

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОУ ВПО «Пермский государственный университет»

Н.И. Толмачева, О.Ю. Булгакова

**МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАТОРЫ И
РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

Учебное пособие

Пермь 2007

ББК 26.23
Т 52
УДК 551.5

Толмачева Н.И.

Т52 Метеорологические радиолокаторы и радионавигационные системы управления воздушным движением: учеб. пособие / Н.И. Толмачева, О.Ю. Булгакова; Перм. ун-т.– Пермь, 2007.– 154 с.

ISBN 5-7944-0801-4

Учебное пособие содержит краткое изложение методов радиозондирования. Приводится комплекс вопросов, касающихся исследования атмосферы с использованием метеорологических радиолокаторов. Описываются классические и современные методы радиолокационных измерений. Уделено внимание теоретическим понятиям и вопросам физико-технического характера. Дано описание широко используемых автоматических измерительных систем и технических средств для управления воздушным движением. Материал поясняется и иллюстрируется схемами, рисунками и снимками.

Издание предназначено для преподавателей, аспирантов, магистров географического факультета и студентов, обучающихся по специальности 012600 «Метеорология».

Печатается в соответствии с решением редакционно-издательского совета Пермского государственного университета

Рецензенты: Первый проректор Института повышения квалификации руководящих работников и специалистов Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды канд. геогр. наук *И.Ф. Берестовский*; д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник Института механики сплошных сред УрО РАН *К.И. Морозов*

ББК 26.23
УДК 551.5
ISBN 5-7944-0801-4 © Толмачева Н.И., Булгакова О.Ю., 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Введение	7
1. Общие сведения об организации управления воздушным движением	10
1.1. Траектория и этапы полета самолета	12
1.2. Эшелонирование полетов	13
1.3. Основы самолетовождения	14
2. Факторы, влияющие на безопасность полетов	17
2.1. Сдвиг ветра и его влияние на взлет и посадку	17
2.2. Взлет и посадка самолетов при наличии сдвига ветра	18
2.3. Навигационный треугольник скоростей	20
2.4. Влияние низкой облачности и тумана на безопасность полетов	22
2.5. Влияние конвективной деятельности на полет воздушных судов	23
2.6. Обледенение и его влияние на полет самолетов и вертолетов	24
2.7. Влияние атмосферной турбулентности на полет воздушных судов	25
2.8. Влияние электрических зон в слоисто-дождевой облачности и осадках на безопасность полетов самолетов	26
3. Метеорологические радиолокационные станции	29
3.1. Основы радиолокации	29
3.1.1. Эффективная площадь рассеяния	29
3.1.2. Классификация радиолокационных целей	31
3.1.3. Отражающий объем метеорологических объемно-распределенных целей	34
3.1.4. Эффективная площадь рассеяния метеоцели	35
3.1.5. Радиолокационная отражаемость	37
3.2. Радиолокационные методы обнаружения и наблюдения объектов в пространстве	39
3.2.1. Принципы радиолокации. Физические основы обнаружения и определения местоположения объекта	39
3.2.2. Радиолокационные методы обнаружения и наблюдения объектов в пространстве	40
3.2.3. Понятие о координатах цели	45
3.3. Радиолокационные методы измерения дальности. Максимальная дальность РЛС	47
3.3.1. Частотный метод определения дальности	47
3.3.2. Фазовый метод определения дальности	49
3.3.3. Импульсный метод определения дальности	52
3.3.4. Основное уравнение радиолокации	55
3.3.5. Дальность действия активной радиолокации с активным ответом	58
3.3.6. Уравнение радиолокации атмосферных образований	59

3.3.7. Влияние атмосферы на максимальную дальность РЛС	62
3.3.8. Радиолокационные отражения от метеорологических образований	66
3.3.9. Влияние Земли на максимальную дальность действия РЛС	68
3.4. Зондирование атмосферы с помощью метеорологических радиолокационных станций	71
3.4.1. Назначение метеорологических РЛС	71
3.4.2. Особенности метеорологических радиолокационных станций	72
3.4.3. Виды МРЛ	75
3.4.4. Определение облачных систем по радиолокационной информации	82
3.4.5. Определение явлений погоды по радиолокационным данным	86
3.4.6. Определение интенсивности осадков	91
3.4.7. Автоматизация радиометеорологического зондирования атмосферы	93
3.5. Доплеровские системы зондирования атмосферы	99
3.5.1. Особенности метеорологических доплеровских радиолокаторов	99
3.5.2. Связь спектра доплеровских частот со скоростью движения рассеивающих частиц	101
3.5.3. Связь ширины спектра доплеровских частот со скоростью диссипации турбулентной энергии	104
3.5.4. Доплеровские метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ)	105
3.5.5. Результаты измерений ДМРЛ параметров атмосферы	106
4. Аэродромные и трассовые радиолокационные комплексы	112
4.1. Общие сведения	112
4.2. Принципы построения трассового радиолокатора	114
4.3. РЛС обзора летного поля	118
4.4. Общие сведения об аппаратуре первичной обработки радиолокационной информации	120
5. Обеспечение безопасности посадки самолетов	123
5.1. Общая характеристика посадки	124
5.2. Взлетно-посадочная полоса	125
5.3. Радиотехнические системы посадки	127
5.3.1. Упрощенная система посадки	127
5.3.2. Радиомаячная система посадки	129
5.3.3. Радиолокационная система посадки	130
5.4. Особенности использования и основные требования к РЛС-П	131
5.5. Отображение пространства на индикаторах РЛС-П	132
6. Системы вторичной радиолокации	134
6.1. Принципы построения и характеристики	134
6.2. Структуры и форматы сигналов	135
6.3. Недостатки систем вторичной радиолокации	136
Приложение	138
Библиографический список	152

СПИСОК АББРЕВИАТУР И СОКРАЩЕНИЙ

АИУ – автономное индикаторное устройство.

АМСГ – авиационная метеорологическая станция гражданской.

АМРК – автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс.

АМЦ – авиационный метеорологический центр.

АРМ – автоматизированное рабочее место.

АСУ – автоматизированная система управления.

ВМО – Всемирная метеорологическая организация.

ВНГО – высота нижней границы облаков.

ВПН – вспомогательный пункт наблюдений.

ВПП – взлетно-посадочная полоса.

ВС – воздушное судно.

ГМС – гидрометеорологическая станция.

ДМРЛ – доплеровский метеорологический радиолокатор.

ДН – диаграмма направленности.

ЗИП – запасное имущество и приспособления.

ИА – индикатор амплитудный.

ИДВ – индикатор дальность-высота.

ИКО – индикатор кругового обзора.

ИС – информационная система.

ИЭ – инструкция по эксплуатации.

КДП – командно-диспетчерский пункт.

КНД – коэффициент направленного действия.

ЛГ – линия глассады.

ЛК – линия курса.

МДВ – метеорологическая дальность видимости.

МОД – метеорологическая оптическая дальность.

МРЛ – метеорологический радиолокатор.

МС – метеорологическая станция.

ОПН – основной пункт наблюдений.

РЛС – радиолокационная станция.

СДП – стартовый диспетчерский пункт.

УВД – управление воздушным движением.

УГМС – межрегиональное территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курсы «Авиационная метеорология», «Аэрология» и «Радиометеорология» читаются в университетах для подготовки специалистов–метеорологов. Изложение сведений об основах радиолокации и основных атмосферных процессах, влияющих на полет самолета, требует использования математического аппарата, физических методов исследования и вызывает определенные трудности в усвоении материала студентами.

Хорошо известные учебники Баранова А.М., Богаткина О.Г., Попова Н.Ф. в полном объеме дают знания по авиационной метеорологии и радиометеорологии, однако не содержат сведений о радиотехнических системах управления воздушным движением, что необходимо знать студенту–метеорологу при дальнейшей работе в аэропорту.

Задачей авторов предлагаемого учебного пособия является знакомство студентов с радиолокационными и радионавигационными системами наблюдений.

Предлагаемое учебное пособие появилось в результате чтения авторами лекций по дисциплинам «Авиационная метеорология», «Аэрология» и «Радиометеорология» в Пермском государственном университете на протяжении последних 10 лет. В нем изложен комплекс теоретических вопросов, касающихся исследования атмосферы с использованием систем зондирования. Уделено внимание вопросам физико-технического характера (особенностям строения радиолокационных систем) и методическим основам получения и обработки информации. Изложены способы измерения, интерпретации и использования данных радиозондирования атмосферы. Рассмотрены основные опасные явления погоды влияющие на взлет и посадку воздушного судна.

Большое количество систем локации, а также сложности, связанные с разнообразием радионавигационных технических средств управления воздушным движением, обуславливают необходимость изучения соответствующих вопросов. В пособии рассмотрены современные методы радиолокации, предназначенные для проведения метеорологических измерений, даны сведения об организации управления воздушного движения и аэродромных радиолокационных станциях, определены основные требования к их эксплуатации, а также приведено описание широко используемых систем.

Авторы признательны диспетчеру ФГУП Госкорпорации по ОВД (филиал «Аэронавигация Урала») Булгакову Григорию Васильевичу, за ряд ценных предложений и замечаний в период подготовки рукописи к печати.

ВВЕДЕНИЕ

Для совершенствования прогноза погоды широко используются методы радиозондирования атмосферы. В связи со спецификой организации и проведения работ, а также в соответствии с предъявляемыми техническими и эксплуатационными требованиями, отдельно следует выделить методы и средства радиолокационной метеорологии. Метеорологическая радиолокация основана на физических принципах распространения в атмосфере излучений сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Доплеровские локаторы позволяют не только обнаружить зоны осадков и грозовых облаков и исследовать их динамику, но и определить полный вектор и составляющие средней скорости ветра. Значительные перспективы в решении задач радиозондирования атмосферы открываются при учете поляризационных характеристик электромагнитных волн. Результативность использования таких радаров повышается при комплексном сочетании методов.

Радиолокация широко применяется для исследований атмосферы с земли и борта самолета. Применение радиолокационной техники для обнаружения и прослеживания областей ливневых осадков началось 40-е гг. XX в. Первые радиолокационные данные о ливнях и грозах успешно применялись для краткосрочных прогнозов погоды. Позднее создана специальная сеть радиолокационных станций, которая обеспечивает штормоповещение аэропортов. Работы в области метеорологической радиолокации направлены на разработку технических средств, обеспечивающих расширение объема и повышение качества информации, получаемой с помощью метеорологических радиолокаторов. Создан радиолокационный метод обнаружения зон турбулентности в облаках и осадках, а также оценки градоопасности облаков и измерения интенсивности осадков на больших площадях. Радиолокация применяется и для измерения движений в облаках и при ясном небе. Радиолокация — это область радиотехники, использующая излучение и отражение электромагнитных волн для обнаружения объектов и получения характеристик путем преобразования отраженного сигнала. Радиолокация основана на свойствах радиоволн распространяться в однородной среде по известным траекториям с постоянной скоростью. Свойство радиоволн отражаться от препятствий отмечено А.И. Поповым еще в 1899 г. Для метеорологических целей радиолокаторы стали использовать в 30-е гг. XX в.

Авиационная метеорология — наука, изучающая метеорологические явления погоды по их влиянию на авиационную технику и полеты, включающая теоретические основы метеорологического обес-

печения полетов. Развитие авиационно-метеорологической службы связано с развитием авиации. В 1903 г. осуществлен первый полет на самолете, а в 1910 г. с открытием школы военных летчиков в России возникла необходимость обеспечения полетов данными о погоде. Началось создание авиационной метеорологической службы, роль которой выросла в период мировой войны и развития гражданской авиации. В 1923 г. открылось регулярное воздушное сообщение между гг. Москва и Н.Новгород. В 30-е гг. XX в. стали создаваться авиационные метеорологические станции гражданские (АМСГ). В XX в. они оснащались новыми приборами, такими как измерители высоты нижней границы облаков, регистраторы дальности видимости, дистанционные метеостанции. Внедрялись комплексные радиотехнические автоматические аэродромные метеорологические станции (КРАМС), позволяющие автоматически получать и передавать информацию о погоде. На станциях устанавливались метеорологические радиолокаторы для наблюдения за облачностью, грозами, градом и ливнями.

К радиометеорологическим методам исследования природных сред относятся: методы метеорологической радиолокации, радиотеплолокации, методы, основанные на применении лидаров, радиоакустических систем и других средств дистанционного зондирования. Наибольшие успехи достигнуты в области метеорологической радиолокации по созданию и проведению систематических радиолокационных наблюдений с целью штормоповещения о ливнях и грозах. Основными направлениями радиометеорологии являются: теоретический анализ основного уравнения радиолокации облаков и осадков; создание специализированных метеорологических радиолокаторов МРЛ, послуживших основой для организации оперативной сети МРЛ штормоповещения; научно-методическое обеспечение функционирования сети МРЛ, использование полученной информации и ее архивация; автоматизация радиолокационных наблюдений; создание полигона с радиотехническим комплексом аппаратуры для дистанционного контроля активных воздействий и исследования конвективных, в том числе грозовых облаков; радиометеорологические исследования условий распространения радиоволн над морем; радиолокационные исследования облаков, возникающих в экстремальных условиях (при пожарах, авариях на АЭС).

Радиолокационные станции метеорологического назначения имеют много общего с РЛС, используемыми для других целей. Однако существуют специфические требования, предъявляемые к РЛС метеорологического назначения, которые обусловлены особенностями метеорологических объектов. К ним относятся:

- большой диапазон эффективных отражающих поверхностей от метеорологических объектов, достигающий более 100 дБ, причем большое число таких атмосферных образований, как неплотные мелкокапельные облака, термики, туманы характеризуются малыми значениями отражаемости, создающими слабые эхосигналы;

- значительные горизонтальные и вертикальные размеры метеорологических объектов, как правило, превышающие геометрические размеры зондирующего импульса;

- малая скорость движения и большая пространственно-временная изменчивость физических параметров метеорологических объектов.

В связи с этим современные МРЛ должны не только обладать максимально возможным энергетическим потенциалом с тем, чтобы обнаруживать опасные погодные явления (грозы, ливни, град, шквалы, смерчи) на больших расстояниях, но и быть дистанционной измерительной информационной системой, решающей задачи распознавания и количественного определения параметров метеорологических объектов.

Необходимо отметить, что созданные МРЛ (МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6) по точности определения местоположения метеорологических объектов и геометрических размеров, мощности эхосигналов, радиусу действия, энергетическому потенциалу, рабочему ресурсу соответствуют требованиям ВМО к метеорадарам и не уступают параметрам некогерентных МРЛ Omega (Франция), Mitsubishi (Япония), Selenik (Италия), Plessy (Англия), Retheon Enterprise (США).

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Управление воздушным движением (УВД) в гражданской авиации включает в себя:

- планирование и координирование воздушного движения;
- непосредственное УВД.

Главными задачами УВД являются:

- обеспечение безопасности полетов;
- обеспечение регулярности и экономичности полетов при эффективном использовании воздушного пространства.

Эти задачи решаются путем:

- организации УВД, планирования и обеспечения воздушного движения;
- координирования совместно с взаимодействующими органами УВД авиации различных ведомств;
- непосредственного УВД;
- принятия мер по предотвращению столкновений воздушных судов на земле и в полете;
- обеспечение безопасных интервалов между воздушными судами;
- принятия своевременных мер по оказанию помощи воздушным судам, терпящим бедствие и в других особых случаях в полете.

Работа службы движения (УВД или ОВД) организуется по сменам. Старший смены — руководитель полетов. Руководителю полетов подчиняются в оперативном отношении начальники дежурных смен объектов и служб, обеспечивающих полеты (в том числе и метеослужбы) по вопросам, связанным с обеспечением безопасности полетов. Руководитель полетов аэродрома является главным должностным лицом, определяющим готовность аэродрома к полетам. Только он разрешает и запрещает выпуск и прием на аэродроме воздушных судов (ВС). Его решения обязательны для всех служб, обеспечивающих полеты.

Все указания диспетчера являются обязательными для экипажей воздушных судов, за исключением случаев, когда при явной угрозе безопасности полета командир воздушного судна может отступить от плана полета и указаний диспетчера с немедленным докладом о своих действиях. Управление воздушным движением осуществляется от момента запуска двигателей (или начала буксировки) перед вылетом и до выключения двигателей на стоянке после посадки.

Диспетчер руления разрешает буксировку, запуск двигателей

и руление ВС на предварительный старт. Диспетчер старта дает разрешение на выруливание ВС на исполнительный старт и взлет.

Диспетчер подхода информирует экипажи о воздушной обстановке и метеоусловиях, разрешает полет по установленным схемам или заданным траекториям, контролирует их соблюдение, обеспечивает расхождение ВС на наиболее безопасных интервалах. Диспетчер круга обязан непрерывно вести контроль за соблюдением экипажем воздушного судна установленной схемы снижения и захода на посадку с соблюдением безопасных интервалов.

Круг над аэродромом в плане больше напоминает прямоугольник (рис. 1). Частью одной стороны прямоугольника является ВПП. После взлета самолет выполняет полет по прямой и подходит к точке (1), которая является местом первого разворота. Обычно это какой-либо заметный ориентир (дом, лес, озеро и др.) в районе аэродрома. При подходе к месту первого разворота пилот изменяет курс полета на 90° (выполняет первый разворот) и определенное время летит курсом, перпендикулярным направлению ВПП.

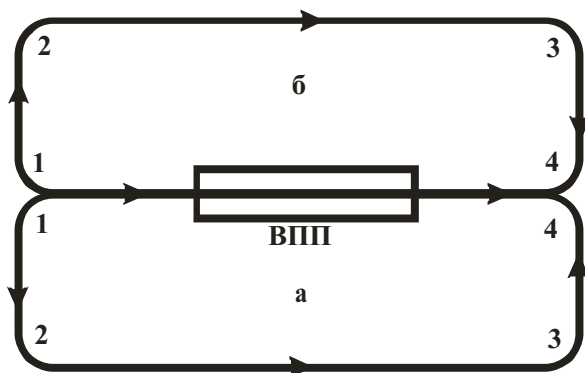


Рис. 1. Схема круга над аэродромом: а — левый круг, б — правый круг; 1, 2, 3, 4 — места соответственно 1-го, 2-го, 3-го и 4-го разворотов

Такой полет продолжается до подлета к месту второго разворота, где летчик снова изменяет курс полета на 90° обязательно в ту же сторону, что и при первом развороте. С курсом, обратным посадочному (взлетному), самолет выполняет полет до места третьего разворота, где пилот еще раз меняет курс на 90° и летит к месту четвертого разворота. Изменив в районе четвертого разворота направление полета

снова на 90° , летчик оказывается на посадочном (взлетном) курсе и при продолжении полета в этом направлении пройдет над ВПП. Вот такая фигура в плане называется кругом. Если все четыре разворота выполняются влево, то круг называется левым, а если вправо — правым. Круг над аэродромом и высоты полета по кругу устанавливаются специальной инструкцией.

Диспетчер района управляет воздушным движением на воздушных трассах. При заходе на посадку в сложных метеоусловиях (НГО — 200 м и менее, видимость 2000 м и менее) диспетчер обязан получить от наблюдателя АМСГ уточненные данные метеовеличин и сообщить их экипажу.

Диспетчер посадки обеспечивает заход ВС на посадку по выбранной системе и дает разрешение на посадку.

1.1. Траектория и этапы полета самолета

Совокупность параметров, характеризующих координаты ВС и их производные по времени, называют параметрами движения. Эти параметры и измеряют в процессе навигации подвижных объектов.

Проекцию траектории полета ВС на земную поверхность называют линией пути. Различают линию заданного пути (ЛЗП), соответствующую заданной траектории движения ЛА, и линию фактического пути (ЛФП), соответствующую траектории действительного движения. Основная часть линии пути, называемая маршрутом полета, расположена между исходным пунктом маршрута (ИПМ) и конечным пунктом маршрута (КПМ).

Вся траектория полета применительно к движению самолета разделяется на следующие этапы (рис. 2): взлет, набор высоты, полет по маршруту, снижение, заход на посадку, посадка.

При взлете самолет движется от момента старта на взлетно-посадочной полосе (ВПП) до набора условной высоты препятствия на подходах к аэродрому, отсчитываемой от уровня ВПП, и достижения безопасной скорости взлета. На этапе набора заданной высоты скорость полета увеличивается, самолет выводится к исходному пункту маршрута с заданным путевым углом и расчетной высотой.

В полете по маршруту самолет движется с крейсерской скоростью в установленном коридоре воздушного пространства, ограниченном по высоте и ширине (воздушной трассе). При этом высота полета соответствует заданному эшелону полета, который представляет собой одну из поверхностей постоянного атмосферного давления, установленного относительно уровня 1013,2 гПа (760 мм рт.ст.).



Рис. 2. Основные этапы полета самолета

В процессе полета возможны изменения направления движения в поворотных пунктах маршрута (ППМ). Завершается маршрутный полет в конечном пункте маршрута. ИПМ и КПМ выбираются на некотором расстоянии от аэропортов взлета и посадки в связи с тем, что траектория движения самолета в районе аэропорта зависит от метеорологических и других условий и заранее не может быть точно указана.

1.2. Эшелонирование полетов

Под эшелонированием полетов понимается вертикальное, продольное или боковое рассредоточение ВС в воздушном пространстве на установленные интервалы, обеспечивающие безопасность воздушного движения.

Нормы эшелонирования полетов обусловлены как техническими возможностями измерения параметров полета, так и возможностями летчика (автопилота) выдерживать заданный режим полета. Исходя из этого, приняты следующие правила эшелонирования.

Интервалы вертикального эшелонирования устанавливаются:

- от эшелона 900 до эшелона 8100 м — 300 м;

- от эшелона 8100 до эшелона 12100 — 500 м;

- выше эшелона 12100 м, а также между воздушным судном, выполняющим полет на сверхзвуковой скорости и др. ВС — 1000 м.

При направлении воздушных трасс местных воздушных линий и установленных маршрутов с истинными путевыми углами от 0 до 179° (включительно) устанавливаются эшелоны полета: 900, 1500, 2100, 2700, 3300, 3900, 4500, 5100, 5700, 6300, 6900, 7500, 8100, 9100, 10100, 11100, 12100, 14100 м и т.д. При углах от 180° до 359° (включи-

тельно) эшелоны полета следующие: 1200, 1800, 2400, 3000, 3600, 4200, 4800, 5400, 6000, 6600, 7200, 7800, 8600, 9600, 11600, 13100, 15100 м и др.

На высотах ниже нижнего эшелона, полеты воздушных судов по правилам визуального полета со скоростями не более 300 км/ч эшелонируются через 150 м.

Продольное эшелонирование. В зависимости от условий полета (визуальный или полет по приборам, дневной или ночной полет и т. д.) при полете на одном эшелоне и на одной трассе минимальное расстояние между самолетами может колебаться от 2 до 30 км или на расстоянии, которое самолет преодолевает за период не менее 10 мин полета.

При смене эшелона (например, при снижении) пересечение нижнего эшелона можно производить в том случае, если на последнем от расчетной точки пересечения эшелона нет других воздушных судов ближе 20–30 км.

При пересечении воздушных трасс на одном эшелоне одно из воздушных судов должно пройти точку пересечения трасс в тот момент, когда другое ВС находится от этой точки на расстоянии от 2 до 30 км или на расстоянии, которое самолет преодолевает за период не менее 15 мин полета.

Боковое эшелонирование. По правилам бокового эшелонирования расстояние между осями соседних воздушных трасс должно быть не менее 50 км. При полете вне трасс боковое расстояние между самолетами, летящими в одном или противоположных направлениях, должно быть не менее 10 км.

Полностью правила эшелонирования изложены в «Федеральных авиационных правилах использования воздушного пространства».

1.3. Основы самолетовождения

Самолетовождение или воздушная навигация как наука изучает теорию и практику безопасного вождения ВС в воздушном пространстве. Под процессом самолетовождения понимается комплекс действий экипажа и наземных служб УВД, направленных на постоянное знание местонахождения самолета и обеспечивающих безопасность и точный полет по заданному маршруту, а также обеспечение прибытия в пункт назначения на заданной высоте в установленное время.

Получив задание на полет, экипаж ВС производит подготовку к полету, которая включает в себя прокладку на карте маршрута поле-

та, составление предварительного штурманского расчета полета и целый ряд других мероприятий. После взлета экипаж, используя технические средства, выводит самолет из зоны аэродрома вылета, затем на заданную трассу полета и в конце маршрута — в зону аэродрома посадки.

