и направление перемещения радиозха метеообъектов, находятся в физико-статистической зависимости с метеорологическими параметрами облачной атмосферы. Это создает предпосылки для оценки последних по радиолокационным характеристикам.

Алгоритмы распознавания явлений в комплексе «Метеор—Метеоячейка» при принятии решения о степени опасности явления имеют вероятностный характер.

При интерпретации опасных явлений, связанных с кучево-дождевыми облаками, и определении их грозовой активности учитывается хорошо известный факт: самолет, попавший в кучево-дождевое облако, сам может явиться причиной возникающего атмосферного электрического разряда на самолет. С другой стороны, время стремительного перехода развивающегося кучево-дождевого облака из негрозового состояния в грозовое (3—5 мин) сравнимо со временем получения и передачи информации потребителю. Отсюда следует неизбежность класса опасных явлений *Гроза с двумя скобками* (обозначение (*R*)), что соответствует вероятности правильного распознавания грозы от 30 до 70 %.

При радиолокационных наблюдениях существует ограничение, связанное с ослаблением радиоволн в осадках, которое заключается в следующем. Вследствие эффектов ослабления в экранирующих осадках (особенно при образовании водяной пленки на поверхности РПУ антенны АМРК), опасные явления (ОЯ) погоды могут не обнаруживаться или обнаруживаться с уменьшением степени их опасности и существенными искажениями высоты и отражаемости ОЯ, находящихся за экранирующими осадками.

Иногда, когда интенсивные жидкие осадки выпадают непосредственно в месте установки антенны АМРК, на непродолжительный промежуток времени АМРК «Метеор—Метеоячейка» перестает обнаруживать радиозхо и становится «слепым».

Каждому потребителю информации комплекса «Метеор—Метеоячейка» следует знать об этих особенностях радиолокационного метода наблюдений и считать его не абсолютным, а относительным.

Под относительностью понимается способность метода указывать вероятность степени опасности только обнаруженного явления. Потребитель должен сам устанавливать перечень опасных явлений погоды (из получаемых АМРК), влияющих на решение выполняемых им

задач. Например, в случае использования информации только о грозах с вероятностью 80 % и больше потребитель сам несет ответственность за принятие решения в ситуациях, когда вероятность грозового состояния меньше 80 %.

Специальное программное обеспечение РС-М АМРК «Метеор—Метеоячейка» (ИТАВ 416311.008 Метеоячейка 2.0) выполняет:

- обработку всех поступивших первичных данных¹;
- вычисление критериев грозоопасности;
- выявление радиоэха конвективной облачности;
- интерпретацию радиоэха метеообразований;
- классификацию радиоэха по заданным алгоритмам (базовое и специальное программное обеспечение);

формирование информации, предназначенной синоптику-прогнозисту, синоптику на вылетах, для службы руководства и управления полетами (АС УВД), консультации летного состава и передачи в линии связи;

- измерение осадков;

- определение радиальных скоростей.

В режиме *Измерение отражаемости* получение информации обеспечивается РС-М путем выполнения следующих функций:

- проведение обзора и обработки данных наблюдений;
- расчет направления и скорости перемещения поля радиоэха;
- расчет тенденции развития поля радиоэха;
- представление результатов наблюдений АМРК на экране ПЭВМ в виде следующих карт:

- а) *Метеоявления* (рис. 2.18, см. цветную вкладку),

- б) *Опасные явления погоды*,

- в) *Высота (верхней границы) радиоэха H* ,

- г) *Отражаемость Z в одиннадцати слоях*,

- д) *Контуры опасных явлений* (рис. 2.19, см. цветную вкладку),

- е) *Скорость шквалистого усиления ветра $V_{ш}$* ,

- ж) *Интенсивность осадков I* ,

- з) *Количество осадков Q за любой период наблюдений*,

¹ Обработка первичных радиолокационных данных производится в соответствии с рекомендациями нормативных документов: РД 52. 04. 320—91, НМО ГА-95, кода RADOB-86, кода BUFR-94 [3, 7, 8—10, 12—14, 19, 20].

и) *Видимость в осадках VV*,

к) *Вертикальное сечение* по произвольному азимуту и заданным воздушным коридорам (рис.2.20, см. цветную вкладку),

л) *Обледенение* по произвольному азимуту и заданным воздушным коридорам;

вывод на экран и печать таблицы *Штормоповещение* с информацией об очагах опасных явлений погоды;

вывод на экран, печать и передача в канал связи телеграммы в коде RADOB-86 и BUFR-94;

вывод на печать бланк-карты АМРК;

архивация данных наблюдений за период не менее 30 дней или неограниченный период, определяемый размером жесткого диска ПЭВМ;

архивация телеграмм в коде RADOB-86 и BUFR-94;

ввод данных метеостанций штормового кольца:

а) о шквалистом усилении ветра,

б) о граде,

в) о грозах,

г) о сильных ливневых осадках;

сопоставление данных метеостанций об ОЯ с данными АМРК;

вывод на печать таблиц с результатами сопоставления;

запись и дополнение файла отражений от местных предметов;

установка координат метеостанций.

2.6.2. Режим *Доплеровская скорость*

В режиме *Доплеровская скорость* конечным продуктом наблюдений на АМРК, который поступает потребителю, является пространственное распределение радиальных скоростей в радиусе обзора 125 км по квадратам 4×4 км.

На основании обработки информации отраженных сигналов в каждом импульсном объеме (дискрете дальности), которая производится в GDRX, получают данные о средней радиальной скорости метеоцели и о ширине спектра скоростей. Их дальнейшая обработка, распространение по квадратам 4×4 км, расчет и пространственное распределение радиальных (доплеровских) скоростей в радиусе обзора производится специальным программным обеспечением РС-М.

Радиальные скорости рассчитываются под одним углом места антенны АМРК в периоды между наблюдениями в режиме *Измерение отражаемости*.

Дискретность измерений радиальной скорости составляет 0,5 м/с, дискретность измерения ширины спектра — 0,62 м/с в диапазоне измерений ширины спектра от 0,1 до 15,8 м/с. Анализ спектральных характеристик (ширины спектра) позволяет оценить дисперсию скоростей метеоцели.

На основе прямых измерений радиальной скорости могут быть рассчитаны явления, представляющие значительную опасность при взлете и посадке самолета (смерч, сдвиг ветра). По сдвигу ветра можно определить фронт порывистости и микрошквал [5, 9].

При круговом обзоре под одним углом места можно получить вертикальное распределение ветра в обложных осадках. Ветер вдоль контура нулевой радиальной скорости перпендикулярен диаграмме направленности антенны. Поскольку средний ветер изменяет направление с высотой, это изменение можно наблюдать по контуру нулевой линии радиальных скоростей. Контур в первом приближении имеет форму буквы S.

2.7. Калибровка приемно-измерительных трактов АМРК «Метеор—Метеоячейка»

В отличие от калибровки АМРК (см. п. 1.7) радиолокаторы нового поколения, в которых процесс получения информации полностью автоматизирован, калибруются с помощью встроенных генераторов с применением ЭВМ, в которых существуют программы со сценариями калибровки [1, 10].

Калибровки можно разделить на калибровки, выполняемые после ремонтных и настроечных работ (после замены комплектующих), когда используются стандартный набор генераторов и общепринятые схемы их подключения, а также калибровки ежедневные, выполняемые с помощью встроенных генераторов, приборов и программ для ЭВМ. Последние могут использоваться при получении и обработке первичных данных (процессор радиолокационных сигналов в режиме контроля).

В технической и эксплуатационной документации АМРК «Метеор—Метеоячейка» приведены методики измерений с помощью стандартных измерительных приборов (ваттметра, калиброванных генераторов, цифровых осциллографов, набора аттенюаторов) и следующих параметров АМРК:

пиковой мощности передатчика,
длительности зондирующего импульса,
интервала следования СВЧ импульсов,
сверхвысокой частоты передатчика на магнетроне,
чувствительности приемника,
коэффициента шума цифрового приемника,
динамического диапазона приемника.

Рассмотрим ежедневные калибровки с помощью встроенной измерительной аппаратуры АМРК.

2.7.1. Калибровка приемника

Калибровка приемника заключается в измерении разницы между синфазными (I) и квадратурными (Q) (т. е. сдвинутыми по фазе на 90°) сигналами в различных комбинациях четырех каналов, использующих тестовый сигнал. Ежедневная калибровка приемника происходит по сценарию, который в виде набора программ находится в процессоре радиолокатора.

Для запуска калибровки оператор должен включить режим обслуживания и запустить *Калибровку приемника*. По этой команде активируется внутренний генератор испытательных сигналов. Он генерирует известную мощность в линейный участок входных каналов. Измеряются мощности сигналов, выходящих из каналов высокой и низкой чувствительности. Они позволяют вычислить различия каналов по фазе и амплитуде. После этого система перезапустится и войдет в нормальное состояние.

2.7.2. Калибровка мощности передатчика

Цель калибровки передатчика — настроить приемник радиолокатора на номинальную мощность передатчика, измеренную на всех длительностях импульсов. Процессор сигналов RSP будет корректировать

данные на колебания мощности передатчика, используя в качестве эталона номинальную мощность.

Прежде чем выполнять калибровку, передатчик должен поработать не менее 30 мин. За это время передатчик достигнет своей рабочей температуры, а его выходная мощность стабилизируется.

До начала калибровки мощности передатчика необходимо измерить номинальную мощность передатчика для каждой длительности импульса. В сценарии калибровки передатчика используется ЧСИ, равная 500 Гц на всех длительностях импульса.

1. Передатчик АМРК следует установить на ЧСИ, равную 500 Гц; затем с помощью ваттметра надо измерить номинальную мощность передатчика на каждой длительности импульса.

2. Зная фактическую мощность передатчика (кВт) на каждой длительности импульса, надо нажать кнопку запуска калибровки. Во время калибровки RSP перейдет в особый импульсный режим работы передатчика. В этом режиме RSP будет считывать фактическую амплитуду на входе исследуемого канала передатчика в произвольных линейных единицах. Она станет эталоном для дальнейшей выборки каналов передатчика и коррекции мощности.

3. Вводятся измеренные вручную значения мощности передатчика (кВт).

4. После ввода измеренного значения вычисляется соотношение между линейными единицами мощности передатчика, используемыми RSP, и входными параметрами (кВт).

5. Полученные калибровочные коэффициенты (отношение измеренной мощности к линейным единицам) будут использоваться для перевода всех дальнейших результатов выборки амплитуды передатчика в фактическую измеряемую мощность передатчика (кВт).

2.7.3. Калибровка процессора сигналов

Панель калибровки процессора сигналов, или SP Calibration, позволяет произвести точечную калибровку и калибровку нуля. Обе калибровки реализуются через запуск заданного сценария, находящегося в процессоре радиолокатора. Перед калибровкой передатчик должен поработать не менее 30 мин.

Цель точечной калибровки заключается в определении соотношения между мощностью (дБ/мВт) на входе малошумящего усилителя (LNA) и мощностью (дБ/мВт), приходящей на процессор сигналов. Эта информация нужна процессору сигналов для вычисления значений отражаемости по измеренной мощности сигналов.

Точечная калибровка состоит из двух главных измерений:

измерение мощности после введения испытательного сигнала;

измерение мощности шума (для коррекции первого измерения и улучшения калибровки).

Поскольку известно, что амплитудная характеристика приемника представляет собой прямую линию во всем динамическом диапазоне, можно вычислить отклонение этой прямой от результата измерения. Этой информации достаточно для измерения необходимого соотношения.

АМРК «Метеор—Метеоячейка» оборудован встроенным генератором испытательных сигналов (ITSG). ITSG вводит фиксированный сигнал для калибровки; уровень мощности сигнала задается при производстве радиолокатора.

Указанные выше измерения производятся для всех возможных длительностей импульса, на которых работает радиолокатор.

Работа генератора ITSG определяется сценарием. Мощность вводимого сигнала сохраняется для соответствующей длительности импульса. На следующем этапе ввод сигнала прекращается для определения значений мощности шума системы. В конце процедуры система возвращается в обычное состояние.

В результате точечной калибровки для всех длительностей импульсов АМРК получают следующие параметры калибровки SP:

- 1) номинальная мощность калибровочного сигнала (дБ/мВт), вводимого внутренним генератором испытательных сигналов;
- 2) линейная мощность шума в произвольных линейных единицах, когда испытательный сигнал не подается;
- 3) мощность сигнала в произвольных линейных единицах при подаче испытательного сигнала;
- 4) Отношения введенной мощности к обнаруженной с поправкой на результаты измерения шума.

Шум-фактор (коэффициент шума) — числовая характеристика радиоэлектронных приборов и устройств, определяющая ухудшение

их чувствительности за счет шумов, вносимых ими самими в полезный сигнал в процессе его обработки:

$$F = (P_c / P_{ш})_{вх} / (P_c / P_{ш})_{вых},$$

где $(P_c)_{вх}$ и $(P_{ш})_{вх}$, $(P_c)_{вых}$ и $(P_{ш})_{вых}$ — мощности полезного сигнала и шума на входе и выходе линейной части устройства в пределах полосы его пропускания Δf .

При этом предполагается, что на входе устройства включено шумящее согласованное сопротивление (эквивалент антенны), находящееся при стандартной температуре 290 К. Поскольку собственные шумы устройства уменьшают отношение сигнал/шум, то $F > 1$.

Часто пользуются другой формой записи шум-фактора:

$$F = (P_c)_{вх} / (kT\Delta f).$$

Здесь $(P_c)_{вх}$ — мощность входного (эталонного) сигнала, при которой на выходе отношение сигнал/шум равно 1, а $kT\Delta f$ — мощность тепловых шумов согласованного входного сопротивления в полосе пропускания.

Шумовая температура источника шума $T_{ш}$ оценивается такой температурой согласованного сопротивления, при которой спектральная плотность мощности теплового шума этого сопротивления будет равна спектральной плотности мощности шумов данного источника.

Шумовой температурой или шумовым числом называется отношение $T_{ш}$ к «комнатной» температуре $T_0 = 290$ К, т. е.

$$T_{ш} = (F - 1) T_0,$$

$$F = 1 + \frac{T_{ш}}{T_0}.$$

Спектральная плотность мощности согласованного сопротивления определяется формулой Найквиста:

$$S = kT,$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура сопротивления.

При оценке реальной чувствительности радиоприемника по величине шум-фактора необходимо учитывать, что спектр полезного сигнала

ла может не совпадать со спектром входных и собственных шумов, а эффективная температура антенны отличается от T_0 .

Калибровка нуля (Zero Check) инициирует выборку шума приемника, которая применяется для определения линейной мощности шума, вычитаемой из получаемых данных перед обработкой отражаемости.

Как во всякой приемной системе, для обнаружения и индикации полезный сигнал должен быть больше избыточного теплового шума, создаваемого приемником. Уменьшение этого шума приводит к уменьшению минимального обнаруживаемого сигнала (minimum detectable signal, MDS).

Коэффициент шума приемника F (дБ) определяется по формуле [1]:

$$F = ENR - 10 \lg(Y - 1) = 10 \lg(kT_0 B_w) - 10 \lg(Y - 1), \quad (2.37)$$

где коэффициент Y — отношение между двумя уровнями мощности шума, один из которых измеряется при включенном источнике шума (N_{on}), а другой при выключенном (N_{off}):

$$Y = \frac{N_{on}}{N_{off}},$$

где N_{on} и N_{off} в терминах линейной мощности.

Цель измерения минимального обнаруживаемого сигнала MDS — проверка чувствительности приемника. За чувствительность приемника принимается входная мощность минимального сигнала, получающаяся на выходе приемника при отношении сигнала к шуму, равном единице ($P_{out}/N_{out} = 1$, или 0 дБ). Она вычисляется по формуле

$$P_{min} = kT_0 B_w + F + B_w + L, \quad (2.38)$$

где $kT_0 B_w = -174$ дБ/МВт — мощность шума (дБ/МВт) при ширине полосы 1 Гц, определяемая по мощности шума на входе приемника; F — коэффициент шума приемника (дБ); B_w — полоса пропускания приемника (дБ); L — потери (дБ).

Проведем расчеты P_{min} при следующих параметрах: $T_0 = 300$ К — шумовая температура приемной системы; $kT_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт·с;

$$B_w = 10 \lg \frac{1,2}{\tau_{\text{зонд}}}; \quad F = 2 \text{ дБ}; \quad L = 0 \text{ дБ}.$$

В режиме *Измерение отражаемости Z* при $\tau_{\text{зонд}} = 2 \cdot 10^{-6}$ с получаем

$$P_{\min} = -174 + 2 + 57,5 = -114 \text{ дБ/мВт}, \text{ или } -144 \text{ дБ/Вт}. \quad (2.39)$$

В режиме *Доплеровская скорость* при $\tau_{\text{зонд}} = 0,83 \cdot 10^{-6}$ с находим

$$P_{\min} = -174 + 2 + 61,5 = -110,5 \text{ дБ/мВт}, \text{ или } -140,5 \text{ дБ/Вт}. \quad (2.40)$$

При $L = 2,0$ дБ имеем $P_{\min} = -142,0$ дБ/Вт и $P_{\min} = -138,0$ дБ/Вт соответственно (см. табл. 2.6 и 2.7).

2.7.4. Расчет радиолокационной постоянной

В АМРК «Метеор—Метеоячейка» процедура измерения эквивалентной отражаемости Z_e отличается от соответствующей процедуры в МРЛ-5. Радиолокационная постоянная рассчитывается автоматически для каждой длительности импульса и не совпадает по величине с потенциалом Π_m (см. формулу (1.1)).

Уравнение радиолокации атмосферных образований с учетом потенциала Π_m можно записать следующим образом [9, 10]:

$$\frac{\bar{P}_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} = \Pi_m \frac{Z_e}{r^2} [\chi K_{\text{РПУ}}] \quad (2.41)$$

где $K_{\text{РПУ}}$ — потери на радиопрозрачном укрытии за счет ослабления электромагнитного излучения (Radome Loss); r — удаление метеорологического образования от МРЛ; $\bar{P}_{\text{пр}}/P_{\text{ш}}$ — отношение величины принятого радиолокационного сигнала от метеообразования к уровню шумов ($P_{\text{ш}}$); χ — двустороннее ослабление радиоволн в осадках:

$$\chi = 2 \int_0^R \alpha_{\text{осл}}(r) dr.$$

В АМРК «Метеор—Метеоячейка» (см. п.2.3.1) $\chi = C_{\text{атм}}(r)$.

В таком виде уравнение радиолокации для атмосферных образований учитывает и способ измерения отраженного сигнала, и особые условия наблюдений (в квадратных скобках).

Необходимо получить формулу для расчета Z_3 , которая связывала бы общепринятые выражения (2.41) с учетом особенностей расчета параметров в АМРК «Метеор—Метеоячейка».

Если члены уравнения выразить в децибелах, то эквивалентная отражаемость Z_3 (дБZ) будет описываться формулой

$$Z_3 = 10 \lg \left(\frac{\bar{P}_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} \right) - 10 \lg \Pi_{\text{м}} + 20 \lg r - 10 \lg K_{\text{РПУ}} - 10 \lg \chi. \quad (2.42)$$

Потери на прием и передачу в антенно-волноводном тракте K_{AB} рассчитываются по формуле

$$K_{\text{AB}} = T_x \text{ Loss} + R_x \text{ Loss} + \text{Matched Filter Loss}, \quad (2.43)$$

$$10 \lg K_{\text{РПУ}} = 2 \text{ Radome Loss}.$$

Значения параметров для расчета потерь приведены в табл. 2.8 [1].

Таблица 2.8

Параметры для расчета потерь

Параметр	Обозначения	Значение, дБ
$T, \text{ Loss}$	Потери на передаче ¹	−1,2
$R, \text{ Loss}$	Потери на приеме ²	−1,5
Radome Loss	Потери на РПУ	−0,2
Matched Filter Loss	Потери на согласующем фильтре	0
$R_x P_{\text{OW}}$	Задаваемый изготовителем уровень входного сигнала при калибровке	?

¹ Потери передатчика между двунаправленным ответвителем и рупорным облучателем антенны.

² Потери приемника между рупорным облучателем антенны и малошумящим ВЧ трактом приемника. В процессе калибровки ($R_x P_{\text{OW}}$) задается предприятием-изготовителем при установке АМРК «Метеор—Метеоячейка» на объекте.

Если положить Z_3 (дБЗ) $\equiv$ UZ (дБЗ) (см. формулу (2.35)), то с учетом уравнения (2.42) и определений в п. 2.3.1, находим:

$$C_r(r^2) = 20 \lg r,$$

$$10 \lg(T_0 - N) = 10 \lg \frac{\bar{P}_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}},$$

$$C_{\text{атм}}(r) = -10 \lg \chi = +0,013 \text{ (дБ/км)} \cdot r \text{ (км)}$$

(см. п.2.3.1),

$$C_{\text{radar}} = 10 \lg \Pi_{\text{м}} + 10 \lg K_{\text{РПУ}} + R_x P_{\text{OW}}. \quad (2.44)$$

Радиолокационную постоянную C_{radar} или $Rad \text{ const}$ (дБЗ), определяют при установке АМРК «Метеор—Метеоячейка», когда представители предприятия-изготовителя выставляют уровень входного сигнала при калибровке ($R_x P_{\text{OW}}$).

Приведем пример расчета эквивалентной отражаемости Z_3 .

Метеоцель, удаленная от АМРК на $r = 100$ км, дает максимальный отраженный сигнал:

$$10 \lg \left(\frac{\bar{P}_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} \right) = 40 \text{ дБ},$$

$$10 \lg \Pi_{\text{м}} = 64,7 \text{ дБ},$$

$$-10 \lg K_{\text{РПУ}} = +0,4,$$

$$-10 \lg \chi = +0,013 \cdot 100 = 1,3 \text{ дБ},$$

$$Z_3 \text{ (дБЗ)} = 40 - 64,7 + 40 + 0,4 + 1,3 = 17.$$

2.7.5. Калибровка АМРК «Метеор—Метеоячейка» по солнцу

Существующие (и частично описанные в п. 2.7) стандартные методы калибровки АМРК имеют ограничения по точности. Если измерять все отрезки пути сигнала от передатчика к антенне и от антенны к приемнику-процессору, а потом, как полагается, сложить результаты измерений, то придется складывать и ошибки отдельных измерений.

Кроме того, такой процесс практически невозможно автоматизировать для его применения в оперативной работе.

По этим причинам уже давно разрабатываются способы калибровки пути сигнала в целом: по солнцу и по осадкам [1].

Солнце используют при калибровке антенны радиолокатора, углов наведения антенны, определения ширины диаграммы направленности антенны по точкам половинной мощности, усиления антенны.

В специальном программном обеспечении АМРК «Метеор—Метеоячейка» имеется программа SunTrack, которая позволяет проанализировать отклонение положения антенны по отношению к положению солнца и вычислять усиление антенны.

Положение солнца рассчитывается с учетом координат калибруемого радиолокатора и времени проведения калибровки. После подключения программного обеспечения RAVIS к радиолокатору параметры местоположения меняются на значение калибруемой системы, и рассчитываются траектория и положение солнца. Во время этого измерения передатчик отключается. Фактическая мощность сигнала солнца измеряется непрерывно после запуска процедуры, и антенна получает команду повернуться прямо на солнце. С помощью этой процедуры определяют фактическую разориентацию антенны и задают в систему АСУ необходимые смещения.

Если известно значение потока солнечной энергии на частоте 2800 МГц, можно рассчитать и усиление антенны.

Краткая методика калибровки состоит в следующем.

1. Каждые 5 мин запускается процедура автоматического отслеживания солнца.
2. Проверяются мощность сигнала и фактическое положение антенны.
3. Положение антенны с максимальным значением выбирается для вычисления новых значений смещения антенны.

Если антенна точно направлена на солнце, измеренная мощность сигнала становится максимальной. Любое уменьшение измеренной мощности показывает, что антенна на солнце не направлена.

После нескольких измерений оператор может определить новые смещения. По входным значениям и по фактическим значениям смещения в блоке управления антенны (АСУ) рассчитываются новые смеще-

ния, которые передаются и сохраняются в АСУ. Если, например, фактическое смещение по азимуту в АСУ определено как $0,5^\circ$ и значения мощности сигнала солнца добавляют смещение $-0,2^\circ$, тогда новое смещение $0,3^\circ$ сохраняется в АСУ; то же справедливо и для углов места.

Определение усиления антенны (отдельная опция). Описание процедуры вычисления усиления антенны представлено в работе Кевина (Kevin M. Calibration of the Doppler on wheels system using solar flux. — McGraft, 2002).

Для вычисления необходимы следующие параметры:

полоса пропускания шума приемника BW_n (Гц);

длина волны радиолокатора λ (м);

солнечный поток S (на 10 см или 2800 МГц) по данным ближайшей обсерватории (sfu, solar flux unit — единица солнечного потока) (10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹);

принятая мощность сигнала солнца и чистого неба P_s (дБ/мВт);

принятая мощность сигнала чистого неба P_b (дБ/мВт).

Прежде всего, рассчитывается значение мощности сигнала солнца P_r (дБ/мВт), которое переводится в значение P_w (мВт):

$$P_r = 10 \lg(10^{P_s/10} - 10^{P_b/10}),$$
$$P_w = 10^{P_r/10} \cdot 10^{-3}.$$
(2.45)

Далее рассчитывается коррекция на диаграмму направленности. Поскольку радиосолнце (от $0,56$ до $0,58^\circ$) занимает значительную долю диаграммы направленности антенны в точке 3 дБ (например, 1°), радиолокационное измерение мощности сигнала является взвешенным средним, а не пиковым значением, предоставленным обсерваторией (см. Sirmans et al. On measuring WSR-88D antenna gain using solar flux. NOAA Radar Operations Branch Engineering Paper, 2001, p. 1—21). В связи с этим нужно вычислить поправочный коэффициент на диаграмму направленности.

Важно учитывать частоту, на которой работает МРЛ, так как плотность солнечного потока изменяется с частотой. Для оценки солнечного потока S_f на всех частотах, кроме 2800 МГц, используется формула экстраполяции, предложенная Тэппингом. Все наблюдения представляют собой измерения солнечного потока на всех поляризациях и для

сопоставления с радиолокационным измерением на одной поляризации должны быть уменьшены в два раза:

$$S_f = (0,0002S_{obs} - 0,01)(f - 2800) + S_{obs}, \quad (2.46)$$
$$S_{fs} = \frac{S_f}{2}.$$

где S_{obs} — измеренная плотность солнечного потока.

Теперь можно вычислить эффективное усиление антенны (g_e) и просто усиление антенны (G_e):

$$g_e = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left(\frac{P_w k_1}{S_{fs} B W n} \right),$$
$$G_e = 10 \lg(g_e). \quad (2.47)$$

2.8. Эксплуатационные особенности

Для АМРК «Метеор—Метеоячейка» характерны следующие показатели надежности [1]:

- средний ресурс 55 000 ч в течение среднего срока службы 10 лет, включая 1 год хранения;
- средняя вероятность безотказной работы в течение 750 ч не менее 0,93;
- среднее время устранения отказа 5 ч.

Как следует из приведенных показателей, АМРК является высоконадежным радиотехническим устройством, предназначенным для круглосуточной работы; при этом выполнение технических регламентов обслуживания, которое должно проводиться силами обученного и грамотного персонала, обязательно.

Рассмотрим основные виды работ по техобслуживанию АМРК «Метеор—Метеоячейка».

2.8.1. Проверка работоспособности

АМРК «Метеор—Метеоячейка» работает в режимах *Местный* (*Local*) и *Дистанционный* (*Remote*).

Режим *Местный (Local)* служит для контроля и регулировки приемопередающего устройства из аппаратного контейнера, размещенного на вышке. Режим *Дистанционный (Remote)* является основным режимом работы АМРК. Включение и выключение, управление работой аппаратуры в этом режиме осуществляется с центральной системы (главная рабочая станция).

При подготовке АМРК к включению независимо от режима при длительном простое рекомендуется проделать следующие операции:

а) произвести внешний осмотр и убедиться в исправности механизмов и узлов электропривода антенны;

б) убедиться в наличии масла в редукторах в соответствии со схемой смазки, после чего закрыть все люки и отверстия, обеспечив герметичность;

в) проверить все кабельные и волноводные соединения;

г) проверить сопротивление изоляции между фазами по измерительному прибору, исправность внутреннего и наружного контуров заземления.

В режиме *Местный (Local)* аппаратура АМРК может контролироваться с помощью блока LCU. Это устройство для управления, тестирования и поиска неисправности в радиолокаторе. Используя LCU, обслуживающий персонал может управлять радиолокатором и перемещать антенну.

В режиме *Дистанционный (Remote)* управление радиолокатором переходит к рабочей станции (PC-M) и PC-P (RAVIS).

Процессор управления радиолокатором (RCP) отвечает за контроль и наблюдение за радиолокационной системой. В частности, этот процессор управляет встроенной системой диагностики состояния аппаратуры (BITE). Отслеживается состояние большого числа параметров подсистем, и, если обнаруживается неисправность, управляющий процессор действует соответственно обстоятельствам и заданным разработчиком приоритетам.

Проверка работоспособности изделия

Перечень работ, которые следует выполнить для проверки работоспособности АМРК «Метеор—Метеоячейка», приведен в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Наименование работы	Средства измерения, вспомогательные технические устройства и материалы	Контрольные значения параметров и показателей
Подключение PC RAVIS к АМРК	PC-P RAVIS (модуль «Connect»)	Должно быть установлено подключение к АМРК
Включение АМРК	PC-P RAVIS (модуль «System Visualization»)	Индикатор включения радиолокатора <i>Radar</i> должен перейти в состояние <i>On</i>
Включение двигателей антенны	PC-P RAVIS (модуль «System Visualization»)	Индикатор включения двигателей антенны <i>Servo</i> должен перейти в состояние <i>On</i>
Проверка точности позиционирования антенны по азимуту и углу места	PC-P RAVIS (модули «Antenna Control» и «Antenna Tags»)	Погрешность позиционирования по азимуту и углу места не должна превышать 0,1°
Проверка точности удержания скорости антенны по азимуту	PC-P RAVIS (модули «Antenna Control» и «Antenna Tags»)	Погрешность в удержании скорости не должна превышать 0,5° в секунду
Проверка точности удержания скорости антенны по углу места и автоматического переключения направления движения антенны в нижних ее положениях	PC-P RAVIS (модули «Antenna Control» и «Antenna Tags»)	Погрешность в удержании скорости не должна превышать 0,5° в секунду. При достижении крайних точек антенна должна автоматически менять направление движения на противоположное
Проверка точности ориентации антенны	PC-P RAVIS (модуль «SunTrack»)	Погрешность ориентации антенны по азимуту и углу места должна быть меньше 0,1°. Иначе необходимо провести корректировку ориентации антенны по солнцу

Продолжение табл. 2.9

Наименование работы	Средства измерения, вспомогательные технические устройства и материалы	Контрольные значения параметров и показателей
Включение АМРК на излучение	PC-P RAVIS (модуль «System Visualization»)	Индикатор включения АМРК на излучение <i>Radiation</i> должен перейти в состояние <i>On</i>
Проверка мощности сигнала передатчика	PC-P RAVIS (модули «ScanWorkSheet» и «Scope»)	Мощность передатчика в импульсе должна быть не менее 250 кВт
Проверка получения данных об отражаемости и их обработке при круговом обзоре	PC-P RAVIS (модули «ScanWorkSheet», «Antenna Control» и «PPI»)	На ИКО должна наблюдаться картина текущих метеоявлений
Проверка получения данных об отражаемости и их обработке при вертикальном обзоре	PC-P RAVIS (модули «ScanWorkSheet», «Antenna Control» и «RHI»)	На ИДВ должна наблюдаться картина текущих метеоявлений

2.8.2. Профилактические мероприятия и обслуживание

Антенная колонка. Профилактика антенной колонки сведена к минимуму. Рекомендации по ее проведению приведены в табл. 2.10 [1, 2].