Точность самолетовождения будет зависеть от точности расчетов и выдерживания навигационного режима полета: курса, скорости и высоты полета. Ошибки, допущенные экипажем в расчетах и выдерживании режима полета, могут привести к значительному отклонению самолета от маршрута и большим ошибкам во времени прихода ВС на аэродром посадки. Чтобы своевременно обнаружить и исправить эти ошибки, экипаж должен постоянно осуществлять контроль пути в полете, т. е. вести ориентировку. Пользуясь техническими средствами, необходимо периодически контролировать курс, скорость и высоту полета. Осуществляя самолетовождение, экипаж использует не только бортовые средства, но и данные наземных радиотехнических средств контроля и УВД, расчеты которых оказывают в полете необходимую помощь.

Современные технические средства самолетовождения по характеру первичной информации и принципу действия делятся на четыре группы: геотехнические, радиотехнические, астрономические и светотехнические. Технические средства самолетовождения могут быть автономными и неавтономными. Автономные средства не требуют специального наземного оборудования и применяются в полетах любой дальности. К таким средствам относятся геотехнические, астрономические и часть радиотехнических средств самолетовождения. К неавтономным можно отнести в основном самолетные радиотехнические средства, которые могут быть использованы только в комплексе с различными наземными устройствами.

Принцип действия геотехнических средств самолетовождения основан на измерении различных параметров геофизических полей Земли. Геотехнические средства в комплексе с другими средствами применяются в каждом полете для выдерживания заданного навигационного режима. Простота устройства и малые габариты большинства геотехнических средств, надежность и автономность являются их главными достоинствами. Это позволяет широко применять их на всех типах ВС и относить к средствам основного назначения. К недостаткам некоторых геотехнических средств самолетовождения можно отнести сравнительно невысокую точность навигационных измерений и ее зависимость от пройденного самолетом расстояния, а также ограниченные возможности использования при полете в сложных метеороло-

гических условиях. К геотехническим средствам самолетовождения относятся магнитные компасы, гироскопические навигационные и пилотажные приборы, дистанционные гиромагнитные компасы, курсовые системы, указатели воздушной скорости, барометрические высотомеры, термометры наружного воздуха, навигационные индикаторы, инерциальные системы, механические часы и др.

Радиотехнические системы самолетовождения применяются в основном при сложных метеоусловиях, так как они позволяют решать почти все основные задачи самолетовождения с достаточной для практики точностью. Благодаря высокой точности и автоматизации измерений некоторые радиотехнические средства незаменимы при посадке самолетов в сложных метеорологических условиях. Радиотехнические средства самолетовождения имеют и свои недостатки. К ним, в первую очередь, относятся ограниченная дальность действия многих радиотехнических систем, особенно при полете на малых высотах, зависимость точности измерений от расстояния между ВС и наземной станцией, а также подверженность естественным и искусственным радиопомехам. К радиотехническим средствам самолетовождения относятся угломерные радиотехнические системы, дальномерные системы, наземные и самолетные радиолокаторы, доплеровские измерители и системы, радиовысотомеры, посадочные системы с их наземным и самолетным оборудованием.

Принцип действия астрономических средств самолетовождения основан на измерении различных параметров небесных светил. Автономность и независимость точности измерений от дальности полета создают возможность широкого применения астрономических средств в различных условиях полета. К недостаткам этой группы средств следует отнести ограниченность (невозможность) их применения при отсутствии видимости небесных светил и сравнительная сложность работы с ними в условиях полета. К астрономическим средствам самолетовождения относятся авиационные секстанты, астрокомпасы, астрономические ориентиры и др.

Светотехнические средства самолетовождения представляют собой наземные и бортовые источники света. Эта группа средств применяется главным образом ночью и при полетах в сложных метеорологических условиях для создания световых ориентиров. Сравнительно небольшая дальность действия — недостаток светотехнических средств. К светотехническим средствам самолетовождения относят световые наземные маяки, световое и импульсно-световое оборудование ВПП и ВС, световое оборудование аэродромов и трасс, а также различные пиротехнические средства.

2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ

К таким факторам относятся факторы технического и психологического характера, приводящие к опасным траекториям движения (маневрам ВС), которые могут вызвать столкновение ВС с другим судном или земной поверхностью и сооружениями на ней.

Другую группу факторов составляют опасные метеорологические явления (сдвиг ветра, низкая облачность и туман, конвективная деятельность, обледенение, атмосферная турбулентность, электрические зоны в слоисто-дождевой облачности и осадках и др.). К опасным метеоявлениям для полета относятся:

- на аэродроме вылета и посадки — гроза, град, сильные болтанка и сдвиг ветра, гололед, сильное обледенение, смерч, ураган, пыльная буря, сильные ливневые осадки;

- по маршруту полета — гроза, град, сильные обледенение и болтанка. При встрече с опасными метеоявлениями по маршруту полета командир воздушного судна обязан принять меры для их обхода. При невозможности обхода путем изменения маршрута или высоты полета экипаж обязан возвратиться на аэродром вылета или произвести посадку на ближайшем запасном аэродроме.

2.1. Сдвиг ветра и его влияние на взлет и посадку

Характеристикой пространственной изменчивости ветра является сдвиг ветра — изменение направления и (или) скорости ветра в пространстве, включая восходящие и нисходящие воздушные потоки (сдвиг ветра слабый — до 2 м/с на 30 м высоты, умеренный от 2 до 4 м/с на 30 м высоты, сильный — от 4 до 6 м/с на 30 м высоты, очень сильный — 6 м/с и более на 30 м высоты). Сильные сдвиги ветра входят в число опасных для авиации явлений погоды.

Сдвиг ветра определяется как векторная разность векторов скорости ветра, измеренных в двух точках пространства, которая отражает изменение как скорости, так и направления ветра при перемещении от одной точки к другой. Модуль сдвига ветра $|\Delta u| = |u_2 - u_1|$ можно определить аналитически по формуле

$$|\Delta u| = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 - 2u_1u_2 \cos d},$$

где u_1 и u_2 — скорость ветра в двух точках, d — угол между векторами ветра u_1 и u_2 .

В зависимости от взаимного расположения рассматриваемых точек в пространстве (обе точки лежат в вертикальной или горизон-

тальной плоскости) различают сдвиг ветра соответственно вертикальный и горизонтальный.

В районе аэродрома горизонтальный сдвиг ветра можно определить по измерениям ветра вблизи различных стартов у ВПП, в точках установки датчиков ветра вокруг летного поля.

Вертикальный сдвиг ветра β характеризует изменение ветра с высотой, например, по данным датчиков ветра, установленных на разных высотах на мачте, башне, на зданиях. Величина β определяется по формуле

$$\beta = \frac{|\Delta u|}{\Delta z},$$

где $|\Delta u| = |u_v - u_n|$ – модуль векторной разности векторов ветра на верхнем уровне u_v и нижнем уровне u_n , м/с; Δz — толщина рассматриваемого слоя, м.

Таблица 1

Критерии интенсивности сдвига ветра

Интенсивность сдвига ветра (термин)	Влияние на управление воздушным судном	Вертикальный сдвиг (м/с) на 30 м,
Слабый	Незначительное	0–2
Умеренный	Значительное	2,1–4
Сильный	Существенные трудности	4,1–6
Очень сильный	Опасное	> 6

Следовательно, единицей измерения вертикального сдвига ветра является c^{-1} , однако для практических целей метеорологического обеспечения полетов значения β рассчитывают для слоя толщиной 30 м и указывают в м/с на 30 м, при этом величина β выражается в $10^{-2}c^{-1}$. В международных документах и зарубежной литературе встречаются и другие единицы измерения β , определяемые иными единицами измерения скорости ветра (узлы, фут/с, мили/ч).

Кроме вертикального и горизонтального сдвигов ветра, в нижних слоях атмосферы могут наблюдаться вертикальные восходящие и нисходящие потоки, также приводящие к изменению траектории движения ВС и включенные в общее понятие о сдвиге ветра. Критерии интенсивности указанных характеристик приведены в табл. 1.

2.2. Взлет и посадка самолетов при наличии сдвига ветра

Из-за большой массы (50–200 т) современный самолет обладает значительной инерцией, которая препятствует быстрому изменению скорости его движения относительно земной поверхности. Сохранение

самолетом этой скорости при пересечении уровней с различным ветром приводит к изменению воздушной скорости и аэродинамических сил. В частности, вследствие того, что подъемная сила крыла самолета Y прямо пропорциональна квадрату воздушной скорости, значительное изменение ветра вдоль траектории движения самолета вызывает резкое изменение воздушной скорости и, соответственно, подъемной силы и является причиной существенных отклонений самолета от начальной траектории набора высоты или глиссады скольжения. Эти отклонения не всегда могут быть своевременно устранены пилотом из-за задержки реакции самолета на управляющие воздействия.

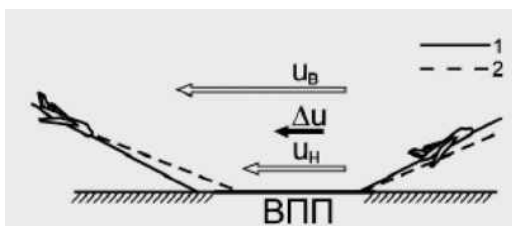


Рис. 3. Пример влияния вертикального сдвига ветра на взлет и посадку. 1 — предполагаемая, 2 — действительная траектория движения ВС, Δu — векторная разность векторов ветра на верхнем уровне u_v и нижнем u_n уровне

Характер отклонений от заданной траектории движения зависит от вида сдвига ветра, наблюдавшегося в данной зоне. Рассмотрим, например, случай резкого возрастания ветра с высотой. Самолет, при посадке движущийся против ветра, попадает в нижележащий слой с меньшим встречным ветром. При этом воздушная скорость уменьшается и, следовательно, происходит уменьшение подъемной силы. В результате фактическая траектория движения самолета проходит ниже заданной глиссады, самолет «проваливается» и, несмотря на увеличение пилотом силы тяги двигателей, посадка может быть совершена с недолетом (рис. 3). Аналогичный случай наблюдается, если пилот вынужден совершать посадку при попутном ветре, который с высотой уменьшается.

При взлете в условиях увеличения скорости встречного ветра с высотой на самолет, попадающий в слой более сильного ветра, будет действовать большая подъемная сила, чем на нижележащих уровнях, и его фактическая траектория набора высоты, как показано на рис. 3, будет лежать выше заданной (самолет «подбрасывает»). Это может

привести к переходу на закритические углы атаки, к сваливанию самолета.

Большие трудности при пилотировании самолета встречаются и в случае резкого ослабления ветра с высотой. Посадка в таких условиях сопровождается «подбрасыванием» при движении со встречным ветром, перелетом заданной точки касания ВПП и выкатыванием за пределы дальней концевой полосы безопасности или за дальний конец ВПП.

Осложнения при взлете в случае ослабевающего с высотой встречного ветра возникают из-за падения подъемной силы и «проваливания» самолета, вследствие чего он может выйти за нижний предел сектора безопасного набора высоты. Так как при взлете практически нет возможности дополнительного резкого увеличения силы тяги, то возникает опасность столкновения самолета с окружающими аэродром препятствиями (высокие искусственные сооружения, рельеф местности).

Влияние горизонтального сдвига ветра на самолет также зависит от изменчивости ветра по горизонтали. Например, в случае резкого увеличения скорости встречного ветра в направлении подлета (или уменьшения попутного ветра) будет наблюдаться «подбрасывание»; при значительном уменьшении скорости встречного ветра (или ослаблении попутного) самолет будет «проваливаться».

Под действием сдвигов ветра самолет может испытывать не только эволюции в вертикальной плоскости, но и изменять направление движения. Сильный сдвиг ветра относится к опасным для авиации атмосферным явлениям, информация о которых в оперативном порядке передается экипажам воздушных судов для обеспечения безопасности взлета и посадки. Взлет и заход на посадку в условиях сильного сдвига ветра запрещаются.

2.3. Навигационный треугольник скоростей

В неподвижном воздухе самолет, совершая горизонтальный полет за счет силы тяги, перемещается относительно поверхности земли с воздушной скоростью V , вектор которой направлен вдоль продольной оси самолета. Ветер, представляющий собой горизонтальное движение воздуха относительно поверхности земли, также характеризуется в данной точке как вектор u . Воздействие ветра на самолет приводит к тому, что скорость полного движения самолета относительно поверхности земли W , носящая название путевой скорости, представляет собой векторную сумму векторов воздушной скорости и скорости

ветра. Указанные три вектора образуют так называемый навигационный треугольник скоростей (рис. 4). Кроме векторов V , u , W , в число элементов навигационного треугольника включаются следующие.

Направление ветра определяется углом δ между северным направлением географического (или магнитного) меридиана и направлением, откуда дует ветер.

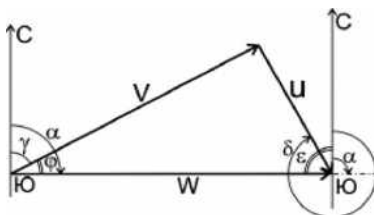


Рис. 4. Навигационный треугольник скоростей

Курс полета γ — это угол между северным направлением географического (или магнитного) меридиана и вектором воздушной скорости. Курс должен тщательно выдерживаться в полете, а при необходимости (например, вследствие сноса самолета под действием ветра) в курс должны вводиться поправки.

Угол φ между векторами воздушной и путевой скорости называется углом сноса, он отсчитывается от вектора воздушной скорости вправо (плюсовой) и влево (минусовой) и показывает, насколько изменилось направление движения самолета под действием ветра.

Путевым углом α называется угол между северным направлением географического (или магнитного) меридиана и вектором путевой скорости. Имеет место соотношение

$$\alpha = \gamma + \varphi.$$

Угол ε между векторами ветра и путевой скорости называется углом ветра. Он отсчитывается от вектора путевой скорости до вектора ветра по ходу часовой стрелки и изменяется от 0° до 360° . Как видно из рис. 4, угол ветра ε можно найти по путевому углу α и направлению ветра δ

$$\varepsilon = \delta - \alpha \pm 180^\circ,$$

если $\delta > \alpha$, то 180° следует вычесть, а если $\delta < \alpha$, то 180° прибавить.

Угол между вектором воздушной скорости и вектором ветра называется курсовым углом ветра и отсчитывается от вектора V до вектора u по ходу часовой стрелки от 0° до 360° .

Элементы навигационного треугольника при полете самолета

могут существенно изменяться вследствие большой пространственной и временной изменчивости ветра и других характеристик состояния атмосферы, влияющих на вектор воздушной скорости.

Для измерения скоростей и угла сноса на борту ВС применяются доплеровские измерители скорости.

2.4. Влияние низкой облачности и тумана на безопасность полетов

Низкая облачность и пространственное распределение видимости в подоблачном слое являются определяющими факторами метеорологических условий взлета и посадки, а также возможности визуального полета на малых и предельно малых высотах. Сложные метеороусловия — видимость 2000 м и менее и (или) высота нижней границы облаков 200 м и ниже при общем количестве более 3 баллов (2 октанта).

В целях обеспечения безопасности полетов устанавливаются минимумы погоды (аэродрома, воздушного судна, командира воздушного судна и вида авиационных работ). Минимум погоды — это минимально допустимые значения высоты нижней границы облаков (НГО) и метеорологической дальности видимости (МДВ), при которых обеспечивается безопасность воздушного судна. Например, минимум аэродрома для взлета — минимально допустимые значения видимости на ВПП (взлетно-посадочная полоса) и при необходимости высоты нижней границы облаков, при которых разрешается выполнять взлет на воздушном судне данного типа.

Видимость (дальность видимости) — максимальное расстояние, с которого видны и опознаются неосвещенные объекты (ориентиры) днем и световые ориентиры (освещенные объекты) ночью. Видимость на ВПП — максимальное расстояние, в пределах которого пилот воздушного судна, находящегося на осевой линии ВПП, может видеть маркировку ее покрытия или огни, ограничивающие ВПП или обозначающие ее осевую линию. На аэродромах не оборудованных светосигнальными системами ОВИ (огни высокой интенсивности) или ОМИ (огни малой интенсивности) типа М-2 за видимость на ВПП ночью принимается видимость световых ориентиров.

Минимум погоды устанавливают отдельно для взлета, посадки и полета по правилам визуального полета (ПВП) с учетом рельефа местности, для каждого типа воздушного судна, индивидуально для командиров ВС, для каждого аэродрома для взлета и посадки с учетом типа ВС. Для обеспечения безопасности полета по ПВП и посадки ВС необходима возможность видения наземных ориентиров, в том числе

маркировки покрытия взлетно-посадочной полосы или огней ее светоборудования, с целью визуального выведения ВС на ось ВПП. При этом необходимо иметь в виду, что пилот самолета имеет возможность наблюдать наземные ориентиры только под некоторым углом к горизонту. Следовательно, существенным фактором является прозрачность слоя атмосферы в наклонном направлении визирования наземных объектов с пилотского кресла ВС. Ни горизонтальная МДВ непосредственно у земной поверхности, ни высота НГО по отдельности не определяют однозначно условий видимости наземных объектов с борта летящего ВС. Эти две метеорологические величины (высота НГО и горизонтальная МДВ) в комплексе помогают оценить высоту обнаружения пилотом наземных ориентиров.

Высота обнаружения — максимальная высота, с которой пилот способен установить надежный зрительный контакт с наземными ориентирами, в том числе с маркировкой покрытия ВПП или огнями ее светоборудования, и может определить положение воздушного судна в пространстве, высота обнаружения обычно несколько меньше высоты НГО, измеренной прибором. Туманы вызывают уменьшение горизонтальной МДВ до пределов меньше установленных минимумов для взлета и посадки ВС.

2.5. Влияние конвективной деятельности на полет воздушных судов

В зависимости от интенсивности конвективной деятельности, ее влияние на полет может быть более или менее значительным. Мало интенсивная конвекция (сопровождающаяся облаками типа Cu) не создает существенных трудностей для выполнения полета. В облаках может отмечаться турбулентность, плохая видимость; обледенение возможно только в переходные сезоны года. Мощные кучевые облака уже представляют значительную опасность: при отрицательных температурах в этих облаках может возникнуть умеренное и сильное обледенение; вертикальные скорости достигают 10–15 м/с и более; наблюдается интенсивная турбулентность и плохая видимость. Преднамеренно заходить в эти облака запрещается.

Наиболее опасные условия для полетов связаны с кучево-дождевыми облаками (рис. 5). В этих облаках развиваются системы чередующихся восходящих и нисходящих струй, скорости в которых достигают десятки м/с. Вследствие сильной турбулентности, создающей перегрузки, угрожающие прочности воздушного судна, а также из-за возможности сильного обледенения и поражения молниями, по-

леты в кучево-дождевых облаках запрещаются. Попадание в кучево-дождевое облако может привести к тяжелому летному происшествию. При попадании в зону сильных вертикальных движений и неупорядоченных порывов, в особенности в верхней части облака, возможны потеря управления воздушным судном и перегрузки катастрофического характера.

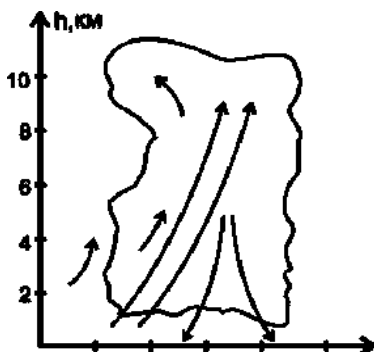


Рис. 5. Воздушные течения в кучево-дождевом облаке

К числу опасных проявлений конвективной деятельности относятся также шквалы и смерчи. Они связаны с интенсивными кучево-дождевыми и грозовыми облаками. В передней части этих облаков под нижней границей развивается движущийся вихрь с горизонтальной осью вращения, так называемый шкваловый ворот, в зоне которого и возникают названные явления. Их быстрое развитие, небольшие горизонтальные масштабы и кратковременность существования сильно затрудняют прогноз. Большая разрушительная сила шквалов обусловлена очень высокими скоростями ветра (часто более 20–30 м/с, а в отдельных случаях свыше 40 м/с), а смерчей — также сильным перепадом атмосферного давления. Смерчи и шквалы представляют большую опасность для летательных аппаратов, находящихся как в воздухе, так и на Земле.

2.6. Обледенение и его влияние на полет самолетов и вертолетов

Обледенением называют отложение льда на частях воздушного судна (ВС), силовых установках и внешних деталях специального оборудования, обтекаемого воздушным потоком в полете. Слабое обледенение — отложение льда на передней кромке крыла до 0,5 мм/м,

умеренное — от 0,5 до 1 мм/мин, сильное — более 1 мм/мин.

Ледяные отложения на самолетах и вертолетах могут наблюдаться и во время их стоянки на аэродроме при наличии общего обледенения наземных предметов (в виде гололеда, изморози и др.). Виды обледенения (в полете и на Земле) имеют много общего в физических основах появления и в причинах, их вызывающих, но существуют различия, определяемые, главным образом, большой скоростью движения самолетов и вертолетов. Вследствие этого процесс отложения льда, а также атмосферные условия при обледенении в полете иные, чем на Земле.

Отложения льда на поверхности ВС могут создавать угрозу безопасности полета, а в отдельных случаях даже приводить к летному происшествию, так как обледенение ухудшает аэродинамические и летные характеристики самолетов (вертолетов). Обледенению подвергаются в основном носовые (лобовые) части обтекаемых профилей на самолете. При этом искажается форма профиля, появляются неровности на его поверхности, что влияет на характер обтекания и приводит к увеличению сопротивления самолета, в общем приросте которого наибольшую долю (до 70–80%) составляет обледенение крыла и оперения. При обледенении уменьшается подъемная сила, увеличивается масса самолета, снижается тяга силовой установки, а также ухудшаются летные характеристики самолета: уменьшается вертикальная скорость набора высоты, снижаются потолок и максимальная скорость полета, увеличивается расход топлива, возрастает потребная мощность (тяга) для полета на заданной скорости.

Отложения льда могут вызвать нарушение работы жизненно важных деталей и приборов: карбюратора, воздухозаборников, приемников воздушного давления, стабилизатора и др. Вследствие обледенения наружных антенн может нарушиться радиосвязь; при полете в условиях обледенения почти всегда осаждается лед на окнах кабины пилота, сильно ухудшается обзор, что особенно опасно при посадке.

Обледенение воздухозаборников чревато опасностью повреждения элементов конструкции двигателей; попадание определенного количества льда в компрессор некоторых типов газотурбинных двигателей приводит к их самопроизвольному выключению. У реактивных двигателей обледенению более всего подвержены их входные устройства, которые иногда могут обледеневать и при небольшой положительной температуре воздуха. Благоприятные условия для этого создаются при работе двигателей на Земле, а также при наборе высоты с небольшой скоростью при высоких оборотах двигателя.

У вертолетов при горизонтальном полете в условиях обледене-

ния лед отлагается на лопастях несущего и хвостового винтов, стабилизаторе, шасси, лобовой части кабины. Наибольшую опасность представляет обледенение винтов, так как даже небольшое отложение льда увеличивает нагрузку на лопасти, что нарушает равновесие ротора и создает сильную вибрацию.

Чувствительность к обледенению различных типов самолетов и вертолетов неодинаковая. Наиболее подвержены обледенению самолеты с поршневыми и турбовинтовыми двигателями, воздушные скорости и потолок которых относительно невелики, и вертолеты с поршневыми двигателями. Современные реактивные самолеты с большими дозвуковыми и особенно сверхзвуковыми скоростями менее уязвимы к обледенению. Однако в режиме взлета и набора высоты, снижения и посадки, выполняемых со скоростями намного меньше крейсерских, они также подвергаются обледенению.

Степень опасности обледенения зависит от количества и характера отложившегося льда, в свою очередь, зависящих от ряда метеорологических факторов, а также аэродинамических характеристик воздушного судна. Обмерзание воздушных судов во время стоянки представляет большую опасность для взлета, особенно если в нижних слоях атмосферы имеются облака, содержащие переохлажденные капли. При попадании в такие облака обмерзшее на земле судно начинает интенсивно обледеневать, что может привести к аварийной ситуации.

2.7. Влияние атмосферной турбулентности на полет воздушных судов

Турбулентность — это движение воздуха, при котором воздушные частицы совершают неустановившееся беспорядочное перемещение по сложным траекториям. В атмосфере турбулентное движение обычно характеризуется наличием вихрей различных размеров, перемещающихся с различными скоростями в общем (среднем) воздушном потоке. Вихревой характер движения воздуха обуславливает наличие в турбулентной зоне знакопеременных пульсаций скорости ветра, в том числе пульсаций вертикальной составляющей ветра, оказывающей существенное влияние на полет ВС. Именно эта особенность турбулентности и представляет наибольший интерес для авиации.