Блок управления антенной (ACU). Не нуждается в обслуживании и настройке. Все его компоненты цифровые, и в системе нет потенциометров, которым была бы нужна периодическая проверка.

Поскольку электромоторы переменного тока бесщеточные, нет также необходимости их обслуживать.

Если какая-то плата ACU выйдет из строя, ее можно заменить запасной. Усилители можно как заменять, так и взаимозаменять.

Таблица 2.10

Мероприятия по профилактике антенной колонки

№ п/п	Мероприятие	Перио- дичность
1	Заполнение смазкой контейнера насоса	1 год
2	Чистка шестерен угломестного привода	1 год
3	Замена масла в азимутальном приводе	3—5 лет
4	Добавление 400 г смазки в угломестный привод	1 год
5	Замена смазки каждые 5 лет	5 лет
6	Чистка токосъемника	1 год
7	Проверка горизонтирования колонки	5 лет
8	Проверка зазора между ведущей шестерней и зубчатым колесом	5 лет
9	Проверка уплотнительных колец	1 год
10	Проверка протечек масла	1 год
11	Проверка подогревателей	1 год
12	Проверка крутящего момента коробок передач и эксцентрика	1 год

Волноводная система (WP). Почти не требует обслуживания. При нормальной эксплуатации не требуется и настройка (см. рис. 2.11 и 2.12).

Работу осушителя следует проверять регулярно. Давление в волноводе должно находиться в пределах 400—500 гПа. Давление может меняться (например, во вращающихся частях) из-за небольших утечек. Это нормально и не является неисправностью.

Рабочий цикл насоса осушителя занимает 10—20 % времени включенного состояния и 80—90 % времени выключенного состояния (например, если общий цикл 20 мин, то 5 мин включен и 15 мин выключен).

Особенно чувствительны к механическому повреждению гибкие части волновода. Эти детали контролируются визуально при падении давления воздуха или плохом коэффициенте стоячей волны (VSWR).

Работать с волноводной системой можно только специалистам, так как после этого требуется настроить двойной согласующий шлейф и снова откалибровать систему. Эта операция производится с помощью измерительной аппаратуры.

Процессор управления АМПК (RCP-L). Не нуждается в настройках параметров. Если какая-то из плат RCP-L выйдет из строя, ее можно заменить запасной.

Любой вид обслуживания должен производиться квалифицированным персоналом!

Передачик TXC 400. Не нуждается в обслуживании и настройке. Все компоненты цифровые, и в системе нет потенциометров, которые нуждаются в периодической регулировке.

Все параметры TXCU загружаются LCU.

Приемник GDRX 500. Обслуживание не требуется. Благодаря применению высококачественных стабильных элементов, а именно источников частоты, фильтра и усилителя, их настройка не требуется.

Рекомендуется проверять характеристики приемника каждые полгода. Как уже отмечалось, у приемников со встроенным сигнал-генератором автоматическая проверка чувствительности, динамического диапазона, линейности и коэффициента шума выполняются под контролем RSP/RCP.

Блок местного управления (LCU). Не нуждается в обслуживании или настройке. Все компоненты цифровые, а в системе нет потенциометров, которые нуждаются в периодической регулировке. Если какая-то из плат LCU придет в негодность, ее можно заменить запасной.

2.8.3. Техническое обслуживание рабочей станции метеоролога

Техническое обслуживание рабочей станции метеоролога (РС-М) АМПК «Метеор—Метеоячейка» производится по следующим видам (формат) [1]:

- оперативное ежедневное техническое обслуживание (ТО-1),
- периодическое недельное техническое обслуживание (ТО-2),
- периодическое месячное техническое обслуживание (ТО-3),
- периодическое квартальное обслуживание (ТО-4),
- периодическое сезонное обслуживание (ТО-5),
- специальное техническое обслуживание (ТО-6).

Меры безопасности

1. Перед извлечением (при необходимости) блоков из кожухов изделий их электропитание должно быть выключено (вилки должны быть вынуты из розеток).
2. Все блоки, питающиеся напряжением переменного тока более 42 В и постоянного тока более 110 В, должны быть заземлены.
3. При техническом обслуживании изделий, входящих в комплектацию РС-М, необходимо соблюдать меры безопасности, указанные в их эксплуатационной документации.

Порядок технического обслуживания РС-М

1. Оперативное ежедневное техническое обслуживание (ТО-1) включает:

внешний осмотр аппаратуры центрального устройства (системного блока ПЭВМ, монитора, принтера, клавиатуры, устройства бесперебойного питания, адаптеров и модемов) и проверку их функционирования в штатном режиме работы;

ознакомление с замечаниями дежурного оператора-радиометеоролога по работе системы «Метеор—Метеоячейка» и устранение имеющихся (выявленных) недостатков.

2. Периодическое недельное техническое обслуживание (ТО-2) включает:

протирку экрана монитора с использованием соответствующих средств;

обслуживание жесткого диска для проверки файловой системы (проверка выполняется с помощью системных утилит, входящих в базовый комплект Windows NT или Windows 2000, XP).

При проведении ТО-2 обслуживание РС-М производится в соответствии с его эксплуатационной документацией, указанной в Ведомости эксплуатационных документов.

3. Периодическое месячное техническое обслуживание (ТО-3) включает:

чистку манипулятора «мышь» и коврика для него с использованием спирта,

заправку принтера бумагой,

обслуживание жесткого диска с целью обнаружения физических дефектов на нем и оптимизации размещения файлов на диске.

При проведении ТО-3 обслуживание РС-М производится по его эксплуатационной документации.

4. Периодическое квартальное техническое обслуживание (ТО-4) включает:

периодическую сезонную техническую проверку встроенных тест-программ (перезагрузка программы),

протирку и чистку клавиатуры и головок дисководов с использованием спирта.

5. Периодическое сезонное обслуживание (ТО-5) производится два раза в год перед наступлением весенне-летнего и осенне-зимнего периодов эксплуатации метеооборудования аэродромов в соответствии с требованиями ПЭМОА-86 (Правила эксплуатации метеооборудования аэродромов гражданской авиации ПЭМОА-86. — Л.: Гидрометеопиздат, 1987) и включает:

проверку выполнения тест-программ,

чистку и подкраску (при необходимости) блоков аппаратуры РС-М.

Сезонное техническое обслуживание блоков, входящих в комплектацию РС-М, производится по их эксплуатационной документации, указанной в Ведомости эксплуатационных документов.

6. Специальное техническое обслуживание (ТО-6) системы производится при возникновении отказов, которые не могут устраняться обслуживающим РС-М инженерно-техническим персоналом, и включает средний ремонт или замену комплектующих изделий.

Проверка работоспособности системы РС-М производится при проведении каждого вида технического обслуживания (ТО-1, ТО-2, ТО-3, ТО-4, ТО-5, ТО-6). При этом под работоспособностью РС-М как измерительно-информационной системы подразумевается состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в заданных пределах.

При проведении периодического и оперативного технического обслуживания (ТО-1, ТО-5) производится частичная оценка работоспособности РС-М методом качественного сопоставления технических значений измеряемых величин, выдаваемых на средства отображения и в линии связи.

Во время специального технического обслуживания (ТО-6) производится полная проверка работоспособности РС-М. При этом проверяются:

- комплектность системы;
- внешний вид блоков и комплектующих изделий;
- работоспособность блоков, средств отображения и регистрации метеоинформации;
- алгоритм обработки метеовеличин, автоматически измеряемых системой и введенных вручную.

2.8.4. Рекомендации по эксплуатации

Общая рекомендация изготовителя АМРК «Метеор—Метеоячейка», которая соответствует общей мировой тенденции оперативной эксплуатации высокотехнологического оборудования, состоит в том, что техническое обслуживание АМРК должна производить специализированная фирма, рекомендованная изготовителем, а текущий технический контроль за работой АМРК должен осуществлять специалист, прошедший обучение и имеющий разрешение на работу в качестве инженера-эксплуатационника на АМРК «Метеор—Метеоячейка».

АМРК «Метеор—Метеоячейка» требует минимального технического обслуживания благодаря применению новейших технологий, выбору модулей и подсистем. Все подсистемы загружаются в рабочий режим автоматически, если включено электропитание и установлены все предохранители в шкафах радиолокатора. Доступ к управлению радиолокатором предоставляется по различным паролям.

Большинство узлов и систем АМРК не нуждается в техническом обслуживании (см. п.2.8.3); исключение составляют механические части и СВЧ изделия (в основном при их замене).

Экономический расчет показывает, что попытки ремонта изделия такой степени сложности плохо обученным или необученным техническим персоналом приводят к большим финансовым издержкам для владельца изделия.

Текущий (внеплановый) ремонт, включая замену отдельных составных частей (комплектующих, покупных изделий), должен производиться на АМРК специализированной организацией, заключившей договор на техническое обслуживание с владельцем АМРК.

Инженер по эксплуатации АМРК обязан осуществлять периодический контроль основных эксплуатационных технических характеристик АМРК «Метеор—Метеоячейка» и организацию поверки средств измерения.

Процедура получения информации на АМРК и передачи ее потребителям практически полностью автоматизирована. Специалист (техник-оператор) необходим для ввода исходных параметров и установки приоритетов на АМРК при проведении наблюдений, а также общего контроля за работой ПЭВМ и АМРК на случай аварийных ситуаций, вызванных отключением электричества и ответом на запросы неавтоматизированных служб метеоподразделений и УВД.

В случае отказов изделия АМРК «Метеор—Метеоячейка» во время гарантийного срока (в течение 5500 ч на протяжении одного года после ввода в эксплуатацию) поставщик несет ответственность за выход из строя аппаратуры и обязан устранить отказы и неисправности своими силами и средствами вплоть до замены аппаратуры в целом.

Гарантия не распространяется на случаи, когда дефекты в АМРК «Метеор—Метеоячейка» возникли вследствие несоблюдения условий эксплуатации, неподготовленности обслуживающего персонала и несанкционированного изменения конфигурации изделия.

2.8.5. Эксплуатационная документация

Эксплуатационная документация на русском языке изложена в соответствии с требованиями ГОСТ 2.601—95 (ЕСКД).

Руководство по эксплуатации (РЭ) состоит из следующих основных разделов:

Описание и работа (РЭ-1),

Использование по назначению (РЭ-2),

Техническое обслуживание (РЭ-3),

Текущий ремонт и др. (РЭ-4—7).

Кроме того, предъявляются:

формуляр;

инструкция по монтажу, настройке, регулированию и прогону;

ведомость ЗИП;

ведомость эксплуатационных документов.

ГЛАВА 3

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ДОПЛЕРОВСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРАХ

Разнообразие формы, фазового состояния и преимущественной ориентации частиц гидрометеоров позволяет использовать при радиолокационных наблюдениях методы поляризационной селекции для получения дополнительной информации о метеорологических объектах. Использование поляризационных параметров в сочетании с доплеровскими характеристиками отраженного сигнала позволяет исследовать не только динамические свойства метеорообъекта, но и особенности его микрофизической структуры.

Со времени первых научных публикаций по поляризационной селекции прошло более 30 лет. Можно ожидать, что в ближайшие пять лет теоретические разработки найдут применение в оперативной практике. Именно по этой причине в настоящей монографии излагаются основные сведения о поляризационных методах измерений характеристик облаков и осадков [1—4], а также приводится обзор последних экспериментальных результатов, приведенных в трудах ERAD [5—15].

3.1. Поляризационные параметры электромагнитных волн

Реальные источники излучения создают сферические волны, но на большом расстоянии от источника малую часть фронта сферической волны можно считать плоской.

Электромагнитная волна, падая на границу раздела двух сред, частично отражается от этой границы, частично проходит в глубь второй среды, поэтому в первой среде имеются падающая и отраженная волны, а во второй — преломленная волна.

В зависимости от направления векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ относительно поверхности Земли различают два вида поляризации — вертикальную и горизонтальную.

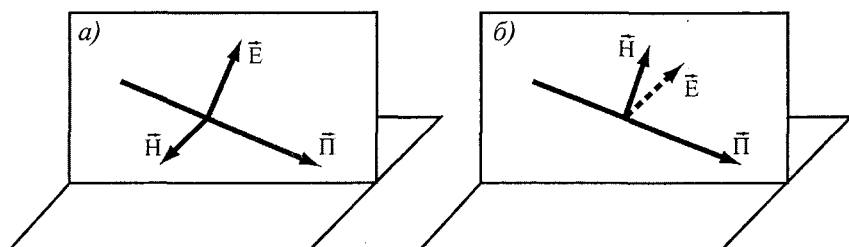


Рис. 3.1. Ориентация векторов напряженности поля при горизонтально и вертикально поляризованных волнах.

а — вертикально поляризованная волна, *б* — горизонтально поляризованная волна.

В случае вертикальной поляризации вектор напряженности электрического поля $\vec{E}$ лежит в плоскости падения волны, т. е. в плоскости, перпендикулярной плоскости раздела и проходящей через направление вектора Пойнтинга $\vec{P}$ падающей волны.

В случае горизонтальной поляризации в плоскости падения волны лежит вектор напряженности магнитного поля $\vec{H}$. Ориентация векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ при вертикальной и горизонтальной поляризации волн показана на рис. 3.1.

Электромагнитные волны, излучаемые антеннами метеорологических РЛС, относятся к классу плоских полностью поляризованных электромагнитных волн. В такой волне векторы электрического ($\vec{E}$) и магнитного ($\vec{H}$) полей в каждый момент времени ориентированы ортогонально друг другу, и концы их описывают в плоскости фронта волны одинаковые замкнутые кривые [1].

При рассмотрении поляризации волны обычно ограничиваются рассмотрением годографа только конца вектора $\vec{E}$, имея в виду его жесткую связь с вектором $\vec{H}$.

Плоская электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль оси z прямоугольной системы координат, в общем случае может иметь составляющие вдоль осей x и y в плоскости фронта волны. Для гармонического поля с частотой $\omega (+j\omega t)$ указанные составляющие могут быть представлены в виде

$$\dot{E}_x = E_x e^{j\varphi_x}, \quad \dot{E}_y = E_y e^{j\varphi_y},$$

где E_x и E_y — амплитуды, а φ_x и φ_y — фазовые углы соответствующих составляющих.

Вещественные части комплексных амплитуд

$$\operatorname{Re}[\dot{E}_x] = x, \quad \operatorname{Re}[\dot{E}_y] = y$$

можно рассматривать как координаты точки на плоскости $xу$.

В параметрической форме траектория конца вектора поля может быть задана уравнениями

$$x = E_x \cos(\omega t + \varphi_x), \quad (3.1)$$

$$y = E_y \cos(\omega t + \varphi_y). \quad (3.2)$$

Мощность P такой волны определяется выражением

$$P = \frac{E_x^2 + E_y^2}{2Z_0}.$$

Здесь Z_0 — волновое сопротивление (Ом) свободного пространства (вакуума):

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = 120\pi,$$

где μ и ε — магнитная и диэлектрическая проницаемость среды.

Величина

$$E_m = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

представляет собой полную амплитуду волны.

Для определения годографа вектора поля необходимо из уравнений (3.1) и (3.2) исключить время t . Для этого из уравнения (3.1) находим

$$\omega t = \left(\arccos \frac{x}{E_x} \right) - \varphi_x \quad (3.3)$$

и подставляем в выражение (3.2):

$$\frac{x^2}{E_x^2} + \frac{y^2}{E_y^2} - 2 \frac{xy}{E_y E_x} \cos(\varphi_y - \varphi_x) = \sin^2(\varphi_y - \varphi_x). \quad (3.4)$$

Выражение (3.4) представляет собой уравнение эллипса, которое при определенных условиях может вырождаться в уравнение прямой или окружности.

Поляризацию волны характеризуют формой эллипса поляризации, его ориентацией и направлением вращения вектора $\vec{E}$ (рис. 3.2). Форму эллипса поляризации определяют коэффициентом эллиптичности:

$$|K_r| = \frac{b}{a},$$

где a и b — большая и малая полуоси эллипса соответственно. Очевидно, что $0 \leq |K_r| \leq 1$.

Ориентацию поляризационного эллипса в плоскости фронта волны задают углом β между большой осью эллипса и горизонтальной осью выбранной прямоугольной системы координат. Этот угол изменяется в пределах $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.

Направление вращения вектора поля относительно наблюдателя, смотрящего вдоль направления распространения волны, учитывается

соответствующим знаком коэффициента эллиптичности. При вращении вектора поля по часовой стрелке величина K_r считается положительной, а волна — правополяризованной; при вращении вектора поля против часовой стрелки величина K_r считается отрицательной, а волна — левополяризованной.

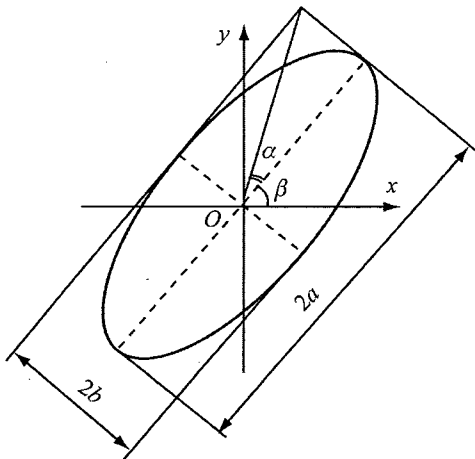


Рис. 3.2. Эллипс поляризации электромагнитной волны [1].

Обычно форму эллипса поляризации и направление его обхода вектором поля определяют углом эллиптичности

$$\alpha = \arctg K_r,$$

изменяющимся в пределах $-\frac{\pi}{4} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{4}$ для левого и правого вращения соответственно.

Очевидно, что амплитуды и фазы ортогональных линейно поляризованных компонентов E_x , E_y , φ_x и φ_y однозначно связаны с параметрами эллипса поляризации и углом его ориентации. Эта связь выражается соотношениями

$$K_r = \left(\frac{E_x^2 \sin^2 \beta - E_x E_y \sin 2\beta \cos \varphi + E_y^2 \cos^2 \beta}{E_x^2 \cos^2 \beta + \sin 2\beta \cos \varphi + E_y^2 \sin^2 \beta} \right)^{1/2}, \quad (3.5)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctg \frac{2E_x E_y \cos \varphi}{E_x^2 + E_y^2}, \quad (3.6)$$

где $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ — разность фаз ортогональных линейно поляризованных составляющих.

Рассмотрим условия, при которых эллиптически поляризованная волна вырождается в линейно поляризованную волну или в волну круговой поляризации.

Для того чтобы выражение (3.4) выродилось в уравнение окружности

$$\frac{x^2}{E_x^2} + \frac{y^2}{E_y^2} = 1,$$

необходимо, чтобы амплитуды и разность фаз линейно поляризованных ортогональных компонентов удовлетворяли соотношениям

$$E_y = E_x, \varphi = \varphi_y - \varphi_x = \pm 90^\circ.$$

У поляризованной по кругу волны коэффициент эллиптичности равен единице, а знак зависит от направления обхода вектором поля по-

ляризации окружности, как и у эллиптически поляризованной волны. Для круговой поляризации угол эллиптичности α равен $\pm 45^\circ$, а угол ориентации вектора поля β не имеет смысла.

У линейно поляризованной волны коэффициент эллиптичности и угол эллиптичности равны нулю, а угол ориентации вектора поля β может изменяться от 0 до 180° .

Выражение (3.4) становится уравнением прямой при условии $\Phi_y = \Phi_x$.

Таким образом, для того чтобы сформировать волну линейной поляризации, необходимо иметь две ортогональные линейно поляризованные составляющие с одинаковой фазой (разность их фаз равна нулю) и различными амплитудами с возможностью регулировки их соотношения.

Волна круговой поляризации может быть образована двумя ортогональными линейно поляризованными волнами с одинаковыми амплитудами и фазами, различающимися на $\pm 90^\circ$. При этом в зависимости от знака разности фаз поляризованная по кругу волна будет правого или левого вращения.

Для получения эллиптически поляризованных волн в качестве исходных необходимо брать две ортогональные линейно поляризованные волны в общем случае с различными амплитудами и фазами.

3.2. Форма, ориентация и движение гидрометеоров

Как известно, гидрометеоры бывают жидкими и твердыми. Среди частиц твердой фазы можно выделить четыре основные категории: градины, крупа, кристаллы и снежинки. *Форма всех гидрометеоров в той или иной мере отличается от сферической, что важно учитывать при оценке их поляризационных свойств.*

3.2.1. Форма

Форма жидких капель близка к сплюсненному сфероиду с отношением осей, зависящим от диаметра равновеликой сферы $D_e = (ab^2)^{1/3}$, где a — размер капли вдоль оси вращения, ориентированной близко к вертикали; b — поперечный размер.

Лучшей аппроксимацией зависимости отношения осей сфероида от диаметра равновеликой сферы является выражение [3]

$$a/b = 1 - 0,64D_e^{1,25}, \quad (3.7)$$

где D_e — в сантиметрах.

Наличие заряда на капле приводит к еще большему ее сплющиванию, в то же время в присутствии мощного электростатического поля, характерного для грозовых облаков, капля может «вытягиваться» вдоль направления поля, принимая форму вытянутого сфероида [3].

Для *частиц града* отношение минимального и максимального размеров $D_{\min}/D_{\max}$ колеблется в пределах 0,3—1,0 с наибольшей повторяемостью значений 0,75—0,8. У градин в отличие от водяных капель форма практически не зависит от их размеров.

Форма *частиц ледяной крупы* близка к сфероидальной или конической. Для крупы отношение минимального размера к максимальному изменяется в пределах 0,55—0,90 и в среднем возрастает при увеличении объема частицы.

Наиболее анизотропными по своей форме среди гидрометеоров являются *кристаллы*, наблюдающиеся в верхней части облаков при низких температурах. К самым распространенным формам кристаллов относятся пластинки, иголки, столбики. В [3] приводятся эмпирические соотношения, связывающие толщину пластинки h (см) с ее диаметром D (см):

$$h = AD^a,$$

а также диаметр игл и столбиков d (см) с их длиной l (см): (3.8)

$$d = Bl^b,$$

где A, a, B и b — коэффициенты, значения которых указаны в табл. 3.1.

Снежинки представляют собой агрегаты снежных кристаллов с неровной структурой поверхности, и их формы практически не повторяются. В настоящее время в литературе отсутствуют достоверные данные о распределении отношения $D_{\min}/D_{\max}$ для снежинок. На рис. 3.3 [14] представлены типичные формы снежинок разных размеров.

Таблица 3.1

Коэффициенты в формулах (3.8), связывающие минимальный и максимальный размеры для кристаллов различных типов (классификация Магоно и Ли [3])

Тип кристалла	A	a	B	b
Толстые пластинки	0,438	0,778		
Гексагональные пластинки	0,014	0,474	0,578	0,958
			0,153	0,786
Длинные столбики			0,035	0,437
Иглы			0,031	0,611

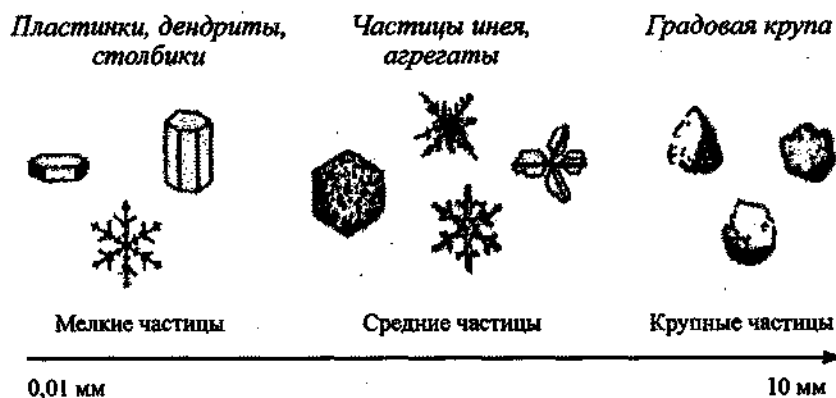


Рис. 3.3. Типичные формы снежинок разных размеров [14].

3.2.2. Ориентация

Среди других гидрометеоров наиболее упорядоченной ориентацией выделяются *водяные капли*. По данным экспериментов [3], для водяных капель распределение по ориентации оси вращения сплюснутого сфероида имеет довольно узкий максимум вблизи вертикального направления (в пределах 5°), ширина которого по уровню 0,5 составляет в среднем $10\text{--}20^\circ$.

Градовые частицы обладают значительно меньшей упорядоченностью ориентаций и, как правило, имеют либо вертикальную, либо горизонтальную преимущественную ориентацию. Ориентация частиц града и крупы с большим влагосодержанием при наличии водяной пленки на поверхности менее хаотична по сравнению с сухими градинами или частицами ледяной крупы.

Преимущественное направление ориентации оси вращения *кристаллов льда в виде пластинок* близко к вертикали, но ширина углового распределения относительно максимума больше, чем в случае водяных капель. Кристаллы в виде игл ориентированы, как правило, хаотически в горизонтальной плоскости.

3.2.3. Движение

Гидрометеорные частицы участвуют в трех типах движений: гравитационном падении под действием силы тяжести, движении в турбулизованной воздушной среде и движении в упорядоченных крупномасштабных конвективных потоках.

Гравитационная скорость падения частиц определяется их размером, фазовым состоянием и соотношением плотностей частицы и окружающего воздуха. Для водяных капель установившаяся скорость их падения в неподвижном воздухе определяется формулой

$$v(D) = 3,778D^{0,67}, \quad (3.9)$$

где D — в миллиметрах, v — в м/с.

Формула (3.9) достаточно хорошо описывает имеющиеся экспериментальные данные о скорости падения частиц вблизи поверхности Земли. Исключение составляют очень крупные капли — они значительно деформируются и крутизна кривой $v(D)$ уменьшается.

При этом можно утверждать, что гравитационная скорость падения жидких капель в неподвижном воздухе не превышает 10 м/с. В разреженном воздухе капли падают быстрее, и связь установившейся скорости падения с плотностью воздуха описывается выражением

$$v(D, \rho) = v(D, \rho_0) (\rho_0 / \rho)^{0,4}, \quad (3.10)$$

где ρ_0 — плотность воздуха при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 20 °С [3].

Для градовых частиц связь скорости гравитационного падения с диаметром имеет следующий вид [3]:

$$v(D) = 4,51D^{0,5}. \quad (3.11)$$

При этом для максимальных размеров градины 60 мм гравитационная скорость может достигать 35 м/с.

Малые скорости падения характерны для снежинок и кристаллических частиц: их гравитационная скорость падения не превышает 2—2,5 м/с.

Для снежинок имеют место следующие формулы:

$$v(D) = 2,07D^{0,31}, \quad (3.12)$$

$$v(D) = 8,8(\rho_s - \rho_a)D^{0,5}, \quad (3.13)$$

где D — в миллиметрах, v — в м/с, ρ_s и ρ_a — плотность снежинки и воздуха соответственно [3].

Помимо движения в поле силы тяжести гидрометеорная частица увлекается движением воздушных потоков в облаке. Воздушные движения в метеообъектах можно условно разделить на крупномасштабные и мелкомасштабные. Крупномасштабные движения определяются стратификацией поля ветра, а также наличием восходящих и нисходящих конвективных потоков, характерных для облаков вертикального развития.

3.3. Энергетические характеристики отражений от метеообъектов

3.1.3. Рассеяние единичными гидрометеорами

Напряженность поля $\vec{E}_x$, рассеянного единичным гидрометеором, облученным падающим полем $\vec{E}_0$ в дальней зоне, определяется формулой

$$\vec{E}_x = \frac{e^{ikR}}{R} \hat{f} \vec{E}_0, \quad (3.14)$$

где R — расстояние до рассеивателя; $\hat{f}$ — матричный коэффициент рассеяния, учитывающий поляризационные характеристики рассеянного поля [3]. Заметим, что напряженность поля падающей волны измеряется вблизи частицы, а напряженность отраженного поля — в точке наблюдения, удаленной на расстояние R .

Часто бывает удобно перейти от размерной матрицы $\hat{f}$ к безразмерной матрице $\hat{S}$:

$$\hat{S} = ik\hat{f}. \quad (3.15)$$

Теперь будем понимать под матрицей рассеяния единичного рассеивателя именно $\hat{S}$.

Энергетические характеристики рассеянного поля удобно выражать через матрицу эффективной площади рассеяния $\hat{\sigma}$. Ее элементы определяются формулой

$$\sigma_{ij} = 4\pi \frac{|E_{si}|^2}{|E_{0j}|^2} = \frac{4\pi}{k^2} |\hat{S}_{ij}|, \quad (3.16)$$

где i и j — номера компонентов векторов $\vec{E}_s$ и $\vec{E}_0$, а также строк и столбцов матриц $\hat{S}$ и $\hat{\sigma}$.

Самой простой и удобной моделью гидрометеора, позволяющей описывать энергетические и поляризационные характеристики рассеянного излучения, является модель эллипсоида вращения (сфероида) (рис. 3.4).

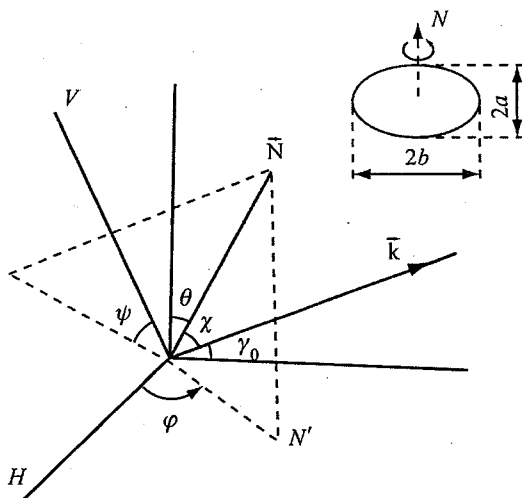


Рис. 3.4. Обозначение углов ориентации оси вращения гидрометеора $\vec{N}$ [3].

Если направление оси вращения сфероида совпадает с направлением одного из ортов линейного поляризационного базиса (горизонталь—вертикаль), то матрицы имеют диагональный вид, а деполяризация падающего поля при рассеянии отсутствует. Для вертикально ориентированного сфероида в базисе горизонталь—вертикаль матрицы $\hat{S}$ и $\hat{\sigma}$ записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}\hat{S} &= \begin{pmatrix} S_{HH} & 0 \\ 0 & S_{VV} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_b & 0 \\ 0 & S_a \end{pmatrix}, \\ \hat{\sigma} &= \begin{pmatrix} \sigma_{HH} & 0 \\ 0 & \sigma_{VV} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_b & 0 \\ 0 & \sigma_a \end{pmatrix}, \quad \sigma_{a,b} = \frac{4\pi}{k^2} |S_{a,b}|^2,\end{aligned}\quad (3.17)$$

где индекс H соответствует горизонтальной поляризации, индекс V — вертикальной; S_a — комплексная амплитуда обратного рассеяния при облучении линейно поляризованной волной с вектором $\vec{E}_0$, совпадающим по направлению с осью вращения сфероида; S_b — комплексная амплитуда обратного рассеяния при облучении полем с ортогональной к оси вращения линейной поляризацией.

В приближении Рэлея, когда выполняется неравенство $k\bar{a} |\sqrt{\epsilon}| \ll 1$, выражения для комплексных амплитуд S_a и S_b имеют наиболее простой вид:

$$S_{a,b} = ik^3 \frac{\bar{a}^3}{3} \frac{1}{L_{a,b} + \frac{1}{\epsilon - 1}}, \quad (3.18)$$

где $\bar{a}$ — радиус равновеликой сферы, ϵ — комплексная диэлектрическая проницаемость вещества частиц, $k = 2\pi/\lambda$, параметр $L_{a,b}$ определяется формой частицы [3].