Пульсации ветра, особенно пульсации его вертикальной скорости (вертикальные порывы), вызывают резкие перемещения ВС в вертикальной плоскости, получившие название болтанки. Болтанка проявляется в виде тряски ВС, вздрагиваний и бросков вверх, сопро-

вождающихся провалами. Болтанка затрудняет пилотирование ВС, нарушает комфорт пассажиров, вызывает дополнительные нагрузки на элементы конструкции, а в исключительных случаях может привести к потере его управляемости и даже разрушению.

Количественно интенсивность болтанки можно оценить по значению вертикальной перегрузки ВС (n) или ее приращения (Δn). Перегрузка (n) представляет собой отношение суммы инерционных и аэродинамических сил, действующих в полете на ВС, к его весу. Приближенно величину n и Δn горизонтально летящего ВС при встрече с вертикальным порывом воздуха можно оценить по формуле

$$\Delta n = \pm \frac{V \rho \omega_{эф} C_y^\alpha}{2G/S} / g,$$

где Δn — приращение перегрузки в долях g , где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; ρ — плотность воздуха; V — скорость полета; $\omega_{эф}$ — так называемая эффективная вертикальная скорость порыва воздуха; C_y^α — производная коэффициента подъемной силы по углу атаки α ; G — полетный вес самолета; S — несущая поверхность крыла.

При спокойном горизонтальном полете $n = 1$, $\Delta n = 0$. При воздействии на ВС восходящего потока возникает положительное приращение перегрузки. Находящиеся в это время в ВС пассажиры и грузы становятся как бы тяжелее. Нисходящие потоки, наоборот, приводят к отрицательным перегрузкам, вследствие чего пассажиры и груз становятся легче в число раз, равное приращению перегрузки. Если приращение перегрузки равно — 1, возникает невесомость.

Приведенная формула показывает, что перегрузка (болтанка) пропорциональна скорости вертикального порыва. Это обстоятельство позволяет решать и обратную задачу — оценивать интенсивность турбулентности по величине перегрузки ВС, т.е. интенсивности болтанки. Такая оценка в практической работе вполне приемлема, хотя и является приближенной.

Качественно интенсивность болтанки можно оценить по характеру поведения ВС, субъективным ощущениям пассажиров и нарушению режима навигационных приборов (указателя скорости полета, вариометра и др.). Важно отметить, что болтанка ВС в атмосфере связана не только с турбулентностью. Волновые или полупорядоченные конвективные движения также могут приводить к вертикальным перегрузкам ВС, пересекающего такие зоны с большой скоростью. Однако такие случаи редки, поэтому практическую болтанку ВС почти всегда отождествляют с турбулентностью, а турбулентность — с болтанкой. Поскольку перегрузка зависит от удельной нагрузки ВС, его скорости и других характеристик, то при одних и тех же скоростях

порывов различные типы ВС и даже одно и то же ВС на различных режимах полета может испытывать болтанку различной интенсивности. Болтанка — беспорядочные перемещения воздушного судна при полете в турбулентной атмосфере (умеренная болтанка — при приросте перегрузки до $\pm 1,0g$, сильная $\pm 1,0g$ и более, а в посадочной конфигурации: умеренная — $\pm 0,3-0,4g$, сильная — $\pm 0,4g$). При попадании воздушного судна в сильную болтанку командир обязан принять меры для немедленного выхода из опасной зоны, в том числе с разрешения диспетчера изменить высоту полета.

2.8. Влияние электрических зон в слоисто-дождевой облачности и осадках на безопасность полетов самолетов

Ежегодно около 60 самолетов поражаются электрическими разрядами в облаках слоистых форм $Ns-As$ и осадках. Эти поражения воздушных судов отмечаются во все времена года и суток, чаще всего после взлета и входа ВС в слоисто-дождевые облака или, наоборот, при снижении в этих облаках и заходе на посадку. Поражения ВС электрическими разрядами отмечались на высотах от 0,2 до 6,0 км при температуре в зоне поражения от 0 до $-15^{\circ}C$, но чаще на высотах от 0,5 до 4,0 км. Признаками сильной электризации ВС являются:

- шумы и треск в наушниках;
- беспорядочные колебания стрелок радиоконпасов;
- искрение на остеклении кабины экипажа и свечение концов крыльев в темное время суток. Возникновение электризации наиболее вероятно в слое облаков с интервалом температур от $+5$ до $-10^{\circ}C$.

Электрические разряды в самолеты в облаках $Ns-As$ и осадках напоминают вспышку при электросварке и сопровождаются негромким хлопком, однако такие разряды наносят ВС существенные повреждения и нарушают безопасность полетов. Анализ происшествий показал, что при поражении самолетов электрическими разрядами в слоисто-дождевой облачности и осадках обычно выходят из строя антенно-фидерные устройства и оборудование связи, повреждается радиолокатор. В корпусе самолета (обычно в передней и лобовой части) прожигается отверстие размером от 1 до 20 см (нарушается герметизация кабины летчиков и пассажирского салона), перегорают и выходят из строя аэронавигационные и пилотажные приборы, а также повреждаются другие системы и агрегаты воздушного судна (повреждение и загорание двигателей).

3. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СТАНЦИИ

Одно из средств получения мгновенной информации о метеоро обстановке — метеорологическая РЛС (МРЛ). С помощью МРЛ решаются следующие задачи: обнаружение атмосферных образований; определение границ этих образований, вид гидрометеоров; изменение высоты облачного слоя; распределение облачности по высотам; определение количественных характеристик облачности, интенсивности осадков и градовых очагов в облаках; определение скорости и направления перемещения облачности; прогноз развития атмосферных образований. Результаты наблюдений являются материалами для оценки состояния воздушного пространства, составления прогнозов, предупреждений об опасных явлениях и разработки климатических характеристик районов. В МРЛ применяется несколько частотных диапазонов. Для определения границ метеообразований при малой и средней интенсивности осадков применяются волны длиной $\lambda = 2\text{--}3$ см, а при большой интенсивности — 5 см и более. С учетом опыта эксплуатации используют на практике два диапазона. МРЛ-1 работает в миллиметровом и сантиметровом диапазонах, МРЛ-2 в сантиметровом, МРЛ-5 в сантиметровом (3 см) и граничном между сантиметровым и дециметровым диапазонами (10 см). МРЛ-6 — в сантиметровом и дециметровом диапазонах радиоволн.

3.1. Основы радиолокации

3.1.1. Эффективная площадь рассеяния

Объекты радиолокационного наблюдения (в соответствии с общепринятой терминологией) называются целями. Для оценки способности цели рассеивать падающие на нее радиоволны пользуются такой характеристикой, как эффективная площадь рассеяния (ЭПР). Эффективной площадью рассеяния называют коэффициент пропорциональности σ между мощностью волны P_p , рассеянной целью (мощность рассеяния) и плотностью потока мощности P_{Π} падающей на нее волны

$$P_p = \sigma P_{\Pi}. \quad (1.1)$$

Мощность, рассеянную целью, можно найти, если известна плотность потока мощности P_{Π} , рассеиваемой целью в любом направлении. Практический интерес представляет знание плотности потока мощности, рассеиваемой целью, в точке, где находится приемная

антенна радиолокационной станции. Поэтому удобно заменить реальную цель некоторой идеальной целью, рассеивающей радиоволны изотропно, т.е. одинаково во всех направлениях, и создающей в точке приема ту же плотность потока мощности, что и реальная цель. Тогда мощность рассеяния можно определить, умножив плотность потока мощности P_p на площадь сферы, радиус которой D равен расстоянию от цели до приемной антенны

$$P_p = 4\pi D^2 P_r. \quad (1.2)$$

Из уравнений (1.1) и (1.2) находим, что

$$\sigma = 4\pi D^2 \frac{P_p}{P_n}. \quad (1.3)$$

Если выразить плотности потоков мощностей падающей и рассеянной волн через напряженности электрического поля, то для ЭПР получим формулу

$$\sigma = 4\pi D^2 \frac{E_p^2}{E_n^2}. \quad (1.4)$$

Как видно из (1.3) и (1.4), для определения ЭПР цели достаточно знать плотности потоков мощности или напряженности электрического поля в месте расположения цели и в точке приема и расстояние от точки приема до цели. Для большинства объектов ЭПР определяется опытным путем, так как теоретически она может быть рассчитана только для объектов простейших геометрических форм. Чаще всего в качестве единицы измерения ЭПР используется квадратный метр (m^2).

ЭПР зависит от электрических свойств материала объекта, его конфигурации, геометрических размеров и направления, с которого он облучается, так как при одновременном отражении от многих точек объекта имеет место сложное взаимодействие отраженных сигналов, при котором в одних направлениях сигналы складываются и усиливаются, а в других — ослабляют друг друга. Если изменяется направление облучения объекта, то изменяется и взаимное расположение элементарных отражателей, поля которых даже при незначительном изменении направления суммируются с большим изменением фазовых сдвигов. В результате изменяется ЭПР.

График, на котором изображается зависимость ЭПР от взаимного расположения РЛС и цели, называется диаграммой ЭПР, или диаграммой вторичного обратного излучения. Строят диаграмму ЭПР в прямоугольных или полярных координатах.

Экспериментальное определение ЭПР производят чаще всего методом сравнения. Сущность этого метода заключается в следующем.

Радиолокационная станция, используемая при измерениях, должна быть снабжена аппаратурой для определения напряженности поля радиоволн, рассеянных эталонной ($E_э$) и исследуемой ($E_ц$) целями. Используя формулу (1.4), получаем уравнения для ЭПР эталонной и исследуемой целей

$$\sigma_э = 4\pi D_э^2 \frac{E_э^2}{E_n^2} \quad \sigma_ц = 4\pi D_ц^2 \frac{E_ц^2}{E_n^2},$$

где E_n — напряженность поля радиоволн, излучаемых станцией; $D_э = D_ц$ по условиям измерений. Решив последние уравнения относительно $\sigma_ц$, получим основную формулу для сравнения

$$\sigma_ц = \sigma_э \frac{E_ц^2}{E_э^2}.$$

При этих измерениях эталонной целью может служить сфера. Радиолокационными целями простейших геометрических форм называются такие объекты, ЭПР которых могут быть вычислены теоретически. К простейшим объектам относятся плоская идеально проводящая пластина, идеально проводящая сфера, уголкового отражатель.

3.1.2. Классификация радиолокационных целей

В теории и практике радиолокации наибольшее распространение получила система классификации радиолокационных целей по принципу формирования структуры сигналов при отражении. В основу классификации положено разделение целей на точечные и распределенные (рис. 6).

Точечная цель — условное название реальной одиночной или групповой цели, размеры которой малы по сравнению с длиной и поперечными размерами разрешаемого объема радиолокационной станции. Разрешаемый объем проще всего определить при использовании иглообразного (конического) луча. В этом случае на достаточно большом расстоянии от РЛС часть конуса близка к цилиндру. Объем такого цилиндра ограничивается диаграммой направленности антенны и вычисляется как произведение площади поперечного сечения диаграммы направленности на половину длины зондирующего импульса РЛС, которую он занимает в пространстве. Среди распределенных целей различают объемные (объемно распределенные) и поверхностные (поверхностно распределенные) цели.

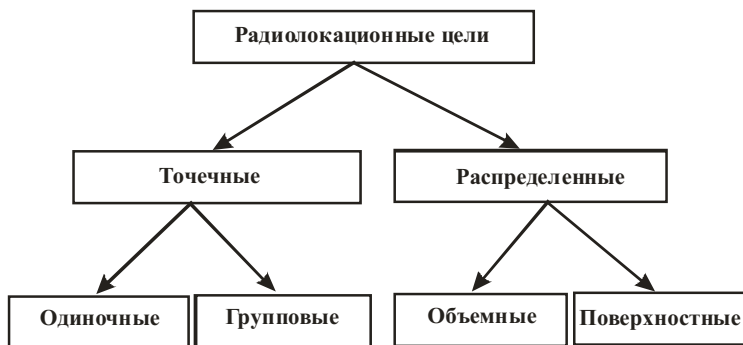


Рис. 6. Классификация радиолокационных целей

Точечные одиночные цели. Многим из воздушных, космических и наземных объектов радиолокационного наблюдения свойственны признаки точечной цели. Большинство этих целей хорошо изучено, в частности, определены диаграммы их ЭПР, установлены зависимости диаграмм от поляризации и частоты облучающих цель радиоволн. К точечным одиночным целям относят: самолеты, суда, автомашины, планеты, птиц, уголкового отражатели. Искусственные отражатели представляют собой многочисленный класс точечных одиночных целей. Они находят широкое применение в метеорологии. Точечные одиночные цели часто называют сосредоточенными целями.

Точечные групповые цели. Несколько точечных целей, расположенных в пределах разрешаемого объема, образуют групповую цель. В нее могут входить самолеты, суда, колонны автомашин, стаи птиц и другие объекты. Одиночные объекты, входящие в состав групповой цели, изолированы один от другого. Однако пребывание этих объектов в разрешаемом объеме на расстояниях, не превышающих разрешения по дальности (оно равно $ct/2$ для импульсной РЛС), является условием формирования общего сигнала групповой цели.

Простейший случай групповой цели — два металлических шара, расстояние между которыми составляет не меньше длины волны РЛС, облучающей шары. Теоретические расчеты позволяют получить результирующую ЭПР групповой цели состоящей из двух шаров.

Поверхностно распределенные цели. Если луч антенны радиолокационной станции пересекает поверхность с равномерно распределенными по ней элементарными отражателями, то участок поверхности, ограниченный лучом, представляет собой поверхностно распределенную цель. В частности, этой целью могут быть поверхность моря,

участки суши, лесного массива. В получении ЭПР такой цели есть свои особенности. Отраженный поверхностной целью сигнал, определяющий ее ЭПР, создается за счет рассеяния радиоволн элементарными отражателями, составляющими эту цель. Предполагается, что в пределах некоторого участка поверхности, называемого обычно отражающей площадкой, отражатели распределены равномерно, а сигналы, отраженные от них, некогерентны.

Кроме отражающих свойств поверхностной цели и ее ЭПР определяют расстояние до отражающей площадки D , технические характеристики РЛС (ширина диаграммы направленности θ и длительность импульса τ), угол падения радиоволны γ .

В отличие от точечной цели, у которой ЭПР не зависит от D , ЭПР поверхностно распределенных полей пропорциональна D . Это характерно для полного заполнения луча распределенной целью, так как размеры такой цели пропорциональны дальности D . При одной и той же дальности, чем больше поперечные размеры диаграммы направленности антенны РЛС, тем больше ЭПР поверхностной цели.

Объемно распределенные цели. Объемно распределенная цель состоит из заполняющих разрешаемый объем и равномерно распределенных в этом объеме в большом количестве элементарных отражателей. Они рассеивают радиоволны, излучаемые антенной радиолокационной станции, и создают принимаемый станцией сигнал. Среднее расстояние между отражателями мало по сравнению с длиной волны радиолокационной станции, облучающей цель.

Объемные цели могут иметь как естественное, так и искусственное происхождение, находиться в атмосфере, космическом пространстве и занимать несколько разрешаемых объемов. Дождь, снег, град, области полярных сияний, неоднородности тропосферы и ионосферы, искусственные отражающие облака из металлизированных лент или распыленного металла и ряд других объектов являются целями, образованными элементарными отражателями, равномерно распределенными в пределах разрешаемого объема радиолокационной станции.

Причины возникновения естественных объемных целей, способы получения искусственных целей и выявленные процессы образования отраженных от них сигналов неодинаковы. Однако существует общий признак, позволяющий объединить эти цели в одну группу. Элементарные отражатели, образующие цель и находящиеся в пределах разрешаемого объема РЛС, создают один общий сигнал на входе приемника станции. Это объясняется одновременным участием в процессе формирования сигнала всех элементарных отражателей, запол-

няющих разрешаемый объем.

ЭПР объемно распределенной цели определяется физическими свойствами элементарных отражателей, характером процессов взаимодействия между ними, плотностью отражателей, поляризацией и длиной волны РЛС. Как правило, ЭПР таких целей не зависит от угла облучения цели. В качестве примера объемных целей естественного происхождения рассмотрим гидрометеоры, которые представляют собой продукты конденсации водяного пара в атмосфере, — дождь, снег, град или туман. Они обнаруживаются радиолокационными станциями, работающими в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн. Гидрометеоры, попадая в зону обнаружения цели, уменьшают дальность ее обнаружения. Радиолокационные наблюдения гидрометеоров, анализ и изучение сигналов, отраженных от дождя, снега, тумана и града, важны для метеорологов. Данные радиолокационных наблюдений используются при составлении прогнозов погоды, определении зоны выпадения осадков в момент наблюдения, оценки количества осадков в течение определенного периода и решения других задач.

3.1.3. Отражающий объем метеорологических объемно-распределенных целей

Если цель представляет собой скопление в пространстве частиц облаков и осадков, то к приемной антенне РЛС приходит одновременно суммарный сигнал от всех частиц, находящихся в объеме, ограниченном по ширине и высоте диаграммой направленности антенны, а по дальности величиной $c\tau_u/2$, где τ_u — длительность импульса, а c — скорость света.

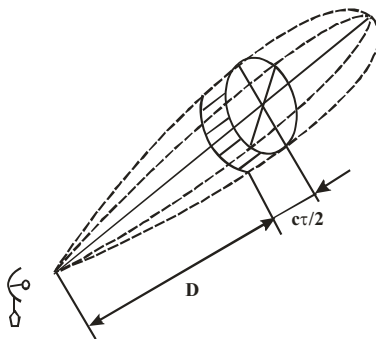


Рис. 7. Отражающий объем метеорологических целей

Перейдем к определению отражающего объема (существует также и облученный объем, который в два раза больше отражающего). Так как дальность D объема (рис. 7), облучаемого высокочастотным импульсом длительностью t_i , много больше расстояния $h = c\tau_u$, занимаемого импульсом в пространстве, то этот объем можно считать цилиндром с площадью основания S_0 и высотой $c\tau_u/2$.

Импульсы, отраженные от частиц, заполняющих объем, будут приходить на вход приемника за время t_i не от всего цилиндра, а от его части высотой $c\tau_u/2$. В результате для узкой симметричной диаграммы направленности шириной θ отражающий объем будет определяться выражением

$$V = S_0 \frac{c\tau_u}{2} = \frac{\pi D^2 \theta^2}{4} \frac{c\tau_u}{2}, \quad (1.5)$$

где c — скорость света, τ_u — длительность импульса РЛС.

Отражающий объем называют также импульсным или разрешаемым объемом.

3.1.4. Эффективная площадь рассеяния метеоцели

Применение радиолокации в метеорологии основано на эффекте рассеяния радиоволн сантиметрового диапазона частицами облаков и осадков в виде капель дождя, градин, кристаллов, снежинок и их различных комбинаций.

При прохождении электромагнитной волны через облака и зоны осадков в каждой отдельной частице возбуждается вторичное излучение. При этом часть энергии волны поглощается частицей и переходит в тепло. Другая часть переизлучается в виде рассеянной волны в различных направлениях, в том числе в направлении на радиолокатор. Частота колебаний рассеянной волны совпадает с частотой волны, падающей на частицу. Интенсивность излучения такой частицы в направлении на РЛС можно оценить через эффективную площадь рассеяния.

Для падающей на сферическую частицу радиусом a плоской электромагнитной волны значение ЭПР частицы можно рассчитать точно, если известна длина волны λ и комплексный показатель преломления вещества частицы m в диапазоне волн λ . Наличие мнимой части в m означает, что падающая на частицу энергия частично поглощается.

Выражение для a оказывается простым, если радиус частицы a значительно меньше длины волны λ , точнее $a \leq 0,03\lambda$. Для таких ма-

лых частиц сферической формы σ (ЭПР) описывается формулой Релея:

$$\sigma = \frac{64\pi^5 a^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2. \quad (1.6)$$

Множитель $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ для воды в сантиметровом диапазоне волн равен $0,93 \pm 0,004$, а для льда — $0,197$. Отсюда следует, что этот множитель для водяной сферической частицы почти в 5 раз больше, чем для ледяной сферической частицы таких же размеров. С увеличением размеров частиц, когда $a > 0,03\lambda$, величина σ сначала стремительно растет до некоторого предела, зависящего от соотношения между a и λ , а затем начинает осциллировать, постепенно приближаясь к предельному значению, пропорциональному πa^2 .

На вход приемника радиолокатора в период между посылками высокочастотных импульсов передатчика одновременно поступают отраженные сигналы, создаваемые не одной, а совокупностью частиц, которые заключены в отражающем объеме, ограниченном шириной диаграммы направленности антенны радиолокатора и половиной пространственной протяженности зондирующего импульса. Величина такого объема увеличивается с удалением от радиолокатора. Поэтому в качестве характеристики ЭПР совокупности частиц используется понятие об эффективной площади рассеяния единицы объема, например кубического метра или кубического сантиметра (σ_0). Если положение рассеивающих частиц в объеме взаимно независимо и произвольно, а расстояние между частицами такое, что взаимодействие (интерференция) между полями, излученными отдельными частицами, отсутствует, то такое рассеяние называется некогерентным. В этом случае

$$\sigma_0 = \sum_{i,V} \sigma_i = N \sigma_i, \quad (1.7)$$

ЭПР единицы объема равна сумме ЭПР σ_i отдельных частиц, находящихся в единице рассеивающего объема (в 1 м^3 или 1 см^3). Величина N содержит метеорологическую информацию об облаках и осадках и измеряется в см^{-1} или м^{-1} .

ЭПР единицы объема называется удельной эффективной площадью рассеяния атмосферного образования. Значения удельной ЭПР, рассчитанные по формуле (1.7), будут справедливы только для некогерентного рассеяния. В реальных условиях предположение о некогерентном рассеянии не всегда оправдывается: в ряде случаев имеет ме-

сто интерференция полей отдельных элементарных рассеивателей, при которой элементарные рассеянные сигналы складываются с учетом фазы. Такое рассеяние называют когерентным.

В атмосферных образованиях в общем случае имеет место как когерентное, так и некогерентное рассеяние.

Результаты исследований показывают, что при радиолокационном наблюдении облаков и осадков в трехсантиметровом диапазоне волн рассеяние всегда некогерентно.

ЭПР некогерентно рассеивающей метеорологической цели равна произведению удельной ЭПР и разрешаемого объема, отраженные сигналы от частиц которого одновременно приходят к РЛС. Для узкой симметричной диаграммы направленности шириной θ отражающий объем на удалении D от РЛС в соответствии с (1.5) будет описываться выражением

$$V = \frac{\pi^6 D^2 \theta^2 c \tau_u}{8}.$$

С учетом этого выражения формула для ЭПР метеоцели, состоящей из одинаковых частиц сферической формы, будет иметь вид

$$\sigma = \frac{\pi^6 D^2 \theta^2 c \tau_u}{8 \lambda^4} N d^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2. \quad (1.8)$$

Выражение (1.8) справедливо в том случае, когда объем пространства, ограниченный диаграммой направленности и излученным импульсом, весь заполнен отражающими гидрометеорными частицами. В реальных условиях, особенно при наблюдении метеорологических объектов на значительных удалениях, отражающий объем пространства оказывается лишь частично заполненным отражающими частицами. Соответствующее уменьшение ЭПР метеорологических целей учитывают, вводя коэффициент заполнения K_s ($0 \leq K_s \leq 1$).

3.1.5. Радиолокационная отражаемость

В соответствии с выражением (1.7) удельная эффективная площадь рассеяния метеорологических образований, состоящих из N одинаковых сферических частиц, описывается формулой

$$\sigma_0 = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \sum_{i,V} d^6 \left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 2} \right|^2, \quad (1.9)$$

$$\sigma_0 = \frac{\pi^5}{\lambda^4} Z, \quad (1.10)$$

$$Z = Nd_i^6 \left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 2} \right|^2. \quad (1.11)$$

Величина Z называется радиолокационной отражаемостью.

Как следует из формулы (1.11), радиолокационная отражаемость определяется количеством частиц в единичном объеме и их распределением по размерам, а также комплексным показателем преломления в диапазоне сантиметровых и дециметровых волн. Величина Z характеризует рассеивающие свойства облаков и осадков в диапазоне радиоволн.

Величина Z измеряется в $\text{мм}^6/\text{м}^3$. Эта размерность подчеркивает, что в единице объема (м^3) суммируются не просто радиусы находящихся в нем частиц, а радиусы частиц в шестой степени (мм^6). В связи с тем, что диапазон отражаемости Z в реальных облаках очень велик (от 10^{-5} до $105 \text{ мм}^6/\text{м}^3$), часто для удобства записей Z используют логарифмы или децилогарифмы ($\lg Z$ или $10\lg Z$). Например, $Z = 103,5 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ записывают как $\lg Z = 3,5$, а $Z = 1 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ записывают как $\lg Z = 0$. В практике радиолокационных наблюдений отражаемость облаков и осадков выражают в дБз (dBz) относительно $Z_0 = 1 \text{ мм}^6/\text{м}^3$. Связь между значениями отражаемости, выраженными в различных единицах, определяется формулой $Z \text{ мм}^6/\text{м}^3 = 10^{0,1} Z \text{ дБз (dBz)}$.

Отражаемость является специфической метеорологической характеристикой интегральной микроструктуры облаков и осадков, такой же, как водность облаков ($\text{г}/\text{м}^3$) или интенсивность выпадающих осадков ($\text{мм}/\text{ч}$), и содержит метеорологическую информацию об объемах облаков и осадков, рассеивающих радиоволны. Величина Z , в отличие от σ_0 (ЭПР), не зависит от длины волны λ и других параметров радиолокатора.

Формулы для Z и σ_0 выражают еще одну особенность радиолокационной информации — ее сильную зависимость от размера частиц. Если диаметр одной капли больше диаметра другой в 10 раз, то значения Z , σ_0 и величина отраженного от них сигнала будут различаться в 10^6 раз. Величина Z резко возрастает при увеличении размеров частиц и их концентрации в облаке и резко падает по мере их уменьшения. Отсюда следует, что радиолокатор наиболее эффективен при обнаружении и определении размеров облаков, состоящих из большого количества крупных частиц.

Для дождя средней интенсивности, как показывают экспери-

ментальные данные, $Z = 200I^{1,6}$, где I — интенсивность осадков (мм/ч). Величина Z в зависимости от интенсивности и происхождения дождя может принимать значения от 150 до 500 мм⁶/м³, показатель степени лежит в пределах 1,23–1,64. Для осадков в виде снега в тех же единицах $Z = 2000I^2$, где I — интенсивность осадков, соответствующая слою воды, образующемуся после таяния снега.

3. 2. Радиолокационные методы обнаружения и наблюдения объектов в пространстве

3.2.1. Принципы радиолокации. Физические основы обнаружения и определения местоположения объекта

В настоящее время существуют РЛС различного назначения, но в основе работы каждой из них лежат следующие три принципа:

- объект, облученный радиоволнами, отражает электромагнитную энергию;
- радиоволны распространяются в однородной среде прямолинейно и с постоянной скоростью;
- антенна РЛС обладает направленным излучением и приемом электромагнитной энергии.

Явление отражения электромагнитных колебаний от объектов, электрические свойства которых отличны от свойств среды, в которой происходит распространение электромагнитных волн, излученных РЛС, используется для радиолокационного обнаружения объектов в пространстве. Постоянство скорости и направления распространения электромагнитных волн в однородной среде служит физической основой радиолокационного измерения дальности объекта, обнаруженного РЛС.

Электромагнитные волны распространяются в однородной среде прямолинейно и с постоянной скоростью, поэтому если измерено время t прохождения волны между целью и РЛС, то можно определить и расстояние D между ними по формуле

$$D = ct,$$

где c — скорость распространения радиоволн в пространстве.

При широко применяемом импульсном методе измерения дальности передатчик РЛС периодически излучает кратковременные зондирующие радиоимпульсы, разделенные относительно большими интервалами времени. В результате облучения цель становится источником вторичного излучения. По времени t запаздывания отраженного сигнала относительно излученного определяется наклонная дальность

цели

$$D = ct/2.$$

Приведенное выражение является основной формулой определения дальности цели. Для измерения расстояния по времени запаздывания отраженного сигнала относительно излученного приемник РЛС отключается от антенны во время излучения передатчиком зондирующего радиоимпульса. В паузах между посылкой зондирующих импульсов приемник подключается к антенне и ведет прием радиоимпульсов, отраженных от объекта.

Измерение расстояния может производиться с помощью индикатора, где воспроизводится зондирующий импульс и отраженный сигнал. Для удобства работы индикатор градуируется в единицах дальности. Физической основой измерения угловых координат является направленное излучение и прием отраженных сигналов антенной РЛС.

Диаграмма направленности приемопередающей антенны РЛС в горизонтальной плоскости имеет форму узкого луча. Специальные механизмы перемещают антенну так, что ее диаграмма направленности поворачивается в горизонтальной плоскости в пределах заданного сектора обзора. При наличии объекта в секторе обзора амплитуда отраженных сигналов на выходе приемника будет максимальной тогда, когда луч антенны направлен на объект. Отмечая положение антенны, соответствующее максимуму амплитуды отраженных сигналов, можно определить азимут объекта.

Определение угла места объекта производится подобным же образом. В данном случае диаграмма направленности приемопередающей антенны РЛС имеет форму узкого луча в вертикальной плоскости. Механизмы перемещают антенну так, что ее луч поворачивается в вертикальной плоскости в пределах заданного сектора обзора. Отмечая положение антенны, соответствующее максимуму амплитуды отраженного сигнала, можно определить угол места объекта.

3.2.2. Радиолокационные методы обнаружения и наблюдения объектов в пространстве

В зависимости от характера процесса формирования радиолокационного сигнала различают следующие методы радиолокационного обнаружения и наблюдения объектов в пространстве:

– метод активного обнаружения объекта с пассивным ответом (активная радиолокация);

- метод активного обнаружения объекта с активным ответом (активная радиолокация с активным ответом);
- метод пассивного обнаружения объекта (пассивная радиолокация).

Активная радиолокация с пассивным ответом. Активная радиолокация осуществляется путем облучения цели радиоволнами и приема отраженной от нее энергии. На рис. 8 а представлена структурная схема РЛС активной радиолокации. В ее состав входят передающее, приемное и индикаторное устройства. Принцип действия станции заключается в следующем. Передающее устройство генерирует электромагнитную энергию высокой частоты и излучает ее в пространство узким лучом. Электромагнитная энергия отражается от объектов, находящихся на пути распространения радиоволн. В приемном устройстве отраженный сигнал усиливается, преобразуется и с выхода подается в индикаторное устройство, с помощью которого непосредственно определяются координаты объекта.

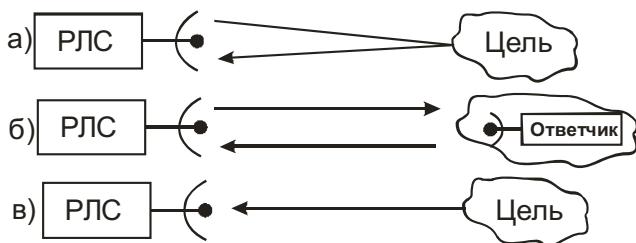


Рис. 8. Структурные схемы РЛС: а — активная радиолокация; б — активная радиолокация с активным ответом; в — пассивная радиолокация

Активная радиолокация находит широкое применение для обнаружения и определения местоположения воздушных и наземных объектов, используется для исследования облаков, осадков и других метеорологических объектов, а также для обнаружения и сопровождения угловых отражателей. Ее часто называют активной радиолокацией с пассивным ответом. Прямой сигнал, облучающий цель, называется зондирующим, а сигнал, приходящий от цели,— отраженным. Амплитуда отраженного сигнала, а следовательно, и дальность действия РЛС, в которой используется метод активной радиолокации с пассивным ответом, зависят от отражающих свойств объекта.

Активная радиолокация с активным ответом. Радиолокация с активным ответом характеризуется тем, что на объекте устанавлива-

ется ответчик, представляющий собой переизлучатель (приемопередающее устройство), запускаемый сигналами активного радиолокатора. Структурная схема такой РЛС приведена на рис. 8 б.

Радиосигналы передатчика основной РЛС улавливаются приемной антенной цели и преобразуются ее приемником, в результате чего возбуждается передатчик цели. От передающей антенны цели распространяется ответный сигнал, улавливаемый приемной антенной основной станции. Этот сигнал поступает в приемник, а затем на индикатор, который позволяет определить координаты цели.

При радиолокации с активным ответом обнаружение производится по сигналу, ретранслированному объектом. При этом прямой сигнал называют запросным, а сигнал, приходящий от цели, — ответным. Ретрансляционную аппаратуру, находящуюся на объекте, именуют ответчиком. Интенсивность ответного сигнала зависит от характеристик установленного на объекте ретрансляционного передатчика. В метеорологии такой способ радиолокационного обнаружения и наблюдения реализуется в системах радиозондирования и метеорологических ракетных комплексах: радиолокационная станция является частью наземной аппаратуры, а ответчик вместе с измерительной аппаратурой радиотелеметрической системы подвешивается к оболочке, наполненной водородом или гелием, или помещается на метеорологической ракете. При таком способе радиолокационного наблюдения существенно повышаются дальность и надежность наблюдения по сравнению с наблюдением целей с пассивным ответом при одинаковых мощностях передатчика и чувствительности приемника радиолокационной станции. Одновременно может передаваться телеметрическая информация (давление, температура и влажность атмосферы на высотах), что значительно расширяет возможности радиолокации.

Активная радиолокация с активным ответом очень эффективна и как средство навигации. Например, если запрошенный сигнал посылается с самолета или морского судна, а в качестве ответчика используется наземный передатчик-маяк, то последний служит хорошим навигационным ориентиром для штурмана судна или самолета. Измерение координат цели в случае активного ответа происходит так же, как и при пассивном ответе. Однако при использовании ответчика запаздывание ответного сигнала больше.

РЛС с активным ответом могут быть совмещенными, автономными и комбинированными. Совмещенная система наиболее простая. Она состоит из ответчика, входящего в состав радиозонда или аппаратуры метеорологической ракеты, и РЛС, выполняющей функции запросчика, и используется в системах радиозондирования «аэрологиче-

ская РЛС—РКЗ». В автономных системах с активным ответом сигналы запроса посылаются специальным приемопередатчиком, работа которого синхронизируется РЛС. Преимуществом систем этого типа является возможность включения аппаратуры только на то время, когда необходимо ее использовать. Основной недостаток — низкая разрешающая способность по угловым координатам, так как запросчики, как правило, имеют антенны небольших размеров с широкой диаграммой направленности. Комбинированные системы отличаются тем, что запрос осуществляется одновременно сигналами РЛС и автономного запросчика, ответчик срабатывает только при получении обоих запрашивающих сигналов, совпадающих по времени.

В практике зондирования атмосферы с помощью метеорологических ракет и радиозондов используется система активной радиолокации с активным ответом «Метеорит—МАРЗ» и др. В ней применяются сверхрегенеративные радиолокационные ответчики. В качестве запросных сигналов используются зондирующие импульсы РЛС. Передача запросного импульса осуществляется на той же несущей частоте, на которой работает бортовой сверхрегенеративный ответчик. Это является преимуществом таких систем по сравнению с другими, в которых запрос и ответ осуществляются на разных частотах. Использование одной и той же частоты при запросе и ответе позволяет существенно упростить как бортовую, так и наземную аппаратуру.

Пассивная радиолокация. Пассивная радиолокация в отличие от активной основывается на приеме собственного излучения цели в радиочастотном диапазоне (рис. 8 в). Существуют два вида собственного радиоизлучения — тепловое, характерное для любого тела, температура которого выше абсолютного нуля, и нетепловое, которое возникает при грозových и других интенсивных электродинамических процессах. Обе разновидности собственного излучения имеют общие свойства и различия.

Мощность теплового радиоизлучения очень мала, а нетеплового — велика. Это объясняется тем, что спектр частот электромагнитных волн, излучаемых при тепловых процессах, весьма широк — простирается от инфракрасного до сантиметрового диапазона, причем на долю миллиметровых и сантиметровых радиоволн приходится менее 1 % излучаемой энергии. Что касается нетеплового излучения, то оно и более интенсивно, и, как правило, уже по спектру. Поэтому для радиоволн нетеплового происхождения используется приемник прямого усиления, а для радиоволн теплового происхождения — высокочувствительные супергетеродины.

Спектральная плотность теплового излучения максимальна в

инфракрасном диапазоне волн и значительно уменьшается с переходом к миллиметровым и сантиметровым волнам, тогда как нетепловое излучение наиболее интенсивно на частотах 10–30 кГц.

Пассивная радиолокация возможна только при температурной контрастности наблюдаемых объектов, т. е. при различии яркостных температур. Естественное излучение тел независимо от своего происхождения (теплового или нетеплового) является беспорядочным. Оно, как и внутренние шумы приемника, имеет флуктуационный характер. Следовательно, пассивная радиолокация является процессом обнаружения шумоподобного сигнала на фоне шумов, а это требует определенной (тщательной) обработки принятого сигнала. Пассивная радиолокация, основанная на использовании радиотеплового излучения, именуется *радиотеплокацией*. Приемники радиотепловых сигналов называются *радиометрами*.

Основную роль при определении координат играют методы пространственной селекции. Как и в активной радиолокации, с пассивным ответом, угловые координаты определяются с помощью антенн направленного действия. Однако для измерения дальности в радиотеплокации используются косвенные методы, например, угломернобазовый метод с разнесенными антеннами. Дальность пассивной радиолокации может быть достаточно большой. Она существенно зависит от контраста цели с фоном и степени однородности фона. Так, бортовой радиометр может иметь большую дальность обнаружения льдов на фоне моря, чем бортовая панорамная РЛС.

Неравномерное тепловое излучение различных участков местности применяется для снятия радиотеплового изображения. При этом используется обзор иглообразным лучом в секторе и соответствующая развертка на экране индикатора, полученное изображение напоминает оптическое. Значительное увеличение объема получаемой информации возможно при использовании многочастотных систем.

Проводятся исследования по применению пассивной радиолокации для разведки земных ресурсов, ледовой разведки, метеорологических наблюдений с самолетов и искусственных спутников Земли за грозами, градоопасными облаками и другими опасными явлениями. Кроме того, с помощью радиотеплокации получают информацию о текущем состоянии сельскохозяйственных площадей. Возможно применение радиотеплокации для навигационных целей, например для точного определения угловых координат внеземных источников радиоизлучения.

3.2.3. Понятие о координатах цели

Положение цели в пространстве определяется координатами. Как известно, при нахождении местоположения какой-либо точки в пространстве можно пользоваться различными системами координат. В радиолокации наиболее удобной является сферическая система координат (рис. 9).

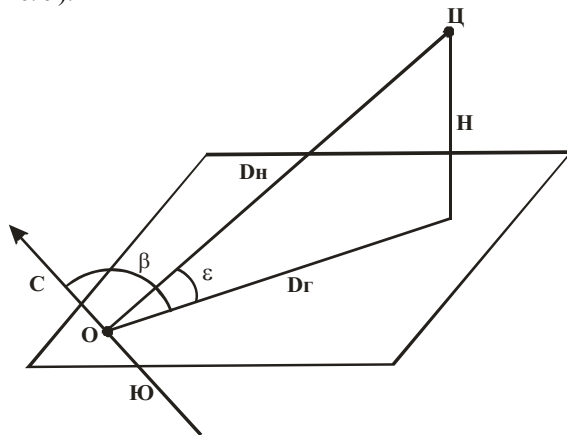


Рис. 9. Сферическая система координат

Начало координат совмещено с точкой расположения РЛС (точка O). Через эту точку проходит линия отсчета ON , лежащая в горизонтальной плоскости. Линия ON обычно совмещается с меридианом, проходящим через РЛС. Положение объекта, находящегося в точке $Ц$, однозначно определяется следующими тремя координатами:

- наклонной дальностью D_n т. е. расстоянием между станцией и объектом по прямой;
- азимутом β , т. е. углом между линией отсчета ON и направлением на объект в горизонтальной плоскости (азимут называется истинным, если отсчет производится по часовой стрелке от северного меридиана);
- углом места ε , т. е. углом между направлением на объект и проекцией этого направления на горизонтальную плоскость.

Понятие наклонной дальности введено для того, чтобы различать расстояние между станцией и объектом по прямой линии и расстояние вдоль поверхности земли, которое по этой же причине называется горизонтальной дальностью. В дальнейшем для простоты изло-

жения термин «наклонная дальность» будет заменен одним словом «дальность».

Отсчеты азимута производятся от линии ОН по часовой стрелке в пределах от 0 до 360° или в двух направлениях — по часовой стрелке и против нее. Углы, отсчитываемые по часовой стрелке, считаются положительными, против часовой стрелки — отрицательными.

Угол места отсчитывается от горизонтальной плоскости вверх и вниз, его значения могут лежать в пределах от 0 до $\pm 90^\circ$. За положительное направление отсчета угла места принято направление вверх от горизонтальной плоскости, за отрицательное — вниз. Отрицательные значения углов места могут быть в самолетных РЛС, а также на судовых и береговых станциях, расположенных на некоторой высоте от поверхности моря. Метеорологические и аэрологические РЛС всегда устанавливаются на некоторой высоте над поверхностью земли, поэтому они могут работать и при отрицательных значениях угла места.

Наклонная дальность, азимут и угол места определяются РЛС непосредственно, без каких-либо дополнительных пересчетов. В этом заключается главное достоинство сферической системы координат.

Высота H — кратчайшее расстояние от объекта до горизонтальной плоскости, проходящей через РЛС, определяется по известному из тригонометрии соотношению

$$H = D_n \sin \varepsilon.$$

В отдельных случаях важно знать значение горизонтальной дальности

$$D_c = D_n \cos \varepsilon.$$

При значительных расстояниях до цели земную поверхность нельзя считать горизонтальной плоскостью. Поэтому приведенные формулы, не учитывающие кривизну Земли, справедливы только для небольших значений дальности D_n . Уже при D_n порядка 50 км ошибка в определении высоты при вычислении по этим формулам достигает 200 м. Практически для вычисления высоты по данным D_n и ε пользуются формулой, учитывающей кривизну Земли:

$$\sin \varepsilon = \frac{H}{D_n} - \frac{D_n}{2R_3},$$

где R_3 — радиус Земли, равный 6370 км. Иногда определение дальности является единственной задачей, решаемой РЛС (навигационные системы, радиодальномеры). Разновидностью радиолокационного дальномера являются радиоальтиметры, представляющие собой приборы для определения высоты самолета над земной поверхностью.

Радиотехнические методы определения координат целей дают более точные результаты по сравнению с другими методами (зву-

ковыми, оптическими). Они позволяют также использовать автоматику для непрерывного сопровождения целей, обнаруженных РЛС. Эти методы получили широкое применение в метеорологии, аэрологии, космических методах исследований.

3.3. Радиолокационные методы измерения дальности. Максимальная дальность РЛС

Все методы радиолокационного измерения дальности объектов основаны на измерении времени запаздывания радиолокационных сигналов. Различают следующие методы измерения дальности:

- метод частотной модуляции;
- фазометрический;
- импульсный (амплитудный).

3.3.1. Частотный метод определения дальности

Выше отмечалось, что определение дальности сводится, в конечном счете, к измерению интервалов времени между моментом излучения передатчиком колебания и моментом прихода колебания, отраженного от цели. Для точного измерения дальности необходимо возможно точнее зафиксировать эти два момента времени. В станциях с непрерывным излучением прямой и отраженный сигналы присутствуют на выходе приемника одновременно и разделение их во времени затруднено. Поэтому желательно, чтобы каждое из следующих друг за другом электрических колебаний имело отличительные особенности.

Тогда при возвращении отраженного колебания к приемнику станции можно установить, когда именно это колебание было излучено передающей антенной. Следовательно, передатчик должен генерировать не чисто синусоидальные незатухающие колебания, а колебания высокой частоты, модулированные по какому-либо периодическому закону.

На рис. 10 изображена упрощенная функциональная схема РЛС с частотной модуляцией. Модулятор осуществляет частотную модуляцию генератора СВЧ. В результате происходит непрерывное сравнительно медленное изменение частоты генерируемых высокочастотных колебаний. К приемному устройству поступают как сигналы, отраженные от цели, так и прямые сигналы передатчика, подводимые через ослабитель.

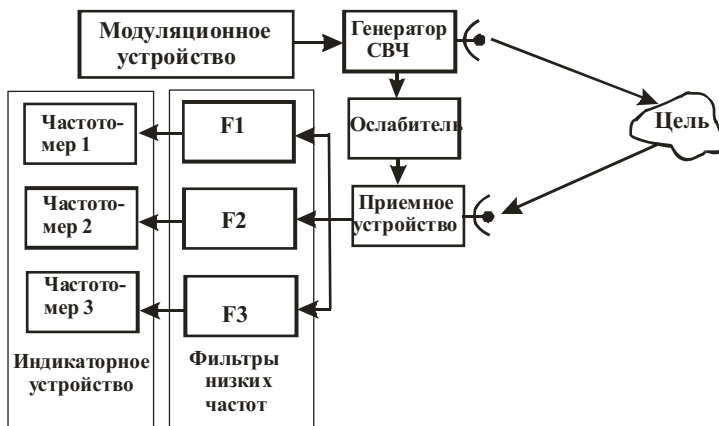


Рис. 10. Функциональная схема РЛС с частотной модуляцией

Отраженные сигналы повторяют закон изменения частоты излучаемых колебаний со сдвигом во времени $t = 2D/c$. Допустим, частота передатчика изменяется, периодически нарастая и спадая от минимального значения $f_{\min}$ до максимального $f_{\max}$ (рис. 11). Чем дальше находится цель, тем больше успеет измениться частота передатчика за время распространения электромагнитной энергии до цели и обратно. Разность между частотой колебаний, генерируемых передатчиком, f_c и частотой колебаний, отраженных от цели, $f_{\text{отр}}$ прямо пропорциональна дальности цели. Определение дальности сводится, таким образом, к измерению разности частот $f_c - f_{\text{отр}}$. Для измерения этой разности колебания частот f_c и $f_{\text{отр}}$ подводят к общему детектору, измеряют возникающую частоту биений $F_B = |f_c - f_{\text{отр}}|$.

Частоту биений обычно измеряют стрелочным частотомером, который, являясь в данном случае индикатором дальности, градуируется непосредственно в единицах дальности.

При наличии сигналов, отраженных от двух целей, находящихся на различных расстояниях, возникают две частоты биений. Более высокая из них соответствует более удаленной цели. Для раздельной индикации двух и более целей необходимо разделить частоты биений F_B , создаваемые сигналами, отраженными от целей, находящихся на разном расстоянии. Для этого на выходе приемника включают узкополосные фильтры.

Метод частотной модуляции удобен для измерения дальности неподвижных или медленно движущихся целей. Если же радиальная составляющая скорости цели велика, то возникает дополнительная

составляющая частоты биений за счет эффекта Доплера—Белопольского, искажающая результаты измерений.

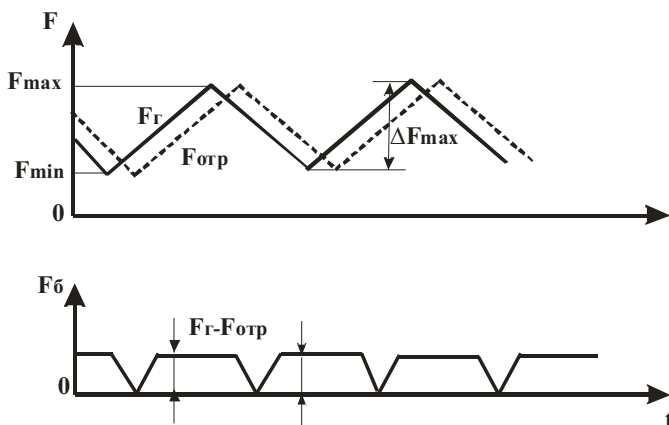


Рис. 11. Изменение частоты излучаемого и принимаемого сигналов

К достоинствам частотных дальномеров с непрерывным излучением следует отнести простоту измерения очень малых расстояний и применение передатчиков относительно малой мощности. Недостатками таких дальномеров являются использование двух антенн и ухудшение чувствительности приема вследствие попадания в приемный тракт некоторой доли излучения передатчика. Специфическим недостатком является требование высокой линейности изменения частоты передатчика. Системы с частотной модуляцией нашли применение в качестве самолетных радиовысотомеров (альтиметров).