Для вытянутого сфероида ($a > b$)

$$\begin{aligned}L_a &= \frac{1-e^2}{e^2} \left(\frac{1}{2e} \ln \frac{1+e}{1-e} - 1 \right), \quad L_b = \frac{1-L_a}{2}, \\ e &= \sqrt{1 - (b/a)^2}.\end{aligned}\quad (3.19)$$

Для сплюснутого сфероида ($a < b$)

$$L_a = \frac{1+f^2}{f^2} \left(1 - \frac{\arctg f}{f} \right), \quad L_b = \frac{1-L_a}{2},$$

$$f = \sqrt{(b/a)^2 - 1}. \quad (3.20)$$

Зависимость параметров L_a и L_b от отношения осей сфероида представлена на рис. 3.5.

Для сферических частиц $L_a = L_b = 1/3$, а диагональные элементы матриц $\hat{S}$ и $\hat{\sigma}$ описываются следующими формулами:

$$S_a = S_b = ik^3 \bar{a}^3 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2},$$

$$\bar{D} = 2\bar{a}, \quad (3.21)$$

$$\sigma_a = \sigma_b = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right|^2 \bar{D}^6,$$

и для эффективной площади рассеяния (ЭПР) частицы получается известное выражение [3].

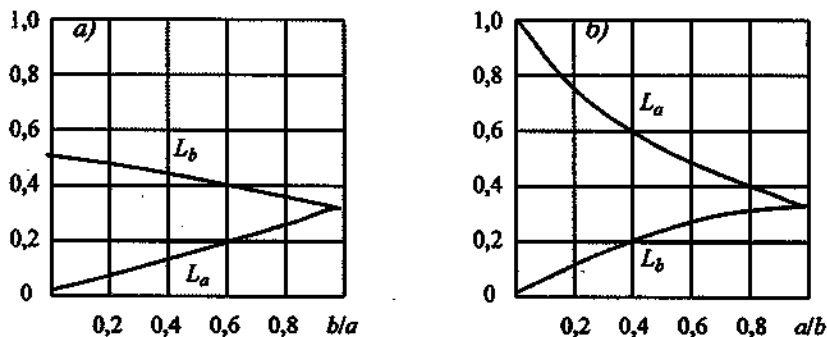


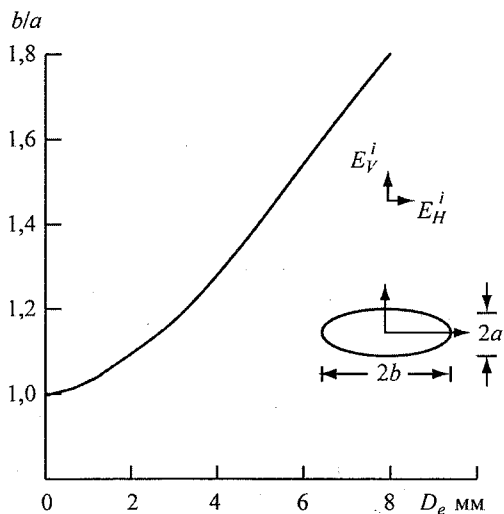
Рис. 3.5. Зависимость параметров L_a и L_b от отношения полуосей сфероида [3].

Из (3.18) и (3.19) следует, что различие ЭПР гидrometeorных частиц на ортогональных поляризациях зависит от фактора формы, определяемого L_a и L_b , а также от диэлектрических свойств частиц.

Важно подчеркнуть, что при фиксированной форме частицы разница между σ_a и σ_b возрастает по мере увеличения абсолютного значения ε . Вследствие этого водяные капли обладают более ярко выраженными поляризационными свойствами, чем ледяные частицы той же формы.

Таким образом, из приведенных зависимостей можно сделать следующий вывод: в спокойном воздухе и слабом статическом и вертикально ориентированном электрическом поле капли падают таким образом, что малая ось сфероида ориентирована вертикально и эксцентриситет сфероида зависит только от диаметра сферы эквивалентного объема. Таким образом, для капель, удовлетворяющих условию рассеяния Рэлея, мощность отраженного сигнала для горизонтально поляризованных волн должна быть больше.

Из рис. 3.6 видно, что при $D_e > 1$ мм капли сплющиваются, а отношение b/a , близкое к 2 : 1, достигается у капель, диаметр которых приближается к предельному значению, равному 8 мм, при котором они начинают распадаться. Диаметр сферы объемом $\pi D_e^3 / 6$, равный объему



эллипсоида $4\pi b^2 a / 3$, выбран в качестве параметра, потому что он описывает форму капли и, кроме того, используется для связи размера капли с установившейся скоростью ее падения (см. рис. 3.6) [16].

Рис. 3.6. Отношение длины большой оси к малой (b/a) как функция диаметра эквивалентного объема [16].

E_H^i — горизонтальная составляющая, E_V^i — вертикальная.

Для ледяных гидрометеоров разница между σ_a и σ_b возрастает по мере увеличения плотности льда и его увлажненности в соответствии с изменением показателя преломления. В приближении Рэлея можно рассчитывать комплексные амплитуды обратного рассеяния и ЭПР для некрупных жидких капель при условии выполнения неравенства $k\bar{a}|\sqrt{\epsilon}-1| \ll 1$, а также для кристаллов, составляющих облачность верхнего яруса и области наковален мощных кучевых облаков, вплоть до миллиметрового диапазона волн.

Другим предельным случаем, для которого можно получить простые аналитические формулы для энергетических характеристик рассеяния гидрометеоров, является случай выполнения неравенств

$$|\sqrt{\epsilon}-1| \ll 1, \quad |k\bar{a}-1| \ll 1, \quad (3.22)$$

определяющих условия применимости приближения Рэлея—Ганса [3].

Приближение Рэлея—Ганса оказывается справедливым при расчете характеристик рассеяния на крупных частицах при условии, что их диэлектрическая проницаемость близка к единице. Примером такого типа рассеивателей являются сухие снежинки.

В приближении Рэлея—Ганса для эффективной площади рассеяния (ЭПР) частицы можно записать

$$\sigma = (16\pi^3/\lambda^4)|\sqrt{\epsilon}-1|^2 V^2 f^2(x), \quad x = k\bar{a}, \quad (3.23)$$

где V — объем частицы, а $f(x)$ — фактор формы.

Следует отметить, что (3.23) выполняется для частиц любой формы и ЭПР не зависит от поляризации падающего поля. Этим объясняется тот факт, что для сухого снега практически отсутствует поляризационная зависимость ЭПР, несмотря на явно несферическую форму снежинок.

В общем случае множитель $f(x)$ может быть рассчитан для частиц произвольной формы. В случае сферы выражение для $f(x)$ имеет следующий вид [3]:

$$f(x) = 3(\sin 2x - 2x \cos 2x)/(2x)^3. \quad (3.24)$$

Для сферических однородных частиц с произвольным отношением их диаметра, диэлектрической проницаемости и длины волны при

оценке характеристик рассеяния необходимо использовать формулы точного решения задачи дифракции на сфере, впервые полученные Ми [3].

3.3.2. Рассеяние совокупностью гидрометеоров

Реальные метеорологические объекты представляют собой множественные радиолокационные цели, состоящие из большого числа рассеивателей. Если пренебречь многократным рассеянием, а также поглощением в гидрометеорах, то матрицу рассеяния ансамбля гидрометеоров можно представить в виде суммы матриц рассеяния единичных гидрометеоров $\hat{s}^{(l)}$, помноженных на фазовые коэффициенты, соответствующие различным удалениям гидрометеоров от МРЛ [3]:

$$\hat{S} = \sum_l \hat{s}^{(l)} e^{i\varphi_l}. \quad (3.25)$$

Элементы матрицы $\hat{S}$ являются случайными функциями времени вследствие относительных движений частиц, изменения их формы и ориентации. В приближении некогерентного рассеяния элементы матрицы эффективной площади рассеяния совокупностью гидрометеоров выражаются через элементы матриц $\hat{s}^{(l)}$ следующим образом:

$$\sigma_{ij}^{\Sigma} = \frac{4\pi}{k^2} |\overline{\hat{S}_{ij}}|^2 = \frac{4\pi}{k^2} \sum_l |\hat{s}_{ij}^{(l)}|^2 = \sum_l \sigma_{ij}^{(l)}, \quad (3.26)$$

где черта означает усреднение по времени.

Мощность P_{ij} принятого радиолокационного сигнала i -й поляризации при облучении метеорообъекта волной j -й поляризации в соответствии с уравнением радиолокации находится из выражения

$$P_{ij} = \frac{P_{\text{и}} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sum_l \sigma_{ij}^{(l)} e^{-2 \int_0^R \gamma_{ij}(R) dR}, \quad (3.27)$$

где $P_{\text{и}}$ — импульсная мощность излучения РЛС, G — коэффициент усиления антенны, R — расстояние до облучаемого объема, γ_{ij} — матричный коэффициент поглощения радиоволн в среде распространения.

Сумма $\sum_l \sigma_{ij}^{(l)}$ может быть выражена через матричный элемент удельной объемной ЭПР η_{ij} и эффективный рассеивающий объем $V_{\text{эф}}$:

$$\sum_l \sigma_{ij}^{(l)} = \eta_{ij} V_{\text{эф}}, \quad (3.28)$$

где

$$V_{\text{эф}} = R^2 \int_0^\infty \omega^2(R) dR \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^4(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (3.29)$$

Функция $\omega(R)$ описывает форму зондирующего импульса в пространстве; $F(\theta, \varphi)$ — нормированная диаграмма направленности антенны, форму которой в данном случае будем считать гауссовой.

Проинтегрировав (3.29), получим:

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^4(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi &= \frac{\pi \Omega_0 \Phi_0}{8 \ln 2}, \\ \int_0^\infty \omega^2(R) dR &= \frac{c\tau}{2} L_r, \end{aligned} \quad (3.30)$$

где L_r — коэффициент, учитывающий степень согласования формы зондирующего импульса с частотной характеристикой приемника МРЛ ($L_r < 1$) [3]; Ω_0 и Φ_0 — значения ширины диаграммы направленности в главных плоскостях по уровню половинной мощности, c — скорость света; τ — длительность импульса.

Удельная объемная ЭПР

$$\eta_{ij} = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right| Z_{ij} \quad (3.31)$$

может быть выражена через радиолокационную отражаемость, которая в общем случае определяется выражением

$$Z_{ij} = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |(\varepsilon - 1) / (\varepsilon + 2)|^2} \int_0^{D_{\text{max}}} \sigma_{ij}(D) N(D) dD, \quad (3.32)$$

где $N(D)$ — функция распределения частиц по размерам.

Для несферических частиц интегрирование в формуле (3.32) осуществляется также по формам частиц и их ориентации. Величина Z_{ij} является обобщенным выражением для радиолокационной отражаемости при рассеянии анизотропными частицами с учетом поляризаций излучаемой и принимаемой волн.

Для сферических частиц в линейном поляризационном базисе в рэлеевском приближении, согласно (3.21) получаем

$$Z_{ii} = Z_{jj} = Z = \int_0^{D_{\max}} D^6 N(D) dD, \quad (3.33)$$

что совпадает с классическим определением радиолокационной отражаемости.

В формуле (3.33) единицей измерения Z является $\text{мм}^6/\text{м}^3$. Чаще всего Z выражается в децибелах относительно $1 \text{ мм}^6/\text{м}^3$: $Z (\text{дБ}) = 10 \lg Z (\text{мм}^6/\text{м}^3)$.

3.4. Поляризационные характеристики метеорологических радиолокационных целей

3.4.1. Ковариационная матрица рассеяния метеобъектов

Матрица рассеяния $\hat{S}$ полностью определяет поляризационные свойства стабильной цели, но является лишь промежуточным звеном при переходе к флуктуирующим объектам, типичными представителями которых являются метеорологические образования.

Различные случаи поляризационной обработки флуктуирующих сигналов удобно рассматривать с помощью ковариационной матрицы рассеяния [4]

$$\hat{W} = \begin{pmatrix} \overline{|S_{11}|^2} & \overline{S_{11}S_{12}^*} & \overline{S_{11}S_{22}^*} \\ \overline{S_{11}^*S_{12}} & \overline{|S_{12}|^2} & \overline{S_{22}S_{12}^*} \\ \overline{S_{11}^*S_{22}} & \overline{S_{22}^*S_{12}} & \overline{|S_{22}|^2} \end{pmatrix}, \quad (3.34)$$

составленной из статистических параметров — вторых моментов элементов $\hat{S}_{ij}$ матрицы $\hat{S}$.

Если моделировать гидрометеоры сфероидами, то матрица рассеяния единичного гидрометеора в базисе горизонталь—вертикаль (условимся называть его *HV*-базисом) при произвольной ориентации гидрометеора можем быть записана в виде [4]

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} (\dot{S}_a - \dot{S}_b) \sin^2 \chi \sin^2 \psi + \dot{S}_b, & (\dot{S}_a - \dot{S}_b) \sin^2 \chi \sin \psi \cos \psi \\ (\dot{S}_a - \dot{S}_b) \sin^2 \chi \sin \psi \cos \psi, & (\dot{S}_a - \dot{S}_b) \sin^2 \chi \cos^2 \psi + \dot{S}_b \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

или в более общепотребительной эквивалентной форме [4]

$$\hat{S} = \frac{e^{i\Phi_0/2}}{2} \tilde{\sigma}^{1/2} \begin{pmatrix} 1 + \dot{\nu} \cos 2\psi & -\dot{\nu} \sin 2\psi \\ -\dot{\nu} \sin 2\psi & 1 - \dot{\nu} \cos 2\psi \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

где

$$\frac{e^{i\Phi_0/2}}{2} \tilde{\sigma}^{1/2} = (\dot{S}_a - \dot{S}_b) \sin^2 \chi + 2\dot{S}_b,$$

$$\dot{\nu} = \frac{(\dot{S}_b - \dot{S}_a) \sin^2 \chi}{(\dot{S}_b - \dot{S}_a) \sin^2 \chi + 2\dot{S}_b}.$$

В формулах (3.34)—(3.36) углы ψ и χ характеризуют ориентацию оси вращения сфероида $\vec{N}$ (см. рис. 3.4): ψ — это угол между проекцией вертикали и проекцией вектора $\vec{N}$ на плоскость фазового фронта волны; χ — угол между осью вращения сфероида $\vec{N}$ и направлением распространения волны $\vec{k}$ (направление вектора $\vec{k}$ определяется углом места антенны γ_0); $\dot{S}_a$ и $\dot{S}_b$ — комплексные амплитуды обратного рассеяния при ориентации электрического вектора падающей волны вдоль ($\dot{S}_a$) и поперек ($\dot{S}_b$) оси вращения сфероида; $\pi \tilde{\sigma} / k^2$ — полная ЭПР гидрометеора (ср. с формулой (3.17)); параметр $\dot{\nu}$ характеризует форму и диэлектрическую проницаемость частицы.

Переход от матрицы рассеяния единичного гидрометеора $\hat{S}$ к ковариационной матрице $\hat{W}$ ансамбля гидрометеоров предусматривает

усреднение по размерам, формам и ориентации отражающих частиц. Осуществив такое усреднение, из (3.34) можно получить следующие выражения для элементов ковариационной матрицы $\tilde{W}$ в HV -базисе [4]:

$$\begin{aligned} \langle |S_{HH}|^2 \rangle &= \frac{N}{4} \langle \tilde{\sigma} \rangle \left[1 + 2 \operatorname{Re} I_2 r \cos 2\bar{\psi} + \frac{I_1}{2} (1 + r^4 \cos 4\bar{\psi}) \right], \\ \langle |S_{VV}|^2 \rangle &= \frac{N}{4} \langle \tilde{\sigma} \rangle \left[1 - 2 \operatorname{Re} I_2 r \cos 2\bar{\psi} + \frac{I_1}{2} (1 + r^4 \cos 4\bar{\psi}) \right], \\ \langle |S_{HV}|^2 \rangle &= \frac{N}{8} \langle \tilde{\sigma} \rangle I_1 (1 - r^4 \cos 4\bar{\psi}), \\ \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle &= -\frac{N}{4} \langle \tilde{\sigma} \rangle \left(I_2^* r \sin 2\bar{\psi} + \frac{I_1}{2} r^4 \sin 4\bar{\psi} \right), \\ \langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle &= -\frac{N}{4} \langle \tilde{\sigma} \rangle \left(I_2^* r \sin 2\bar{\psi} - \frac{I_1}{2} r^4 \sin 4\bar{\psi} \right), \\ \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle &= -\frac{N}{4} \langle \tilde{\sigma} \rangle \left[1 - 2i \operatorname{Im} I_2 r \cos 2\bar{\psi} - \frac{I_1}{2} (1 + r^4 \cos 4\bar{\psi}) \right]. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Здесь N — число частиц в рассеивающем объеме; угловые скобки означают осреднение по ансамблю гидрометеоров; интегральные параметры

$$I_1 = \frac{\langle \tilde{\sigma} |\dot{v}|^2 \rangle}{\langle \tilde{\sigma} \rangle}, \quad I_2 = \frac{\langle \tilde{\sigma} \dot{v} \rangle}{\langle \tilde{\sigma} \rangle} \quad (3.38)$$

учитывают особенности распределения гидрометеоров по размерам, формам и ориентации по углу χ ; параметр $r = \exp(-2\sigma_\psi^2)$ характеризует степень упорядоченности ориентации частиц и связан со среднеквадратической шириной углового распределения $\sigma_\psi \sin \chi$.

Заметим, что поляризационные параметры отраженного сигнала в гораздо меньшей степени зависят от распределения ориентаций отражателей по углу χ , чем по углу ψ .

С учетом вышеуказанных обозначений наиболее компактно ковариационная матрица ансамбля гидрометеоров выглядит в круговом поляризационном базисе. Ее члены суть

$$\begin{aligned}\langle |S_{RR}|^2 \rangle &= \langle |S_{LL}|^2 \rangle = \frac{N}{4} \langle \tilde{\sigma} \rangle I_1, \\ \langle |S_{RL}|^2 \rangle &= \frac{N}{4} \langle \tilde{\sigma} \rangle, \\ \langle S_{RR} S_{RL}^* \rangle &= -\frac{N}{4} \langle \tilde{\sigma} \rangle r I_2 e^{-i2\bar{\Psi}}, \\ \langle S_{LL} S_{RL}^* \rangle &= -\frac{N}{4} \langle \tilde{\sigma} \rangle r I_2 e^{i2\bar{\Psi}}, \\ \langle S_{RR} S_{LL}^* \rangle &= -\frac{N}{4} \langle \tilde{\sigma} \rangle r^4 I_1 e^{-i4\bar{\Psi}}.\end{aligned}\tag{3.39}$$

В формулах (3.39) индексы R и L используются для обозначения круговой поляризации правого (right hand) и для левого (left hand) вращения соответственно. Из выражений (3.39) очевиден физический смысл параметра

$$I_1 = \frac{\langle |S_{RR}|^2 \rangle}{\langle |S_{RL}|^2 \rangle} = \frac{\langle |S_{LL}|^2 \rangle}{\langle |S_{RL}|^2 \rangle} = CDR.\tag{3.40}$$

Он представляет собой деполяризационное отношение в круговом базисе (circular depolarization ratio).

3.4.2. Дифференциальная отражаемость

На практике измерение всех элементов ковариационной матрицы рассеяния метеообъектов представляет собой весьма сложную задачу, поэтому обычно при измерениях ограничиваются оценкой лишь некоторых из них, а также их отношений. В последние годы наибольшее количество экспериментальных данных получено по результатам измерения дифференциальной отражаемости в HV -базисе.

Под дифференциальной отражаемостью понимается отношение мощностей отраженного сигнала на горизонтальной и вертикальной поляризациях, выраженное в децибелах:

$$Z_{DR} \text{ (дБ)} = 10 \lg (P_H / P_V) = 10 \lg \left(\langle |S_{PP}|^2 \rangle / \langle |S_{VV}|^2 \rangle \right) = \frac{Z_\Gamma}{Z_B} = \frac{Z_H}{Z_V}. \quad (3.41)$$

Техника измерения дифференциальной отражаемости применительно к задачам радиолокационной метеорологии впервые была предложена Селигой и Бринги в 1976 г. [4] для повышения эффективности радиолокационного измерения осадков. Широкое распространение метода обусловлено относительной простотой его технической реализации, не очень обременительными требованиями к поляризационной развязке антенно-волноводного тракта и отсутствием энергопотерь в отличие от ситуации, когда измеряется деполяризационное отношение и один из компонентов отраженного сигнала значительно меньше другого. Для измерения дифференциальной отражаемости обычно используются одноканальные МРЛ, содержащие поляризационный переключатель, как правило, ферритовый, обеспечивающий череспериодное переключение ортогональных поляризаций одновременно на передачу и прием, т. е. когда для каждой посылки импульсов поляризации излучаемой и принимаемой отраженной волны совпадают.

3.4.3. Линейное деполяризационное отношение

Другим важным поляризационным параметром, измеряемым в *HV*-базисе, является линейное деполяризационное отношение (*LDR*), представляющее собой отношение мощностей перекрестного и согласного компонентов отраженного сигнала:

$$LDR \text{ (дБ)} = 10 \lg \frac{P_{HV}}{P_{HH}} = 10 \lg \frac{\langle |S_{HV}|^2 \rangle}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle}. \quad (3.42)$$

В соответствии с (3.41)

$$LDR \cong \frac{1}{2} I_1 (1 - r^4 \cos 4\bar{\psi}). \quad (3.43)$$

Из (3.43) видно, что деполяризация отраженного сигнала отсутствует в том случае, когда частицы сферические ($I_1 = 0$) или когда все отражатели ориентированы вдоль направления вектора электрического поля ($r = 1, \bar{\psi} = 0$). При полностью хаотической ориентации рассеивателей ($r = 0$) LDR не обращается в нуль и полностью определяется степенью несферичности отражающих частиц.

Измерения Z_{DR} и LDR могут хорошо дополнять друг друга. Действительно, мелкие водяные капли, имеющие практически сферическую форму, и хаотически ориентированные твердые гидрометеоры невозможно различить по величине дифференциальной отражаемости, поскольку для обоих типов рассеивателей $Z_{DR} = 0$ дБ. В то же время для сферических капель деполяризация отсутствует, а для твердых несферических гидрометеоров она может быть существенной.

3.4.4. Дифференциальная фаза

Отраженные от метеороbjectов сигналы на вертикальной и горизонтальной поляризации различаются не только по мощности, но и по фазе. Разность фаз обусловлена тем, что в процессе отражения от несферических частиц волны вертикальной и горизонтальной поляризации получают разные фазовые добавки (их разность будем обозначать δ), и постоянные распространения горизонтально и вертикально поляризованных волн в анизотропной среде также различны.

Таким образом, дифференциальный фазовый сдвиг Φ_{DP} (в градусах) является суммой двух слагаемых:

$$\Phi_{DP} = \delta + \left[2 \operatorname{Re} \int_0^R (k_H - k_V) dR_{\text{тр}} \right] (\sin^2 \chi) r, \quad (3.44)$$

или

$$\Phi_{DP} = \arg (R_0^{HV}), \quad (3.44 \text{ а})$$

где k_H и k_V — постоянные распространения на горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно при условии, что все частицы ориентированы вертикально или горизонтально, а волновой вектор облучаемой волны перпендикулярен оси вращения гидрометеора; $R_{\text{тр}}$ — длина трассы распространения; $r = \exp(-2\sigma_{\psi}^2)$ — параметр, характери-

зующий степень упорядоченности ориентаций гидрометеоров (при хаотической ориентации гидрометеоров $r = 0$ и $\Phi_{DP} = \delta$); $(\sin^2 \chi)$ описывает изменение дифференциальной фазы с изменением угла места антенны; R_0^{HV} — коэффициент корреляции между горизонтальными и вертикальными сигналами временного ряда в интервале 0 (см. (3.46)).

Величина $K_{DP} = \text{Re}(k_H - k_V)$ называется удельным дифференциальным фазовым сдвигом и рассчитывается по формуле

$$K_{DP} = \text{Im} \left\{ \frac{2\pi}{k^2} \int_0^{D_{\max}} [S'_H(D) - S'_V(D)] N(D) dD \right\}, \quad (3.45)$$

или

$$K_{DP} = 0,5 \frac{d}{dR_{\text{тр}}} \Phi_{DP} \text{ (град./км)}. \quad (3.45a)$$

В (3.45) $S'_H(D)$ и $S'_V(D)$ — комплексные амплитуды рассеяния гидрометеоров в направлении вперед для горизонтальной и вертикальной поляризации.

Для жидкокапельных облаков и осадков при зондировании под скользящими углами сомножитель $(\sin^2 \chi)r$ обычно близок к единице, и его, как правило, не учитывают при интерпретации результатов измерений на горизонтальных трассах.

Дифференцируя Φ_{DP} по дальности, нетрудно получить оценку дифференциального фазового сдвига K_{DP} при условии, что величина δ или производная $d\delta/dR$ малы (для длинноволновой части сантиметрового диапазона это условие выполняется в большинстве ситуаций). Величина K_{DP} представляет особый интерес, поскольку весьма жестким образом связана с водностью и интенсивностью осадков по трассе.

Зрнич и Сачидананда [4] установили следующее регрессионное соотношение между I (мм/ч) и K_{DP} (град./км) (формула (3.45)):

$$I \cong 20,35 (K_{DP})^{0,866}.$$

Теми же авторами было показано, что для интенсивных осадков оценка I по величине K_{DP} дает лучшую точность, чем оценка по совокупности Z и Z_{DR} и тем более по $Z - I$ -соотношению.

Другим преимуществом оценивания интенсивности осадков I по фазовому сдвигу K_{DP} является более высокая эффективность работы алгоритма по осадкам смешанного фазового состава (например, дождь с градом). Немаловажное достоинство фазовых измерений состоит в том, что для их проведения не требуется абсолютная калибровка радиолокатора по мощности.

Величину дифференциального фазового сдвига можно использовать для идентификации зон града. В силу того что для частиц града по сравнению с водяными каплями характерна менее упорядоченная ориентация, меньшие их концентрация и диэлектрическая проницаемость, при сравнимых значениях отражаемости Z для дождя и града величина K_{DP} для града будет гораздо меньше. Теоретическое и экспериментальное подтверждение этого вывода содержится в работе [4].

Фазовые поляризационные измерения дают возможность оценивать по величине K_{DP} значения полного ослабления A и дифференциального ослабления A_{DP} радиоволн по трассе распространения, которые необходимо учитывать для коррекции измеренных значений радиолокационной отражаемости и дифференциальной отражаемости. Ниже приводятся простые соотношения, связывающие фазовый сдвиг K_{DP} (град./км) с ослаблением на горизонтальной поляризации A_H (дБ/км) и дифференциальным ослаблением A_{DP} (дБ/км), полученные в работе [4]:

$$A_H = 0,05K_{DP}, \quad A_{DP} = 0,0139K_{DP} \quad \text{при } \lambda = 5,5 \text{ см.}$$

3.4.5. Коэффициент взаимной корреляции

Коэффициент взаимной корреляции (кросс-корреляции) согласных компонентов отраженного сигнала на горизонтальной и вертикальной поляризации представляет собой по сути коэффициент взаимной корреляции диагональных элементов матрицы рассеяния метеорообъекта:

$$\rho_{HV} = \frac{\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle^{1/2} \langle |S_{VV}|^2 \rangle^{1/2}} = \frac{|R_0^{HV}|}{\sqrt{|R_0^H| |R_0^V|}}. \quad (3.46)$$

Исследования показали, что для большинства метеообъектов модуль коэффициента ρ_{HV} весьма близок к единице и отличие его от единицы тем большее, чем больше дисперсия форм и дисперсия ориентаций отражающих несферических частиц. Наличие эффектов нерезлеевского рассеяния также способствует уменьшению величины $|\rho_{HV}|$. Согласно теоретическим оценкам и экспериментальным данным, полученным в S -диапазоне, величина $|\rho_{HV}|$ для дождей изменяется в пределах от 0,9 до 1,0 с наиболее вероятными значениями порядка 0,96—0,98. Для града коэффициент $|\rho_{HV}|$ может принимать существенно меньшие значения, что может служить важным диагностическим признаком наличия града в облаке. В нижней части слоя таяния также отмечается хорошо выраженный минимум $|\rho_{HV}|$.

Другой важной особенностью использования поляризационных параметров является яркий контраст между радиолокационными сигналами от метеообъектов и подстилающей поверхности в терминах ρ_{HV} . Если для метеообъектов величина ρ_{HV} близка к единице, то для подстилающей поверхности она приближается к нулю [4]. Немаловажным достоинством измерения коэффициента ρ_{HV} является то, что на его величину не влияют эффекты распространения в гидрометеорной среде, искажающие в общем случае оценки Z_{DR} и LDR .

3.4.6. Поляризационные характеристики метеообъектов в круговом базисе

Интерес к использованию круговой поляризации излучения возник в связи с необходимостью подавления мешающих отражений от гидрометеоров при радиолокационном обнаружении сосредоточенных целей на фоне выпадающих из облаков осадков. Для гидрометеоров сферической формы отраженный сигнал на согласной круговой поляризации полностью отсутствует, а вся мощность отраженного сигнала как бы «перекачивается» в его перекрестный компонент. На практике в силу несферичности гидрометеоров и влияния деполяризации при распространении в анизотропной среде полного подавления сигнала на согласной поляризации не происходит, особенно при значительных удалениях от РЛС, когда эффекты распространения накапливаются. Таким образом, уровень отраженного сигнала на согласной поляризации или круговое деполяризационное отношение служат мерой несферичности отражающих частиц, что может быть использовано для их идентификации.