3.3.2. Фазовый метод определения дальности

При использовании фазового метода о расстоянии до объекта судят по изменению фазы отраженного сигнала за время распространения электромагнитных волн до объекта и обратно.

В фазометре (рис. 12) сравниваются две волны — прямая, поступающая непосредственно от генератора, и отраженная, поступающая в приемник после отражения от объекта. Эти радиоволны имеют различные фазы.

Допустим, передатчик РЛС непрерывно генерирует синусоидальные колебания, а отражающий объект неподвижен. Отраженный сигнал будет иметь в этом случае ту же частоту, что и сигнал, послан-

ный передатчиком, но будет отличаться от него амплитудой и фазой.



Рис. 12. Функциональная схема РЛС непрерывного излучения для определения дальности фазовым методом

Судить по амплитуде отраженного сигнала о расстоянии до объекта невозможно, так как она зависит от размеров и других характеристик отражающего объекта. Фаза же отраженного сигнала зависит только от расстояния до объекта.

Если напряжение, генерируемое передатчиком, изменяется по синусоидальному закону с нулевой начальной фазой:

$$u = U \sin \omega t, \quad (3.1)$$

то напряжение отраженного сигнала на выходе приемника будет описываться выражением

$$u_{\text{отп}} = U \sin \omega(t - t_3) = U \sin(\omega t - \Delta\varphi), \quad (3.2)$$

где t_3 — время запаздывания отраженного сигнала за счет распространения электромагнитной энергии до цели и обратно.

Поскольку $t_3 = 2D/c$, фазовый сдвиг между прямым и отраженным сигналами равен

$$\Delta\varphi = \omega t_3 = \frac{\omega 2D}{c} = \frac{4\pi f D}{c}.$$

Учитывая, что $c/f = \lambda$, находим окончательно

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi f D}{c} = \frac{4\pi D}{\lambda}. \quad (3.3)$$

Чем дальше находится цель, тем больше фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ между отраженным сигналом и сигналом, генерируемым передатчиком, в момент возвращения отраженного сигнала. В соответствии с формулой (3.3) выражение для дальности объекта имеет вид

$$D = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi = \frac{c}{4\pi f} \Delta\varphi. \quad (3.4)$$

Для определения фазового сдвига $\Delta\varphi$ в качестве индикатора может использоваться фазометр, градуированный в единицах дальности. К

фазометру подводятся одновременно колебания от передатчика (через аттенуатор) и с выхода приемника.

Методы определения дальности, основанные на измерении фазового сдвига между излучаемым и отраженным сигналами, называются фазометрическими. Эти методы нашли применение в радионавигационных системах большого радиуса действия. Использование фазометрического метода в диапазоне УКВ позволяет определить дальность цели с высокой степенью точности, но неоднозначно, так как фазовый сдвиг, кратный 2π , нельзя измерить. Согласно формуле (3.4), однозначность отсчета дальности обеспечивается лишь при условии $D_{\max} \leq \lambda/2$.

Поскольку $D_{\max}$ составляет десятки и сотни километров, выполнение этого условия возможно лишь для сверхдлинных волн, непригодных для радиолокации. Кроме неоднозначности, измерение дальности фазометрическим способом затрудняется также тем, что неизвестен сдвиг по фазе, возникающий при отражении сигнала от цели.

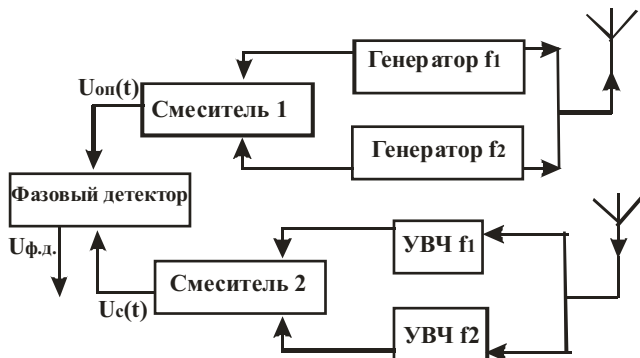


Рис. 13. Функциональная схема двухчастотного фазового дальномера

Двухчастотные фазовые дальномеры позволяют устранить указанные недостатки. В РЛС, предназначенных для определения дальности фазометрическим методом (рис. 13), с помощью двух генераторов создаются незатухающие колебания на двух близких частотах f_1 и f_2 , которые затем излучаются в пространство. Принятые отраженные от цели сигналы усиливаются каждый в своем тракте и поступают к 1 (первому) смесителю. На его выходе образуется напряжение разностной частоты U_c .

Так как частоты f_1 и f_2 близки друг к другу, то для них фазовые сдвиги, обусловленные отражением волн от цели, можно считать оди-

наковыми. На выходе 1 смесителя эти сдвиги полностью вычитаются. Аналогично с помощью обоих генераторов во втором смесителе формируется опорное напряжение разностной частоты $U_{on}(f_1 - f_2)$. Напряжения $U_c(t)$ и $U_{on}(t)$ подводятся к фазометру, который измеряет разность фаз напряжения сигнала и опорного напряжения. Дальность цели определяется выражением

$$D = \frac{c\Delta\varphi}{4\pi(f_1 - f_2)},$$

где $\Delta\varphi$ — разность фаз опорного напряжения и сигнала на разностной частоте.

Максимальная однозначно измеряемая дальность может быть найдена при $\Delta f = 2\pi$ как

$$D_{\text{макс}} = \frac{c}{2(f_1 - f_2)}.$$

Подбором значения $\Delta\varphi$ добиваются однозначных измерений в заданном диапазоне дальности. Достоинством фазовых дальномеров является высокая точность измерений. К специфическим недостаткам относится невозможность измерений при одновременном облучении двух и более целей. Все недостатки, присущие устройствам с непрерывным излучением, свойственны фазовым дальномерам.

3.3.3. Импульсный метод определения дальности

В большинстве эксплуатируемых в настоящее время метеорологических РЛС применяется импульсная амплитудная модуляция передатчика. При такой модуляции передатчик генерирует колебания в виде кратковременных серий радиоимпульсов, за которыми следуют сравнительно длительные паузы. Длительность импульсов составляет десятые доли и единицы микросекунд, а паузы между ними продолжаются сотни и тысячи микросекунд. Импульсный метод определения расстояния был впервые предложен А. Н. Щукиным для измерения высоты отражающих слоев атмосферы (ионосферы). В 1932 г. построена первая ионосферная станция, основанная на импульсном методе.

Упрощенная функциональная схема РЛС, работающей импульсным методом, изображена на рис. 14. Колебания высокой частоты от генератора СВЧ поступают через антенный переключатель в антенну. На время генерации импульса он подключает антенну к выходу передатчика и блокирует вход приемника, а на все остальное время подключает антенну к входу приемника и отсоединяет ее от пе-

редатчика. Отраженные от цели импульсы поступают на антенны через антенный переключатель и приемник. В приемнике они усиливаются, детектируются и с его выхода подаются на индикатор.

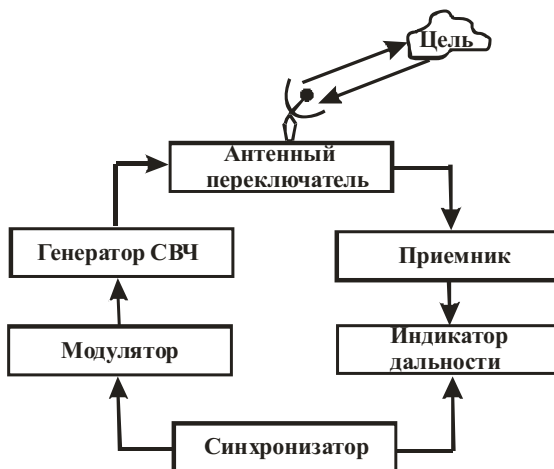


Рис. 14. Упрощенная функциональная схема РЛС с импульсным методом работы

Определение дальности при этом сводится к измерению интервала времени t между моментом послыки прямого импульса и моментом прихода импульса, отраженного от цели. Для точного определения дальности необходимо с высокой точностью измерить этот интервал времени, который составляет десятки и сотни микросекунд. Для точного измерения таких интервалов времени требуются приборы с малой инерционностью.

В индикаторах дальности в качестве измерительных приборов используются электронно-лучевые трубки (ЭЛТ). Сущность измерения дальности (времени) с помощью ЭЛТ можно пояснить на примере использования простейших линейной (рис. 15) и кольцевой разверток. Разверткой называют траектории движения светящегося пятна по экрану ЭЛТ. При линейной развертке в трубке с электростатическим управлением электронный луч под действием пилообразного напряжения развертки периодически перемещается с постоянной скоростью по прямой, например, слева направо. В этом случае линия развертки имеет вид горизонтальной прямой с началом у левого края экрана. Пилообразное напряжение развертки вырабатывается специальным генера-

тором развертки, который запускается тем же импульсом синхронизатора, что и модулятор передатчика, поэтому движение луча в горизонтальном направлении по экрану начинается каждый раз в момент посылки излучаемого импульса.

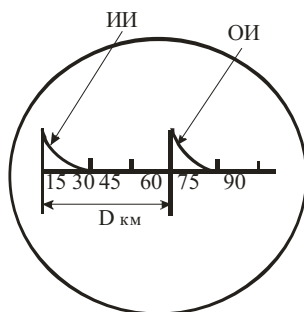


Рис.15. Использование линейной развертки при импульсном методе измерения дальности. ИИ — излученный импульс, ОИ — отраженный импульс

При использовании амплитудной отметки цели отраженный сигнал, поступающий с выхода приемника, вызывает отклонение луча в вертикальном направлении. Отраженный сигнал можно видеть на экране трубки. Чем дальше находится цель, тем больше времени проходит до момента появления отраженного импульса и дальше вправо успевает переместиться луч вдоль линии развертки. Каждой точке линии развертки соответствует определенный момент времени прихода отраженного сигнала и, следовательно, определенное значение дальности. Индикаторы дальности с линейной разверткой применяются в метеорологических и аэрологических РЛС.

При кольцевой развертке электронный луч, перемещаясь с постоянной скоростью, описывает на экране ЭЛТ окружность. Для получения кольцевой развертки обычно используют специальные ЭЛТ с центральным электродом и электростатическим управлением. На горизонтально и вертикально отклоняющие пластины таких ЭЛТ одновременно подаются синусоидальные напряжения одинаковой частоты, сдвинутые между собой по фазе на 90° . За один период синусоидального напряжения на экране ЭЛТ образуется одна полная окружность. На центральный электрод с выхода приемника подаются отрицательные импульсы напряжения, под действием которых луч отклоняется от центра экрана в радиальном направлении. Центральный

угол, между отметками прямого и отраженного импульсов на экране ЭЛТ пропорционален дальности цели D (рис. 15).

Для повышения точности в индикаторах с кольцевой разверткой синусоидальное напряжение развертки вырабатывается генератором, стабилизированным кварцем. Это же стабилизированное по частоте напряжение используется и для формирования пусковых импульсов передатчика. Тем самым обеспечивается строгая синхронность работы передатчиков и индикаторов дальности.

Импульсный метод измерения дальности имеет следующие преимущества:

- возможность вести наблюдение одновременно за несколькими объектами, а также определять координаты этих объектов с достаточной точностью;
- большую мощность в импульсе при небольшой средней мощности, потребляемой от источника питания (в связи с этим размеры и вес радиолокационной аппаратуры невелики);
- возможность конструктивно объединить передающее и приемное устройства, используя общую антенну.

К недостаткам импульсного метода измерения дальности относятся:

- наличие «мертвой зоны», т. е. непросматриваемого пространства вблизи РЛС, которое тем обширнее, чем больше длительность излучаемого импульса;
- наличие отражений от местных предметов.

Целесообразно применять непрерывное излучение для специальных целей, например: слепой посадки самолетов, когда требуется измерение дальности порядка нескольких метров; выделения отражений от наблюдаемой цели на фоне отражений от других объектов (местных предметов, пассивных помех); измерения высоты полета самолета (радиоальтиметры).

3.3.4. Основное уравнение радиолокации

Рассмотрим зависимость максимальной дальности действия РЛС $D_{\text{макс}}$ от ее технических параметров. Сначала не будем учитывать влияния Земли и атмосферы. Допустим, что передающее устройство излучает максимальную мощность импульса $P_{\text{макс}}$. При ненаправленной передающей антенне плотность потока мощности Π'_y на расстоянии D от станции можно найти, разделив излучаемую мощность равную $4\pi D^2$ на поверхность сферы

$$\Pi_{\psi}' = \frac{P_{\text{макс}}}{4\pi D^2}.$$

Для направленной антенны плотность потока мощности в направлении максимального излучения в G раз больше, где G — коэффициент направленного действия передающей антенны по мощности. Следовательно, плотность потока мощности в направлении максимального излучения равна

$$\Pi_{\psi} = \frac{P_{\text{макс}}}{4\pi D^2} G.$$

Если в направлении максимального излучения антенны находится цель с эффективной отражающей поверхностью σ , то отраженная от цели мощность определяется по формуле

$$P_{\text{отр}} = \frac{P_{\text{макс}}}{4\pi D^2} \sigma. \quad (3.5)$$

Реально энергия рассеивается целью в различных направлениях по-разному, однако учесть направленность вторичного излучения трудно, так как при облучении сложного объекта характер отражения сигнала от различных элементов цели все время изменяется вследствие изменения ориентации элементарных отражателей. Одновременно изменяются фазовые соотношения между сигналами, отраженными от различных элементов. Поэтому направленностью вторичного излучения обычно пренебрегают.

Плотность потока отраженной мощности на расстоянии D от цели можно определить, разделив величину полной отраженной мощности, полученную по формуле (3.5), на поверхность сферы радиусом D . Таким образом, на единицу площади приемной антенны станции приходится мощность

$$\Pi_{\text{РЛС}} = \frac{P_{\text{отр}}}{4\pi D^2} = \frac{P_{\text{макс}} G \sigma}{4\pi D^2 4\pi D^2}. \quad (3.6)$$

Обозначим эффективную площадь приемной антенны через S_A . Тогда полная мощность отраженного сигнала, принятая антенной РЛС, будет равна

$$P_{\text{РЛСпр}} = \frac{P_{\text{макс}} G \sigma S_A}{16\pi^2 D^4}. \quad (3.7)$$

Выражение (3.7) называют *основным уравнением радиолокации*. Оно показывает зависимость мощности отраженного сигнала от параметров станции, характера цели и ее дальности. Из этого уравнения видно, что цели с большей эффективной отражающей поверхно-

стью дают большую амплитуду отраженного сигнала. Из основного уравнения радиолокации следует также, что мощность отраженного сигнала убывает пропорционально четвертой степени дальности. Очевидно, что не при любой дальности цели мощность отраженного сигнала достаточна для того, чтобы различить на экране индикатора отраженный импульс на фоне шумов.

Обозначим через $P_{пр.мин}$ минимальное значение мощности сигнала, улавливаемого антенной, при котором импульс еще может быть обнаружен на фоне шумов приемника. Из определения следует, что $P_{пр.мин}$ — реальная чувствительность приемника. Очевидно, что то расстояние до цели, при котором мощность отраженного сигнала $P_{пр}$ уменьшается до значения $P_{пр.мин}$, и будет максимальной дальностью действия станции. При большей дальности цели $P_{пр} < P_{пр.мин}$, а отраженный импульс на экране индикатора будет неразличим в шумах.

Подставив в формулу (3.7) значения $P_{пр.мин}$ и $D_{макс}$, получим

$$P_{пр.мин} = \frac{P_{макс} G \sigma S_A}{16\pi^2 D_{макс}^4}. \quad (3.8)$$

Отсюда следует, что максимальная дальность действия РЛС описывается выражением

$$D_{макс} = \sqrt[4]{\frac{P_{макс} G \sigma S_A}{P_{пр.мин} 16\pi^2}}. \quad (3.9)$$

Изменение каждого из этих параметров влияет на значение максимальной дальности действия не очень значительно, так как все сомножители находятся под корнем четвертой степени. Так, увеличение мощности $P_{макс}$ с 500 до 1000 кВт, т. е. в два раза, приводит к увеличению дальности $D_{макс}$ всего в $\sqrt[4]{2} = 1,19$ раза, или примерно на 20%. Такой же результат дает повышение чувствительности приемника. Чтобы увеличить максимальную дальность действия в два раза, необходимо повысить мощность передатчика в импульсе в 2^4 (16 раз). Из формулы (3.9) следует, что более эффективным способом увеличения дальности является увеличение коэффициента направленного действия (КНД) антенны. КНД антенны связан с ее эффективной площадью соотношением

$$G = 4\pi \frac{S_A}{\lambda^2}. \quad (3.10)$$

При неизменной длине волны λ увеличение КНД достигается увеличением эффективной площади антенны S_A . Поскольку для передачи и приема используется одна общая антенна, G и S_A в формуле (3.9) возрастают одновременно, и, следовательно, дальность $D_{макс}$ про-

порциональна корню не четвертой, а второй степени из G (или S_A).

Формула (3.9) определяет дальность действия РЛС только в направлении максимума диаграммы направленности. Более полно дальность действия РЛС с учетом направленности антенны позволяет оценить зона видимости, которая представляет собой область, характеризующуюся тем, что только цели, находящиеся внутри этой области, могут быть обнаружены РЛС.

3.3.5. Дальность действия активной радиолокации с активным ответом

Рассмотрим дальность действия радиолокационной системы с активным ответом в свободном пространстве, предположив, что запрос и ответ происходят на одной частоте, а для передачи и приема используется одна и та же антенна. Тогда плотность потока мощности запросчика, приходящаяся на единицу поверхности сферы на расстоянии D , равна

$$P'_{\text{зап}} = \frac{P_{\text{и.зап}}}{4\pi D^2},$$

где $P_{\text{и.зап}}$ — импульсная мощность передатчика запросчика.

Для направленной антенны запросчика плотность потока мощности ответчика равна

$$P_{\text{зап}} = \frac{P_{\text{и.зап}}}{4\pi D^2} G_{\text{зап}},$$

где $G_{\text{зап}}$ — коэффициент направленного действия антенны запросчика.

Мощность сигнала, улавливаемого антенной ответчика, описывается формулой

$$P_{\text{пр.отв}} = \frac{P_{\text{и.зап}} G_{\text{зап}} S_{\text{А.отв}}}{4\pi D^2},$$

где $S_{\text{А.отв}}$ — эффективная площадь антенны ответчика. Отсюда максимальная дальность действия запросчика в свободном пространстве

$$D_{\text{макс.зап-отв}} = \sqrt{\frac{P_{\text{и.зап}} G_{\text{зап}} S_{\text{А.отв}}}{4\pi P_{\text{пр.мин.отв}}}}. \quad (3.11)$$

Если сигнал на входе приемника ответчика превышает некоторый пороговый уровень, т. е. $P_{\text{пр}} > P_{\text{пр.мин}}$, то ответчик вырабатывает ответный сигнал, мощность которого уже не зависит от запускающего сигнала запросчика. Такой сигнал создает у антенны запросчика плотность потока мощности

$$P_{отв} = \frac{P_{и.отв} G_{отв}}{4\pi D^2}.$$

Мощность сигнала, улавливаемого антенной запросчика, т. е. на входе приемника запросчика, определяется по формуле

$$P_{пр.зап} = \frac{P_{и.отв} G_{отв} S_{А.зап}}{4\pi D^2}.$$

При этом максимальная дальность действия ответчика в свободном пространстве

$$D_{\max.отв.зап} = \sqrt{\frac{P_{и.отв} G_{отв} S_{А.зап}}{4\pi P_{пр.мин.зап}}}. \quad (3.12)$$

Следует так выбирать параметры устройств, чтобы дальности по линии запросчик—ответчик и по линии ответчик—запросчик были равны. Приравняв правые части выражений (3.11) и (3.12), получим

$$\frac{P_{и.зап} G_{зап} S_{А.отв}}{P_{пр.мин.отв}} = \frac{P_{и.отв} G_{отв} S_{А.зап}}{P_{пр.мин.зап}},$$

откуда находим

$$P_{и.зап} P_{пр.мин.зап} G_{зап} S_{А.отв} = P_{и.отв} P_{пр.мин.отв} G_{отв} S_{А.зап}. \quad (3.13)$$

Выражение (3.13) позволяет произвести выбор параметров системы. В практике радиозондирования атмосферы использование сверхрегенеративных ответчиков позволяет повысить дальность действия системы при малой мощности ответчика, так как дальность действия пропорциональна корню квадратному из параметров РЛС и радиозонда (3.13), а не корню четвертой степени, как в случае активной радиолокации с пассивным ответом.

3.3.6. Уравнение радиолокации атмосферных образований

Уравнение дальности радиолокационного наблюдения облаков и осадков связывает между собой технические характеристики РЛС, параметры метеорологических целей, определяющие их отражающие свойства, и дальность обнаружения. Для получения уравнения дальности радиолокационного обнаружения облаков и осадков воспользуемся основным уравнением радиолокации (3.7) для точечной цели и подставим в него выражение для ЭПР метеоцели, состоящей из одинаковых сферических частиц (1.8). В результате подстановки получим

$$P_{пр} = \frac{P_u G S_A \pi^4 \theta^2 c \tau_u}{128 \lambda^4 D^2} N d^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (3.14)$$

где P_u — импульсная излучаемая мощность, G — КНД антенны, θ — ширина диаграммы направленности, c — скорость распространения радиоволн, τ_u — длительность импульса, D — расстояние до отражающего объема цели, N — число частиц в отражающем объеме, d — диаметр отражающих частиц, m — комплексный коэффициент преломления вещества частиц, S_A — эффективная площадь антенны.

Так как КНД антенны и ее эффективная площадь связаны следующими соотношениями

$$G = 4\pi \frac{S_A}{\lambda^2}, \quad S_A = \frac{G\lambda^2}{4\pi}, \quad (3.15)$$

то, выражая одни параметры антенны через другие, можно представить уравнение дальности радиолокационного наблюдения облаков и осадков в различном виде, в частности, как

$$P_{np} = \frac{\pi^3 P_u G^2 \theta^2 c \tau_u}{512 \lambda^2 D^2} N d^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2. \quad (3.16)$$

В метеорологических РЛС, как правило, применяются антенны с симметричными диаграммами направленности и отражателями зеркального типа. У таких антенн КНД и ширина диаграммы направленности связаны соотношением

$$G = \frac{16}{\theta^2}. \quad (3.17)$$

Тогда, принимая во внимание (3.15), получаем

$$\theta^2 = \frac{4\lambda^2}{\pi S_A}. \quad (3.18)$$

С учетом (3.18) и (3.15) выражение (3.16) может быть представлено в виде

$$P_{np} = \frac{\pi^4 P_u S_A c \tau_u}{8 \lambda^4 D^2} N d^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2. \quad (3.19)$$

Сравнивая выражение (3.19) и уравнение дальности радиолокационного наблюдения точечной цели, можно сделать вывод, что при радиолокационном наблюдении метеоцелей максимальная дальность пропорциональна квадратному корню из излучаемой мощности и других энергетических характеристик, а не корню четвертой степени, как в случае точечной цели. Это обусловлено зависимостью ЭПР метеорологических целей от расстояния.

С учетом неполного заполнения отражающего объема уравнение радиолокации атмосферных образований будет иметь вид

$$P_{np} = \frac{\pi^4 P_u S_A c \tau_u K_z}{8\lambda^4 D^2} Nd^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (3.20)$$

где K_z — коэффициент заполнения отражающего объема.

При измерении P_{np} в качестве начального уровня выбирают любое значение P_o или уровень собственных шумов приемника $P_{ш}$. Используя выражение (1.11), можно записать уравнение радиолокации атмосферных образований с учетом способа измерения отраженных сигналов:

$$\frac{P_{np}}{P_{ш}} = \frac{\pi^4 P_u S_A c \tau_u K_z}{8\lambda^4 P_{ш}} \frac{z}{D^2}. \quad (3.21)$$

Величина

$$\Pi = \frac{\pi^4 P_u S_A c \tau_u}{8\lambda^4 P_{ш}} \quad (3.22)$$

называется метеорологическим *потенциалом радиолокационной станции*.

Приняв $K_z = 1$ и используя выражение (3.22), можно существенно упростить уравнение (3.21):

$$\frac{P_{np}}{P_{ш}} = \Pi \frac{z}{D^2}. \quad (3.23)$$

Из соотношения следует, что при постоянном значении Π по измеренным значениям мощности отраженных сигналов можно получить информацию об отражающих свойствах метеорологических целей. На использовании этого соотношения и основаны количественные измерения при применении импульсных РЛС.

Потенциал метеорологической радиолокационной станции. Потенциал метеорологической РЛС определяется техническими характеристиками станции и описывается выражением (3.22). Большое число атмосферных образований характеризуется очень малыми значениями эффективных площадей рассеяния, создающих слабые отраженные сигналы. В связи с этим для обеспечения наибольшей дальности обнаружения метеорологические радиолокационные станции должны обладать максимально возможными значениями мощности передатчика и чувствительности приемника, т. е. большим энергетическим потенциалом. Именно по энергетическому потенциалу судят об эффективности радиолокатора для метеорологических целей. Чем больше потенциал, тем лучше данная станция приспособлена для метеонаблюдений. При измерении радиолокационной отражаемости облаков и осадков необходимо, чтобы энергетический потенциал РЛС сохранялся постоянным. Контроль энергетического потенциала сво-

дится к контролю уровня излучаемой мощности и чувствительности приемного устройства.

3.3.7. Влияние атмосферы на максимальную дальность РЛС

На процессы распространения электромагнитных колебаний в атмосфере существенное влияние оказывают атмосферная рефракция и потери энергии, обусловленные поглощением и рассеянием радиоволн.

Рефракция радиоволн. Искривление траектории распространения радиоволн в атмосфере, называемое радиорефракцией, обусловлено тем, что плотность атмосферы зависит от давления, температуры и влажности воздуха, а поскольку эти величины изменяются с высотой, меняется и плотность. Плотность реальной атмосферы и, следовательно, показатель преломления убывают с высотой, поэтому радиоволна, направленная под некоторым углом к горизонту вверх, будет переходить из области с большим коэффициентом преломления в область с меньшим коэффициентом преломления. Траектория лучей приобретает форму кривых, радиус кривизны которых определяется скоростью изменения с высотой H коэффициента преломления n , или ε ($n = \sqrt{\varepsilon}$), т. е. вертикальным градиентом dn/dH .

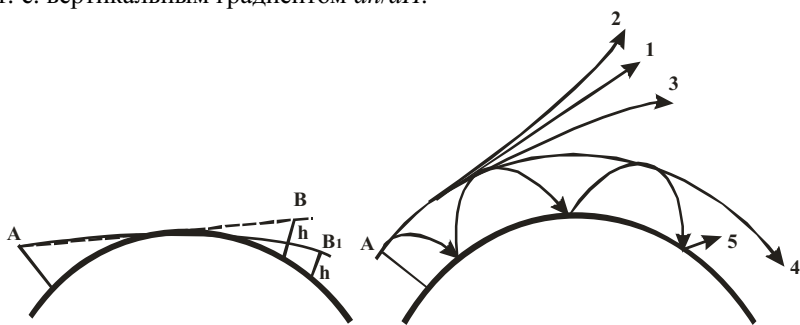


Рис. 16. Влияние атмосферной рефракции на распространение радиоволн: 1 — отсутствие рефракции, 2 — отрицательная рефракция, 3 — нормальная, 4 — критическая, 5 — сверхрефракция

Влияние атмосферной рефракции на процессы распространения ультракоротких волн схематически показано на рис. 16. Здесь A — пункт, в котором расположена антенна РЛС. Штриховой линией AB показана траектория распространения волн в том случае, когда явлением атмосферной рефракции можно пренебречь. Тогда траектория представляет собой отрезок прямой линии. При некотором заданном

значении h луч, касающийся поверхности Земли, может попасть в точку B . Сплошной линией показана траектория, искривленная под действием атмосферной рефракции. При одной высоте передающей и приемной антенн луч, касающийся поверхности Земли, попадает в более удаленную точку B_1 .

Атмосферной рефракции подвержены радиоволны всех диапазонов, однако, несмотря на общую сущность радиорефракции и оптической рефракции, они несколько отличаются. Это объясняется тем, что воздействие среды, в которой распространяется электромагнитная энергия, зависит от частоты излучения. Так, содержащиеся в воздухе молекулы водяного пара, имеющие постоянный электрический дипольный момент, под влиянием световых волн не успевают менять свою ориентировку с частотой колебаний этих волн, которая достигает 1014 Гц. Вследствие этого водяной пар почти не влияет на степень оптической рефракции. При распространении в атмосфере радиоволн, частота колебаний которых ниже частоты световых волн, молекулы водяных паров приводятся в колебательное движение, оказывая влияние на степень рефракции (за счет уменьшения скорости распространения волны). Под влиянием радиорефракции траектория радиоволн искривляется в большей степени, чем траектория световых лучей.

Типы рефракции радиоволн. В атмосфере значения метеорологических величин существенно изменяются с высотой, а следовательно, изменяется с высотой и коэффициент преломления воздуха n . В зависимости от характера изменения $n(H)$ рефракция может быть отрицательной, положительной или отсутствовать вообще. Если метеорологические условия таковы, что коэффициент преломления n увеличивается с высотой, траектория радиоволны обращена выпуклостью вниз; в этих случаях рефракция считается отрицательной. Отрицательная рефракция может наблюдаться при очень резком понижении температуры с высотой и повышении влажности воздуха. При отсутствии атмосферной рефракции, когда n с высотой не изменяется, радиоволны распространяются по прямолинейным траекториям.

Если наблюдается уменьшение коэффициента преломления с высотой, рефракция считается положительной. При этом типе рефракции траектории радиоволн обращены выпуклостью вверх. Положительную рефракцию подразделяют на нормальную, повышенную, критическую и сверхрефракцию (рис. 16).

Критическая рефракция наблюдается тогда, когда изменение коэффициента преломления с высотой происходит так резко, что траектории радиоволн, имевшие у РЛС горизонтальное направление, превращаются в окружности, центры которых совпадают с центром Зем-

ли. В случае сверхрефракции траектория распространения радиоволн также обращена выпуклостью вверх, но радиус кривизны ее меньше радиуса Земли. Радиолуч, выходящий под небольшим углом наклона к горизонту, испытывает полное внутреннее отражение, затем, достигая поверхности Земли на некотором удалении от РЛС, опять отражается. Таким образом, в результате большого числа последовательных отражений радиоволны могут достигать определенных целей, находящихся далеко за пределами прямой видимости.

Слои воздуха, в которых наблюдается сверхрефракция, называются атмосферными волноводами. Горизонтальная протяженность такого атмосферного волновода ограничивается горизонтальными размерами области, в которой наблюдается соответствующее распределение метеорологических величин с высотой. Различают приземные или приводные волноводы и приподнятые волноводы. Высота волноводов зависит от длины волны. Волноводное распространение возникает лишь тогда, когда высота атмосферного волновода значительно больше длины волны РЛС.

Поглощение и рассеяние радиоволн в атмосфере. В процессе распространения электромагнитных волн в атмосфере возникают потери энергии. Ослабление радиолокационного сигнала в атмосфере обусловлено двумя явлениями — поглощением и рассеянием. На волнах длиной несколько сантиметров поглощение атмосферными газами оказывается пренебрежимо мало. Ослабление в облаках и в дожде должно учитываться во всем диапазоне волн короче 10 см. Особенно сильно это явление сказывается на волнах длиной 1 и 3 см, а также на еще более коротких волнах.

Поглощение радиоволн в газах, рассеяние и ослабление их осадками и облаками влияют на требования, предъявляемые к техническим характеристикам РЛС. Поглощение и рассеяние радиоволн облаками и осадками имеют важное значение для метеорологических исследований. Механизм взаимодействия электромагнитных волн с газами атмосферы и водяным паром, с одной стороны, и осадками и облаками, с другой — имеет свои особенности.

Поглощение радиоволн атмосферными газами. Ослабление электромагнитных волн при распространении в атмосфере происходит вследствие поглощения и рассеяния энергии волн молекулами атмосферных газов.

В диапазоне СВЧ длина волны колебаний много больше размеров молекул, поэтому эффектом рассеяния можно пренебречь и рассматривать только эффект поглощения.

Из атмосферных газов наибольшее влияние на электромагнит-

ную энергию оказывают кислород и водяной пар; при этом ослабление возникает вследствие того, что электромагнитная волна вызывает в молекулах газов переход электронов с одного энергетического уровня на другой. Так как внутриатомным переходам свойственны собственные частоты, то когда с какой-либо из них совпадает частота распространяющейся волны, наступает резонанс, и поглощение резко возрастает. Если в атмосфере имеются гидрометеоры, то электромагнитные волны вызывают в них токи смещения, которые становятся источниками вторичного излучения. Этим обусловлены явления рассеяния электромагнитной энергии радиоволн атмосферными образованиями. Одновременно происходит поглощение энергии радиоволн, поскольку гидрометеоры имеют некоторую активную проводимость.

Влияние кислорода зависит от давления и температуры воздуха. С понижением температуры поглощение кислородом увеличивается. Ослабление водяным паром прямо пропорционально влажности воздуха и также увеличивается с понижением температуры. Потери электромагнитной энергии в газах атмосферы учитывают с помощью удельных коэффициентов поглощения кислородом и водяным паром, характеризующих ослабление проходящей электромагнитной энергии на единице расстояния и выражаемых в дБ/км. Анализ зависимости удельных коэффициентов поглощения кислородом и водяным паром атмосферы от длины волны у поверхности Земли при температуре 20°C показывает, что как у кислорода, так и у водяного пара имеются области частот, где поглощение велико за счет резонансных явлений.

У кислорода резонансная область лежит вблизи длин волн 0,5 и 0,25 см, на которых значение удельного коэффициента поглощения у земной поверхности может достичь 3 и 14 дБ/км соответственно. Ослабление волны водяным паром зависит от его содержания в атмосфере. Резонансное поглощение водяным паром наблюдается на волнах 0,16 и 1,35 см. На этих длинах волн при абсолютной влажности 7,5 г/м³, характерной для умеренных широт, удельный коэффициент поглощения равен 20 и 0,2 дБ/км соответственно.

Ослабление, вносимое облаками. Ослабление энергии радиоволн, вносимое облаками, можно выразить соотношением

$$K = K_1 M,$$

где K — ослабление (дБ/км), M — водность облака (г/м³), K_1 — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом ослабления. Наблюдения показывают, что водность облаков обычно изменяется от 1 до 2,5 г/м³. В облаках, образованных кристалликами льда, содержание воды составляет 0,1–0,5 г/м³.

Ослабление уменьшается с увеличением длины волны. При

уменьшении λ от 3 до 1 см ослабление в случае капельных облаков увеличивается на порядок (0,0483 и 0,647). Что касается кристаллических облаков, то ослабление, вызванное ими, почти на два порядка меньше, чем ослабление капельными облаками с такой же водностью. Поэтому ослаблением за счет кристаллических облаков можно во всех практических случаях пренебречь во всем сантиметровом диапазоне волн.

Ослабление, вносимое дождем. Поглощение и рассеяние радиоволн каплями тем существеннее, чем выше частота волны, т. е. чем ближе диаметр капли к длине волны. На длине волны 10 см и на более коротких волнах эти эффекты имеют существенное значение, а на длинах волн, превышающих 10 см, влияние дождя резко уменьшается. Поглощение энергии радиоволн взвешенными в воздухе каплями воды и дождя превышает суммарное поглощение кислородом и водяным паром. Ослабление радиоволн осадками выражают как функцию интенсивности осадков, которая зависит как от содержания в единице объема воды в жидкой фазе, так и от скорости падения капель (которая зависит от их размеров).

Ослабление, вносимое градом и снегом. Ослабление радиоволн под влиянием града и снега составляет всего несколько процентов ослабления в дожде той же интенсивности, поэтому, если интенсивность града не очень велика, им можно пренебречь. Что касается ослабления в снеге, то в случае сухого снега оно также пренебрежимо мало, но если снег мокрый, то ослабление будет таким же, как и в дожде той же интенсивности. Ослабление радиоволн облаками и осадками приводит к сокращению дальности действия РЛС.

3.3.8. Радиолокационные отражения от метеорологических образований

Наряду с вредным эффектом ослабления электромагнитных волн в атмосфере, происходит рассеяние энергии водяными каплями и ледяными кристаллами, что приводит к формированию отраженного сигнала, несущего полезную информацию об облаках и осадках. Эта информация позволяет обнаруживать и исследовать облака и зоны осадков, т. е. заблаговременно, по большой площади получать данные об опасных атмосферных процессах (сильные ливневые дожди, грозы, град), определять размеры зон осадков и их интенсивность, следить за эволюцией развития облаков и осадков, определять скорость и направление их перемещения, измерять высоту облаков, а также облачных слоев, получать вертикальные профили характеристик облаков и осад-

ков.

При обнаружении метеорологических целей по характеру эхо сигналов (радиосигналов) их можно классифицировать на грозовые и ливневые очаги, зоны обложных осадков и градовые облака (рис. 16а).

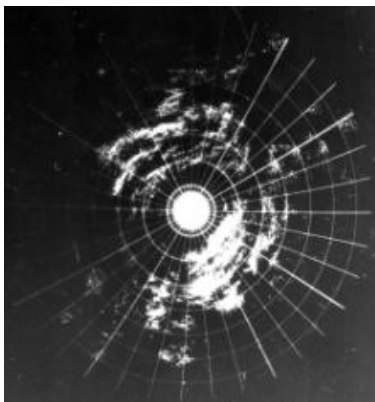


Рис. 16а. Радиозэхо облачного поля на ИКО

Обнаружение ливней и гроз. К характерным особенностям эхо сигналов ливней и гроз относятся:

- очаговая структура общей картины радиозэха на индикаторе кругового обзора (ИКО) — поперечные размеры отдельных очагов чаще всего составляют несколько километров;
- большая вертикальная протяженность радиозэха — от 3–4 км и более;
- большая мощность эхо сигналов и высокая яркость отметок на ИКО;
- сильная временная и пространственная изменчивость радиозэха;
- большая дальность обнаружения.

Радиозэхо грозовых облаков характеризуется большой вертикальной протяженностью и высоким значением мощности, что может быть критерием разделения грозовых и ливневых очагов. Поскольку интенсивность осадков, следовательно, и отражаемость при грозах существенно больше, чем в ливневых очагах, то дальность обнаружения грозовых очагов больше дальности обнаружения ливневых.

Обнаружение зон обложных осадков. Характерными особенностями эхо сигналов зон обложных осадков являются:

– большие площади с однородной картиной радиозаха на ИКО; относительно небольшая вертикальная протяженность радиозаха, чаще всего менее 3–5 км;

– относительно небольшая мощность эхосигналов на индикаторе дальности и яркость свечения отметок на ИКО, небольшая временная и пространственная изменчивость.

3.3.9. Влияние Земли на максимальную дальность действия РЛС

Рассмотрим влияние Земли на максимальную дальность действия РЛС. Во-первых, вследствие отражения радиоволн от земной поверхности изменяется форма диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости. Во-вторых, из-за кривизны земной поверхности максимальная дальность действия ограничивается расстоянием прямой видимости.

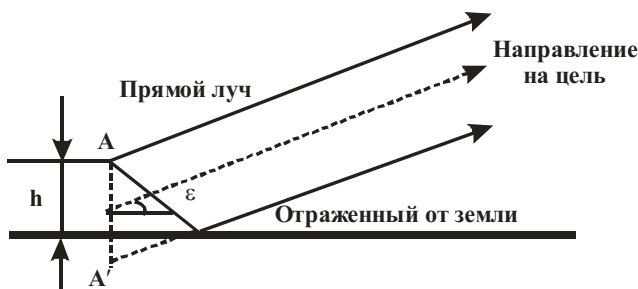


Рис. 17. Облучение цели при зеркальном отражении радиоволн от поверхности земли

Отражение радиоволн от земной поверхности сказывается в основном в диапазоне метровых волн, поскольку в этом диапазоне происходит преимущественно зеркальное отражение. При зеркальном отражении к цели приходит, помимо прямого луча от станции, также луч, отраженный от поверхности земли (рис. 17). Соотношение фаз прямого и отраженного лучей зависит от того, под каким углом места по отношению к станции находится цель. При некоторых углах места сигналы находятся в фазе и результирующий сигнал увеличивается. Дальность действия станции $D_{\text{макс}}$ оказывается выше рассчитанной. При других углах места сигналы оказываются в противофазе. Результирующий сигнал уменьшается и, соответственно, уменьшается дальность действия станции $D_{\text{макс}}$.

С учетом отраженного от поверхности земли луча диаграмма направленности антенны в вертикальной плоскости приобретает лепестковый характер. Число лепестков, их расположение и глубина провалов зависят от высоты подъема антенны над Землей (в длинах волн), поляризации волны и свойств почвы. Число лепестков тем больше, чем больше высота антенны и чем меньше длина волны. Чем больше высота антенны и чем меньше длина волны, тем сильнее нижний лепесток прижат к поверхности земли.

При идеально проводящей поверхности энергия отраженного от Земли луча равна энергии падающего луча. Поэтому максимальные значения напряженности поля удваиваются, а минимальные — уменьшаются до нуля. Примерно так происходит отражение от гладкой морской поверхности. Модули коэффициентов отражения при вертикальной и горизонтальной поляризации радиоволн равны единице лишь при углах места $\varepsilon < 2-3^\circ$. Фаза отраженной волны в случае горизонтальной поляризации изменяется на 180° при любых значениях угла места ε , а в случае вертикальной поляризации — при $\varepsilon < 1$. Таким образом, во всех других случаях, когда $\varepsilon > 2-3^\circ$, электромагнитная энергия поглощается поверхностью земли и отраженный от нее луч имеет меньшую энергию, чем падающий (обычно $E_{отр} = 0,8-0,9E_{пад}$). Вследствие этого в направлении максимумов лепестков напряженность поля увеличивается менее чем вдвое, а в направлениях минимумов — уменьшается не до нуля.

Лепестковым характером диаграммы направленности обусловлены провалы при определенных углах места. В результате при некоторой дальности отраженный от цели сигнал отсутствует, и слежение за целью затрудняется. При использовании радиоволн сантиметрового и дециметрового диапазонов происходит диффузное отражение от земной поверхности. К цели приходит только прямой луч от станции, что исключает различие в напряженности поля E для разных углов места. Кроме того, на сантиметровых волнах можно получить более узкие диаграммы направленности антенны и тем самым избежать облучения поверхности земли.

Влияние кривизны земной поверхности на максимальную дальность действия РЛС поясняется рис. 18. Из рисунка следует, что если электромагнитная энергия распространяется прямолинейно, то в принципе возможно обнаружение лишь тех целей, которые находятся выше линии горизонта (прямая AC). В зависимости от высоты подъема антенны станции h_1 и высоты цели h_2 существует некоторая предельная дальность прямой видимости $D_{пр}$, при которой еще возможно облучение цели. Когда расчетная дальность действия станции $D_{макс}$

больше ее предельной дальности D_{np} , формулы (3.9) и (3.20) теряют смысл. В этом случае расчетная максимальная дальность $D_{макс}$ оказывается соответствующей нереализуемым высотам цели.

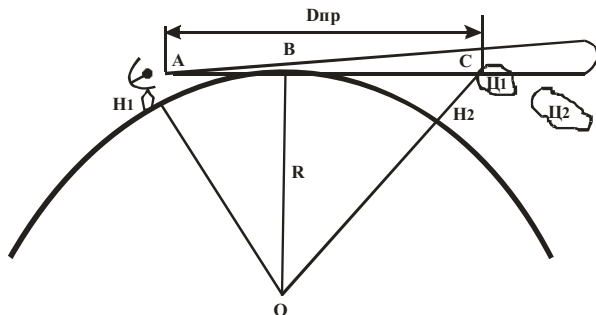


Рис. 18. К определению предельной дальности прямой видимости

Наличие высоких местных предметов (здания, горы, деревья) вокруг РЛС создает углы закрытия, часто намного превышающие нулевые. В связи с этим увеличивается минимальная высота обнаружения целей, расположенных в азимуте высоких местных предметов.

Предельную дальность прямой видимости D_{np} можно найти по рис. 18

$$D_{np} = AB + DC = \sqrt{(R + h_1)^2 - R^2} + \sqrt{(R + h_2)^2 - R^2},$$

где R — радиус земной поверхности.

Поскольку R во много раз больше h_1 и h_2 ,

$$D_{np} = \sqrt{2Rh_1} + \sqrt{2Rh_2} = \sqrt{2R}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}).$$

Подставив в эту формулу радиус земной поверхности $R = 6370$ км, получим:

$$D_{np} = 110(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}).$$

Значения D , h_1 , h_2 выражены в километрах.

Загоризонтные радиолокационные станции. Загоризонтные РЛС работают в диапазоне коротких радиоволн ($\lambda = 10\text{--}50$ м, $f = 6\text{--}30$ МГц). Эти волны, отражаясь от ионосферы, огибают Землю, что позволяет облучать цели, находящиеся за горизонтом, и принимать отраженные ими сигналы. Различают два типа загоризонтных РЛС: обратного и прямого рассеяния. Станции, в которых используется обратное рассеяние, работают следующим образом. Зондирующий сигнал

РЛС, излученный под небольшим углом ε к горизонту, распространяется прямолинейно до одного из слоев ионосферы. Отразившись от ионосферы, волна направляется к земной поверхности, где происходит вторичное отражение в сторону ионосферы.

Расстояние по земной поверхности от точки излучения до точки возвращения волны к Земле после однократного отражения от ионосферы называют дальностью скачка. В зависимости от значений угла и высоты отражающего слоя дальность скачка изменяется от 1500 до 3500 км. Если распространяющаяся волна встретит на своем пути цель, то возникает отраженная волна, распространяющаяся тем же путем, но в обратном направлении. Обработка отраженного сигнала позволяет оценить расстояние до цели по ломаной линии и азимут цели. Зная угол, под которым излучаются радиоволны, и высоту отражающего ионизированного слоя, можно по расстоянию рассчитать дальность до цели по траектории луча на земную поверхность.

3.4. Зондирование атмосферы с помощью метеорологических радиолокационных станций

3.4.1. Назначение метеорологических РЛС

Импульсные метеорологические радиолокационные станции, называемые метеорологическими радиолокаторами (МРЛ), предназначены для зондирования атмосферы с целью обнаружения и исследования облаков и осадков, основная метеорологическая информация заключена в измеряемой радиолокационной отражаемости. В результате зондирования атмосферы с помощью МРЛ в оперативном режиме решаются следующие задачи:

- обнаружение и определение местоположения зон радиоэха кучево-дождевых облаков и связанных с ними явлений (ливней, гроз и града);
- предупреждение о грозах, граде и сильных ливневых осадках с заблаговременностью, зависящей от характера явления;
- определение скорости и направления перемещения зон радиоэха кучево-дождевых облаков и зон обложных осадков;
- определение верхней границы радиоэха всех обнаруживаемых облаков и нижней границы радиоэха облаков без осадков;
- определение тенденций изменения радиолокационных характеристик облачных систем;
- определение эволюции радиоэха кучево-дождевых облаков;
- оценка распределения и интенсивности осадков на площади

обзора МРЛ.

Метеорологический анализ данных радиолокационных измерений основан на существовании устойчивых физико-статистических связей этих характеристик с физическим состоянием и параметрами облаков и осадков. Используются качественные особенности пространственного распределения радиоэха и их количественные характеристики (высота верхней границы, вертикальная мощность и радиолокационная отражаемость). Метеорологическая интерпретация (анализ) получаемых радиолокационных данных основана на использовании: детерминированных, т. е. заранее составленных описаний радиолокационных характеристик метеорологических объектов для классификации облаков и облачных систем; одиночных и комплексных физико-статистических критериев для распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевыми облаками; корреляционных связей — для оценки мгновенной интенсивности осадков. Весь процесс радиолокационных наблюдений облачности и осадков, а также метеорологической интерпретации получаемых данных можно разделить на два основных этапа: общая оценка метеорологической обстановки и определение типа обнаруживаемой облачной системы; локализация опасных метеорологических явлений, связанных с кучево-дождевой облачностью.

Зондирование атмосферы, выполняемое с помощью метеорологических радиолокационных станций, позволяет получить информацию о метеорологических объектах, которая в силу особенностей радиометеорологического метода носит вероятностный характер.

3.4.2. Особенности метеорологических радиолокационных станций

Одной из основных особенностей метеорологических радиолокационных станций является то, что они предназначены для количественных измерений мощности сигналов, отраженных от облаков и осадков. С этой целью в их состав должны входить специальные устройства измерения мощности отраженных сигналов. Выполнение точных измерений мощности отраженных сигналов влечет за собой необходимость калибровки радиолокатора как метеорологического инструмента и контроля его потенциала в процессе измерений. В свою очередь, контроль потенциала должен включать контроль излучаемой мощности и чувствительности приемного устройства.