С помощью некогерентных РЛС с любой поляризацией, обеспечивающих излучение волн с круговой поляризацией левого или правого вращения и одновременный прием ортогональных компонентов отраженного сигнала, измерялись поляризационные параметры радиолокационных сигналов метеобъектов на волнах 1,6; 3,1 и 10,3 см. В качестве оцениваемых поляризационных параметров служили круговые деполаризационные отношения, т. е. отношение мощностей согласного и перекрестного компонентов отраженного сигнала в круговом базисе (см. формулы (3.39)):

$$CDR = \frac{\langle |S_{RR}|^2 \rangle}{\langle |S_{RL}|^2 \rangle} = \frac{\langle |S_{LL}|^2 \rangle}{\langle |S_{RL}|^2 \rangle} = I_1, \quad (3.47)$$

а также комплексный коэффициент взаимной корреляции ортогональных компонентов отраженного сигнала, равный коэффициенту взаимной корреляции диагональных и недиагональных элементов матрицы рассеяния метеоцели в круговом базисе:

$$\rho_R = \frac{\langle S_{RR} S_{RL}^* \rangle}{\langle |S_{RR}|^2 \rangle^{1/2} \langle |S_{RL}|^2 \rangle^{1/2}} = -r \frac{|I_2|}{\sqrt{I_1}} e^{i(\arg I_2 - 2\bar{\Psi})} \quad (3.47a)$$

либо

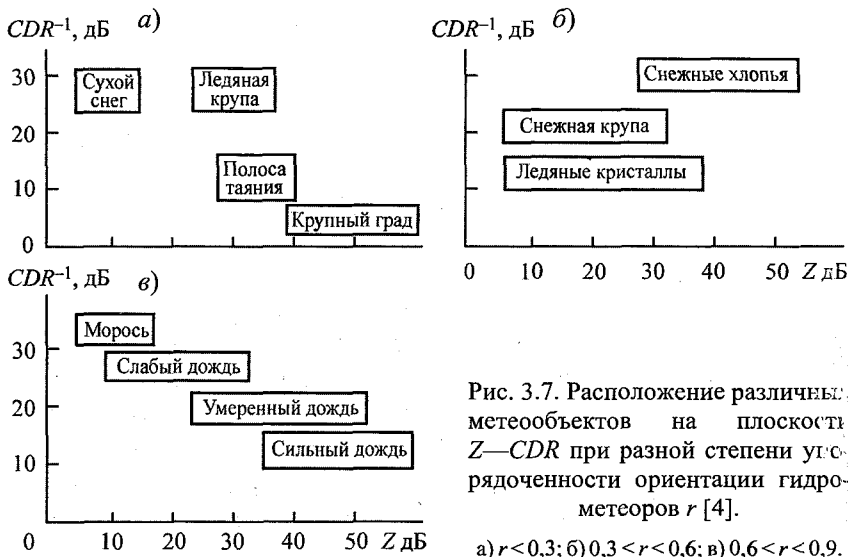
$$\rho_L = \frac{\langle S_{LL} S_{RL}^* \rangle}{\langle |S_{LL}|^2 \rangle^{1/2} \langle |S_{RL}|^2 \rangle^{1/2}} = -r \frac{|I_2|}{\sqrt{I_1}} e^{i(\arg I_2 + 2\bar{\Psi})}.$$

В соответствии с определением I_1 (см. формулу (3.38)) данный параметр характеризует главным образом форму отражающих частиц и не зависит от характера ориентации гидрометеоров по углу ψ . Действительно, при $\chi = \pi/2$ для монодисперсного облака частиц $I_1 = |(S_a - S_b)/(S_a + S_b)|^2$. Для сферических частиц $S_a = S_b$ и $I_1 = 0$. Анализ величин ρ_R и ρ_L показывает, что их модуль определяется главным образом величиной параметра r , характеризующего степень упорядоченности ориентации частиц.

Для рэлеевских частиц $\arg I_2$ близок к нулю, и фазы коэффициентов взаимной корреляции определяются величиной угла преимущественной ориентации в плоскости фазового фронта волны. Отсюда вытекает немаловажное преимущество измерений в круговом поляризационном базисе: основные физические параметры облака гидрометеоров — средняя форма частиц, степень упорядоченности ориентации и направление преимущественной ориентации — могут быть определены раздельно из независимых измерений. В то же время на линейной поляризации такого разделения произвести не удастся (см. выражение (3.43) для Z_{DR} и LDR).

Поляризационные измерения в круговом базисе не получили широкого распространения главным образом из-за существенного паразитного влияния эффектов распространения в гидрометеорной среде.

Величина кругового деполаризационного отношения очень чувствительна к изменению медианного диаметра D_0 или интенсивности дождя I . Расположение различных метеообъектов на плоскости Z — CDR при различной упорядоченности ориентации гидрометеоров r по данным экспериментов представлено на рис. 3.7. Из рисунка видно,



что метеообъекты различных классов хорошо разделяются по совокупности параметров Z , CDR и r . Обращают на себя внимание повышенные значения CDR (больше 10 дБ) для крупного града.

3.5. Поляризационные параметры радиолокационных антенн и их влияние на прием отраженных сигналов

Для излучения высокочастотной энергии и приема отраженных сигналов используется одна и та же антенна МРЛ. С точки зрения поляризационных свойств антенна удовлетворяет принципу взаимности: она полностью принимает волну такой поляризации, какую имеет излучаемая волна. Если на антенну поступает волна, поляризованная ортогонально излучаемой, то антенна оказывается «слепой» и принимать такую волну не будет. Так, например, антенна вертикальной поляризации не принимает горизонтально поляризованное колебание; антенна круговой поляризации, излучающая волну с правым направлением вращения вектора поля, не сможет принимать такую же волну левого вращения. В случае антенны эллиптической поляризации эллипс собственной поляризации и эллипс «слепой» поляризации ориентированы ортогонально друг другу, а направления обхода векторов противоположны [1].

Если поляризация антенны не согласована с поляризацией электромагнитного поля (угол между соответствующими линейными поляризациями составляет $\delta/2$), то мощность, принятая антенной, будет описываться формулой

$$P_{\text{пр}} = AP \cos^2 \frac{\delta}{2}, \quad (3.48)$$

где P — плотность потока мощности, A — эффективная площадь антенны. Угол δ (которым можно характеризовать различие не только линейных, но и любых поляризаций) называется углом поляризационной эффективности антенны. Поскольку плотность потока мощности равна векторному произведению векторов напряженности электрического и магнитного полей ($\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$) и каждый из этих векторов повернут на

угол $\delta/2$ относительно соответствующих поляризационных осей антенны, множитель $\cos(\delta/2)$ входит в формулу (3.48) в квадрате.

Из выражения (3.48) следуют рассмотренные выше частные случаи: при согласованной поляризации ($\delta = 0$) антенна принимает максимальную мощность $P_{\text{пр макс}} = AP$, при слепой поляризации ($\delta/2 = 90^\circ$) приема нет.

Радиолокационные сигналы, отраженные от метеорологических целей, являются частично поляризованными. Они содержат составляющую с регулярной поляризацией и неполяризованный компонент, который характеризуется хаотическим вращением вектора напряженности поля. Соотношение между поляризованной и неполяризованной составляющими определяется степенью поляризации

$$m = \frac{\Pi_{\text{п}}}{\Pi_{\text{п}} + \Pi_{\text{н}}},$$

где $\Pi_{\text{п}}$ и $\Pi_{\text{н}}$ — плотность потока мощности поляризованной и неполяризованной составляющей соответственно.

Хаотическое движение вектора напряженности поля можно представить двумя составляющими: согласованной с поляризацией антенны и не согласованной с ней. Поэтому любая антенна принимает только половину мощности неполяризованной волны:

$$P_{\text{н}} = \frac{1}{2} AP_{\text{н}}.$$

Частично поляризованная волна создает на выходе антенны мощность

$$P_{\text{пр}} = AP \left[m \cos^2 \frac{\delta}{2} + \frac{1}{2} (1 - m) \right],$$

обусловленную обеими указанными составляющими.

Мощность, определяемая первым слагаемым, обусловлена полностью поляризованной составляющей и зависит от поляризационных параметров антенны. Мощность, определяемая вторым слагаемым, обусловлена неполяризованной составляющей, всегда постоянна для

волны с определенной степенью поляризации и не зависит от поляризационных свойств антенны.

В частном случае, когда собственная поляризация антенны и поляризация принимаемой волны совпадают (угол $\delta = 0$), принимаемая мощность будет описываться формулой

$$P_{\text{пр}} = \frac{1}{2} AP(1+m),$$

которая для полностью поляризованной волны приобретает вид

$$P_{\text{пр}} = AP.$$

С изменением угла поляризационной эффективности антенны принимаемая ею мощность меняется (рис. 3.8). Для каждой степени поляризации эхо-сигналов имеют место максимум принимаемой мощности при согласованной поляризации антенны и принимаемой волны ($\delta = 0$) и минимум при ортогональной поляризации ($\delta/2 = 90^\circ$). В частности, для полностью поляризованных сигналов ($m = 1$) получаем $P_{\text{пр макс}} = AP$ и $P_{\text{пр мин}} = 0$.

Для неполяризованных сигналов ($m = 0$) $P_{\text{пр}} = 1/2 AP$ и принимаемая мощность не зависит от поляризационных параметров антенны.

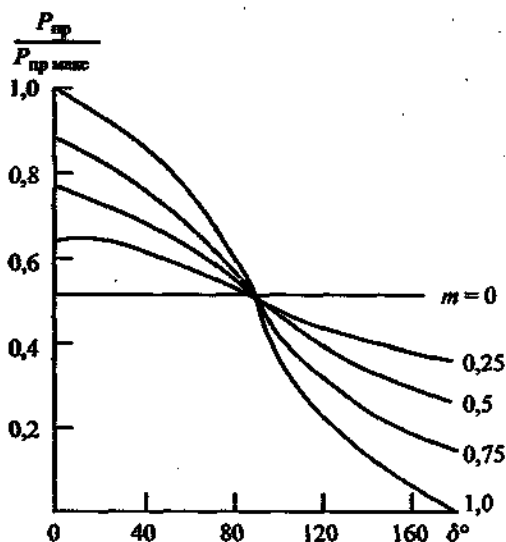


Рис. 3.8. Зависимость относительной мощности $P_{\text{пр}}/P_{\text{пр макс}}$ частично поляризованной волны, отраженной от облаков и осадков, от угла поляризационной эффективности антенны δ при различной степени поляризации волны m [1].

3.6. Физическая интерпретация поляризационных характеристик метеобъектов

В практике радиометеорологических исследований хорошо зарекомендовал себя метод дифференциальной отражаемости, предусматривающий измерение отношения мощностей отраженного сигнала на горизонтальной и вертикальной поляризации. Величина отношения мощностей Z_{DR} является важным информативным признаком, позволяющим проводить разделение несферических хорошо ориентированных частиц и гидрометеоров, форма которых близка к сферической или хаотическим образом ориентированных в пространстве.

При дифференциальной отражаемости $Z_{DR} = 1$ выполняется одно из трех условий:

- частицы являются сферическими,
- несферические частицы обладают хаотичной ориентацией,
- направление преимущественной ориентации несферических частиц составляет 45° к вертикали.

Как уже отмечалось, отличительной особенностью жидкокапельных гидрометеоров является высшая степень упорядоченности их ориентации и близость направления преимущественной ориентации к вертикали. Величина Z_{DR} в этом случае определяется главным образом несферичностью капель, которая, в свою очередь, определяется их размером. По измеренному значению Z_{DR} можно оценить среднюю форму капель и их средний размер. Если величина Z_{DR} будет измерена с точностью 0,1—0,2 дБ, это позволит примерно в 3 раза повысить точность определения интенсивности осадков по сравнению с измерением только Z .

Для метеобъектов Z_{DR} обычно изменяется в пределах 0—3 дБ. Сравнительно небольшой диапазон изменчивости Z_{DR} накладывает повышенные требования к точности измерения Z_{DR} . Можно утверждать, что требуемая точность оценки Z_{DR} , при которой метод дифференциальной отражаемости имеет практическое значение, составляет 0,1—0,2 дБ. Реализовать такую точность оценки Z_{DR} возможно при сравнительно небольших временах накопления, используя череспериодное переключение поляризации на передачу при условии хорошей коррелированности двух последовательных отраженных импульсов.

Наличие в ДМРЛ режима поляризационной селекции предполагает ряд преимуществ.

1. Появляется возможность разделения жидкой и твердой фаз в облаках и осадках по значению Z_{DR} . Высокие положительные значения Z_{DR} характеризуют крупнокапельную жидкую фазу [2]. Близкие к нулю или отрицательные значения Z_{DR} являются признаком твердых хаотически ориентированных частиц. Зоны больших положительных значений Z_{DR} выше нулевой изотермы могут указывать на локализацию восходящих потоков с выносом крупных капель в верхнюю часть облака, а близкие к нулю или отрицательные значения Z_{DR} ниже нулевой изотермы предположительно обусловлены интенсивными нисходящими потоками [2].

2. Повышается точность измерения осадков как за счет знания их фазы, так и за счет дополнительной информации о распределении капель по размерам, поскольку форма жидких капель довольно жестко связана с их размером.

На рис. 3.9 представлены зависимости Z_{DR} от интенсивности осадков (мм/ч) на длинах волн 5,6; 3,2 и 0,86 см, рассчитанные для однопараметрического распределения капель по размерам типа Маршалла—Пальмера. Из рисунка видно, что в миллиметровом диапазоне длин волн дифференциальная отражаемость дождя значительно меньше, чем в сантиметровом, и слабо зависит от медианного диаметра и интенсивности дождя.

3. Наличие информации о высоте расположения нулевой изотермы позволяет более точно оценивать вклад гравитационной скорости гидрометеоров в измеряемую радиальную скорость, а значит, способствует более точному оцениванию скоростей воздушных потоков.

4. Величина Z_{DR} является неплохим предиктором града. Близкие к нулю или небольшие отрицательные значения Z_{DR} в сочетании с высокими значениями радиолокационной отражаемости Z достаточно надежно свидетельствуют о наличии града. Таким образом, результаты поляризационных измерений как бы восполняют отсутствие данных измерений на другой длине волны.

С помощью Z_{DR} можно идентифицировать градовые зоны в Сб. При усреднении по ансамблю частиц интегральное значение Z_{DR} оказывается слабо положительным для мелкого града и слабо отрицатель-

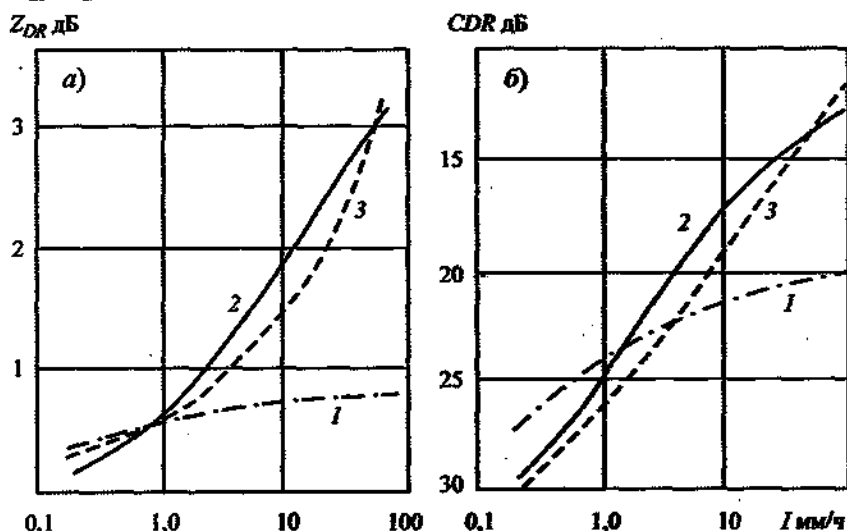


Рис. 3.9. Зависимость дифференциальной отражаемости Z_{DR} (а) и кругового деполаризационного отношения CDR (б) от интенсивности дождя I на длинах волн 0,86 см (1), 3,2 см (2) и 5,6 см (3) [4].

ным для крупного. При одном и том же значении Z для града и дождя Z_{DR} для града будет меньше, чем для дождя.

По измеренным значениям Z и Z_{DR} в 10-сантиметровом диапазоне МРЛ вывод о наличии града можно сделать при выполнении неравенства

$$Z - f(Z_{DR}) > 0,$$

где

$$f(Z_{DR}) = \begin{cases} 60 & \text{при } Z_{DR} < 1,74 \text{ дБ,} \\ 19Z_{DR} + 27 & \text{при } 0 < Z_{DR} < 1,74 \text{ дБ,} \\ 27 & \text{при } Z_{DR} \leq 0,1 \text{ дБ.} \end{cases}$$

Таким образом, если неравенство $(Z - f(Z_{DR})) > 0$ выполняется, то это свидетельствует о выпадении града, а если нет, то о выпадении дождя.

Для кристаллических частиц в области сильно переохлажденных вершин облаков $Z_{DR} \geq 5$ дБ за счет сильной анизотропии и высокой степени упорядоченности ориентации кристаллов.

В снегопадах Z_{DR} меньше, чем в дождях, в силу малоупорядоченной ориентации снежинок и меньшего показателя преломления. Пример пространственного распределения Z и Z_{DR} в вертикальном сечении кучево-дождевого облака приведен на рис. 3.10 [4].

5. По величине Z_{DR} легко идентифицируются мощные отражения от местных предметов. Для местных предметов значение Z_{DR} чаще всего велико по модулю и отрицательно по знаку. Следовательно, поляризационная селекция может помочь в тех случаях, когда режекция сигналов местных предметов в частотной области, предусмотренная в ДМРЛ, оказывается неэффективной.

Введение режима поляризационной селекции в ДМРЛ, т. е. череспериодного переключения поляризации на передачу, не приводит к существенному усложнению аппаратуры и системы обработки ДМРЛ. Для обеспечения требуемой точности оценки Z_{DR} необходимы дополнительные меры по симметрированию диаграммы направленности, что достигается специальной конструкцией облучающего рупора. Что касается системы обработки, то ее незначительное усложнение сводится лишь к введению операции череспериодного вычитания в амплитудном канале на выходе приемника.

Оценим статистическую точность измерения Z_{DR} при череспериодном переключении поляризации в основном режиме работы ДМРЛ.

Зависимость среднеквадратического отклонения оценки Z_{DR} от длины выборки и коэффициента межпериодной корреляции

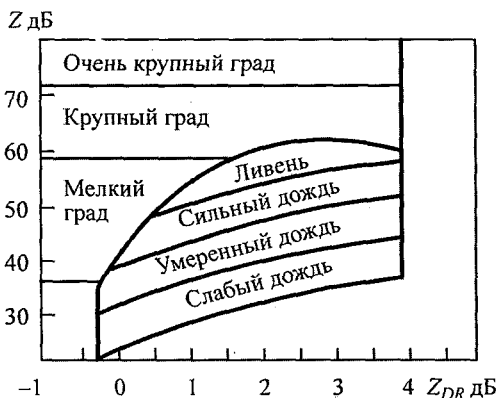


Рис. 3.10. Пример пространственного распределения радиолокационной отражаемости Z и дифференциальной отражаемости Z_{DR} в вертикальном сечении кучево-дождевого облака [4].

рассматривалась в работе [2]. По ее результатам можно сделать вывод о том, что при измерении ширины доплеровского спектра скоростей для отражающего объекта в диапазоне от 0,5 до 4 м/с, что соответствует изменению коэффициента корреляции в С-диапазоне от 0,99 до 0,68, статистическая ошибка оценивания Z_{DR} в указанном цикле накопления лежит в пределах 0,2—0,6 дБ. Эта ошибка может быть уменьшена на этапе вторичной обработки в 1,5—3 раза при дополнительном осреднении оценок Z_{DR} по пространству в пределах стандартных ячеек представления.

Рассмотрим, следуя работе [2], влияние череспериодного переключения поляризации на работу канала измерения скорости. Прежде всего, следует отметить, что поляризационная модуляция с частотой повторения импульсов никак не отразится на качестве режекции сигналов, отраженных от местных предметов, поскольку спектральные искажения, связанные с поляризационной селекцией, являются высокочастотными и не попадают в спектральную полосу отражений от местных предметов.

Комплексные амплитуды отраженного от метеообъекта радиолокационного сигнала на горизонтальной и вертикальной поляризации можно записать в виде

$$\begin{aligned} H(t) &= A \sum_j S_{HH}^{(j)} e^{2i\tilde{k}_H r_j(t)}, \\ V(t) &= A \sum_j S_{VV}^{(j)} e^{2i\tilde{k}_V r_j(t)}, \end{aligned} \quad (3.49)$$

где суммирование осуществляется по совокупности отражателей в пределах рассеивающего объема; A — коэффициент, зависящий от энергетических параметров РЛС и дальности зондируемого объема; r_j — расстояние между МРЛ и j -м отражателем; $\tilde{k}_H$ и $\tilde{k}_V$ — постоянные распространения на горизонтальной и вертикальной поляризации, отличающиеся друг от друга вследствие анизотропии среды распространения; $S_{HH}^{(j)}$ и $S_{VV}^{(j)}$ — диагональные элементы матрицы рассеяния для j -го отражателя.

Если для простоты моделировать гидрометеоры эллипсоидами вращения, то матрица обратного рассеяния гидрометеора, ориентация оси вращения которого относительно направления распространения и вектора электрического поля при линейной поляризации облучения задается углами α и θ (рис. 3.11), имеет вид, аналогичный (3.35) [2]:

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (S_a - S_b) \sin^2 \alpha \sin^2 \theta + S_b & (S_a - S_b) \sin^2 \alpha \sin \theta \cos \theta \\ (S_a - S_b) \sin^2 \alpha \sin \theta \cos \theta & (S_a - S_b) \sin^2 \alpha \cos^2 \theta + S_b \end{pmatrix}, \quad (3.50)$$

где S_a — комплексная амплитуда рассеяния при облучении линейно поляризованной волной с вектором $\vec{E}_0$, совпадающим с осью вращения эллипсоида; S_b — комплексная амплитуда рассеяния при облучении перекрестно поляризованным полем.

В приближении Рэлея выражения для S_a и S_b определяются формулой (3.18).

При череспериодном переключении поляризации на передачу на выходе приемника ДМРЛ мы имеем комплексный коэффициент межпериодной корреляции входного сигнала ρ_0 по совокупности перекрывающихся пар импульсов в соответствии с алгоритмом парных импульсов [16].

При череспериодном переключении поляризации на передачу на выходе приемника мы имеем комплексную величину

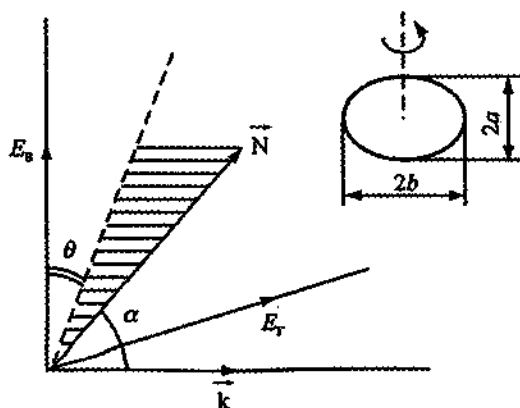


Рис. 3.11. Ориентация оси вращения гидрометеора $\vec{N}$ относительно горизонтали, вертикали и направления распространения волны [2].

$$\rho = \frac{B_{HV} + B_{VH}}{P_H + P_V}, \quad (3.51)$$

где

$$B_{HV} = \langle H^*(t)V(t+T) \rangle, \quad B_{VH} = \langle V^*(t)H(t+T) \rangle, \quad (3.52)$$

$$P_H = \langle |H|^2 \rangle, \quad P_V = \langle |V|^2 \rangle,$$

T — период следования импульсов, $\langle \rangle$ — знак усреднения. Подставив (3.49) в (3.52), нетрудно получить:

$$\rho = \gamma \rho_0, \quad (3.53)$$

$$\gamma \cong \frac{2R \left[\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle e^{-2(\tilde{k}_H - \tilde{k}_V)R} \right]}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle \langle |S_{VV}|^2 \rangle}, \quad (3.54)$$

где R — расстояние до центра рассеивающего объема.

Множитель γ , описывающий эффект поляризационной модуляции, является вещественным числом, меньшим единицы. Следовательно, при формировании оценки коэффициента корреляции по перекрывающимся парам импульсов поляризационная модуляция не приводит к искажению фазы комплексного коэффициента корреляции и смещению оценки доплеровской скорости. В то же время имеет место некоторое расширение спектра за счет того, что $\gamma < 1$.

В S -диапазоне ошибки в определении ширины доплеровского спектра скоростей за счет поляризационной модуляции для жидкокапельных облаков пренебрежимо малы, а для кристаллических облаков не превышают 2 м/с. Таким образом, режим поляризационной селекции в ДМРЛ не приводит к дополнительным затратам времени, и информация о Z_{DR} может быть получена параллельно с информацией о спектральных моментах.

Дифференциальные характеристики распространения, определяемые экспоненциальным множителем $\exp[2i(\tilde{k}_H - \tilde{k}_V)R]$, могут быть использованы для извлечения полезной физической информации.

Разность постоянных распространения $\tilde{k}_H - \tilde{k}_V$ описывается следующей формулой [2]:

$$\tilde{k}_H - \tilde{k}_V = (k_H - k_V) \left(1 - e^{-2\sigma_\alpha^2} \cos 2\bar{\alpha} \right) \frac{e^{-2\sigma_\theta^2}}{2}, \quad (3.55)$$

где величины k_H и k_V определяются из выражения

$$k_{H,V} = k + \frac{2\pi}{k} \int_0^\infty f_{H,V} n(D) dD \quad (3.56)$$

($f_{H,V}$ — амплитуды рассеяния вперед гидрометеора для горизонтальной поляризации при условии, что направление оси вращения частицы совпадает с одним из ортов поляризационного базиса).

Для рэлеевских частиц амплитуда рассеяния вперед равна амплитуде обратного рассеяния и $f_{H,V} = (i/k) S_{a,b}$, где $S_{a,b}$ определяются формулой (3.18), а разность $k_H - k_V$ является комплексной величиной, причем мнимая часть этой разности характеризует разность коэффициентов ослабления ортогональных поляризаций при распространении в среде с гидрометеорами ΔA (дБ/км) — *дифференциальное ослабление*:

$$\Delta A = 8,686 \operatorname{Im} (k_H - k_V), \quad (3.57)$$

а вещественная часть $\Delta\Phi$ (град/км) — *дифференциальный фазовый сдвиг* между ортогональными поляризациями:

$$\Delta\Phi = (180/\pi) \operatorname{Re} (k_H - k_V). \quad (3.58)$$

В первом приближении можно считать, что в сантиметровом диапазоне длин волн величины ΔA и $\Delta\Phi$ прямо пропорциональны частоте излучения и интенсивности осадков. Твердокапельные частицы с низким влагосодержанием являются чисто фазосдвигающей средой, где величиной ΔA по сравнению с $\Delta\Phi$ можно пренебречь.

В формуле (3.55) величина $\bar{\alpha}$ представляет собой преимущественное направление ориентации оси вращения эллипсоидальных частиц по углу α ; σ_α и σ_θ — среднеквадратические значения ширины распределения ориентации гидрометеоров по углу α и θ соответственно (см. рис. 3.10).

для оценки интенсивности осадков I (мм/ч) алгоритмов разного типа. Кроме классического алгоритма $I(Z_H)$ можно применять алгоритмы, включающие два параметра $I(Z_H, Z_{DR})$ и $I(Z_{DR}, K_{DP})$ вместо $I(K_{DP})$ (см. п. 3.4.4).

Как показали экспериментальные исследования, поляризационные измерения в C -диапазоне, в отличие от измерений в S -диапазоне, нуждаются в коррекции эффектов распространения радиоволн [5—8]. Этих эффектов два: ослабление в осадках и появление резонансных скачков отражаемости в жидких осадках в средних широтах.

Алгоритмы с использованием K_{DP} невосприимчивы к эффектам ослабления в осадках радиоволн C -диапазона, но зависят от точности их оценки. Совершенно очевидно, что и алгоритмы, включающие Z_H и Z_{DR} , только тогда будут эффективны, когда абсолютные погрешности их измерения будут не хуже следующих: $\Delta Z_H < 1$ дБ, $\Delta Z_{DR} < 0,2$ дБ. Отсюда вытекают и повышенные требования к калибровке оперативных ДМРЛ (см. п.3.9).

3.7.2. Схема коррекции ослабления в C -диапазоне

Изложим, следуя публикациям А. В. Рыжкова и его коллег [5—8], схему коррекции ослабления в C -диапазоне.

В C -диапазоне отношение α_H между удельным ослаблением A_H и удельной дифференциальной фазой K_{DP} может сильно изменяться, а в общепринятом поляриметрическом методе коррекции ослабления [6] считается, что отношение α_H практически не меняется.

Большая изменчивость коэффициента α_H в C -диапазоне приписывается эффектам сильного резонансного рассеяния, которые воздействуют на A_H и K_{DP} при размерах капель дождя больше 5 мм. Зависимости нормализованных A_H и K_{DP} от диаметра капель дождя равного объема показаны на рис. 3.12. В результате резонансного рассеяния отношение A_H / K_{DP} быстро увеличивается при диаметре капель больше 5 мм, а затем имеет тенденцию к уменьшению на верхнем конце спектра дождевых капель.

Для оценки изменчивости отношения α_H моделировались A_H и K_{DP} на основе 25 920 распределений капель по размерам (drop size distributions, DSD), полученных в Оклахоме. Поскольку вертикальный размер крупных капель меньше горизонтального, можно ожидать, что резонансные эффекты при вертикальной поляризации менее заметны,

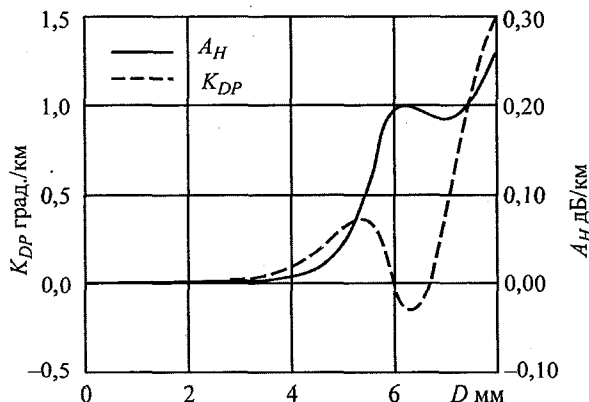


Рис. 3.12. Зависимость A_H и K_{DP} от диаметра D равнообъемных капель дождя в С-диапазоне ($T = 20^\circ\text{C}$) [6].

чем при горизонтальной, и отношение α_V между удельным ослаблением A_V при вертикальной поляризации и K_{DP} меньше и менее изменчиво, чем α_H .

Графики разброса значений $A_{H,V}$ относительно K_{DP} для всех DSD и для DSD с $Z_{DR} < 3$ дБ приведены на рис. 3.13. Большинство точек для DSD без крупных капель ($Z_{DR} < 3$ дБ) концентрируются на прямых линиях, и это означает, что отношения $A_{H,V}/K_{DP}$ весьма устойчивы для таких DSD. Точки вне этих «линейных кластеров» приписываются резонансным эффектам, обусловленным наличием крупных капель. Очевидно, что графики рассеяния A_V — K_{DP} меньше поддаются резонансным эффектам, чем графики рассеяния A_H — K_{DP} , особенно для $Z_{DR} < 3$ дБ. Кроме того, для данного K_{DP} ослабление при горизонтальной поляризации заметно больше, чем при вертикальной, т. е. дифференциальное ослабление $A_{DP} = A_H - A_V$ положительное.

Анализ графиков рассеяния, представленных на рис. 3.13, показывает, что главная проблема коррекции ослабления в С-диапазоне — это случайные «горячие точки» вдоль луча, где $Z_{DR} > 3$ дБ и коэффициенты $\alpha_{H,V}$ очень изменчивы. Обычно такие изменения $\alpha_{H,V}$ происходят в относительно небольшом числе селекторов дальности, но общий эффект этой изменчивости сильный, потому что интенсивность осадков и ослабление там высоки.

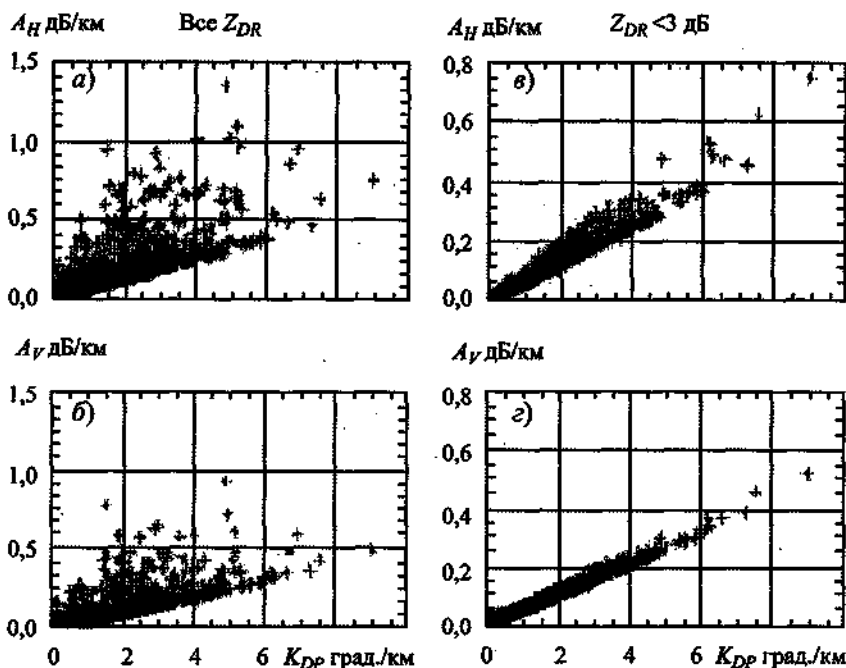


Рис. 3.13. Графики рассеяния $A_{H,V}-K_{DP}$, построенные по данным 25 920 DSD, измеренных в Центральной Оклахоме [6].

а и б — включены все DSD, *в и г* — включены только DSD с $Z_{DR} < 3$ дБ.

В предлагаемом методе коррекции принимается, что отношение $\alpha_{H,V}$ является величиной переменной и неизвестной внутри «горячих пятен», тогда как за их пределами оно постоянно и равно своему среднему климатологическому значению α_0 , которое зависит только от температуры при данной зависимости формы от размера для капель дождя.

Идентификация «горячих пятен» — критический компонент алгоритма. Они могут быть обнаружены по превышению порога $Z_{DR} = 3$ дБ при условии, что дифференциальная отражаемость скорректирована на дифференциальное ослабление. Альтернативно можно использовать порог $Z_t = 45$ дБZ после приближенной коррекции коэффициента радиолокационной отражаемости на ослабление по простой формуле

$$\Delta Z = \alpha_0 \Phi_{DP}. \quad (3.61)$$

Действительно, график рассеяния $Z - Z_{DR}$ в C -диапазоне, смоделированный по измеренным DSD, показывает, что эти пороги обнаружения Z и Z_{DR} вполне совместимы (рис. 3.14). Далее будет использоваться порог по радиолокационной отражаемости $Z_t = 45$ дБZ.

Согласно традиционному методу ZPHI, используется схема Хитчфелда—Бордана с интегральным ограничением на основе полного приращения дифференциальной фазы в интервале дальности (r_0, r_m) с радиозом:

$$\int_{r_0}^{r_m} A_H(s) ds = \int_{r_0}^{r_m} \alpha_H K_{DP}(\dot{s}) ds = \frac{\alpha_H}{2} \Delta \Phi_{DP}(r_0, r_m), \quad (3.62)$$

где

$$\Delta \Phi_{DP}(r_0, r_m) = \Phi_{DP}(r_m) - \Phi_{DP}(r_0). \quad (3.63)$$

Радиальный профиль $A_H(r)$ можно оценить по ослабленной радиолокационной отражаемости Z_a и $\Delta \Phi_{DP}$, используя формулу

$$A_H(r) = \frac{[Z_a(r)]^b [10^{0,1b\alpha_H \Delta \Phi_{DP}(r_0, r_m)} - 1]}{I(r_0, r_m) + [10^{0,1b\alpha_H \Delta \Phi_{DP}(r_0, r_m)} - 1] I(r, r_m)} \quad (3.64)$$

где

$$I(r_0, r_m) = 0,46b \int_{r_0}^{r_m} [Z_a(s)]^b ds \quad (3.65)$$

и

$$I(r, r_m) = 0,46b \int_r^{r_m} [Z_a(s)]^b ds. \quad (3.66)$$

Параметр b — это показатель степени в соотношении $A_H = aZ^b$.

В предлагаемом усовершенствованном методе ZPHI предполагается, что

$$\alpha_H(r) = \alpha_0 + \Delta \alpha(r), \quad (3.67)$$

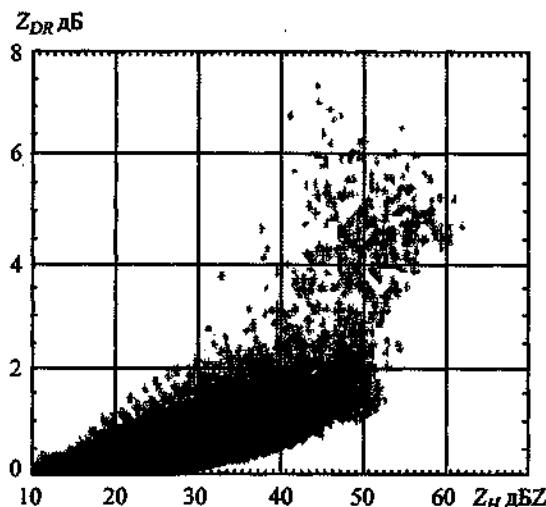


Рис. 3.14. График рассеяния $Z_H - Z_{DR}$ в С-диапазоне, смоделированный по измеренным DSD ($T = 20^\circ \text{C}$) [6].

где α_0 — постоянное климатологическое значение, а $\Delta\alpha$ — произвольная в селекторах, внутри которых отражаемость Z превышает порог $Z_t = 45$ дБЗ. Поскольку величина $\Delta\alpha$ может изменяться от луча к лучу, она считается постоянной для всех селекторов, в которых $Z > Z_t$ для любого конкретного луча.

Соответственно уравнение ограничения (3.62) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \int_{r_0}^{r_m} A_H(s) ds &= \alpha_0 \int_{r_0}^{r_m} K_{DP}(s) ds + \Delta\alpha \int_{Z > Z_t} K_{DP}(s) ds = \\ &= \frac{\alpha_0}{2} \Delta\Phi_{DP}(r_0, r_m) + \frac{\Delta\alpha}{2} \Delta\Phi_{DP}(Z > Z_t). \end{aligned} \quad (3.68)$$

Здесь интегрирование во втором интеграле выполняется в селекторах дальности, где $Z > Z_t$, и $\Delta\Phi_{DP}(Z > Z_t)$ есть приращение Φ_{DP} в селекторах с $Z > Z_t$.

Из уравнения (3.68) следует, что в основной формуле (3.64) для традиционного метода ZPHI член $\alpha_H \Delta\Phi_{DP}(r_0, r_m)$ следует заменить на член $\alpha_0 \Delta\Phi_{DP}(r_0, r_m) + \Delta\alpha \Delta\Phi_{DP}(Z > Z_t)$.

Это означает, что для процедуры ограничения следует вместо одного использовать два измеренных параметра дифференциальной фазы: $\Delta\Phi_{DP}(r_0, r_m)$ и $\Delta\Phi_{DP}(Z > Z_t)$. В результате радиальный профиль A_H становится зависимым от значения $\Delta\alpha$. Соответствующий коэффициент $\Delta\alpha$ должен определяться по итерационному процессу приращивания $\Delta\alpha$ пока не будет удовлетворено следующее условие:

$$\int_{Z < Z_t} A_H(s, \Delta\alpha) ds = \frac{\alpha_0}{2} \Delta\Phi(Z < Z_t), \quad (3.69)$$

где интегрирование выполняется в селекторах с $Z < Z_t$ и

$$\Delta\Phi_{DP}(Z < Z_t) = \Delta\Phi_{DP}(r_0, r_m) - \Delta\Phi_{DP}(Z > Z_t). \quad (3.70)$$

Подобную процедуру можно проделать для коррекции ослабления радиолокационной отражаемости, измеряемой при вертикальной поляризации. Использование вертикально поляризованного компонента радиолокационного сигнала особенно рекомендуется для азимутов с существенным ослаблением, где дифференциальное ослабление также существенно и чувствительность радиолокатора выше при вертикальной поляризации.

Усовершенствованный метод коррекции ослабления был применен к данным С-диапазона, полученным летом 2005 г. на юге центрального Онтарио на С-полосном поляриметрическом радиолокаторе, разработанном Environment Canada. Было исследовано пять штормов, наблюдавшихся 9 и 14 июня, 14 июля, 2 и 19 августа. Все пять штормов были либо с градом, либо с существенными осадками, создававшими значительное ослабление излучения в С-диапазоне. Максимальная дифференциальная фаза, измеренная в каждом из пяти штормов, колебалась от 100 до 300°. Соответствующее максимальное ослабление в радиусе наблюдений 250 км изменялось при горизонтальной поляризации приблизительно от 10 до 20 дБ.

Коэффициент радиолокационной отражаемости корректировался только при горизонтальной поляризации. На основе результатов моде-

лирования A_H и K_{DP} в C -диапазоне для $Z_H < 45$ дБZ, $T = 20$ °C и формы капель дождя, определенных Brandes et al. (2002), для параметра α_0 в уравнениях (3.67)—(3.69) было использовано значение 0,06 дБ/град. В уравнениях (3.64)—(3.66), следуя Bringi and Chandrasekar (2001), использовалось $b = 0,8$.

Согласованность между полями интенсивности дождя, полученными по K_{DP} , и скорректированной Z_H использовалась для проверки правильности работы предложенного метода коррекции ослабления.

Интенсивности дождя рассчитывались по формулам

$$I(K_{DP}) = 25,1 |K_{DP}|^{0,777} \text{ sign}(K_{DP}) \quad (3.71)$$

и

$$I(Z_H) = 1,69 \cdot 10^{-2} 10^{0,0717 Z_H}, \quad (3.72)$$

выведенным по 25 920 выборкам DSD для C -диапазона. В уравнениях (3.71) и (3.72) K_{DP} выражено в град./км, а Z_H — в дБZ.

Для примера на рис. 3.15 показаны поля $I(K_{DP})$ и $I(Z_H)$ для шторма, наблюдавшегося 19 августа 2005 г., который вызвал наводнение в Торонто. Очевидно, что интенсивность дождя, оцененная по некорректированной Z_H , сильно занижена по сравнению с $I(K_{DP})$ (см. рис. 3.15 б). Интенсивность дождя остается отрицательно смещенной, если используется традиционный алгоритм ZPHI с фиксированным $\alpha_0 = 0,06$ дБ/град. (см. рис. 3.15 в). Лучшее согласие между $I(K_{DP})$ и $I(Z_H)$ достигается при использовании нового метода ZPHI (см. рис. 3.15 г). Среднее значение $\Delta\alpha$ в области ливневых осадков с $Z_H > 45$ дБZ близко к 0,04 дБ/град. Следовательно, в ядрах дождевых ячеек на рис. 3.15 отношение A_H/K_{DP} составляет приблизительно 0,10 дБ/град.

Анализ пяти явлений с дождем показывает, что различие между смещениями, связанными с ослаблением коэффициента радиолокационной отражаемости при оценке стандартным и усовершенствованным методами ZPHI может достигать 4 дБ, что приведет приблизительно к удвоенной разнице соответствующих значений интенсивности дождя.

Таким образом, сильные эффекты резонансного рассеяния в C -диапазоне вызывают высокую изменчивость отношения $A_{H,Y}/K_{DP}$ для капель дождя больше 5 мм.

Глава 3. Поляризационные методы измерений в доплеровских метеорологических радиолокаторах

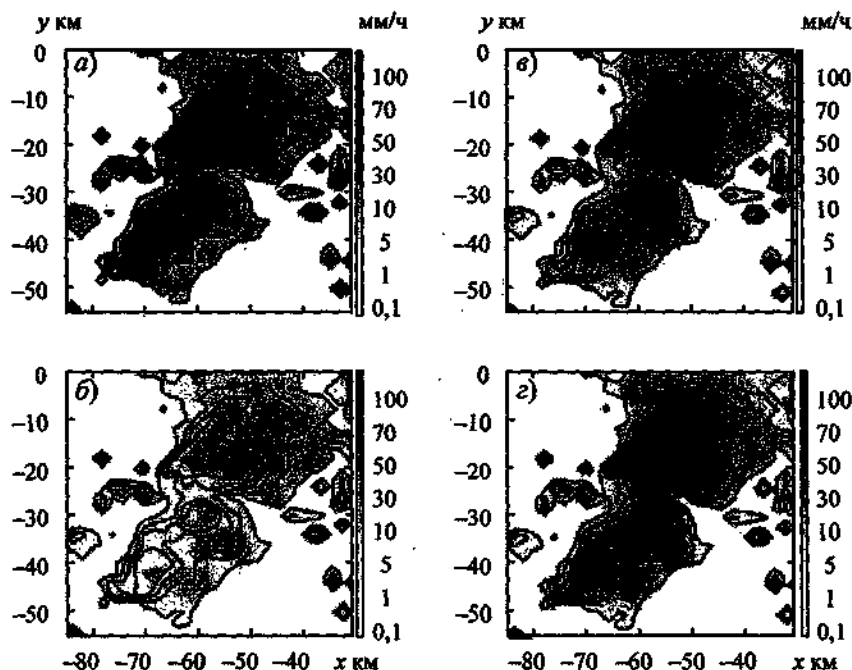


Рис. 3.15. Поля интенсивности осадков, оцененные различным образом.

a — по K_{DP} , *б* — по некорректированной Z_{H^*} , *в* — по Z_H с коррекцией на ослабление обычным методом ZPHI, *г* — по Z_H с коррекцией на ослабление усовершенствованным методом ZPHI.

Данные были получены 19 августа 2005 г. на С-полосном поляриметрическом радиолокаторе Environment Canada на юге центрального Онтарио [6].

Такая неопределенность негативно воздействует на качество коррекции ослабления, если не применять вместо стандартного алгоритма профилирования дождя ZPHI предлагаемый алгоритм.

3.7.3. Оценка точности алгоритмов интенсивности осадков на базе поляриметрических измерений в С-диапазоне

В [13] поляриметрические алгоритмы оценки интенсивности осадков получены в результате обработки распределений капель по размерам (15 000 выборок), измеренных оптическим дисдрометром.

Для подтверждения радиолокационных поляриметрических оценок интенсивности осадков использовалась сеть из 73 дождемеров в бассейне реки Мэдуэй (юго-восток Англии), расположенных в радиусе 50 км от ДМРЛ.

ДМРЛ Turnham ($\lambda = 5,5$ см, одновременные передача и прием горизонтально и вертикально поляризованных волн) выполнен по схеме с делителем мощности и приемником, размещенным на антенне. Такая схема обеспечивает максимальное качество данных при минимизации источников систематической ошибки от вращающихся переходов.

Отражаемости Z_{HH} и Z_{VV} рассчитывались по формуле (3.32), Z_{DR} — по формуле (3.41), а удельная дифференциальная фаза K_{DP} (град./км) — по формуле

$$K_{DP} = 10^3 \frac{180\lambda}{\pi} \int \operatorname{Re}(f_H - f_V) N(D) dD, \quad (3.73)$$

где f_H и f_V — амплитуды прямого рассеяния для горизонтально и вертикально поляризованных электромагнитных волн.

Интенсивность осадков I (мм/ч) рассчитывалась по формуле

$$I = \frac{\pi}{6} \int D^3 v(D) n(D) dD, \quad (3.74)$$

где $v(D)$ (м/с) — конечная скорость дождевых капель:

$$v(D) = 3,78D^{0,67} \quad (3.75)$$

(вертикальные движения воздуха отсутствуют).

Распределение капель по размерам по измерениям на оптическом дисдрометре рассчитывалось по формуле

$$N(D_i) = \frac{t_i}{TV_e \Delta D} (\text{мм}^{-3} \cdot \text{мм}^{-1}), \quad (3.76)$$

где D_i — средний размер капель в классе i ; t_i — время падения, измеренное в классе размеров капель i ; T — период выборки; V_e — эффективный объем выборки; ΔD — интервал диаметров. Последнее уравнение не зависит от скорости падения капель.

Предлагаемые поляриметрические алгоритмы оценки интенсивности осадков получены методом нелинейной регрессии между известной интенсивностью осадков I и любой комбинацией модельных радиолокационных измерений.

Из приведенных в [13] отберем только два алгоритма I_A и I_B , которые в результате испытаний дали наименьшие погрешности.

Алгоритм I_A имеет минимальные теоретические ошибки (15 %) в отсутствие шума, а алгоритм I_B — при шуме 25—35 %, т. е. с допущением теоретического белого гауссова шума в поляриметрических радиолокационных наблюдениях ($\sigma(Z_H) = 1,0$ дБЗ; $\sigma(Z_{DR}) = 0,1$ дБ и $\sigma(K_{DP}) = 0,35$ град./км):

$$I_A = 25,2598 K_{DP}^{-0,9951} Z_{DR}^{-0,6383}, \quad (3.77)$$

$$I_B = 0,01583 Z_H^{0,8349} \cdot 10^{-0,3732 Z_{DR}}, \quad (3.78)$$

где I — в мм/ч, Z_H — в мм⁶/м³, Z_{DR} — в дБ и K_{DP} — в град./км.

Алгоритм I_B дает наименьшую ошибку при сравнении с уравнением Маршалла—Пальмера ($Z_H = 200 I^{1,6}$) во всем диапазоне измеренной интенсивности осадков (I до 50 мм/ч).

Авторы делают более чем осторожные выводы о перспективности поляриметрических алгоритмов, отмечая лишь тот факт, что они не имеют недостатков уравнения Маршалла—Пальмера, т. е. не занижают значение интенсивности, как это происходит при использовании уравнения Маршалла—Пальмера для $I > 25$ мм/ч.

3.8. Классификация гидрометеоров по данным поляриметрических ДМРЛ

3.8.1. Модель на базе системы нечеткой логики (FLS)

Поляризационные измерения применяются для восстановления микрофизических свойств и идентификации гидрометеоров [15].

Классификация гидрометеоров находит широкое применение:

- в инициализации и проверке микрофизических моделей облаков;
- в выборе нужного алгоритма оценки интенсивности осадков;
- в выборе нужного алгоритма коррекции ослабления;

— в оценке допущений, принимаемых в процессах восстановления структурной интенсивности осадков.

Привлекательным подходом к классификации гидрометеоров являются системы нечеткой логики (fuzzy logic systems, FLS) ввиду следующих их способностей:

- совмещать объективные и субъективные знания,
- управлять лингвистическими априорными знаниями,
- справляться с классификацией при получении результатов не-точно определенного класса,
- делать выводы при взаимно не исключающих условиях,
- справляться с приближенными рассуждениями.

Для того чтобы проиллюстрировать данный подход, рассмотрим модели CSU (Colorado State University) и NCAR/NSSL (National Center for Atmospheric Research/ National Severe Storms Laboratory) для S -диапазона, различающиеся входными измерениями, выбором функции принадлежности и механизмом логического вывода.

Важно иметь аналогичные методы для поляриметрических радиолокаторов, работающих в C -диапазоне. Системы C -диапазона проводят измерения с большой дифференциальной фазой, при меньшем раз-мере антенны и, наконец, при общей более низкой стоимости по срав-нению с системой S -диапазона при одинаковых характеристиках разрешающей способности.

При распространении методов классификации гидрометеоров на C -диапазон следует учитывать:

- необходимость синтеза новых функций принадлежности с уче-том различных рассеивающих свойств гидрометеоров в C -диапазоне,
- коррекцию эффектов распространения.

Модели CSU и NCAR/NSSL используют в качестве входных пара-метров набор данных поляриметрических измерений, состоящих из от-ражаемости (Z_H), дифференциальной отражаемости (Z_{DR}), коэффици-ента линейной деполяризации (LDR), коэффициента кополярной кор-реляции (ρ_{co}) и удельного дифференциального фазового сдвига (K_{DP}).

Использование одной только отражаемости Z_H ограничивает воз-можности по различению гидрометеоров. Тем не менее при наличии высоких значений Z_H можно воспользоваться ими для уменьшения слу-чаев ошибочной классификации гидрометеоров типа мороси и ледяных кристаллов, которым присущи низкие значения Z_H .

Величина Z_{DR} очень чувствительна к форме и ориентации частиц осадков, поэтому она служит хорошим дискриминатором сплюснутых капель дождя и сферических градин.

LDR зависит от несферичности, ориентации, наклона и диэлектрической постоянной частиц осадков. Вращающиеся влажные несферические частицы типа тающей крупы могут распознаваться по большим значениям LDR , тогда как частицы мороси и сухие ледяные кристаллы связаны с низкими значениями LDR .

Комплексный коэффициент кополярной корреляции имеет амплитуду и фазу. По амплитуде мы можем определять ρ_{co} , присутствующий в модели классификации. Коэффициент ρ_{co} не зависит от калибровки радиолокатора. Он уменьшается с увеличением многообразия частиц и может использоваться для выделения тающих частиц или смешанных осадков.

На радиолокационных частотах, на которых ослабление ничтожно мало, например в S -диапазоне, главным результатом распространения в осадках является дифференциальный фазовый сдвиг Φ_{DP} . В C -диапазоне измеренный дифференциальный фазовый сдвиг включает компонент обратного рассеяния, который обычно обозначают δ_{HV} . Его, как правило, игнорируют в S -диапазоне, но игнорировать его в C -диапазоне нельзя.

Дифференциальная фаза распространения K_{DP} составляет половину производной Φ_{DP} по дальности и пропорциональна содержанию воды на пути жидких осадков, а также является одним из важных измеряемых параметров. K_{DP} может использоваться для отделения анизотропных гидрометеоров типа дождя от изотропных гидрометеоров типа вращающегося града. Оценочные функции K_{DP} в C -диапазоне должны, тем не менее, отфильтровывать вклад δ_{HV} . Значение K_{DP} пропорционально частоте, а потому в C -диапазоне ожидается повышение чувствительности к измерениям мощности и дифференциальной фазы.

Системы нечеткой логики (FLS) осуществляют нелинейное отображение вектора входных данных («четкие» входы) в скалярный выход («четкие» выходы). Систему нечеткой логики можно объяснить с помощью рис. 3.16, где она разделена на три части: фаззификатор (fuzzifier), механизм логического вывода (inference engine) и дефаззификатор (defuzzifier).



Рис. 3.16. Общая схема системы нечеткой логики [15].

Фаззификатор — это блок преобразования четких величин (объективные измерения) в нечеткие множества. Четкие величины могут принадлежать различным нечетким множествам с разными степенями принадлежности, определяемыми функциями принадлежности (membership function).

Механизм логического вывода — это блок, управляемый рядом априорно установленных правил, отображающих нечеткие множества в нечеткие множества в соответствии с правилами и согласуясь с силой правила.

Дефаззификатор — это процесс, отыскивающий четкую величину, которая лучше всего представляет результирующее нечеткое множество, определенное согласно механизму логического вывода.

Когда эта схема применяется к системе классификации гидрометеоров, нечеткими входами являются радиолокационные поляриметрические измерения, а нечетким выходом является индекс, соответствующий конкретному классу гидрометеоров.

Реализации системы нечеткой логики для классификации гидрометеоров определяются:

- входными четкими величинами,
- классами гидрометеоров (выходные четкие величины),
- видом функций принадлежности,
- механизмом логического вывода.

В модели CSU в качестве входных параметров используются измерения Z_H , Z_{DR} , LDR , ρ_{co} , K_{DP} , h , где h — высота измерения. В модели NCAR/NSSL используется тот же ряд поляриметрических измерений и температура вместо h .

В блоке фазификации модели CSU используются функции принадлежности вида (рис. 3.17)

$$\beta(x; m, a, b) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - m}{a} \right)^2 \right]^b},$$

форма которых подбирается для каждой входной переменной и результирующего класса и определяется тремя параметрами: m задает центр функции принадлежности, a — ширину, b — крутизну. Например, для функции принадлежности явления классу *дождь* при заданной горизонтальной отражаемости было взято следующее выражение:

$$f_{\text{дождь}}(Z_H) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{Z_H - 42,5}{18,17} \right)^2 \right]^{18,32}}.$$

В качестве функций принадлежности можно использовать и другие зависимости, например получившие наибольшее распространение в силу своей простоты функции — треугольную, трапециевидную или Гаусса. Однако последние обладают рядом недостатков по сравнению с выбранной β -функцией. Во-первых, в соответствии с физическим смыслом моделируемой задачи функции принадлежности должны обладать широким горизонтальным участком со значениями, близкими к 1, так как для каждого описываемого класса свойствен диапазон вход-

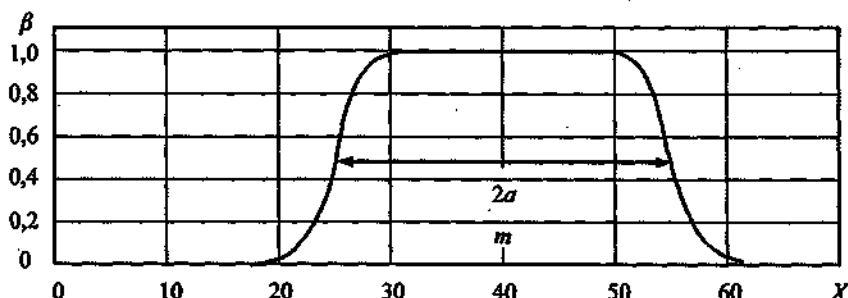


Рис. 3.17. Вид функции принадлежности $\beta(X)$, используемой в модели CSU.

ных параметров, а не конкретное «предпочтительное» значение. Во-вторых, β -функция обладает длинными остаточными «хвостами», что придает системе большую устойчивость к ошибкам во входных величинах. И, наконец, в-третьих, производная функции непрерывна, что позволяет осуществлять автоматическую корректировку параметров системы посредством «обучения» (поэтому данную систему правильно назвать нечеткой нейронной сетью).

На этапе логического вывода степень принадлежности исследуемого явления классу j получается как произведение степеней принадлежности для каждой входной величины:

$$RS_j = B_j^{Z_H}(Z_H) B_j^{Z_{DR}}(Z_H, Z_{DR}) B_j^{K_{DP}}(K_{DP}) \times \\ \times B_j^{\rho_{HV}}(\rho_{HV}) B_j^{LDR}(LDR) B_j^h(h), \quad j=1 \dots M, \quad (3.79)$$

где B_j^X представляет функцию принадлежности классу гидрометеоров j для измерения X . Этот мультипликативный подход минимизирует вероятность возникновения ложной классификации: если для данного класса одно измерение сильно выходит из диапазона, то низкое значение соответствующей функции принадлежности подавит класс. Веса функции не использовались, поэтому радиолокационные измерения считаются одинаково надежными. Четкий выход дается индексом j , соответствующим наибольшему RS_j .

С другой стороны, в модели NCAR/NSSL применяется аддитивный подход, который позволяет максимизировать вероятность корректной классификации. Дефазификация основывается на поиске индекса класса с максимальной степенью принадлежности.

В более поздней модели CSU использованы веса и двумерные β -функции. Формула для степени принадлежности принимает вид

$$RS_j = \left[W_j^{Z_{DR}} A_j^{Z_{DR}}(Z_H, Z_{DR}) + W_j^{K_{DP}} A_j^{K_{DP}}(Z_H, K_{DP}) + \right. \\ \left. + W_j^{\rho_{HV}} A_j^{\rho_{HV}}(\rho_{HV}) + W_j^{LDR} A_j^{LDR}(LDR) \right] A_j^{Z_H}(Z_H) A_j^\alpha(\alpha), \\ j=1 \dots M, \quad (3.80)$$

где W_j^X и A_j^X представляют вес и функцию принадлежности, связанные с классом гидрометеоров j и измерением X , а величина α , заменяю-

щая h , указывает высоту слоя таяния, выведенную из вертикального профиля Z_{DR} . Вес LDR зависит от отношения кроссполярного сигнала к шуму. Если оно меньше 10 дБ, то вес LDR устанавливается на нуль, указывая на то, что измерение LDR не используется. Обычно ρ_{co} имеет наименьший вес, тогда как Z_{DR} — наибольший. Схема этого классификатора показана на рис. 3.18.

В современной схеме классификации гидрометеоров CSU для S -диапазона рассматривается уменьшенный набор их типов: морось, дождь, мокрый снег, сухой снег, крупа/мелкий град, град, смесь дождь/град.

Функции принадлежности, принятые в CSU и в других схемах для S -диапазона, выводятся с учетом существующей базы знаний для этой

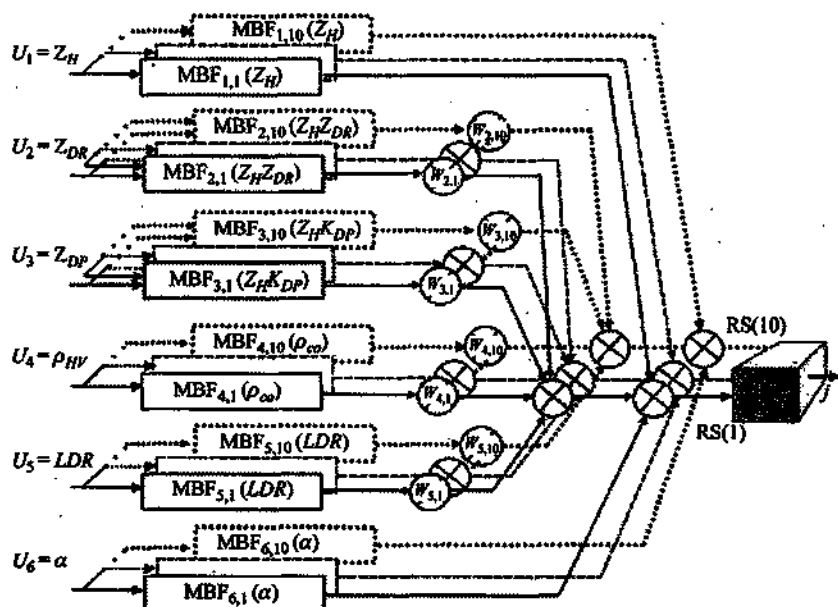


Рис. 3.18. Модель классификации гидрометеоров CSU [15] для S -диапазона.

V_1 — морось, V_2 — дождь, V_3 — ливень, V_4 — мокрый снег, V_5 — сухой снег, V_6 — крупа/мелкий снег, V_7 — мокрая крупа, V_8 — мелкий град, V_9 — крупный град, V_{10} — дождь с градом.

полосы частот. Эти функции напрямую не применимы к S -диапазону, поскольку резонансные эффекты, вызванные рассеянием Ми и в S -диапазоне обычно ничтожно малые, существенно влияют на радиолокационные измерения в S -диапазоне. Например, в случае с дождем резонансные эффекты приводят к разному диапазону поляризметрических измерений в данном диапазоне параметров DSD.

Аналогичные эффекты возможны в присутствии смешанной фазы осадков. Функции принадлежности в S -диапазоне должны учитывать

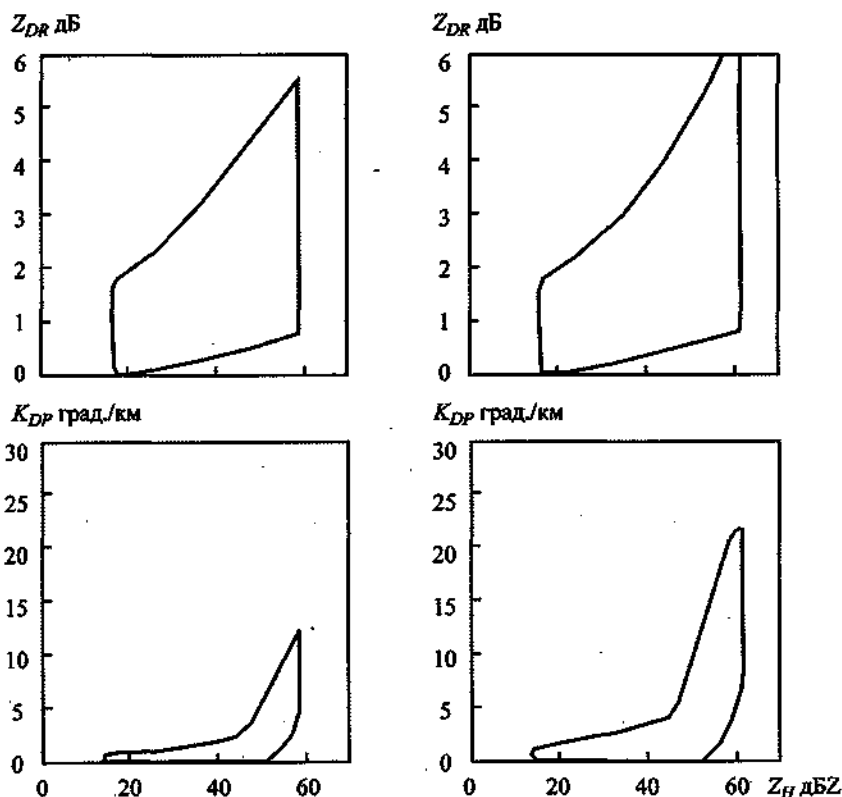


Рис. 3.19. Функции принадлежности (Z_H , Z_{DR}) и (Z_H , K_{DP}) для дождя в диапазонах S (слева) и C (справа). Контуры соответствуют уровню 0,99 [15].