Другой особенностью метеорологических РЛС является большой динамический диапазон приемного устройства, что обусловлено большим диапазоном значений мощности радиолокационных сигна-

лов, отраженных от метеорологических объектов. Оценка возможных значений ЭПР метеорологических объектов показывает, что их динамический диапазон достигает 100–120 дБ. Таким же диапазоном должен обладать и приемник метеорологической РЛС. С целью достаточно надежного обнаружения облаков и осадков с малыми значениями отражаемости метеорологические РЛС должны обладать значительным потенциалом, что обеспечивается применением соответствующих мощных передатчиков и высокочувствительных приемных устройств.

Важным для метеорологических РЛС является выбор длины волны, излучаемой электромагнитной энергии. Вопрос о выборе решается с учетом как рассеивающих свойств метеорологических объектов, так и ослабляющих свойств атмосферы. Метеорологические радиолокаторы обеспечивают наблюдение метеорологических объектов как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, для чего предусмотрены соответствующие режимы управления антенной и индикаторные устройства.

Обобщенная схема импульсного метеорологического радиолокатора представлена на рис. 19. Основными частями метеорологического радиолокатора (МРЛ) являются антенная система, включающая в себя облучатель (1) и металлическое зеркало-отражатель (2), передатчик (3), приемник (4), антенный переключатель (5), индикаторы (6), синхронизатор (7), волноводно-фидерный тракт (8), блоки управления антенной (9) и энергетического питания (10).

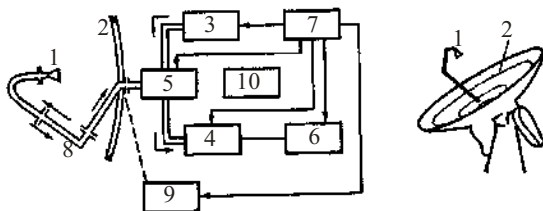


Рис. 19. Обобщенная схема метеорологической РЛС: *а* — структурная схема, *б* — антенная система: облучатель — 1, металлическое зеркало-отражатель — 2, передатчик — 3, приемник — 4, антенный переключатель — 5, индикаторы — 6, синхронизатор — 7, волноводно-фидерный тракт — 8, блоки управления антенной — 9 и энергетического питания — 10

Передатчик импульсной МРЛ генерирует мощные электромагнитные СВЧ колебания в виде периодически повторяющихся зон-

дирующих импульсов, которые с помощью антенной системы излучаются в сторону метеорологического объекта. Во время пауз, между зондирующими импульсами, отраженные от метеорологического объекта информационные сигналы принимаются той же антенной системой и по волноводному тракту поступают на вход приемника, усиливаются и подаются на индикаторы РЛС для определения координат и физических характеристик метеорологических объектов.

Волноводно-фидерный тракт служит для передачи высокочастотных импульсов от передатчика к антенне и от антенны к приемнику. Антенный переключатель обеспечивает попеременное подключение антенны к передатчику или приемнику, что позволяет использовать для передачи и приема одну и ту же антенну. Во время работы передатчика переключатель через волноводно-фидерный тракт замыкает передатчик на антенную систему и отключает вход приемника, защищая приемник от мощного импульса передатчика, а в период между двумя зондирующими импульсами антенный переключатель закрывает вход передатчика, чтобы всю энергию информационного сигнала (радиосх) направить в приемник.

В метеорологических РЛС для наглядного представления метеорологической обстановки могут применяться индикаторы кругового обзора (ИКО), вертикального обзора (дальность-высота (ИДВ) и амплитудные индикаторы (ИА).

На индикаторе кругового обзора пространственное положение метеорологического объекта определяется в полярных координатах: наклонная дальность и азимут. В ИКО применяется радиально-круговая развертка, периодически перемещающая луч радиально от центра к периферии экрана и обратно, одновременно (синхронно) с вращением антенны по азимуту. В результате этого на экране ИКО можно наблюдать конфигурацию, взаимное положение и размеры метеорологических объектов.

В индикаторе ИДВ развертка электронного луча производится синхронно с поворотом антенны по углу места, что позволяет получать изображение вертикальных разрезов наблюдаемого метеорологического объекта. Следует заметить, что иногда в метеорологических РЛС используются совмещенные индикаторные устройства, когда они могут выполнять как функции ИКО, так и функции ИДВ. Работа передатчика, приемника и индикаторов МРЛ синхронизируется запускающими или тактовыми импульсами, вырабатываемыми блоком синхронизатора. Система синхронизации обеспечивает также формирование масштабных меток дальности, подаваемых на индикаторы метеорологической РЛС. Выбор технических характеристик МРЛ осуществляет-

ся в зависимости от назначения с учетом требуемой дальности действия, точности определения координат, оперативности обзора, отражающих свойств и других характеристик метеорологических объектов.

3.4.3. Виды МРЛ

Основные принципы работы МРЛ не отличаются от работы импульсных РЛС, но задачи, решаемые МРЛ, влияют на ее структуру. Для создания игольчатых диаграмм направленности (ДН) используется антенное устройство, состоящее из двух параболических зеркал-отражателей (рис. 20). При использовании одного зеркала разделение сигналов по частоте производится волноводами, имеющими разные размеры в поперечном сечении. Метеорологический радиолокатор имеет следующие режимы работы.

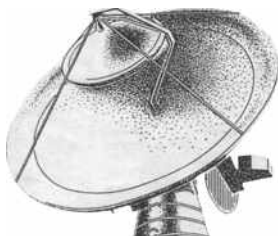


Рис. 20. Параболические антенны МРЛ

Режим кругового обзора. В этом режиме антенна вращается в горизонтальной плоскости с частотой 6 об/мин при постоянном угле наклона в вертикальной плоскости. На индикаторе кругового обзора (ИКО) создается общая картина состояния атмосферы в зоне действия станции (рис. 21а).

Режим ступенчатого обзора. В этом режиме антенна вращается в горизонтальной плоскости, а ее наклон в вертикальной плоскости изменяется после оборота антенны. Величину изменения наклона антенны после каждого оборота можно регулировать от 0 до 5°. Указанным образом наклон антенны в вертикальной плоскости в данном режиме изменяется в пределах от 1 до 11°. На ИКО создается общая картина состояния атмосферы в зоне действия станции под различными углами места.

Режим вертикального обзора. Антенна качается в вертикальной плоскости с частотой 2 качания в 1 мин при постоянном азимуте. На ИДВ отображается вертикальный разрез атмосферных образований

в выбранном азимуте.

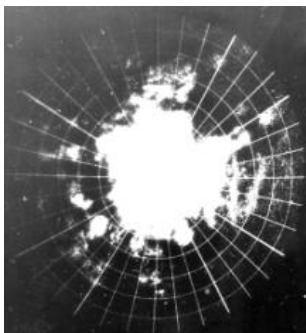


Рис. 21а. Вид облачности на индикаторе кругового обзора

Режим вертикального зондирования. В этом режиме антенна неподвижна, но может быть установлена в любом направлении в горизонтальной плоскости и под любым углом в пределах $1-105^\circ$. Радиолокатор в данном режиме просматривает узкий выбранный сектор пространства.

Визуальная индикация осуществляется на индикаторах трех типов: кругового обзора (ИКО), дальность-высота (ИДВ) и амплитудном (ИА) (рис. 21б). На ИКО в одном из выбранных масштабов создается изображение метеообстановки вокруг РЛС при постоянном или переменном угле места антенны. С экрана ИКО может измеряться дальность по круговым меткам и азимут по шкале, нанесенной на внешнем кольце ИКО. В режиме строчного обзора на ИКО создается изображение, позволяющее судить о состоянии атмосферы при различных углах места, т. е. на разных эшелонах.

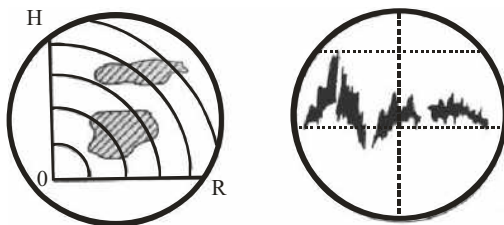


Рис. 21б. Изображение сигналов от облачности на индикаторе дальность-высота и амплитудном индикаторе

ИДВ дает отображение вертикального разреза при качании антенны по углу места при постоянном азимуте и имеет несколько масштабов. Изображение строится в координатах: ось абсцисс — наклонная дальность и ось ординат — высота. РЛС располагается в начале координат. Дальность отображается метками в виде концентрических четверть-окружностей. Изображение на этом индикаторе позволяет определить распределение облаков по высоте, их относительную интенсивность, а также высоту их верхней и нижней границ.

На ИА атмосферные образования вызывают вертикальное отклонение луча в ходе его развертывания по дальности, причем величины отклонений свидетельствуют об интенсивности атмосферных образований. ИА — двухлучевой, что позволяет либо одновременно наблюдать результаты наблюдений по двум каналам, либо получить на второй развертке изображение на интересующей нас дальности в укрупненном масштабе. Так как яркость изображения метеообразования зависит от мощности сигнала, то по этому параметру изображения можно судить о характере и относительной интенсивности этого образования. Визуально это возможно по яркости изображения наблюдаемых образований или по амплитуде отметки сигнала на ИА. Более точно эта задача может быть решена при обработке специальных номограмм, показывающих зависимость мощности сигнала при различной интенсивности осадков на различных расстояниях от их источников. Мощность отраженного сигнала снимается с измерителя мощности, для чего производится стробирование сигнала во времени. Мощность этого сигнала зависит от мощности зондирующих посылок и от коэффициента шума приемника, поэтому в процессе наблюдения эти параметры контролируются измерителями мощности в обоих каналах и измерителем коэффициента шума. По отношению мощностей сигналов, полученных в разных каналах, можно судить о размерах градовых частиц. Для этого в 2-х каналах имеется устройство обработки — изоэхо, формирующее разностные сигналы, которые воспроизводятся на ИКО для отображения грозовой деятельности в виде светлого пятна на изображении атмосферных образований.

Метеорологический радиолокатор штормового оповещения и градозащиты МРЛ-5 предназначен для обнаружения зон облаков, гроз и градовых очагов в облаках. Метеорологическая информация, получаемая от радиолокатора, используется для штормового оповещения аэропортов и населенных пунктов, обслуживания активных воздействий на градовые очаги с целью предотвращения градобитий. Аппаратура размещена в кузове автоприцепа (передвижной вариант), разделенного на приемопередающий и индикаторный отсеки (рис. 22).



Рис. 22. Внешний вид МРЛ-5 (передвижной вариант)

В индикаторном отсеке расположен пульт метеоролога, который имеет цифровое табло и панель управления. На пульте располагаются два идентичных ИКО (рис. 23). Первый обеспечивает наблюдение при круговом обзоре. Второй индикатор позволяет проводить наблюдение, как при круговом обзоре, так и в режиме горизонтальная дальность-высота.



Рис. 23. Пульт радиометеоролога

Индикаторы обеспечивают воспроизведение видеосигналов обоих каналов или их отношений и имеют масштабы дальностей 25; 50; 100 и 300 км, масштабы высоты/дальности 6,25/12,5; 12,5/25; 25/50;

50/100 км. Режимы ИКО и ИДВ включаются оперативно. Цифровое световое табло, размещенное на панели индикатора, позволяет фиксировать дату, время, номер наблюдаемого видеосигнала, уровень ослабления сигнала изо-эхо, азимут и угол места цели.

В настоящее время для зондирования атмосферы используется базовая отечественная радиометеорологическая система МРЛ-5, редко МРЛ-2. МРЛ-2 представляет собой метеорологическую импульсную радиолокационную станцию, реализующую одноволновой метод радиометеорологического зондирования атмосферы. Основным реализуемый режим — режим штормооповещения. Метеорологический радиолокатор МРЛ-2 в силу специфики решаемых при одноволновом методе задач имеет ряд особенностей. Так, передатчик станции может работать только на одной длине волны. Чувствительность приемного устройства достаточно высока; используется коррекция сигнала на квадрат расстояния. Для одновременного измерения одинаковых сигналов от метеорологических объектов может применяться система ступенчатого изоэха с клавишным переключателем. Управление антенной реализуется с помощью специального программного устройства. В целях устранения влияния ветровых нагрузок антенна заключена в специальную защитную пластиковую сферу. Основные технические характеристики МРЛ-2 представлены в табл. 1.

МРЛ-5 является двухволновым высокопотенциальным метеорологическим импульсным радиолокатором. Локатор МРЛ-5 может работать как в режиме штормооповещения, так и при обслуживании градозащиты. Отметим основные особенности МРЛ-5 (табл. 1). Используются два отдельных канала, каждый из которых обладает высоким потенциалом; режим штормооповещения может осуществляться на каждом из каналов, а режим обслуживания градозащиты реализуется, главным образом, при совместной работе обоих каналов. Применяется антенная система с параболическим отражателем и двухдиапазонным облучателем, формирующая узкие диаграммы направленности. Такая антенна обеспечивает получение высокой разрешающей способности по угловым координатам и совмещение диаграмм направленности обоих диапазонов с высокой точностью, что обеспечивает соответствующее качество измерения горизонтальных и вертикальных характеристик радиоэха. Антенная система помещена под защитный купол, обеспечивающий защиту антенны от ветровых нагрузок и от воздействия атмосферных явлений. Прием измерительных сигналов осуществляется с помощью приемных устройств 1- и 2-го каналов, каждое из которых обладает высокой чувствительностью и широким динамическим диапазоном входных сигналов. Высокая чувствитель-

ность приемных устройств позволяет увеличить дальность обнаружения метеорологических объектов, а широкий динамический диапазон обеспечивает высокую точность количественных измерений радиоэха.

Таблица 1

Основные тактико-технические данные МРЛ-2 и МРЛ-5

Параметр	Ед. измерения	МРЛ-2	МРЛ-5 (1 канал)	МРЛ-5 (2 канал)
Несущая частота	МГц	9595±15	9595±15	2950±15
Длина волны	см	3,14	3,14	10,15
Импульсная мощность на выходе магнетрона	кВт	210	250	800
Длительность импульса	мкс	1; 2	1; 2	1; 2
Частота следования зондирующих импульсов	Гц	600; 300	500; 250	500; 250
Диаметр зеркала в режиме градозащиты	м		1,4	4,5
Диаметр зеркала в режиме штормооповещения	м	3	4,5	4,5
Ширина диаграммы направленности излучения в режиме градозащиты	град		1,5	1,5
Ширина диаграммы направленности излучения в режиме штормооповещения	град	0,74	0,5	1,5
Коэф. усиления антенны в режиме градозащиты	дБ		40	39
Коэф. усиления антенны в режиме штормооповещения	дБ	46	49	40
Уровень боковых лепестков диаграммы направленности в режиме градозащиты	дБ		23	25
Уровень боковых лепестков диаг. направленности в режиме штормооповещения	дБ, %	10	23	25
Скорость вращения антенны по азимуту	число об/мин	6	0-6	0-6
Скорость вращения антенны по углу места	число ск/мин	4	0-2	0-2

Окончание табл. 1

Параметр	Ед. измерения	МРЛ-2	МРЛ-5 (1 канал)	МРЛ-5 (2 канал)
Чувствительность приемного устройства не менее	дБ/Вт	-132	-134	-136
Масштабы дальности:				
индикатора кругового обзора (ИКО)	км	25;100;300	25;50;100;300	25;50;100;300; 6,25/12,5
индикатора дальность-высота (ИДВ)	км	5/10;10/20 20/40; 40/80	6,25/12,5; 12,5/25; 25/50; 50/100	12,5/25; 25/50; 50/100
Общая потребляемая мощность от сети 3х220х50	кВт	19	14	14
Точность позиционного режима по углу места	град	±0,25	±0,25	±0,25
Суммарное затухание, вносимое антенно-фидерным трактом в режиме приема и передачи	дБ	8	6	5
Эффективная площадь антенны	м ²	7	16	16

Принятые измерительные сигналы отображаются с помощью универсальной системы индикации, обеспечивающей возможность наблюдения и регистрации радиоэха от метеорологических объектов. При этом, совмещенные индикаторы ИКО/ИДВ (основной и для фото-регистрации) с широким набором масштабов разверток обеспечивают наблюдения, измерения и регистрацию радиоэха в горизонтальной и вертикальной плоскостях; двухлучевой индикатор типа ИА позволяет наблюдать изменение радиоэха объектов в зависимости от дальности.

Преобразование угловой информации выполняется с помощью аппаратуры, обеспечивающей определение азимута целей, вычисление высоты и горизонтальной дальности, а также сопряжение с устройствами автоматической обработки метеорологической информации. Градовые очаги автоматически выделяются с помощью специальных устройств. Оперативный съем и регистрация даты, времени, номера канала, знака нормы потенциала МРЛ, уровня изоэха, масштаба изображения, азимута и угла возвышения антенны, горизонтальной и наклонной дальности и высоты выбранной метеорологической цели выполняются с помощью специального светового табло.

В МРЛ-5 с помощью специальных устройств выполняется

контроль чувствительности приемных устройств, мощности передающих устройств и потенциала локатора в целом. Использование специальных управляемых СВЧ аттенуаторов обеспечивается измерение мощностей радиоэха и их коррекция на квадрат расстояния. Документирование картин радиоэха осуществляется с помощью специальной регистрирующей аппаратуры.

3.4.4. Определение облачных систем по радиолокационной информации

Имея в виду особенности радиометеорологического зондирования атмосферы, логично предположить, что получаемые изображения облачных систем в радиодиапазоне не всегда достаточно полно соответствуют визуально наблюдаемым облачным системам. Сравнение большого количества изображений радиоэха на ИДВ с данными метеорологических наблюдений за формами облаков позволило определить форму радиоэха, соответствующую каждой форме облаков. Так, облака слоисто-кучевые (*Sc*) и высоко-кучевые (*Ac*) как в теплую, так и в холодную половину года создают радиоэхо в виде сплошной полосы, которая по мере увеличения расстояния может приобретать ячеистую структуру. Облака слоистые (*St*), высокослоистые (*As*) и перистые (*Ci*) также имеют радиоэхо в виде сплошной полосы. Слоисто-дождевым облакам (*Ns*) соответствует радиоэхо в виде сплошной области, а кучево-дождевым (*Cb*) и мощным кучевым (*Cb cong*) облакам — в виде вертикально вытянутых «столбов». Картины радиоэха различных облаков не всегда являются отличительным признаком их формы, необходимы и геометрические характеристики. Ими являются высота верхней и нижней границ радиоэха или его вертикальная мощность. Высота нижней кромки радиоэха не всегда соответствует визуально определяемой нижней границе облаков из-за выпадения из облаков отдельных крупных частиц, что обуславливает занижение нижней границы облаков по сравнению с визуальной или даже невозможность измерения высоты нижней границы облаков радиолокационным способом. Выпадение крупных частиц при наличии облаков нижнего яруса приводит к тому, что радиоэхо распространяется до поверхности Земли, а в случае облаков среднего и верхнего ярусов — до верхней границы нижележащего слоя.

Для двух наиболее трудно распознаваемых форм облаков *Ns* и *Cb* — ни одна из характеристик геометрических размеров радиоэха не является однозначным признаком для определения формы облаков, так как функции их распределения взаимно пересекаются. Специфика

микроструктуры облачных систем зимой приводит к тому, что их отражаемость в это время на 2–3 порядка меньше по сравнению с соответствующей отражаемостью в летний период. Вызывается это уменьшением размеров рассеивающих частиц и водности облаков зимой.

Надежным радиолокационным признаком формы облаков является вертикальный профиль отражаемости $Z(H)$, характеризующий основные закономерности интегральной микроструктуры облака, а следовательно, и физические процессы его образования. Для выявления общих и наиболее типичных закономерностей в распределении $Z(H)$ в облаках анализируются осредненные вертикальные профили. Вертикальные профили отражаемости всех облаков, за исключением облаков вертикального развития, можно разделить на три основных типа. Для первого из них характерно незначительное изменение отражаемости с высотой, лежащее в пределах возможных погрешностей измерений интенсивности радиоэха. Такой вид профиля характерен для облаков с однородной по вертикали микроструктурой, какими являются St и Ci . Действительно, облака этих форм не содержат, как правило, крупных частиц, и фазовый их состав сравнительно однороден. Второй тип профиля — четко выраженный максимум отражаемости Z на высоте, близкой к уровню нулевой изотермы, характерен для слоисто-дождевых облаков Ns . Третий тип профиля специфичен для облаков Ac и характеризуется незначительным увеличением отражаемости Z в средней части облака. Возможно, появление максимума для отражаемости Z в такого типа облаках связано с присутствием в этой части облака более крупных отражающих частиц. По сравнению с летним периодом зимой изменение отражаемости с высотой для всех форм облаков менее существенно, что свидетельствует о сравнительно большей однородности микроструктуры облаков в этот период.

В радиометеорологии была принята специальная форма классификации облачности отличающаяся от общепринятой генетикоморфологической и микрофизической и позволяющая описать тип облачных систем с учетом специфики радиолокационного метода наблюдений, в которой учитывается весь комплекс радиолокационных характеристик облака, важнейшими из которых являются картина радиоэха, характерные значения отражаемости облака и ее вертикальное распределение. На основе использования детерминированных описаний радиолокационных характеристик отдельных классов облаков для радиолокационной классификации облаков в ближней зоне (до 40 км) различают пять основных типов радиоэха облаков:

— слоистообразных верхнего яруса C ;

- слоистообразных среднего яруса A ;
- слоистообразных нижнего яруса S ;
- слоистообразных большой вертикальной протяженности N ;
- кучевообразных (вертикального развития) Q .

С первыми тремя типами радиолокационной классификации облачности не связаны никакие явления погоды; последние два могут сопровождаться обложными осадками и опасными явлениями погоды.

По наблюдениям в дальней зоне (30–300 км) на ИКО характер облачной системы определяется совокупностью отдельных облачных форм и особенностями их распределения в пространстве. Существование связей между геометрическими размерами облаков и размерами их радиоэха на ИКО, а также между микроструктурой облаков и интенсивностью радиоэха позволяет использовать особенности пространственного распределения радиолокационных характеристик для определения типа облачной системы. Для этого могут использоваться следующие признаки:

- распределение радиоэха по площади, наблюдаемой на ИКО;
- пространственное распределение высоты верхней границы радиоэха;
- пространственное распределение отражаемости на наиболее характерном уровне, расположенном на 2 км выше уровня нулевой изотермы.

Радиолокационные наблюдения за различными облачными системами позволили классифицировать основные типы облачных систем в дальней зоне по указанным радиолокационным признакам. Здесь выделяют три основных типа радиоэха облаков:

- слоистообразных облаков (PCO), которое по распределению в пространстве может быть сплошным или несплошным, приподнятым или при наличии осадков достигать поверхности Земли ($As-Ns$, $St-Sc-Ac$);
- кучевообразных или конвективных (PKO), которое может наблюдаться в виде сплошной или несплошной полосы или отдельного очага ($Cu\ cong.$, Cb);
- одновременно кучевообразных и слоистообразных (PKCO), которое повторяет признаки предыдущих двух типов радиоэха ($As-Cb-Ac$, $As-Ns-Cb$).

Картина облачной системы $As-Ns$ на ИКО под оптимальным углом возвышения антенны, при котором на ИКО наблюдается наибольшая площадь радиоэха, имеет вид большой области радиоэха без четко очерченных границ. Такой вид радиоэха объясняется тем, что данная система, связанная с атмосферными фронтами, представляет

собой сплошной массив облачности, простирающийся обычно на несколько сотен километров. Высота верхней границы $As-Ns$ может быть примерно постоянной для всей системы. Однако при одинаковой дальности поле высоты верхней границы радиоэха этой системы однородно, а по мере увеличения дальности высота радиоэха убывает. Это объясняется особенностью вертикального распределения отражаемости в облаках типа Ns , влиянием конечного значения потенциала МРЛ и кривизной Земли. В результате, начиная с некоторого расстояния от МРЛ, верхняя часть облаков, где отражаемость мала, радиолокатором может вообще не обнаруживаться.