эти эффекты. Чтобы продемонстрировать эти последствия для функций принадлежности, достаточно сравнить двумерные функции принадлежности — использованную в модели CSU для S -диапазона и соответственно отмасштабированную для C -диапазона. На рис. 3.19 показано различие между двумерными функциями принадлежности для дождя в диапазонах C и S .

3.8.2. Сравнение с моделями

Авторы [15] утверждают, что классификации, полученные в результате моделирования на основе системы нечеткой логики, которое может применяться в оперативном режиме, совпадают с общепринятыми [9] (рис. 3.20 и 3.21).

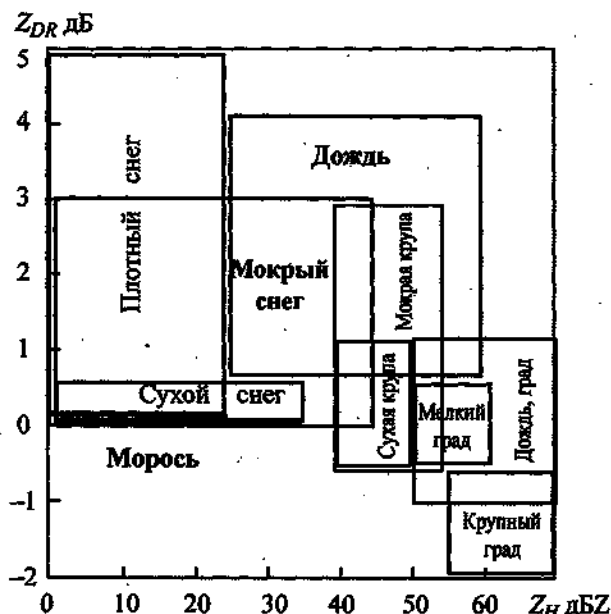


Рис. 3.20. Диаграмма фазового состояния гидрометеоров, построенная по результатам одновременных измерений их отражаемости при вертикальной поляризации Z_H и дифференциальной отражаемости Z_{DR} .

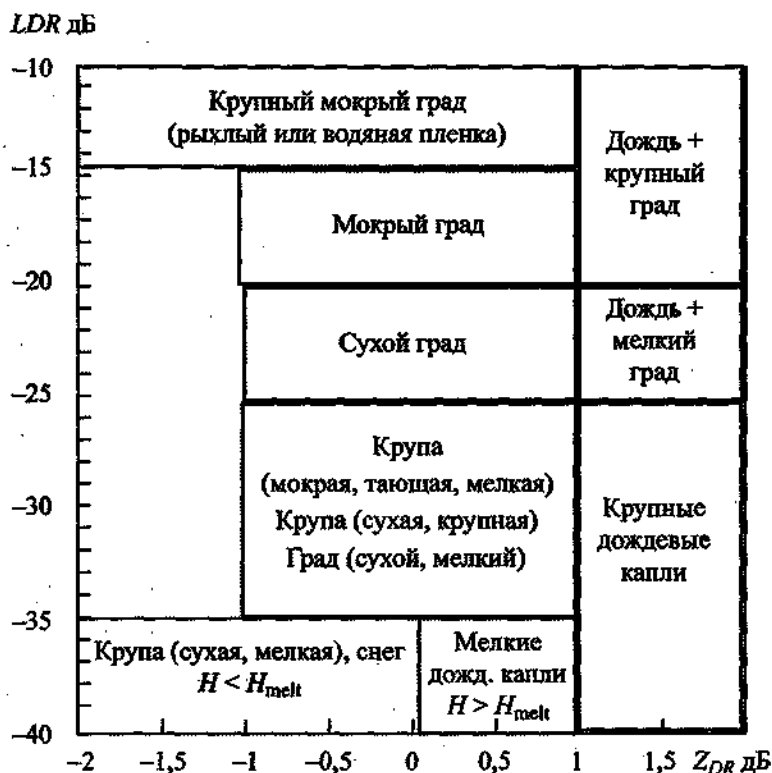


Рис. 3.21. Диаграмма фазового состояния гидрометеоров, построенная по результатам одновременных измерений их дифференциальной отражаемости Z_{DR} и коэффициента линейной деполяризации LDR .

На диаграмме фазового состояния гидрометеоров в плоскости $Z_H - Z_{DR}$ [9], приведенной на рис. 3.20, отмечается небольшое перекрытие разных типов гидрометеоров. На диаграмме фазового состояния гидрометеоров в плоскости $LDR - Z_{DR}$ (см. рис. 3.21) перекрытие отсутствует. Отсюда можно сделать вывод: коэффициент линейной деполяризации LDR является очень полезным параметром при классификации гидрометеоров и обнаружении «яркой полосы».

3.8.3. Микрофизические характеристики снега по данным измерений на двух поляризациях

Вызывает практический интерес изложенный в работе [14] подход к восстановлению микрофизических характеристик снега с использованием спектрального анализа по данным радиолокационных наблюдений на двух поляризациях.

Восстановление параметров распределения размеров капель для пластин и агрегатов (см. рис.3.3) проиллюстрировано данными о слоистообразных осадках, полученными радиолокатором TARA — S-полосным FM CW доплеровским радиолокатором с двумя поляризациями, установленным на метеостанции Cabauw в Нидерландах (Russchenberg et al., 2005). Проверка выходных данных разработанного авторами [14] алгоритма выполнялась путем сравнения оцениваемой водности льда с содержанием воды ниже слоя таяния. Оцениваемая водность льда сравнивалась с измеренной отражаемостью. Полученные результаты для пластин, по мнению авторов [14], хорошо согласуются с опубликованными зависимостями между водностью льда и отражаемостью.

Экспериментальные данные получены на радиолокаторе TARA во время дождя умеренной интенсивности из слоистообразных облаков. Угол места радиолокационных наблюдений составил 45°. Измерения проводились в режиме чередования поляризации. Доплеровский спектр вычислялся по временному ряду из 512 выборок (2,56 с). Для получения доплеровского спектра осреднялось десять доплеровских спектров, и он служил вводом для алгоритма инверсии (25,6 с). Разрешение по дальности и доплеровское разрешение составляли 15 м и 1,8 см/с соответственно.

Измеренная спектральная горизонтальная отражаемость показана на рис. 3.22. Объект у радиолокатора имеет отрицательную доплеровскую скорость. Спектральная отражаемость калибруется, и ее сумма по всем доплеровским скоростям дает обычно используемый коэффициент отражаемости. Слой таяния расположен между 1280 и 2000 м.

Для гарантии отсутствия частиц, покрытых инеем, доплеровские спектры, используемые на входе алгоритма восстановления, измерялись на высоте более 200 м над вершиной слоя таяния. Затем к выбранным спектрам применялся только алгоритм инверсии, когда спектраль-

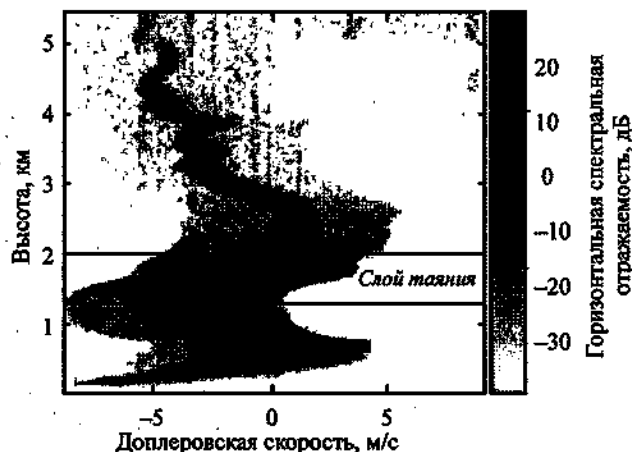


Рис. 3.22. Пример измеренной спектральной отражаемости [14].

ная отражаемость превышала 10 дБ, а максимальная спектральная дифференциальная отражаемость превышала 0,5 дБ. Эти ограничения были необходимы для гарантии работы алгоритма восстановления для гидрометеоров в виде пластин и агрегатов. Выбранные доплеровские спектры отсекались менее чем на 10 дБ ниже максимального значения спектральной горизонтальной отражаемости. На спектральную дифференциальную отражаемость под уровнем отсечения очень сильно влияет шум. На рис. 3.23 приведен пример выбранных данных о спектральной горизонтальной и дифференциальной отражаемости и их аппроксимации, а также шесть восстановленных параметров.

Относительно полученных значений распределений размеров капель, а также восстановленных значений спектрального расширения и скорости окружающего ветра была обнаружена совместимость для небольших изменений по высоте и времени (500 с).

Для того чтобы сделать выводы относительно восстановленных значений, необходимо было вычислить интегральные параметры, в частности водность льда. Водность льда оценивают по полученным параметрам распределения размеров капель для пластин и агрегатов, используя алгоритм инверсии. Содержание воды оценивается по пара-

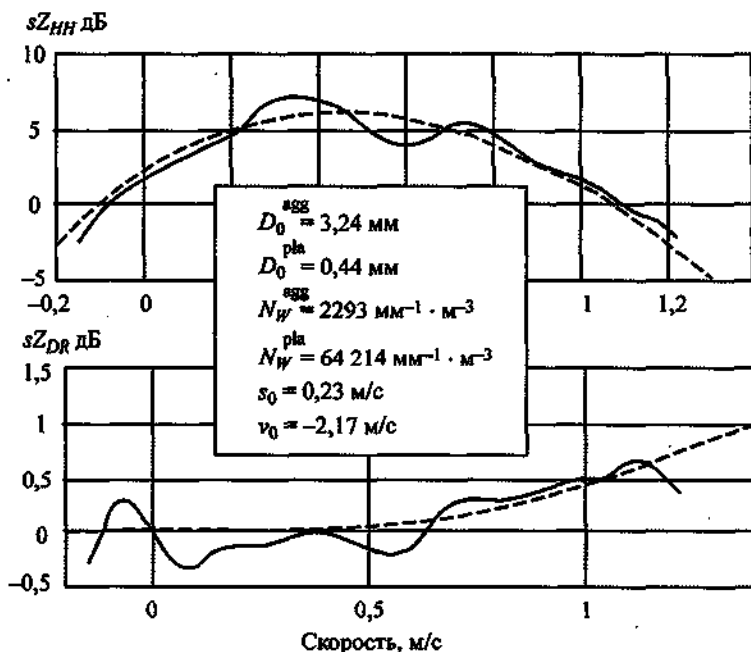


Рис. 3.23. Измеренная спектральная горизонтальная (sZ_{HH}) и дифференциальная (sZ_{DR}) отражаемости (сплошная кривая) с полученными аппроксимациями (пунктирная кривая) и шесть восстановленных параметров для высоты 2291 м [14].

метрам распределения размеров капель для дождя. На рис. 3.24 приведены оцененная водность льда и оцененное содержание воды как функции времени. Они хорошо согласуются, особенно через 250 с. В период 0—250 с водность льда превышает содержание воды. Это может указывать на испарение осадков, из-за чего уменьшается содержание воды на высоте 950 м, где выбираются доплеровские спектры, используемые на входе алгоритма инверсии для дождя.

Соотношение между водностью льда и эквивалентной отражаемостью на частоте радиолокатора 3 ГГц получено Hogan et al. [14]:

$$IWC = 0,02Z_e^{0,6}, \quad (3.81)$$

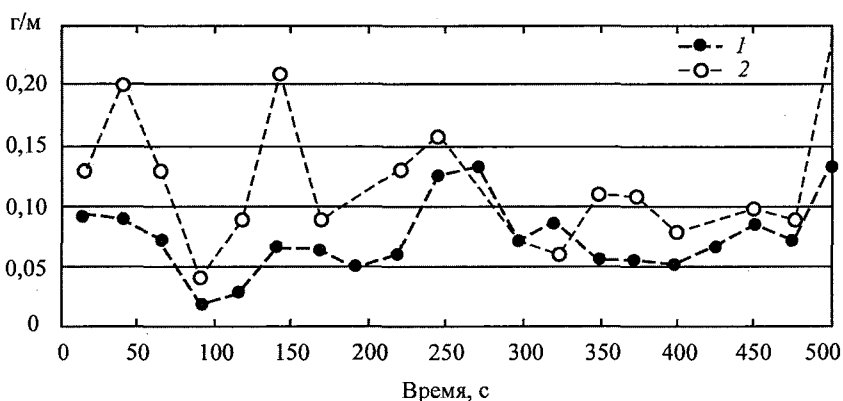


Рис. 3.24. Восстановленная водность льда (1) и содержание воды (2) как функции времени [14].

где IWC — водность льда (г/м^3), Z_e — эквивалентная отражаемость ($\text{мм}^6/\text{м}^3$). Это соотношение основано на результатах измерений частиц льда в неморозящих ледяных облаках.

Используя выходные данные алгоритма восстановления, который выдает параметры распределения размеров капель для пластин и агрегатов, можно разделить значения водности льда и эквивалентной отражаемости для агрегатов и пластин. На рис. 3.25 оцененная водность льда приведена относительно оцененной эквивалентной отражаемости для пластин и агрегатов вместе с соотношением (3.81). В случае пластин имеется хорошее согласие между соотношением Хогана и результатами, полученными по алгоритму инверсии. В случае агрегатов соотношение между оцененной водностью льда и горизонтальной отражаемостью получено по кривой подгонки:

$$IWC = 0,0023 Z_e^{0,68}, \quad (3.82)$$

где IWC — водность льда (г/м^3), Z_e — эквивалентная отражаемость ($\text{мм}^6/\text{м}^3$) агрегатов над слоем таяния в слоистообразных осадках. Значение показателя степени в оцененном отношении водность льда — отражаемость хорошо согласуется с показателями, используемыми в литературе, которые составляют от 0,55 до 0,74 (Liu and Illingworth, 2000) [14].

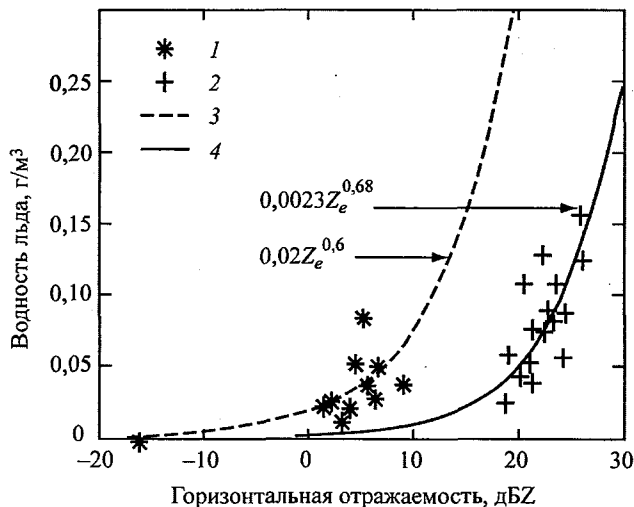


Рис. 3.25. Соотношение оцененной водности льда к оцененной отражаемости для пластин и агрегатов [14].

1 — ледяные влажные агрегаты; 2 — ледяные влажные пластинки; 3 — соотношение $IWC-Z_e$ для сплошного льда (Hogan et al., 2005); 4 — агрегаты, оцененные по соотношению $IWC-Z_e$

3.9. Калибровка двухполяризационного ДМРЛ

Общепринятым и наиболее распространенным способом калибровки Z_{DR} является калибровка при вертикальном зондировании. Суть его состоит в следующем.

Когда над ДМРЛ отмечаются слабые осадки, антенна направляется вертикально, и производимые измерения отраженных сигналов обеспечивают при пересчете $Z_{DR} = 0$ дБ. В силу однородной ориентации частиц слабых осадков в плоскости поляризации расчетное значение Z_{DR} для таких рассеивателей равно 0 дБ.

Национальная метеослужба США запланировала обновление радиолокаторов сети NEXRAD для их работы в режиме одновременного излучения и приема H и V поляризаций. На рис. 3.26 показана блок-схема типичной конфигурации ДМРЛ с двумя передатчиками.

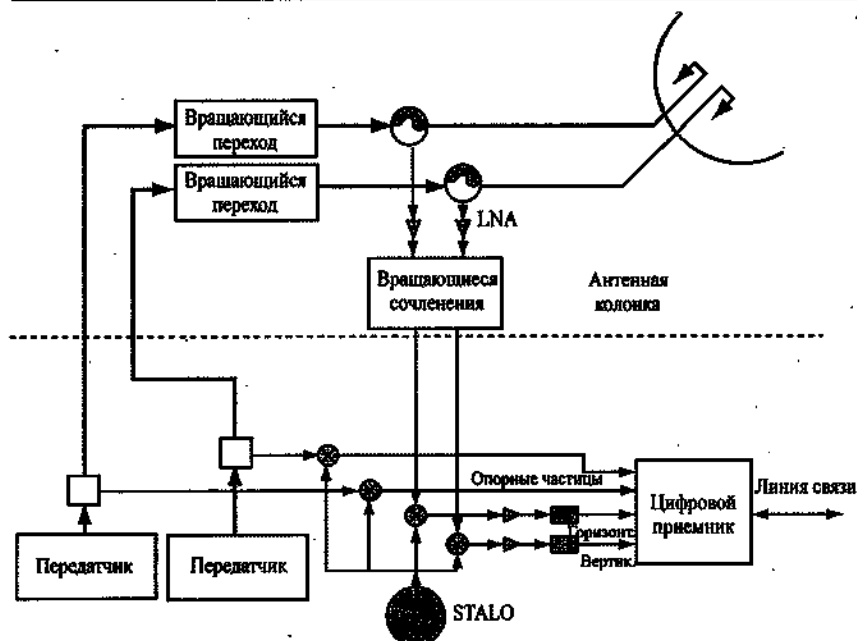


Рис. 3.26. Типичная радиолокационная система с двумя одновременными поляризациями и двумя передатчиками [9].

На рис. 3.27 используются один передатчик и делитель мощности. Приемники всегда находятся в работе, и на них не влияют волноводные переключатели. Такая конфигурация реализована в приемо-передатчике SIDPOL (simultaneous dual polarization) фирмы EEC США [9].

Для повышения точности измерения осадков на двухполяризационных ДМРЛ S -диапазона, по мнению авторов [11], точность калибровки Z_{DR} должна быть не хуже 0,1 дБ. Трудности на пути решения поставленной задачи были изложены в [11].

Поскольку ДМРЛ NEXRAD лишены возможности вертикального зондирования [11], были предложены два других способа калибровки: технический и метод кроссполярной мощности. При использовании технического способа Z_{DR} калибруется с помощью комбинации активных и пассивных измерений. Цепи передачи и приема радиолокацион-

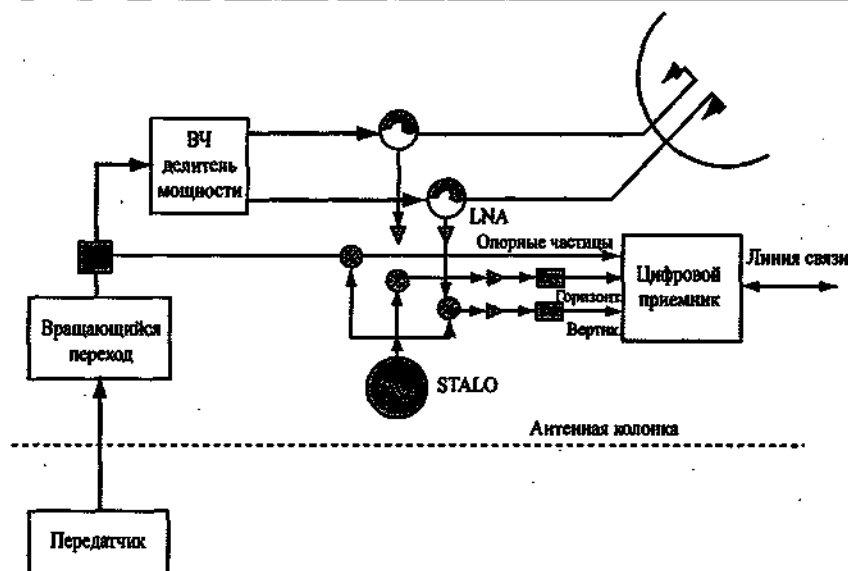


Рис. 3.27. Вариант доплеровского MPR SIDPOL фирмы EEC с двумя одновременными поляризациями [9].

ных сигналов делятся на активную (цепи приема от циркулятора до выборки I/Q) и пассивную (волноводы, антенна) части.

Усиление и потери в пассивной части определяются с помощью стандартных испытательных сигналов и интенсивности солнечной радиации. Контролируются излучаемая мощность; усиление сигнала в цепи приема отслеживается постоянно с помощью ввода стандартного испытательного сигнала. Такой подход позволяет учитывать изменения в цепи приема в зависимости от времени, температуры и других факторов.

Основной предлагаемый в [11] способ калибровки Z_{DR} — метод кроссполярной мощности — основан на изложенном в п. 3.5 принципе радиолокационной взаимности: два кроссполярных члена матрицы рассеяния S_{HV} и S_{VH} равны. Это означает, что кроссполярные излучения ДМРЛ с быстрым чередованием H и V поляризаций должны быть равны, если равны излучаемые мощности H и V . Уравнение калибровки по данному методу записывается следующим образом [11]:

$$Z_{DR}^c = Z_{DR} S^2 \frac{P_{xV}}{P_{xH}}, \quad (3.83)$$

где Z_{DR}^c — калиброванное значение Z_{DR} , S — отношение мощности V и H по данным солнечных измерений (см. п. 2.7.5), P_{xH} и P_{xV} — средние H и V кроссполярные мощности соответственно.

По мнению разработчиков [11], основное преимущество метода кроссполярной калибровки заключается в том, что в процессе калибровки не требуются отдельные измерения с включением в измерительную цепочку узлов вращения, волноводных ответвителей, генераторов стандартных сигналов и ваттметров.

Более взвешенный подход к калибровке изложен в [10].

В сравнительных исследованиях принимали участие два радиолокатора: один от *Meteo-France*, другой от Метеослужбы Великобритании. Оба радиолокатора оборудованы средствами линейной поляризации, излучающими волны с углом наклона плоскости поляризации 45° , и принимающими H и V отдельно по двум каналам. В табл. 3.2 приведены характеристики обоих радиолокаторов. Главное их конструктивное различие заключается в расположении приемника: на радиолокаторе *Trappes* приемник, как правило, устанавливается в диспетчерской, а на радиолокаторе *Thurnham* установлен в задней части антенны. Последняя конфигурация предполагает снижение потерь в волноводе и исключение узлов вращения по пути приема, которые могут вызывать вариации параметров двух поляризаций и смещения калибровки.

Точность измерений поляриметрических параметров имеет определяющее значение для улучшения оценок параметров осадков. Точность измерения параметров ограничивается числом выборок, используемых в оценке, разнообразием капель в объеме выборки и величиной коэффициента корреляции. Качество данных можно оценить, сравнив измеренное и теоретически полученное стандартное отклонение переменных (табл. 3.3). Как видно из рис. 3.28, точность измерений Z_{DR} на радиолокаторе *Trappes* больше, чем на радиолокаторе *Thurnham*, что связано с большим значением коэффициента корреляции на первом из них. Пиковое значение $\rho_{HV}(0)$, зарегистрированное в дожде, равно 0,99 на радиолокаторе *Trappes* и 0,965 на радиолокаторе *Thurnham*.

Таблица 3.2

Характеристики оперативных С-полосных радиолокаторов
с двумя поляризациями, принадлежащих Meteo-France
и Метеослужбе Великобритании

Характеристика	Радиолокатор Meteo-France	Радиолокатор Метео- службы Великобрита- нии
Название станции	Trappes	Thurham
Расположение	На ЮЗ Парижа	На ЮВ Лондона
Изготовитель радиолокатора	Gematronik	EEC
Тип антенны	Центральный фокус	Центральный фокус
Диаметр	3,7 м	3,7 м
Диаграмма направленности	$< 1,1^\circ$	$< 1,0^\circ$
Пиковая мощность	250 кВт	250 кВт
Длительность импульса	2 мкс	2 и 0,4 мкс
Расположение приемника	В диспетчерской	Сзади антенны
Динамический диапазон	>95 дБ	~ 100 дБ
Процессор сигналов	CASTOR2 от Meteo-France	EDRP9 от Lassen и EDGE от EEC

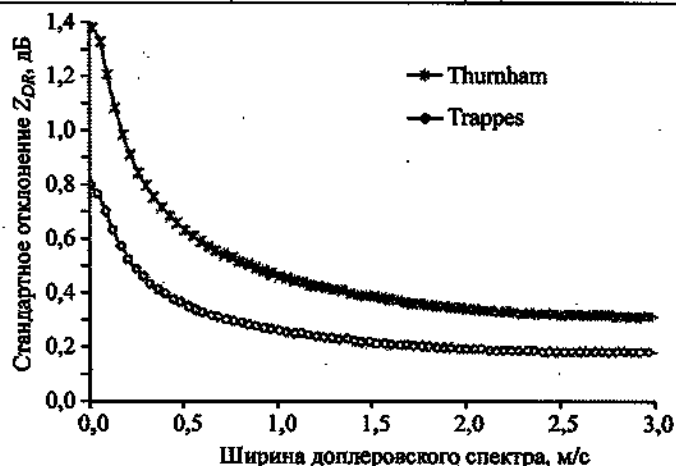


Рис. 3.28. Теоретическое изменение стандартного отклонения Z_{DR} и ширина доплеровского спектра [10].

Средний наклон падения дождевых капель или неточный угол наведения антенны ДМРЛ могут вызвать большую изменчивость измерений Z_{DR} при вертикальном зондировании, поэтому сдвиг нужно рассчитывать по среднему азимутальному значению. При использовании этой процедуры сдвиг Z_{DR} оказался равным $-0,16 \pm 0,60$ дБ с воспроизводимостью от сканирования к сканированию $\pm 0,03$ дБ для Thurnham (рис. 3.29) и $-0,08 \pm 0,90$ дБ для Trappes.

Таблица 3.3

Сравнение теоретических и экспериментальных погрешностей для Z_{DR} (для значения ненормализованной ширины спектра 2 м/с при $\rho_{HV}(0) = 0,99 \pm 0,01$ у радиолокатора Trappes и $0,965 \pm 0,01$ у радиолокатора Thurnham)

Радиолокатор	Стандартное отклонение	
	теоретическое	наблюдаемое
Thurnham	$\pm 0,45$ дБ	$\pm 0,61$ дБ
Trappes	$\pm 0,20$ дБ	$\pm 0,21$ дБ

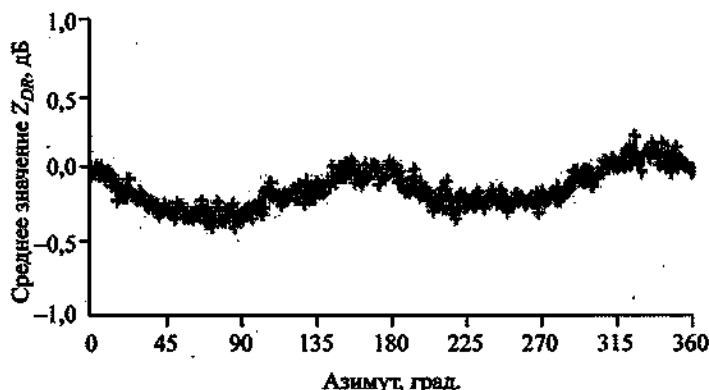


Рис. 3.29. Диаграммы калибровки Z_{DR} , полученные по данным в вертикально падающем дожде на радиолокаторе Thurnham [10].

Как уже отмечалось, солнечная радиация имеет равную мощность на горизонтальной и вертикальной поляризации. Следовательно, обнаружение солнечной радиации при проходе солнца через радиолокационный луч на восходе и на закате солнца может также использоваться для определения сдвига Z_{DR} .

Солнечную радиацию вдоль радиуса можно автоматически обнаружить по следующим критериям:

солнечная радиация, как правило, дает измерения в диапазоне между -10 и 20 дБZ, значит, можно выбрать этот порог;

по теории, $\rho_{HV}(0)$ должно быть нулевым в направлении на центр солнца, что не всегда наблюдается в действительности, однако порог $\rho_{HV}(0)$ меньше 0,5, как полагают, достаточен, чтобы отличить солнечную радиацию от гидрометеоров.

На рис. 3.30 показано частотное распределение солнечного пика, полученное по данным радиолокатора Trappes. Кривая приближается к нормальному распределению погрешности при небольшом отрицательном среднем $0,2 \pm 1,4$ дБ. Оба метода калибровки Z_{DR} согласуются для радиолокатора Trappes.



Рис. 3.30. Диаграммы калибровки Z_{DR} , полученные по солнечной радиации, наблюдавшейся на радиолокаторе Trappes [10].

Измерения сдвига Z_{DR} с использованием обнаружения солнечной радиации имеют преимущество: используются избыточные данные и не нужны сканирования, проводимые специально для калибровки. Однако измерения при вертикальном падении гидрометеоров могут служить для тестирования объединенных эффектов приема и передачи на абсолютную калибровку Z_{DR} . Анализ по «всплеску солнца» проверяет только приемный тракт радиолокатора, и результаты имеют тем большую неопределенность, чем больше стандартное отклонение. Поэтому для калибровки Z_{DR} желательно проводить измерения осадков при вертикальном их падении, если такая функция имеется на радиолокаторе. Если она отсутствует, то может быть достаточно калибровки по солнечной радиации.

Метод двойной поляризации обеспечивает новый подход к калибровке Z , который основан на четком поведении определенного дифференциального фазового сдвига (K_{DP}), измеренного по Z относительно Z_{DR} . Это соотношение оказалось фактически независимым от изменений распределений размеров капель (DSD). K_{DP} можно оценить по измеренным значениям Z и Z_{DR} с помощью моделей форм капель дождя. После этого полученная величина K_{DP} интегрируется в радиальном направлении для вычисления значения Φ_{DP} . Различия между измеренными и вычисленными Φ_{DP} приписываются недостаткам калибровки Z и служат основанием для ее корректировки.

Разработка этой концепции с использованием радиолокатора Ttrappes позволила получить следующие рекомендации [10]:

величина Z_{DR} должна калиброваться заранее и не должна зависеть от азимута из-за помех, создаваемых РПУ радиолокатора;

величина Φ_{DP} должна корректироваться по начальному сдвигу системы и не должна зависеть от азимута из-за вращающихся переходов;

величина Φ_{DP} должна быть достаточно велика для измерений с достаточной точностью, но не столь велика, чтобы указывать на наличие заметного ослабления; в S -диапазоне рекомендуется ограничивать анализ значениями Φ_{DP} менее 10° ;

модели формы капель дождя действительны только для капель дождя, поэтому необходима уверенность в том, что в данных нет информации о постоянных объектах, градинах и тающих гидрометеорах;

для того чтобы оценка была статистически значимой, требуется обработать много лучей; выбор пригодных лучей оказался делом первостепенной важности.

В результате в [10] был сделан вывод о том, что калибровка радиолокатора Trappes содержит ошибку в -1 дБ. В работе Gourley et al. (2006), в которой изучалась чувствительность калибровки к более широкому диапазону моделей формы капель дождя, сообщалось, что модель Brandes et al. (2002) дала самые согласованные результаты. Тем не менее для полной автоматизации процесса калибровки нужна еще большая работа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

АМРК «Метеор—Метеоячейка» имеет режим работы *Двойная поляризация*. Он поставляется потребителю фирмой Selex Si как опция по отдельному контракту или в рамках модернизации ДМРЛ.

В режиме *Двойная поляризация* при одновременном излучении электромагнитных волн вертикальной и горизонтальной поляризации излучаемая мощность передатчика делится между ними поровну.

В режиме *Вертикальная поляризация* излучается 50 % мощности передатчика, остальные 50 % мощности излучаются в режиме *Горизонтальная поляризация*, но прием отраженных сигналов не осуществляется. И только при излучении электромагнитных волн горизонтальной поляризации задействованы все 100 % мощности передатчика.

В приемнике GDRX предусмотрено четыре канала приема: по два канала для приема отраженных сигналов горизонтальной и вертикальной поляризации. Для каждой поляризации имеются каналы высокой и низкой чувствительности.

В результате обработки отраженных сигналов в режиме *Двойная поляризация* АМРК «Метеор—Метеоячейка» может выдавать потребителю весь набор радиолокационной поляриметрической информации о метеообразованиях (дифференциальная отражаемость, дБ; линейное деполяризационное отношение, дБ; дифференциальный фазовый сдвиг, град.; удельный дифференциальный фазовый сдвиг, град./км; коэффициент кросскорреляции между горизонтальным и вертикальным излучением АМРК).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К главам 1 и 2

1. Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс «Метеор—Метеоячейка». Руководство по эксплуатации 73-1887РЭ. — Selex Sistemi Integrati, GmbH, 2006.
2. Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс «Метеор—Метеоячейка». Инструкция по монтажу, настройке, регулированию и прогону 73-1887ИМ. — Selex Sistemi Integrati, GmbH, 2006.
3. Автоматизированная информационная система (АИС) «МетеоСервер». Руководство по эксплуатации ИТАВ. 416311.007РЭ. — ЗАО ИРАМ, 2005.
4. Голд Б., Рэдер Ч. Цифровая обработка сигналов. — Советское радио, 1973. — 368 с.
5. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 512 с.
6. Казакевич Д. И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 320 с.
7. Международный код FM 94 BUFR. — FM 94 BUFR Collected papers and specification/European Center for Medium-Range Weather Forecasts, Feb. 1998. — Рекомендация 3 КОС-ХП, 2001.
8. Метеорологическое обеспечение международной авиации. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. Часть I. Основные SARPS. Часть II. Добавления и дополнения. Изд. 15-е. — ИКАО, 2004.
9. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Коллективная монография ИРАМ. — СПб: Гидрометеиздат, 2002. — 332 с.
10. Метеорологическое оборудование аэродромов и его эксплуатация / Коллективная монография ИРАМ. — СПб: Гидрометеиздат, 2003. — 592 с.
11. МУ. Контроль и нормализация электромагнитной обстановки, создаваемой метеорологическими радиолокаторами / Госкомгидромет СССР и Минздрав СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — 63 с.
12. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА-95). — Изд. Росгидромета и Минтранса РФ, 1995.

13. Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации / Коллективная монография ГГО. — Л.: Гидрометеоиздат, 1991. — 375 с.
14. РД 52.05.320-91. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. — Л.: Гидрометеоиздат, 1993. — 358 с.
15. Рыжков А. В. Характеристики метеорологических РЛС. — Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4, с. 29—34.
16. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. — 1104 с.
17. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. Изд. 4-е. — СПб: Питер, 2005. — 699 с.
18. Таненбаум Э. Современные операционные системы. Изд. 4-е. — СПб: Питер, 2005. — 1038 с.
19. European organization for the Safety of Air navigation. Eurocontrol standard Document for Radar Data Exchange. Part 3. Transmission of Monoradar Derived Weather Information (SUR.ET1.STO5.2000-STD-03-01).
20. Radar Data Quality — Ensuring Procedures at European Weather Radar Stations / M. Divjak et al. OPERA/WD/9/1999. Final document, 1999, p. 12.
21. Yanting Wang, Chandrasekar V. Adaptive clutter identification and filtering using subpace processing technique. — Proc. Fourth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (Proc. ERAD 2006). — Barcelona, 18—22 Sept., 2006, p. 72—75.

К главе 3

1. Павлов Н. Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 432 с.
2. Рыжков А. В. Поляризационная селекция в доплеровских метеорологических РЛС. — Труды ГГО, 1991, вып. 535, с. 118—124.
3. Рыжков А. В. Метеорологические объекты и их радиолокационные характеристики. — Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4, с. 6—17.
4. Рыжков А. В. Поляризационные методы метеорологической радиолокации. — Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4, с. 18—28.
5. Ryzkov A. The effect of nonuniform beat filling on the quality of radar polarimetric data. — Proc. Fourth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2006). — Barcelona, 18—22 Sept., 2006, p. 1—4.
6. Ryzkov A., Hydak D., Scott J. A new polarimetric scheme for attenuation correction at C-band. — ERAD 2006, p. 29—32.

7. Ryzhkov A., Zrnic D. The impact of depolarization on polarimetric signatures in snow. — ERAD 2006, p. 33—36.
8. Hudak D., Rodriguez P., Lee G.W., Ryzhkov A., Fabry F., Donaldson N. Winter precipitation studies with a dual polarized C-band radar. — ERAD 2006, p. 9—12.
9. Stagliano J., Helvin J., Alford J., Nelson D. Measuring the linear depolarization ratio simultaneously with the other polarimetric variables. — ERAD 2006, p. 80—83.
- 10. Sugier J., Tabary P. Evaluation of dual-polarization technology at C-band for operational weather radar as part of EUMETNET OPERA programmer. — ERAD 2006, p. 37—40.
11. Hubbert J. C., Pratte F., Ellis, Dixon M. Differential power calibration for weather radar. — ERAD 2006, p. 102—104.
12. Vulpiani G., Marzano F. S., Chandrasekar V., Berne A., Uijlenhoet R. Raindrop size distribution estimation from S-band polarimetric radar using a regularized neural network. — ERAD 2006, p. 175—178.
13. Rico-Ramirez M. A., Cluckie I. D. Assessment of polarimetric rain rate algorithms at C-band frequencies. — ERAD 2006, p. 221—224.
14. Spek A., Unal C., Dufournet Y., Russchenberg H., Moisseev D., Chandrasekar V. Retrieval of microphysical properties of snow using dual polarization spectral analysis: model and data analysis. — ERAD 2006, p. 264—267.
15. Baldini L., Gorguccil E., Chandrasekar V. Hydrometeor classification methodology for C-band polarimetric radars. — ERAD 2004, p. 62—65.

Приложение 1

Основные технические требования к системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологического радиолокатора

П.1.1. Общие положения

1. Система обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения (далее по тексту Система), основанная на использовании информации от метеорологических радиолокаторов, включает в себя: метеорологические радиолокаторы (далее по тексту МРЛ), оснащенные программно-вычислительными комплексами для обработки данных и формирования выходной информации (сообщений, кодограмм); телекоммуникационные средства, обеспечивающие функционирование Системы в масштабе времени, близком к реальному; центры сбора радиолокационной метеорологической информации (абонентские пункты). Система должна обеспечивать возможность включения в свой состав неограниченного числа МРЛ, образующих сеть МРЛ, обеспечивающую освещение метеорологической обстановки по определенной территории.

2. Система должна обеспечивать получение максимально полного состава метеорологической информации с характеристиками, удовлетворяющими основным требованиям различных видов потребителей, т. е. удовлетворять требованию многофункциональности.

3. Система должна функционировать во все сезоны года в круглосуточном режиме.

4. Система должна являться частью наблюдательной сети Гидрометеорологической службы России и предоставлять данные для прогнозирования погоды и опасных явлений. Информация, формируемая Системой, должна быть доступна по телекоммуникационным сетям организациям Росгидромета, обеспечивающим оперативное метеорологическое обслуживание (гидрометцентры, АМЦ/АМСГ, ЦГМС).

5. Минимальный интервал времени обновления информации, передаваемой в центры сбора радиолокационной метеорологической информации, должен составлять 10 мин. При обслуживании местных потребителей информации (расположенных вблизи конкретного МРЛ) интервал времени обновления информации определяется по согласованию с этими потребителями.

6. Основные параметры Системы должны отвечать действующим требованиям технической документации ВМО.

П.1.2. Основные решаемые задачи

Система должна обеспечивать решение следующих основных задач:

- 1) получение радиолокационных данных, характеризующих облака и осадки в зоне обзора;
- 2) идентификация связанных с облачностью метеорологических явлений, включая опасные;
- 3) расчет скорости перемещения облачных систем;
- 4) сверхкраткосрочный прогноз перемещения и эволюции полей облаков и осадков (экстраполяционным методом);
- 5) оперативная передача информации об облачности, осадках и опасных явлениях в прогнозистические центры, АМЦ/АМСГ для использования при разработке прогнозов погоды и предупреждений об опасных и неблагоприятных явлениях погоды;
- 6) оперативная передача специализированной информации об облачности, осадках и опасных явлениях в аэропорты и автоматизированные системы управления воздушным движением для использования диспетчерским составом гражданской и ведомственной авиации в целях обеспечения полетов авиации;
- 7) передача специализированной оперативной и/или архивной информации об облачности и осадках в органы власти субъектов РФ, территориальных образований и другим потребителям;
- 8) объединение (совмещение) полученной на сети МРЛ информации об облачности, осадках и опасных явлениях погоды по освещаемой территории, включая в перспективе территории сопредельных государств по их согласию;

9) архивация получаемой метеорологической информации с использованием технических средств, обеспечивающих ее длительное хранение.

На МРЛ, применяемых для создания Системы, могут использоваться разные комплексы автоматизации радиолокационных наблюдений.

П.1.3. Состав представляемой информации и формы представления

1. Система должна обеспечивать представление радиолокационной метеорологической информации в картографическом виде (с использованием условных обозначений), в виде разрезов (сечений), в табличном виде. Формы представления должны соответствовать эргономическим требованиям, обеспечивать удобство использования информации конкретным потребителем.

2. Информация в картографическом виде должна представляться с использованием топографической основы. Должна быть обеспечена возможность выбора масштаба топографической основы в соответствии с детальностью отображаемой радиолокационной метеорологической информации. Должна быть предусмотрена возможность отображения на карте: административных и государственных границ, воздушных трасс и коридоров, физико-географических условий местности, зон ответственности прогностических органов, границ землепользования, автомобильных и железных дорог, линий электропередачи и других объектов.

3. Должна быть предусмотрена замена (изменение) электронных карт, используемых для создания топографической основы. Электронные карты должны быть разработаны с учетом потенциальной возможности расширения Системы за счет привлечения информации вновь организуемых пунктов автоматизированных радиолокационных наблюдений на территории региона.

4. Радиолокационная метеорологическая информация должна включать:

- 1) горизонтальные сечения радиоэха облаков и осадков на разных высотах;
- 2) вертикальные сечения радиоэха облаков в любом заданном азимуте;
- 3) интенсивность осадков;

- 4) суммы осадков за заданный интервал времени;
- 5) направление и скорость перемещения облачных образований;
- 6) тенденции эволюции развития (распада) облачных систем, зон с опасными явлениями и скорость их перемещения; представление тенденций в форме анимации;
- 7) зоны с опасными метеорологическими явлениями: градом, грозой, шквалом, ливнем, дождем, снегопадом;
- 8) карты контуров опасных явлений.

П.1.4. Основные требования к программно-вычислительным комплексам МРЛ

1. Программно-вычислительные комплексы МРЛ должны обеспечивать выполнение радиолокационных метеорологических наблюдений в автоматическом (автоматизированном) режиме, обработку радиолокационных данных и формирование выходной информационной продукции, обеспечение работы в сети МРЛ.

2. Основные требования (количественные) к программно-вычислительным комплексам МРЛ приведены в п. П.1.5.

3. Порядок обмена данными в системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов приведен в п. П.1.6.

П.1.5. Основные требования к программно-вычислительным комплексам метеорологических радиолокаторов, используемых для штормового оповещения

№ п/п	Наименование	Требования
1	Пространственное разрешение по вертикали	В типовом режиме разрешение 11 слоев, толщина слоя 1 км. Допускается до 15 слоев, толщина слоя от 0,5 до 1,5 км
2	Пространственное разрешение по горизонтали	В типовом режиме 100 × 100 элементов с размером элемента (ячейки) 4 × 4 км. Допускается 128 × 128 элементов, размер элемента от 1 до 4 км

Автоматизированные метеорологические радиолокационные
комплексы «Метеоячейка»

№ п/п	Наименование	Требования
3	Темп обновления информации	Период обновления информации, выдаваемой в сеть, от 10 до 180 мин (циклы наблюдений повторяются в автоматическом режиме)
4	Наличие осадков и их интенсивность	Определяются в каждом цикле наблюдений по элементам пространственного разрешения по горизонтали 4×4 км или менее. Интенсивность оценивается по градациям в диапазоне: жидкие осадки от 0,5 до 100 мм/ч — 4 градации (не менее), твердые осадки от 0,02 до 10 мм/ч — 3 градации (не менее). Должна быть предусмотрена возможность настройки границ градаций
5	Сумма осадков за заданный промежуток времени	Количество осадков должно суммироваться за заданный промежуток времени для элементов поверхности 4×4 км (или менее) и представляться в виде градаций. Типовое число градаций количества осадков — 15. Промежуток времени суммирования выбирается из ряда: 1, 3, 6, 9, 12, 24 ч. Возможно иное значение промежутка времени суммирования. Должна быть предусмотрена возможность настройки границ градаций
6	Диапазон измерения высоты облаков	Должна измеряться максимальная для каждой ячейки высота радиоэха облаков в диапазоне от поверхности Земли (высоты радиогоризонта) до 20 000 м. Дискретность измерения 250 м
7	Перечень обнаруживаемых опасных явлений погоды и их градации	Облачность, осадки обложные, осадки ливневые, грозы, град. По каждому явлению не менее трех градаций

Приложение 1

№ п/п	Наименование	Требования
8	Формы представления данных МРЛ в каналы связи	Код FM-94 BUFR, АС УВД. Формат: ВМО (Наставление по ГСТ № 386), АС УВД
9	Протокол передачи данных МРЛ	Протокол TCP/IP-socket (сопряжение с каналами АСПД Росгидромета), АС УВД
10	Режим распространения радиолокационной информации	Программное обеспечение должно обеспечивать возможность передачи радиолокационной информации любому потребителю (пользователю), обеспеченному каналом связи для передачи бит-ориентированной информации. Должна быть обеспечена возможность циркулярной передачи данных и передачи данных по запросу (режим <i>запрос—ответ</i>) на адреса пользователей
11	Объединение информации от нескольких (сети) МРЛ по общей зоне обзора	ПВК должен обеспечивать получение и объединение радиолокационных данных от нескольких (сети) МРЛ и построение «стыкованных» карт радиолокационной информации
12	Дистанционное управление работой МРЛ и получение информации с МРЛ	Должно быть обеспечено дистанционное управление и получение информации с МРЛ. Дистанционность — не менее 8 км
13	Хранение и архивация радиолокационной информации	ПВК должен обеспечивать хранение полученной радиолокационной информации за срок не менее 30 сут. Должна быть обеспечена архивация отдельных (наиболее важных) видов радиолокационной информации
14	Отображение текущего прогноза погоды и штормовых предупреждений	Должна быть предусмотрена возможность вывода на экран дисплея прогноза погоды и штормовых предупреждений

**Автоматизированные метеорологические радиолокационные
комплексы «Метеоячейка»**

№ п/п	Наименование	Требования
15	Функции, реализация которых является полезной для решения задач штормового оповещения	Определение скорости и направления перемещения облачных систем (зон осадков) в автоматическом и интерактивном режимах Обеспечение возможности наложения на радиолокационные данные других видов данных (от штормового кольца, метео- и аэрологических станций), прогностических полей, спутниковой информации. Для МРЛ (ПВК) штормового оповещения реализация возможности функционирования в режиме контроля за работами по АВ; для МРЛ (ПВК), устанавливаемых в противоградовых подразделениях. выдача информации ШО (контроль АВ) с периодичностью 10—25 мин

П.1.6. Порядок обмена данными в системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов

П.1.6.1. Правила обмена данными

Кодирование данных. Для обмена радиолокационными данными на территории России используется международный код FM-94 BUFR (FM-94 BUFR Collected papers and specification/European center for medium-range weather forecasts, Feb. 1998. Изд. 2001 г., рекомендация 3 КОС-ХП).

Каналы связи. Для обмена радиолокационными данными используются каналы телесвязи сети МЕКОМ, используемой в Росгидромете для обмена оперативной информацией (протокол TCP/IP) с соблюдением правил формата сообщений. При отсутствии каналов доступа к каналам сети МЕКОМ допускается использование других каналов связи.

Сроки проведения наблюдений. Технический цикл формирования комплекта наблюдений должен быть построен таким образом, чтобы эти комплекты могли быть отнесены к следующим срокам наблюдений: $H + 00$, $H + 10$, $H + 20$, $H + 30$, $H + 40$, $H + 50$, где H — час по Гринвичу, 00, 10, 20 и т. д. — минуты часа. Время получения данных определяется по моменту завершения обзора пространства. Время получения данных может быть меньше соответствующего номинального срока не более чем на 3 мин и больше него не более чем на 2 мин. При передаче радиолокационных данных время, указанное в заголовке сообщения, должно быть временем получения данных.

Сроки составления композитных карт. Сроки составления композитных карт соответствуют срокам наблюдений (см. п. 1.3), а именно: $H + 00$, $H + 10$, $H + 20$, $H + 30$, $H + 40$, $H + 50$, где H — час по Гринвичу, 00, 10, 20 и т. д. — минуты часа.

Время передачи данных по каналам связи. Время передачи данных определяется как разность между временем получения данных и временем поступления данных в центр построения композитных карт. Время передачи данных не должно превышать 5 мин.

Радиолокационные продукты. Для обмена используются следующие виды радиолокационных продуктов:

горизонтальная отражательная способность

в слое 0000—0999 м,

в слое 1000—1999 м,

в слое 2000—2999 м,

в слое 3000—3999 м,

в слое 4000—4999 м,

в слое 5000—5999 м,

в слое 6000—6999 м,

в слое 7000—7999 м,

в слое 8000—8999 м,

в слое 9000—9999 м,

в слое 10000—10999 м;

метеорологические явления и типы облачности;

высота верхней границы радиоэха облачности;

интенсивность осадков;

сумма осадков

за 1 час;

за 3 часа;

за 6 часов;

за 12 часов;

за 24 часа.

Формат данных радиолокатора. Каждый радиолокационный продукт передается в виде матрицы (карты), состоящей из 100 строк и 100 столбцов. Значения каждого элемента матрицы относятся к центру ячейки размером 4×4 км. Строки матрицы ориентированы с запада на восток, столбцы — с юга на север. Данные в сообщении располагаются построчно, начиная с левого (западного) элемента нижней (южной) строки и заканчивая правым (восточным) элементом верхней (северной) строки.

Единицы измерения и длина данных в битах для каждого типа радиолокационного продукта описаны в классе 21 таблицы В кода BUFR.

П.1.6.2. Формат сокращенного заголовка метеорологических сообщений с данными радиолокационных наблюдений в коде FM-94 BUFR для национального и двустороннего согласованного распространения в регионах RA2 и RA6

Сокращенный заголовок должен иметь следующий формат (ВМО. Оперативные процедуры глобальной системы телесвязи. Часть II. Приложение II-5. Указатели данных T1, T2, A1, A2ii в сокращенных заголовках):

T₁, T₂, A₁, A₂iiCCCCYYGGgBBB.

Для радиолокационных данных в коде BUFR указатели данных имеют следующие значения:

T₁ = I — данные наблюдений в коде BUFR (таблица А);

T₂ = P — графические данные (таблица В3);

A₁ = R — радиолокационные данные (таблица С6);

A₂ = N — северное полушарие (таблица С3);

ii = 40—89 — система номеров используется для различия бюллетеней с данными.

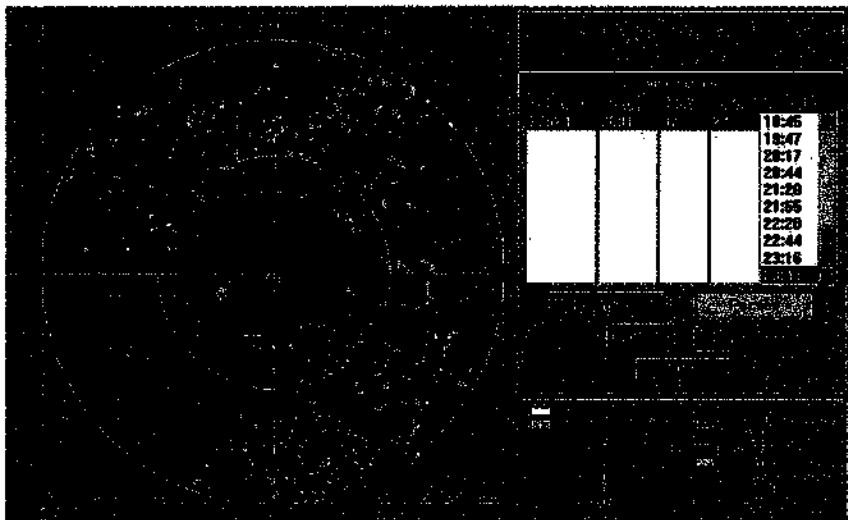


Рис. 1.3. Карта количества осадков за заданный интервал времени (с 5 ч 42 мин по 23 ч 43 мин 27 июля 2001 г.).

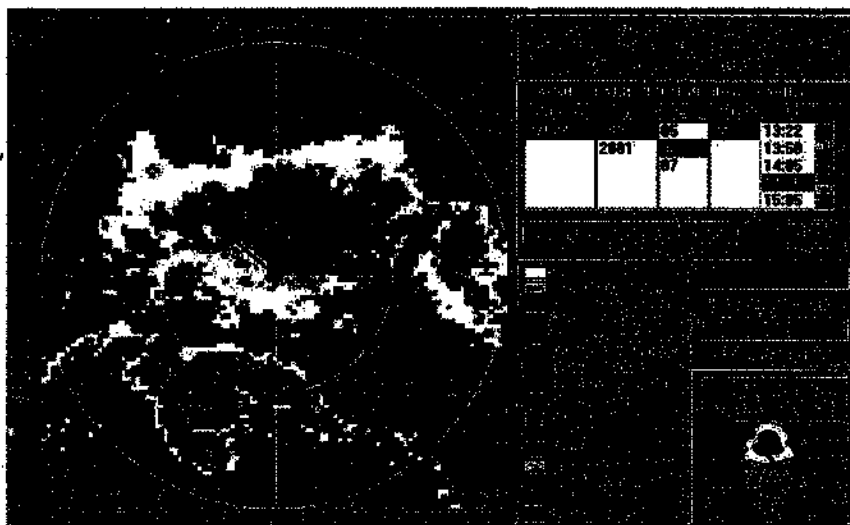


Рис. 1.4. Карта метеоявлений.

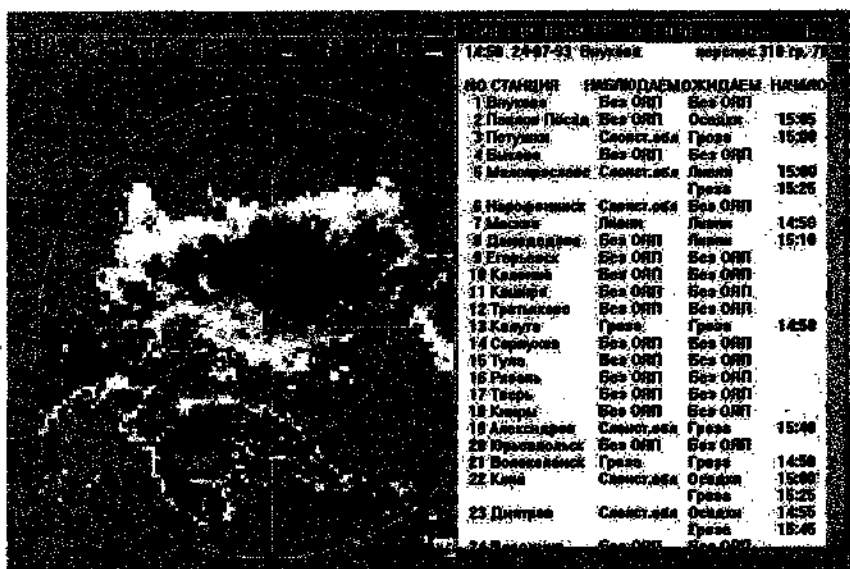


Рис. 1.5. Инерционный прогноз для метеостанций.

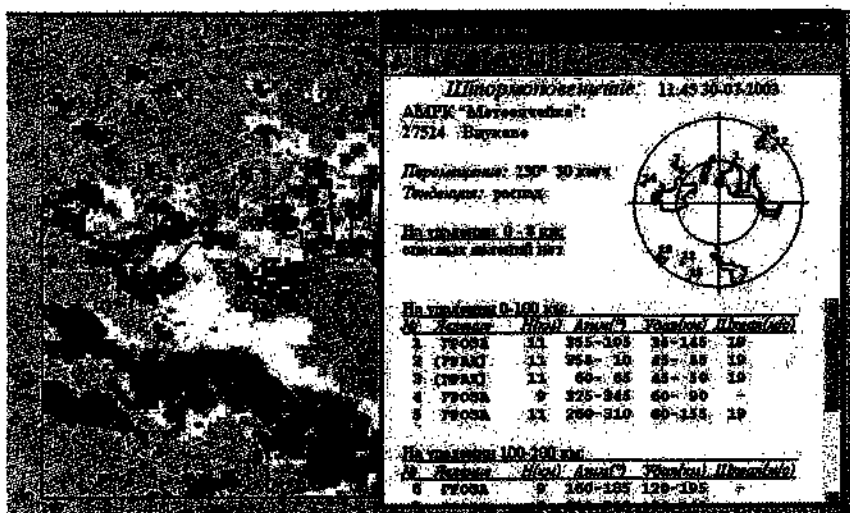


Рис. 1.6. Таблица штормового предупреждения.

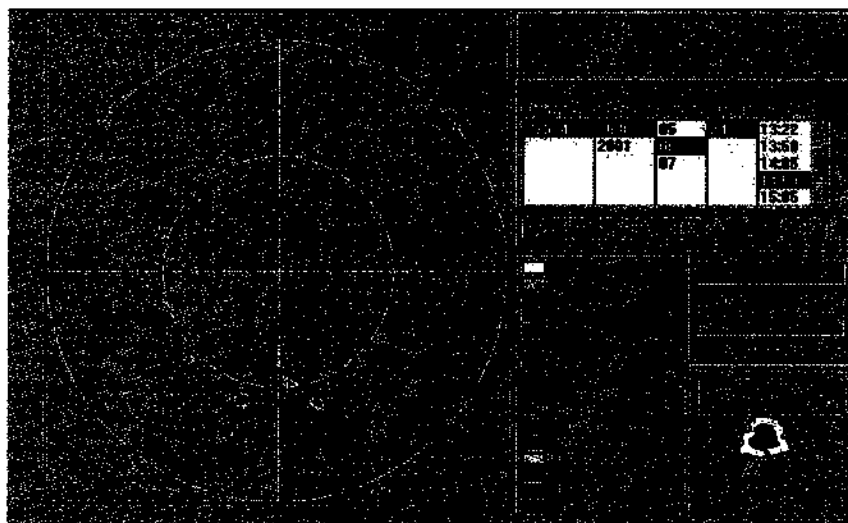


Рис. 1.9. Карта контуров опасных явлений с планом воздушной зоны.

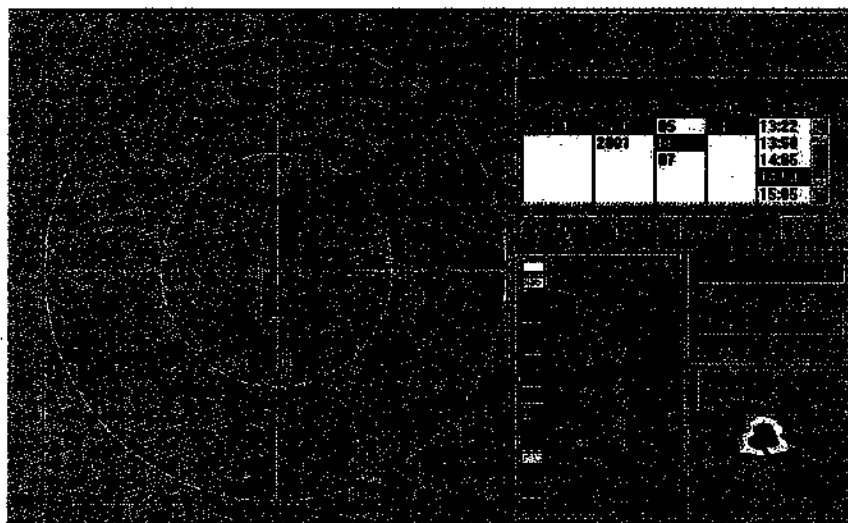


Рис. 1.10. Карта контуров опасных явлений с планом воздушной зоны.

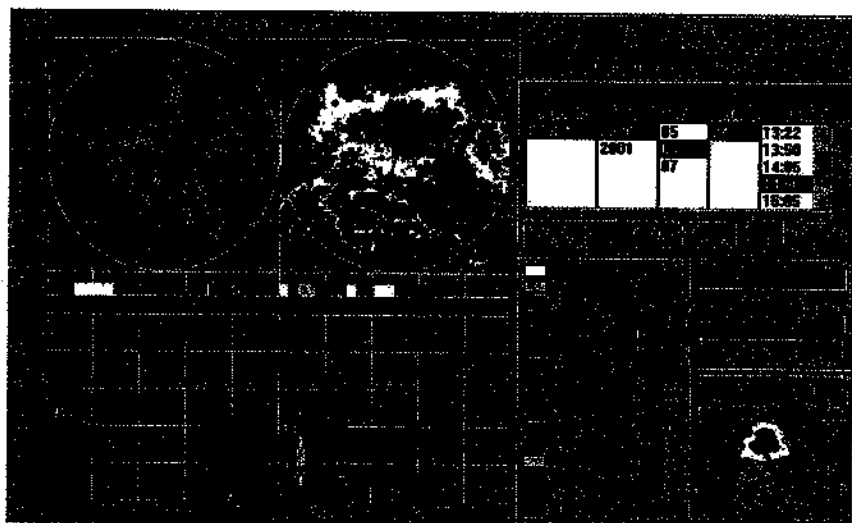


Рис. 1.11. Вертикальное сечение по выбранному азимуту ($A = 197^\circ$).



Рис. 1.12. Карта обледенения в заданном азимуте ($A = 184^\circ$).



Рис. 1.13. Композитная карта метеоявлений.

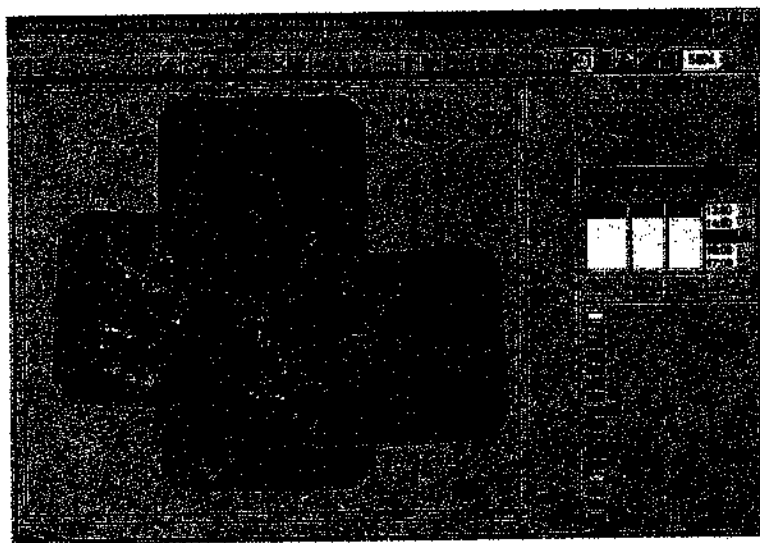


Рис. 1.14. Композитная карта высот верхней границы радиозаха.

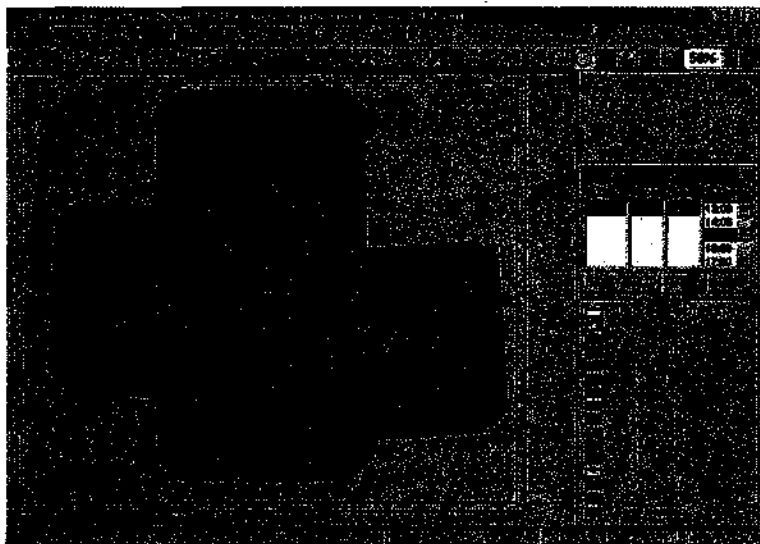


Рис. 1.15. Композитная карта отражаемости в слое 1,0—2,0 км.

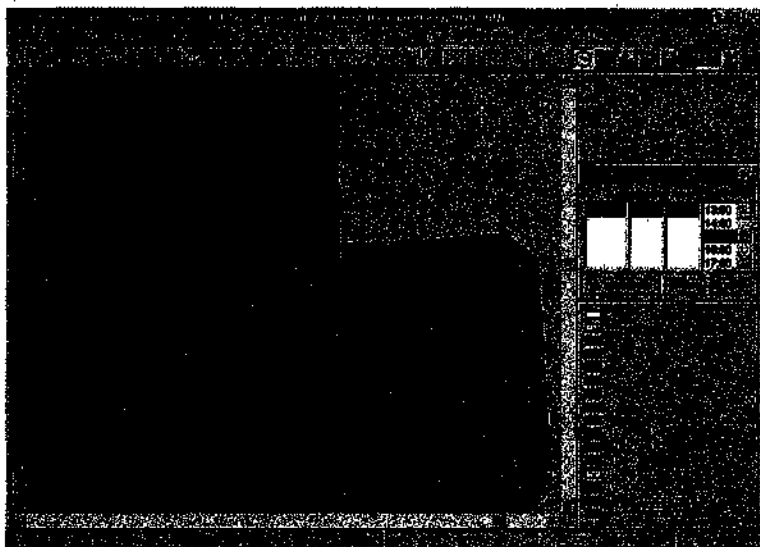


Рис. 1.16. Контуры опасных явлений погоды.

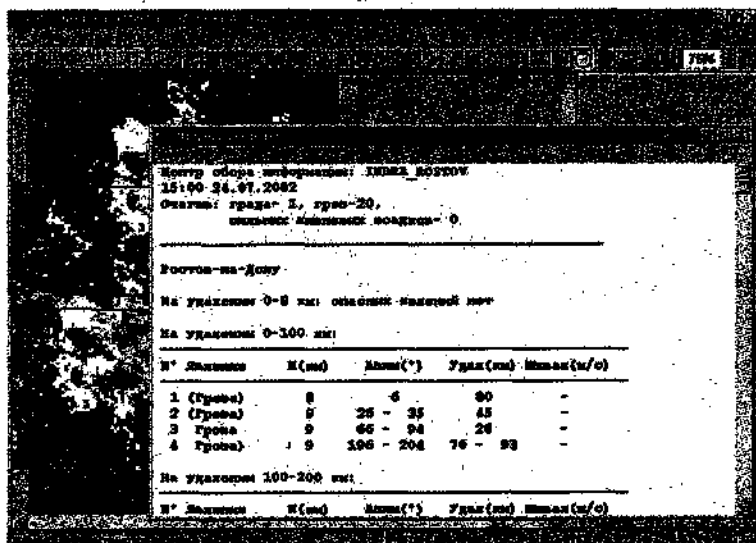


Рис. 1.17. Таблица «Штормоповещение» с опасными явлениями погоды.

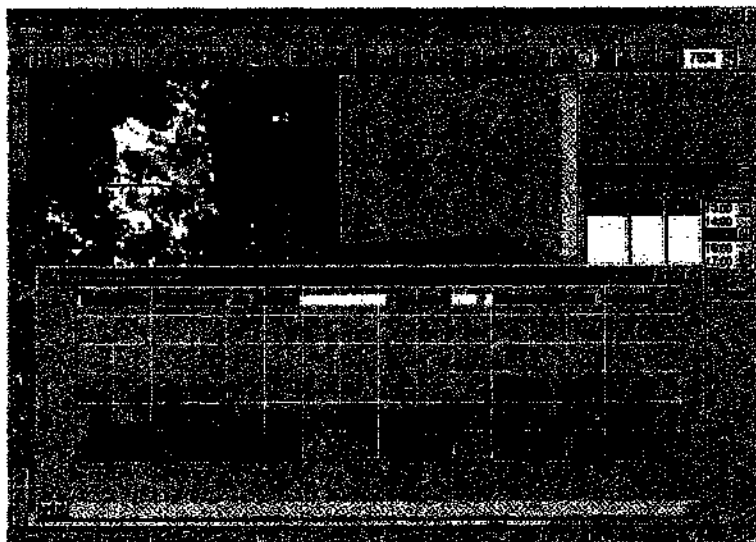


Рис. 1.18. Вертикальное сечение радиозона по заданной траектории.



Рис. 1.19. Карта количества осадков.

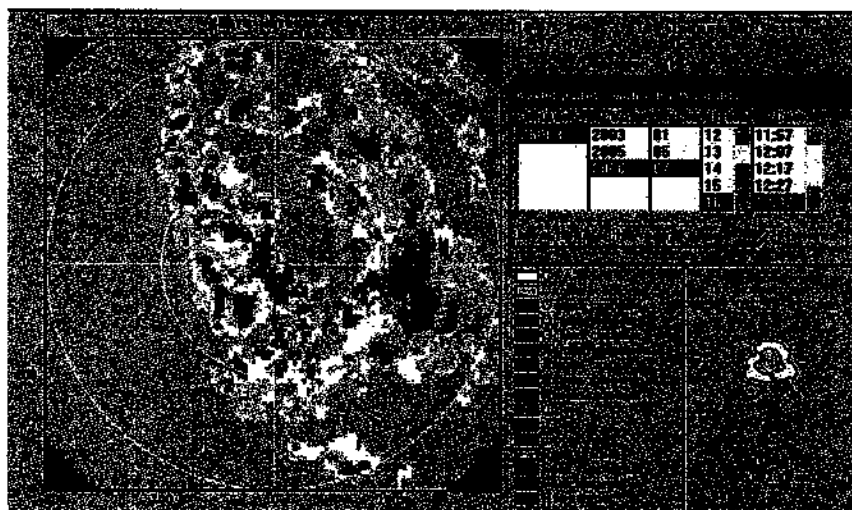


Рис. 2.17. Карта метеоявлений.



Рис. 2.19. Карта контуров опасных явлений.

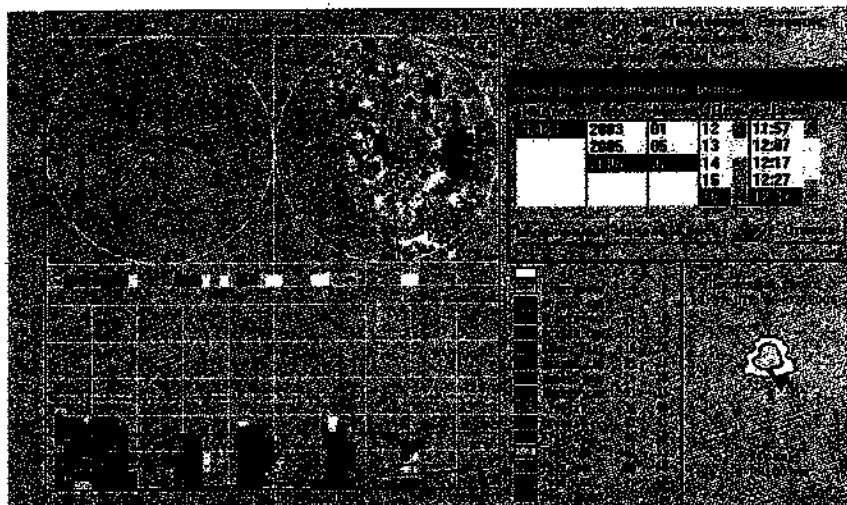


Рис. 2.20. Карта вертикальных сечений в азимуте ($A = 175^\circ$).

Приложение 1

ii	Тип данных
40	Горизонтальная отражательная способность в слое 0—999 м
41	Горизонтальная отражательная способность в слое 1000—1999 м
42	Горизонтальная отражательная способность в слое 2000—2999 м
43	Горизонтальная отражательная способность в слое 3000—3999 м
55	Горизонтальная отражательная способность в слое 15 000—15 999 м
56—69	Зарезервировано
70	Метеорологические явления и типы облачности
71	Высота верхней границы радиоэха облачности
72	Интенсивность осадков
73	Сумма осадков за 1 час
74	Сумма осадков за 3 часа
75	Сумма осадков за 6 часов
76	Сумма осадков за 12 часов
77	Сумма осадков за 24 часа
78—88	Зарезервировано
89	Техническое состояние МРЛ

II.1.6.3. Дополнение кода FM-94 BUFR кодовой таблицей «Метеорологические явления и типы облачности по радиолокационным данным»

В связи с отсутствием в коде FM-94-ХП BUFR таблицы для кодирования метеорологических явлений и типов облачности по радиолокационным данным рекомендуется таблицу В кода BUFR класс 21 дополнить новым дескриптором 0 21 022 и соответствующей ему кодовой таблицей.

**Таблица В кода BUFR. Классификация элементов
Класс 21 — Данные радиолокатора**

Табличная ссылка	Название элемента	Единица измерения	Масштаб	Начало отсчета	Длина данных, биты
F X Y					
0 21 022	Метеорологические явления и типы облачности по радиолокационным данным	Кодовая таблица	0	0	5

Кодовая таблица 0 21 022. Метеорологические явления
и типы облачности по радиолокационным данным

Кодовая цифра	Значение
0	Отсутствие радиозха
1	Облачность верхнего и среднего яруса
2	Слоистообразная облачность
3	Осадки слабые
4	Осадки умеренные
5	Осадки сильные
6	Кучевая облачность
7	Ливень слабый
8	Ливень умеренный
9	Ливень сильный
10	Гроза с вероятностью 30—70 %
11	Гроза с вероятностью 71—90 %
12	Гроза с вероятностью >90 %
13	Град слабый
14	Град умеренный
15	Град сильный
16	Шквал слабый
17	Шквал умеренный
18	Шквал сильный
19	Торнадо (смерч)
31	Отсутствующее (иное) значение

Приложение 2

Сведения о фильтрах, применяемых при обработке информации в АМРК «Метеор—Метеоячейка»

П.2.1. Согласованный фильтр

Фильтрация в передатчике и канале обычно приводит к искажению принятой последовательности импульсов, а значит, эти импульсы не совсем готовы к дискретизации и детектированию. Задачей принимающего фильтра является восстановление низкочастотного импульса с максимально возможным отношением сигнал/шум. Оптимальный принимающий фильтр, выполняющий такую задачу, называется согласованным фильтром.

Другими словами, *согласованный фильтр (matched filter)* — это линейное устройство, спроектированное, чтобы давать на выходе максимально возможное для данного передаваемого сигнала отношение сигнал/шум.

Обычные фильтры отсекают нежелательные спектральные компоненты принятого сигнала при поддержании некоторой точности воспроизведения сигналов в выбранной области спектра, называемой *полосой пропускания (pass-band)*. В общем случае эти фильтры разрабатываются для обеспечения приблизительно одинакового усиления, линейного увеличения фазы в зависимости от частоты в пределах полосы пропускания и максимального поглощения в остальной части спектра, именуемой *полосой заграждения (stop-band)*. Согласованный фильтр имеет несколько иные «проектные приоритеты», направленные на максимизацию отношения сигнал/шум известного сигнала при шуме AWGN (additive white Gaussian noise — аддитивный белый гауссов шум, т.е. тепловой шум). В обычных фильтрах используются случайные сигналы, и результат фильтрации определяется только полосами сигналов, тогда как согласованные фильтры предназначены для известных сигналов, имеющих случайные параметры (такие как амплитуда и время). Согласованный фильтр можно рассматривать как

шаблон, который согласовывает обрабатываемый сигнал с известной формой. Обычный фильтр сохраняет временную или спектральную структуру сигнала. Согласованный фильтр, наоборот, в значительной степени модифицирует временную структуру путем сбора энергии сигнала, которая согласовывается с его шаблоном, и в завершение каждого интервала передачи символа представляет результат фильтрации в виде значения максимальной амплитуды. Вообще, в цифровой связи приемник обрабатывает поступающие сигналы с помощью фильтров обоих типов. Задачей обычного фильтра является изоляция и извлечение высокоточной аппроксимации сигнала с последующей передачей результата согласованному фильтру. Согласованный фильтр накапливает энергию принятого сигнала, и в момент взятия выборки на выход фильтра подается напряжение, пропорциональное этой энергии, после чего следует детектирование и дальнейшая обработка сигнала.

П.2.2. Цифровая фильтрация

С помощью подходящих аналоговых и цифровых компонентов цифровой фильтр можно настроить на выполнение селекции желаемой частоты или модификации фазы.

Выходной сигнал фильтра $y(k)$ создается из взвешенной суммы предыдущих входных сигналов $x(k)$ и предыдущих выходных сигналов $y(k-n)$, где $n > 0$. На рис. П.2.1 показан поточный граф сигнала (состоит только из сумматоров, умножителей и схем задержки выборки) для цифрового фильтра с четырьмя весовыми коэффициентами прямой связи и тремя весовыми коэффициентами обратной связи. (Задержка, длительность которой равна длительности одной выборки, обозначена символом Δ)

Выход данного фильтра описывается следующим выражением:

$$\begin{aligned} y(k) = & a_0 x(k) + a_1 x(k-1) + a_2 x(k-2) + \\ & + a_3 x(k-3) + b_1 y(k-1) + b_2 y(k-2) + \\ & + b_3 y(k-3) = \sum_{n=0}^3 a_n x(k-n) + \sum_{m=1}^3 b_m y(k-m). \end{aligned} \quad (\text{П.2.1})$$

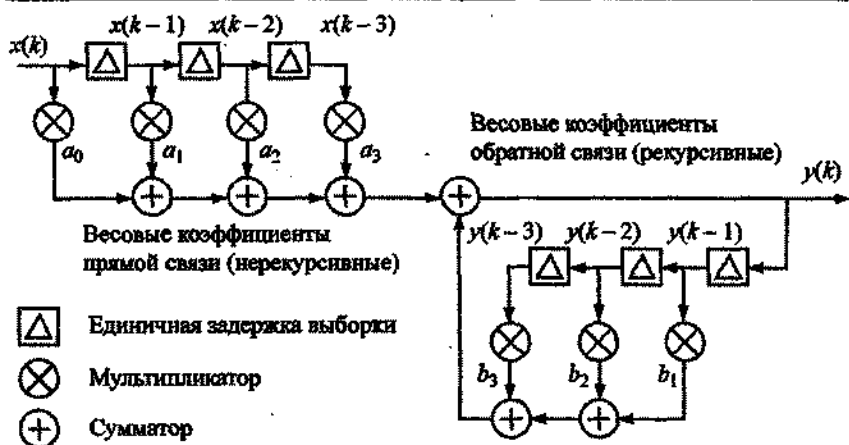


Рис. П.2.1. Общая схема цифрового фильтра.

П.2.3. z-преобразование

По сути z-преобразование — это дискретный эквивалент преобразования Лапласа. Оно делает возможным удобный математический анализ (стационарный анализ и анализ переходных процессов) и манипулирование сигналами и спектрами. Возможно, наиболее распространенным современным применением z-преобразования являются описание дискретных систем и анализ их устойчивости. z-преобразование позволяет вычислять свертку входного сигнала и импульсной характеристики дискретной линейной системы в математически удобном виде. Кроме того, могут определяться нули и полюса системы, что позволяет извлекать информацию о динамическом поведении и устойчивости дискретной системы. Следует отметить, что нули и полюса z-преобразования отличаются от нулей и полюсов преобразования Лапласа.

Прямое z-преобразование определяется следующей формулой:

$$X(z) = \sum_{k=0}^{\infty} x(k)z^{-k}, \quad (\text{П.2.2})$$

где $x(k)$ — исходный дискретный сигнал во временной области.

Переход из z -области во временную область выполняется посредством обратного z -преобразования

$$x(k) = z^{-1} \{X(z)\} = \frac{1}{2\pi i} \oint_c X(z) z^{k-1} dz. \quad (\text{П.2.3})$$

Здесь интегрирование в комплексной области $\oint$ производится по любому простому контуру в области сходимости $X(z)$, включающему точку $z=0$. Как правило, вычисление обратного z -преобразования сложнее, чем прямого. Обычно приходится раскладывать подынтегральное выражение на сумму рациональных дробей, делить полиномы, использовать теорему о вычетах и составлять разностные уравнения. Поэтому большая часть z -преобразований и обратных z -преобразований вычисляется с использованием таблиц интегралов и их свойств, так что явного вычисления выражения (П.2.3) обычно удается избежать.

П.2.4. Передаточная функция цифрового фильтра

Применение z -преобразования к формуле (П.2.1) дает следующий результат:

$$Y(z) = a_0 X(z) + a_1 X(z) z^{-1} + a_2 X(z) z^{-2} + a_3 X(z) z^{-3} + \\ + b_1 Y(z) z^{-1} + b_2 Y(z) z^{-2} + b_3 Y(z) z^{-3}. \quad (\text{П.2.4})$$

Передаточная функция цифрового фильтра, изображенного на рис. П.2.1, получается после преобразования выражения (П.2.4) и выглядит следующим образом:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}}{1 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2} - b_3 z^{-3}} = \\ = \frac{a_0 (1 - \alpha_1 z^{-1})(1 - \alpha_2 z^{-1})(1 - \alpha_3 z^{-1})}{(1 - \beta_1 z^{-1})(1 - \beta_2 z^{-1})(1 - \beta_3 z^{-1})} = \\ = \frac{a_0 (z - \alpha_1)(z - \alpha_2)(z - \alpha_3)}{(z - \beta_1)(z - \beta_2)(z - \beta_3)} = \frac{A(z)}{B(z)}. \quad (\text{П.2.5})$$

Здесь через α обозначены нули, а через β — полюса z -области, которые находятся как корни полинома числителя $A(z)$ и полинома знаменателя $B(z)$. Для цифрового фильтра, подобного изображенному на рис. П.2.1, но имеющего $N - 1$ весовых коэффициентов прямой связи и M коэффициентов обратной связи, полиномы числителя и знаменателя в передаточной функции, приведенной в формуле (П.2.5), будут иметь порядок N и M соответственно.

Вследствие наличия в потоковом графе численных обратных связей цифровой фильтр может быть (численно) неустойчивым. Критерий устойчивости можно сформулировать следующим образом: система устойчива, если модули всех полюсов передаточной функции цифрового фильтра меньше единицы.

П.2.5. Фильтры с конечным импульсным откликом

На настоящий момент наиболее распространенный тип цифровых фильтров — это *фильтры с конечной импульсной характеристикой, КИХ (finite impulse response, FIR)*, имеющие, как понятно из названия, импульсный отклик конечной длительности. Данные фильтры не имеют весовых коэффициентов обратной связи (см. рис. П.2.1), следовательно, можно сделать вывод об их безусловной устойчивости. Выход фильтра с КИХ, приведенного на рис. П.2.2, описывается следующим выражением:

$$y(k) = a_0x(k) + a_1x(k-1) + a_2x(k-2) + a_3x(k-3) + \dots + a_{N-1}x(k-N+1) = \sum_{n=0}^{N-1} a_nx(k-n). \quad (\text{П.2.6})$$

Таким образом, передаточная функция фильтра имеет только нули и не имеет полюсов:

$$H(z) = a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3} + \dots + a_Nz^{-N+1} = \\ + a_0(1 - \alpha_1z^{-1})(1 - \alpha_2z^{-1})(1 - \alpha_3z^{-1}) \dots (1 - \alpha_Nz^{-1}). \quad (\text{П.2.7})$$

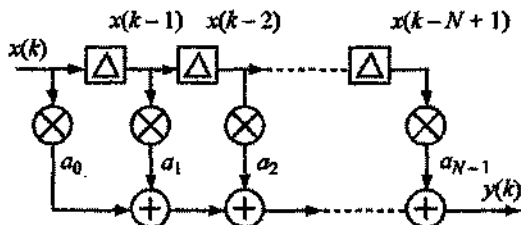


Рис. П.2.2. Цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой.

По сути работа фильтра с КИХ — это вычисление текущего среднего, когда выход — это взвешенное среднее N последних входных выборок, и поэтому фильтры данного типа называются *фильтрами скользящего среднего* (*moving average filter*). Кроме того, их еще называют *линиями задержки с отводами* (*tapped delay line*) и *трансверсальными фильтрами* (*transversal filter*).

Если не оговорено противное, большинство фильтров с КИХ разрабатывается в расчете на линейное изменение фазы или постоянную групповую задержку (что соответствует симметричной импульсной характеристике).

П.2.6. Фильтры с бесконечной импульсной характеристикой

Фильтры с бесконечной импульсной характеристикой, БИХ (*infinite impulse response, IIR*) обычно создаются из аналоговых прототипов. Как понятно из названия, импульсная реакция таких фильтров (предполагая арифметику бесконечной точности) может иметь бесконечную длительность. Данные фильтры имеют весовые коэффициенты и прямой, и обратной связи, подобно тому, как показано на рис. П.2.1. Вследствие рекурсивной природы поточного графа, данные фильтры могут иметь весьма длительные импульсные отклики. Следовательно, фильтры с БИХ могут создаваться с меньшим числом весовых коэффициентов, чем фильтры с КИХ при аналогичных функциональных амплитудных характеристиках. В общем случае в цифровых фильтрах с БИХ фаза изменяется нелинейно.

Приложение 3

Вертикальная диаграмма излучения (ВДИ) АМРК «Метеор—Метеоячейка»

Для выбора места размещения радиолокатора необходимо знать его вертикальную диаграмму излучения (ВДИ) [11].

Предельно допустимый уровень (ПДУ) плотности потока энергии (ППЭ) на высоте 2 м над поверхностью Земли не должен превосходить 10 мкВт/см². Такова норма для санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и зоны ограниченной застройки (ЗОЗ) для радиолокатора, установленная Минздравом РФ.

1. Граница дальней зоны облучения R_d для круглой апертуры антенны со спадающим к краям возбуждением определяется формулой:

$$R_d = 0,39 \frac{D^2}{\lambda} = 0,39 \frac{(4,2)^2}{0,053} = 130 \text{ м.} \quad (\text{П.3.1})$$

2. Зона Френеля—Фраунгофера, за пределами которой диаграмма направленности АМРК окончательно принимает игольчатый характер, описывается формулой

$$R_{\text{фр}} \geq \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot (4,2)^2}{0,053} = 665,6 \text{ м.} \quad (\text{П.3.2})$$

3. Плотность потока энергии (ППЭ, мкВт/см²) АМРК рассчитывается по формуле

$$\text{ППЭ} = \frac{cF^2(\theta)}{r^2}, \quad (\text{П.3.3})$$

где

$$c = 8P_{\text{ср}}G\Phi_3, \quad (\text{П.3.4})$$

$P_{\text{ср}}$ — в ваттах; $\Phi_3 = 1,6$ — множитель, учитывающий влияние Земли (для $\lambda = 5,3$ см); $G = 3,2 \cdot 10^4$ — коэффициент усиления антенны (45 дБ).

В режиме Измерение отражаемости Z:

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{и}} F_{\text{ЧСИ}} \tau_{\text{зонд}} k_{\text{кпл пер}} = 250 \cdot 10^3 \cdot 250 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,715 = 90 \text{ Вт},$$

$$C_{\text{реж z}} = 8 \cdot 90 \cdot 3,210^4 \cdot 1,6 = 76,8 \cdot 10^5.$$

В режиме Доплеровская скорость:

$$P_{\text{ср}} = 250 \cdot 10^3 \cdot 1200 \cdot 0,83 \cdot 10^{-6} \cdot 0,715 = 177,6 \text{ Вт},$$

$$C_{\text{реж доп}} = 8 \cdot 177,6 \cdot 3,2 \cdot 10^4 \cdot 1,6 = 228,25 \cdot 10^5.$$

Аппроксимация диаграммы направленности антенны (ДНА) до уровня первого бокового лепестка описывается выражением

$$F^2(\theta) = \exp \left[-0,69 \left(\frac{\theta}{\theta_{0,5p}} \right)^2 \right] \quad (\text{П.3.5})$$

где $\theta_{0,5p}$ — половина ширины ДНА ($0,5^\circ$): на границе ДНА $\theta/\theta_{0,5p} = 2$ и $F^2(\theta/\theta_{0,5p}) = 6,3 \cdot 10^{-2}$, по оси ДНА $F^2(\theta) = 1$.

4. Расчет санитарно-защитной зоны (СЗЗ)

4.1. Для санитарно-защитной зоны (СЗЗ) по первому боковому лепестку удаление ее границы $r_{\text{мин}}$ не должно быть меньше наибольшего из значений

$$r_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{c F_{6\text{л}}^2}{\text{ПДУ}}}. \quad (\text{П.3.6})$$

В режиме Измерение отражаемости Z:

$$r_{\text{мин z}} = \sqrt{\frac{76,8 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3}}{10}} = 27,7 \text{ м}.$$

В режиме Доплеровская скорость:

$$r_{\text{мин доп}} = \sqrt{\frac{228,2 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3}}{10}} = 47,7 \text{ м},$$

где первый боковой лепесток -30 дБ, или $F_{\text{бл}}^2 = 10^{-3}$, а ПДУ = 10 мкВт/см².

Таким образом, для АМРК «Метеор—Метеоячейка» размер санитарно-защитной зоны по боковому лепестку составляет $47,7$ м.

4.2. Для оценки размера СЗЗ и зоны ограниченной застройки ЗОЗ рассчитаем r_{max} по формуле

$$r_{\text{max}} = \sqrt{\frac{c}{\text{ПДУ}}}. \quad (\text{П.3.7})$$

Величина r_{max} соответствует максимуму излучения АМРК ($F^2(\theta) = 1$, ПДУ = 10 мкВт/см²):

$$r_{\text{max з}} = \sqrt{\frac{76,8 \cdot 10^5}{10}} = 876,3 \text{ м},$$

$$r_{\text{max доп}} = \sqrt{\frac{228,2 \cdot 10^5}{10}} = 1511 \text{ м}.$$

Отсюда следует, что расчеты удаления границ СЗЗ и ЗОЗ необходимо проводить до расстояния 1511 м.

4.3. Построение СЗЗ и ЗОЗ графоаналитическим методом производится с помощью формулы

$$H = h_a - r \operatorname{tg} \left[\sqrt{\frac{\ln \frac{r^2 \cdot \text{ПДУ}}{c}}{-0,69} \cdot \frac{(\theta_{0,5 \text{ рэ}})}{2} - \varepsilon_0} \right]. \quad (\text{П.3.8})$$

где H — высота над поверхностью Земли; h_a — высота центра излучения антенны АМРК; $c = 8P_{\text{ср}} [B_m] G \Phi_3$ (см. формулу (П.3.4)); $(\theta_{0,5 \text{ рэ}})$ — ширина ДНА по половинной мощности в вертикальной плоскости; ε_0 — угол места максимума излучения (град.); r — дальность (м); ПДУ — значение предельно допустимого уровня ППЭ, равное 10 мкВт/см².

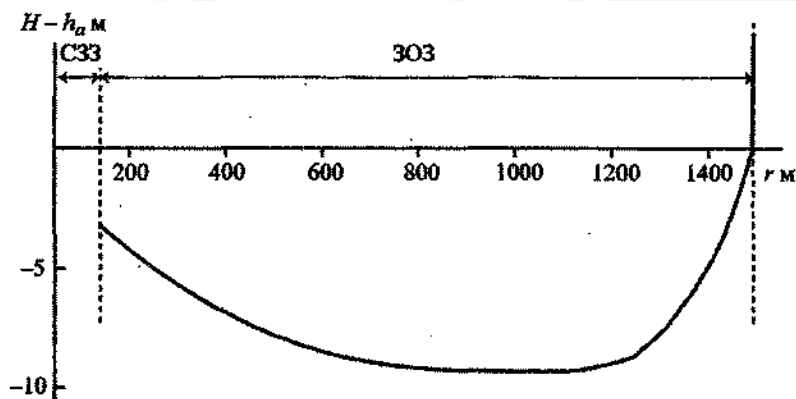


Рис. П.3.1. Вертикальная диаграмма излучения (ВДИ) при $\text{ПДУ} = 10 \text{ мкВт/см}^2$ АМРК «Метеор—Метеоячейка».

На рис. П.3.1 приведена вертикальная диаграмма излучения (ВДИ) относительно центра излучения. Размер СЗЗ АМРК определяется границей дальней зоны R_d от источника излучения. (Граница дальней зоны R_d иначе называется рэлеевским расстоянием (П.3.1).) В интервале от 0 до R_d формируется ДНА АМРК. Только на $r \geq R_d$ от АМРК можно использовать геометрический подход к построению ДНА.

Зона ограничения застройки (ЗОЗ) существует в интервале расстояний от 130 м до $r_{\text{max}} = 1511$ м. Далее ограничений на застройку не существует. Высота строений в ЗОЗ должна быть на 9,5 м меньше высоты центра антенны АМРК «Метеор—Метеоячейка».



МОНОГРАФИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ
РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ «МЕТЕОЯЧЕЙКА»

ЛР № 020228 от 10.11.96 г.

Редактор *О. В. Латина*. Компьютерная верстка *М. В. Дукальская*.

Подписано в печать 10.07.2007 г. Печать офсетная. Вумага офсетная.
Печ. л. 16 с вкл. Тираж 400 экз.

Гидрометеониздат, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.
Отпечатано в типографии ООО «Северная Нива» (г. Всеволожск).

ИНСТИТУТ РАДАРНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ
188685, Россия, Ленинградская область,
Всеволожский район, п. Воейково, д. 15.
Тел./факс (813) 707-5592
E-mail: iram@infopro.spb.ru