Картина радиоэха облачной системы $As-Cb-Ac$ на ИКО под оптимальным углом возвышения антенны обычно имеет вид полосы или нескольких полос. Это обусловлено тем, что данная система, связанная с атмосферными фронтами, представляет собой обычно гряду кучево-дождевых облаков, сопровождаемую облаками среднего яруса типа As , Ac . При больших углах возвышения антенны радиоэхо такой системы имеет вид «пелены» до расстояний, на которых могут обнаруживаться As , Ac , так как оно создается не только конвективными облаками, но и облаками среднего яруса. Во время наблюдений на МРЛ конвективные облака в системе $As-Cb-Ac$ могут находиться на разных стадиях развития. Это объясняет неоднородный характер поля высоты верхней границы данной облачности.

Картина радиоэха облачной системы $As-Ns-Cb$ на ИКО под оптимальным углом возвышения антенны представляет собой большую область без резко очерченных границ, которая по мере увеличения расстояния (более 100–150 км) может переходить в отдельные полосы или ячейки. На расстоянии свыше 100–150 км обычно наблюдаются только Cb . Следует ожидать, что интенсивность конвекции в радиусе наблюдений будет в значительной степени определять и пространственное распределение высоты верхней границы радиоэха Cb . При слабо развитой конвекции верхняя граница облачного массива располагается на одинаковой высоте. В этом случае, как уже отмечалось, следует ожидать постепенного понижения верхней границы радиоэха с увеличением расстояния. При сильно развитой конвекции и формировании кучево-дождевых облаков может наблюдаться неоднородное поле высоты верхней границы радиоэха даже на одинаковых расстояниях. В связи с тем, что вертикальное распределение отражаемости существенно различно в облаках Cb и Ns , неоднородно и само поле отражаемости выше высоты нулевой изотермы $H_{0^{\circ}}$.

Облачные системы $St-Sc-Ac$, возникающие в теплой устойчивой воздушной массе, как известно, представляют собой сплошной

массив облаков, простирающийся по горизонтали на сотни и даже тысячи километров. Однако в силу незначительной отражаемости таких облаков появление радиоэха от них возможно только на расстояниях, не превышающих 100 км. На ИКО радиоэхо таких облаков под меняющимися углами возвышения антенны имеет вид отдельных или концентрических колец. В первом случае такая картина может характеризовать одноярусную облачность, во втором — многоярусную. Высота верхней границы данной облачной системы примерно постоянная, а поскольку дальность обнаружения этих облаков невелика, высота верхней границы радиоэха также мало изменяется в пространстве. Аналогичный ход может иметь и поле отражаемости. Картина радиоэха облаков неустойчивой холодной массы типа *Cu cong.*, *Cb* на ИКО при наблюдениях под оптимальным углом возвышения представляет собой хаотически разбросанные ячейки или локальные полосы.

Для определения типа облачной системы иногда достаточно использовать особенности пространственного распределения радиолокационных признаков: площади, высоты или отражаемости. Так, для облачных систем типа *As-Cb-Ac*, *St-Sc-Ac* и *Cu cong.*, *Cb* однозначным признаком определения их типа является картина распределения радиоэха по площади. Однако для систем *As-Ns*, *As-Ns-Cb* этот признак является недостаточным. В этом случае для анализа необходимо привлекать дополнительную информацию в виде распределения высоты радиоэха. Часто можно ограничиться двумя этими признаками, например, когда поле высоты неоднородно даже при одинаковой дальности. Такое распределение высоты при наличии соответствующих картин на ИКО характерно только для системы *As-Ns-Cb*, но бывают случаи когда картины распределения высоты в системах *As-Ns* и *As-Ns-Cb*. Тогда следует использовать третий признак — распределения отражаемости, которая, как уже отмечалось, позволит отличить систему *As-Ns-Cb* от системы *As-Ns*.

3.4.5. Определение явлений погоды по радиолокационным данным

При зондировании атмосферы с помощью МРЛ можно определить наличие явлений погоды, имеющих важное значение для авиации. К числу таких явлений относят опасные явления погоды, связанные с конвективной облачностью, и осадки.

Радиолокационная классификация явлений погоды, связанных с конвективной облачностью. Метеорологические радиолокаторы сантиметрового диапазона обычно не фиксируют грозовые разряды, а вероятность обнаружения сигнала от молнии ничтожно мала из-за крат-

ковременности ее существования и использования узких диаграмм направленности при выполнении зондирования атмосферы. Факт осадков определяется по наличию радиоэха у поверхности Земли, однако возможности такого определения ограничены радиусом 90–100 км под углами возвышения антенны, близкими к нулевым. К тому же с помощью МРЛ не представляется возможным всегда получать однозначную характеристику вида осадков (твердые или жидкие).

Радиометеорологическая классификация явлений, связанных с *Cb*, несколько отличается от общеизвестной метеорологической классификации и предполагает деление на три группы:

I — градоопасные *Cb* и грозовые облака с градом;

II — грозоопасные облака и ливневой дождь с грозой;

III — негрозоопасные конвективные облака и негрозовые ливни.

К группе I относятся кучево-дождевые облака, сопровождающиеся грозовыми разрядами и в большинстве случаев выпадением града. Однако из облаков этой группы град может и не выпадать в данный момент, т. е. облако находится в градоносном состоянии. Группу II образуют облака *Cb*, сопровождающиеся ливневым дождем с грозовыми разрядами, а также облака *Cb*, образование которых связано с интенсивными восходящими потоками, сильной турбулентностью и высокой напряженностью электрического поля. Это, так называемая, предгрозовая стадия, которая обычно визуально фиксируется, как *Cb*, без явлений. В группу III включают облака *Cu cong-Cb*, которые за время их жизни не переходят в грозовые облака. Из них в процессе развития может выпадать ливневой дождь различной интенсивности и продолжительности. Невозможность получения непосредственных характеристик степени опасности явлений (молния, интенсивность конвекции) с помощью МРЛ заставляет использовать в качестве критерия диагноза косвенные признаки, основанные на различных физико-статистических закономерностях, установленных для определенных физико-географических условий, конкретных МРЛ и методик наблюдения путем статистической обработки и анализа данных.

Радиолокационные критерии диагноза опасных явлений погоды. К числу явлений погоды, связанных с *Cb*, можно отнести достаточно много различных опасных явлений погоды, среди которых, несомненно, особенно важное значение имеют град, грозы и ливни.

Град и градоносные Cb. Для ближней зоны критерием градоносного *Cb* является выполнение следующих условий:

1) отражаемость в нижней части облака должна быть равна или превышать 46 дБ или $\lg Z > 2.8$; такую зону радиоэха называют

«ядром» РКО;

2) верхняя граница ядра РКО должна превышать высоту нулевой изотермы не менее чем на 1,4 км;

3) ограничений на высоту верхней границы РКО не накладывается.

Таким образом, наличие града (символ града — Δ) идентифицируется по изображению вертикального разреза Cb , если высота верхней границы облачности удовлетворяет условию

$$H_v > (H_{0^\circ\text{C}} + 1,4) \text{ при } \lg Z_{\text{ядра}} > 2,8.$$

Однозначным критерием града при любой высоте РКО является наличие отражаемости в любой части облака, равной или большей $\lg Z > 4,0$ ($Z_e = 58 \text{ dBZ}$). Для РКО с $H \geq 10$ км однозначным критерием града является отражаемость на любом уровне, равная или большая $\lg Z > 3,1$ ($Z_e = 55 \text{ dBZ}$). При структуре критерия $Y = H \lg Z_3$ для РКО с $H > 10$ км, критерий Y града $Y > A$, где $\lg Z_3$ — логарифм отражаемости на высоте, превышающей уровень нулевой изотермы на 2–2,5 км; A — пороговое значение, которое зависит от географического района. Величина A равна 40, 35 и 30 для Северного Кавказа, Средней Азии и Украины соответственно. За пределами ближней зоны, если $H > 10$ км и одновременно $\lg Z_3$ и логарифмы отражаемости на уровне нулевой изотермы ($\lg Z_2$) и на уровне 1 км над поверхностью Земли ($\lg Z_1$) больше 2,8, можно идентифицировать наличие града. Перечисленные критерии имеют достаточно высокую степень надежности и позволяют успешно диагностировать наличие града.

Гроза и ливень. Для диагностирования грозы и ливня по радиолокационным данным предлагались различные критерии, однако в настоящее время наибольшее распространение получил критерий Y .

Используемый в практике оперативных наблюдений с помощью МРЛ критерий позволяет распознавать грозу в квадрате 30×30 км с использованием максимальной высоты радиоэха H (км) и отражаемости

$$Y = H \lg Z_3 \quad (3.24)$$

Хорошо известно, что важнейшим моментом в развитии конвективного облака является начало оледенения частиц, находящихся в его верхней части. С ним тесно связан процесс интенсивного разделения электрических зарядов и превращение облака в кучево-дождевое с последующим возникновением ливней и гроз. Экспериментальные данные показывают, что температура на уровне вершин радиоэха грозовых облаков должна быть в диапазоне от -20 до -25°C . Таким образом, можно считать первым необходимым условием локализации грозы по радиолокационным данным превышение радиоэхом конвектив-

ных облаков высоты изотермы $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. $H \geq H_{22^{\circ}\text{C}}$.

В конвективных облаках восходящие потоки в основном определяют и количество осадков. Тесная связь отражаемости облака с восходящими потоками, его микрофизикой и интенсивностью выпадающих осадков позволяет применить минимальное значение $\lg Z_3$, в грозах — $(\lg Z_3)_{\min}$ в качестве второго необходимого критерия грозового состояния. В слое около H_3 отмечается наибольший рост облачных частиц, которые являются косвенным индикатором разделения зарядов в *Cb*. Выбор для расчета критерия Y величины $\lg Z_3$ обеспечивает некоторую заблаговременность радиолокационной информации о грозах по сравнению с данными метеорологических станций, поскольку начало грозы обычно совпадает с началом выпадения осадков. Следует заметить, что при описаниях критериев используется обычно величина $\lg Z_a$, однако индекс «*a*» для простоты записи опускается. Объяснение указанному факту следует искать в особенностях радиолокационной структуры *Cb*. К концу стадии роста *Cb* величины H и $\lg Z$ достигают своих максимальных значений и в течение некоторого промежутка времени в слое около H_3 может существовать максимум в вертикальном профиле отражаемости $Z_{\max}(h)$. Устойчивый максимум отражаемости в слое выше нулевой изотермы при длине волны зондирующего излучения, равной 3 см, может являться следствием ряда причин:

- скопления частиц осадков в конвективных ячейках, которые лишь через некоторый промежуток времени становятся грозовыми;
- ослабления радиоволн в избыточной влаге на высотах, лежащих над нулевой изотермой;
- ослабления радиоволн на малых высотах в устойчивом экранирующем ливне;
- образования пористого града в наклонном восходящем потоке, насыщенном избыточной влагой, за которым следует выброс этих частиц в гораздо более сухую атмосферу, где при опускании температуры ниже нуля их оболочка замерзает. Эффективная площадь рассеяния σ и η падающих градин, по мере того, как их поверхностные слои замерзают, уменьшается, приближаясь к соответствующим значениям для чистого льда.

Начало грозы обычно связывают с началом выпадения осадков. Однако МРЛ по критерию Y уже в течение значительного промежутка (10–30 мин) времени стадии роста распознает грозовое состояние. Продолжительность стадии роста для отдельных *Cb* может изменяться в широких пределах и зависит от интенсивности процессов конвекции в районе наблюдения. Поэтому чем интенсивней и стремительней выражен конвективный процесс на наблюдаемой территории,

тем меньше будет опережение грозы, диагностируемой по данным МРЛ. В настоящее время на сети МРЛ гроза фиксируется, когда

$$Y \geq Y_k = H_{-22^\circ \text{C}} (\lg Z_3)_{\text{минR}} \quad (3.25)$$

где $(\lg Z_3)_{\text{минR}}$ — минимальное значение $\lg Z_3$ в грозах, а $H_{-22^\circ \text{C}}$ — высота изотермы -22°C . При этом предполагается, что для гроз различной интенсивности выполняются следующие соотношения:

- при $Y > Y_k + 14$ наблюдаются грозы R с вероятностью распознавания $B_p > 90\%$;
- при $Y > Y_k + 6$ наблюдаются грозы R) с вероятностью распознавания $B_p = 70\text{--}90\%$;
- при $Y > Y_k$ наблюдаются грозы (R) с вероятностью распознавания $B_p < 70\%$.

Начало гроз в 70% случаев по данным МРЛ отличается на 10 мин по сравнению с данными метеорологических станций. Вероятность совпадения радиолокационной и наземной информации о грозах в радиусе 150 км от МРЛ составляет 85%, а в радиусе 30 км — 95% случаев. С увеличением значения Y растет среднее число молниевых разрядов облако–Земля, зафиксированных с помощью грозопеленгаторов в ячейке 30×30 км и интервале 30 мин. Ежедневное корректирование Y по $H_{-22^\circ \text{C}}$ оказывается особенно эффективным при возникновении гроз во время резких похолоданий. Анализ радиоэха гроз и ливней для разных физико-географических условий России позволил оценить повторяемость используемых в оперативной практике градаций гроз и ливней. При анализе первичных данных по соотношению гроз и ливней можно выделить следующие зоны: I — 90% ливней и 10% гроз; II — 70% ливней и 30% гроз; III — 50% ливней и 50% гроз; IV — 30% ливней и 70% гроз; V — 10% ливней и 90% гроз. Границам каждой такой зоны можно поставить в соответствие осредненную величину $Y = H \lg Z_3$; тогда, для зоны I — $Y < 9$, II — $9 < Y < 10$, III — $10 < Y < 12$, IV — $12 < Y < 13$, V — $Y > 13$. Зонам неопределенности II–IV ($9 < Y < 13$) соответствуют 20% гроз и 15% ливней.

Увеличение $\lg Z_{\text{минR}}$ от 1,0 до 1,5 при неизменности структуры принятия решения о грозах приводит как к увеличению числа гроз в градации с малой вероятностью распознавания. Возрастает суммарная ошибка распознавания между классом ливней и маловероятных гроз и уменьшается — между ливнями и грозами. Увеличение $\lg Z_{\text{минR}}$ до 1,5 в ситуациях, когда возможно ослабление радиоволн в осадках ближней зоны МРЛ, может привести к неправильной интерпретации радиоэха и занижению числа диагностируемых гроз. Таким образом, можно считать ливнями все случаи наблюдений РКО с $Y < 9$, а грозами — все

случаи радиоэха с $Y > 13$. Это составляет 81,2% ливней и 74,7% гроз. Для каждой отдельной МРЛ граничные значения Y могут изменяться не более чем на ± 2 . Такой подход уменьшает зону принятия неоднозначных решений и увеличивает надежность распознавания гроз с высокой степенью достоверности. Одним из недостатков изложенной методики принятия решений является неопределенность величины IgZ_{minR} , которая может иметь сезонные и суточные вариации в конкретном пункте зондирования.

3.4.6. Определение интенсивности осадков

Из-за большой пространственной и временной изменчивости и интенсивности дождей, а также из-за ограниченности времени наблюдений (1–2 мин) при оперативных радиолокационных наблюдениях на МРЛ можно производить лишь оценку и получать сведения о пространственном распределении мгновенной (за время, необходимое для нескольких оборотов антенны) максимальной интенсивности выпадающих осадков по ячейкам 30×30 , 15×15 , 4×4 км в радиусе до 120 км в зависимости от времени года и высоты нулевой изотермы (рис. 24).

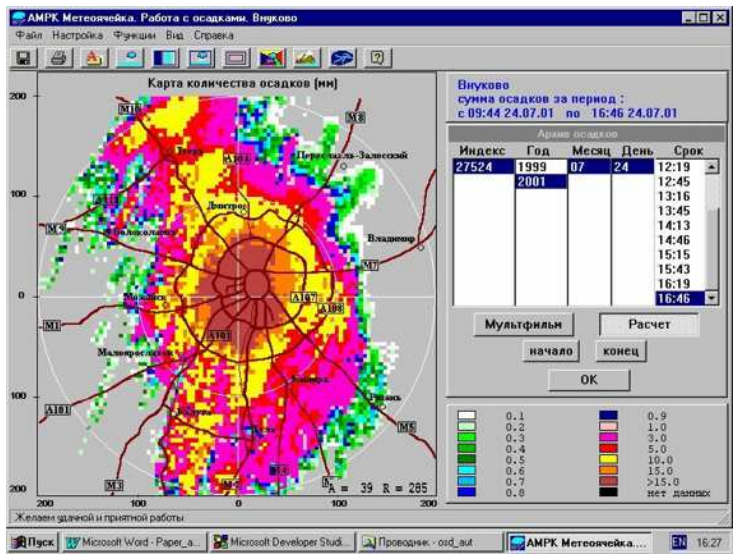


Рис. 24. Карта интенсивности осадков по МРЛ

Мгновенная оценка называется максимальной потому, что она

производится по максимальному значению отраженного сигнала в ячейке 30×30 или 15×15 км. Получение оценок величин интенсивности, осредненных за большой промежуток времени, привело бы к существенному усложнению работы МРЛ и практически исключило бы возможность работы МРЛ в режиме штормового оповещения.

По радиолокационным данным с помощью $Z-I$ соотношения (соотношения Маршалла-Пальмера) можно оценить теоретическую мгновенную интенсивность осадков (кроме морозящих и града). Для такой оценки интенсивности ливневых и обложных осадков, снега с дождем и переохлажденного дождя, наблюдаемых при температуре воздуха от -1 до $+3^{\circ}\text{C}$, необходимо использовать данные табл. 4.2. Точность оценки интенсивности осадков будет уменьшаться с увеличением расстояния. Однако в связи с тем, что в диапазоне высот от 0 до 1,5 км отражаемость ливневых осадков в большинстве случаев не изменяется, можно считать, что измерение отражаемости будет обеспечивать точность, соответствующую градациям табл. 2.

При максимальной температуре воздуха ниже -1°C соотношение $Z-I$ позволяет сделать грубую оценку максимальной интенсивности радиоэха снегопада в момент проведения радиолокационных наблюдений по трем градациям: слабая, умеренная и сильная (табл. 3).

Таблица 2

Оценка теоретической мгновенной максимальной интенсивности жидких осадков по радиолокационной отражаемости

$\lg Z, \text{мм}^6/\text{м}^3$	Интенсивность радиоэха	Мгновенная максимальная интенсивность, мм/ч
0.0–1.1	Слабая	0.5–2.9
1.2–2.7	Умеренная	3.0–25.0
2.8–3.9	Сильная	25.1–140
>3.9	Очень сильная	> 140

Таблица 3

Оценка теоретической мгновенной максимальной интенсивности снегопада

$\lg Z, \text{мм}^6/\text{м}^3$	Интенсивность радиоэха	Мгновенная максимальная интенсивность, мм/ч
-1.5–0.4	Слабая	0.02–0.1
-0.3–1.2	Умеренная	0.1–1.0
≥ 1.3	Сильная	> 1.0

Дополнительным признаком разделения слабого и умеренного снегопада может служить дальность обнаружения слабого снегопада. При обычном потенциале МРЛ и интенсивности отраженного сигнала 6–12 дБ слабый снегопад не будет обнаруживаться далее 40 км.

3.4.7. Автоматизация радиометеорологического зондирования атмосферы

Процессы получения и обработки радиометеорологической информации являются весьма трудоемкими и при ручном способе реализации не отвечают современным требованиям по точности, пространственному разрешению, оперативности и способам доведения информации до потребителей. Именно поэтому необходима автоматизация процесса получения радиолокационной информации, ее оперативной обработки в требуемом темпе и представления в виде, необходимом для потребителя. Решение этой проблемы потребовало как разработки специальной аппаратуры сопряжения МРЛ с компьютером, так и разработки специального математического обеспечения.

В настоящее время наиболее широко используются два типа отечественных специализированных автоматизированных радиометеорологических комплексов: системы АКСОПРИ и МЕТЕОЯЧЕЙКА.

Система АКСОПРИ. Автоматизированный комплекс сбора, обработки и представления радиолокационной информации (АКСОПРИ) представляет собой комплекс технических и программных средств, обеспечивающих автоматизированное проведение радиолокационных наблюдений и передачу информации потребителям, в том числе и удаленным.

АКСОПРИ обеспечивает решение ряда следующих основных задач:

- получение информации об опасных явлениях погоды, связанных с конвективной облачностью;
- оперативное измерение характеристик осадков по большим площадям;
- сверхкраткосрочный прогноз эволюции и перемещения полей облачности и осадков;
- контроль активных воздействий на облачные системы с целью регулирования осадков и подавления града;
- комплексные исследования атмосферы.

Комплекс содержит следующие технические устройства:

- метеорологический радиолокатор МРЛ-5;
- аппаратуру предварительной обработки сигналов (АПОС) и сопряжения радиолокатора с компьютером;
- управляющий вычислительный комплекс (УВК);
- устройства представления информации на цветном мониторе и передачи информации потребителям.

Работой МРЛ управляет компьютер, с помощью которого производится выбор рабочего канала зондирования, определяется режим предварительной обработки и включается режим кругового обзора. АПОС осуществляет предварительную аналоговую и цифровую обработку сигналов, отраженных от метеорологических объектов, непрерывную калибровку потенциала радиолокатора и обеспечивает сопряжение МРЛ-5 с компьютером. Предварительная цифровая обработка заключается в преобразовании сигналов радиозеха в специальный код и последующем вычислении исходных радиолокационных характеристик. При этом обеспечивается дискретность съема информации через каждые 250 м по дальности; данные осредняются по заданным интервалам дальности (0,5, 1,0 или 2,0 км) и азимутального угла (1°). Значения отражаемости рассчитываются в 250 прилегающих ячейках пространства. При этом обеспечивается контрольное отображение распределения радиозеха на ИКО и ИДВ. С целью повышения точности измерений отражаемости метеорологических объектов в составе АПОС используется блок автоматической калибровки, обеспечивающий непрерывный оперативный контроль потенциала радиолокатора.

Информативность данных АКСОПРИ существенно повышена благодаря включению дополнительных режимов обработки и представления данных. Так, режим ФАЗА обеспечивает измерение разности радиальных скоростей элементарных отражателей (частиц облаков и осадков) на интервале дальности 500 м и отображение на индикаторах МРЛ зон повышенных неоднородностей поля скоростей и турбулентности.

Информация об отражаемости и неоднородностях поля скоростей при конических обзорах пространства для заданного набора углов возвышения антенны поступает в компьютер. Следует заметить при этом, что количество обзоров и дискретность по углам возвышения антенны определяется автоматически в соответствии с задачами, которые должен решать комплекс. Эти задачи могут достаточно оперативно изменяться оператором МРЛ. После завершения ввода информации в компьютер на печать может быть выведена информация о распределении отражаемости или неоднородностей поля ветра на любом высотном уровне и высоты верхней границы облачности. После

выполнения необходимой обработки на печать также могут выдаваться распределение интенсивности выпадающих осадков и опасных явлений погоды. Цифровая информация выводится по полю 100×100 элементов с пространственным размером ячеек представления 1×1 , 2×2 или 4×4 км в зависимости от выбранного радиуса обзора пространства. Для оперативного представления полученной метеорологической информации карты распределений отображаются также на цветном мониторе компьютера в виде цветных мозаичных карт. Комплекс с помощью модема позволяет организовать передачу штормовой информации по телефонной линии связи.

Комплекс АКСОПРИ может обеспечивать различные режимы получения метеорологической радиолокационной информации. При работе на 1 канале ($\lambda = 3$ см) реализуется узкая диаграмма направленности ($0,5^\circ$), удобная для работы в высоких и умеренных широтах, особенно в тех случаях, когда облачные образования небольшие и поля осадков слабые (метеорологические объекты имеют малую вертикальную протяженность и малую отражаемость). При работе с мощными метеорологическими образованиями (летом или в тропических широтах) можно перейти на работу во 2 канале ($\lambda = 10$ см), где затухание радиоволн в метеорологических образованиях намного меньше. При работе с градовыми облаками можно использовать режим одновременной работы на двух каналах, реализуя метод двухволновой радиолокации. АКСОПРИ позволяет не только отображать полученную радиолокационную информацию определенного типа и в заданном масштабе, но и выполняет архивацию данных радиометеорологического зондирования атмосферы. Дальнейшая обработка данных позволяет просматривать на мониторе динамику метеорологической обстановки, совмещать с картой местности, исключать отражения от местных предметов.

Система «Метеоячейка». Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеоячейка» предназначен для получения информации об опасных явлениях погоды, связанных с облаками. Комплекс обеспечивает автоматизированное управление метеорологическим радиолокатором МРЛ-5, сбор, обработку и анализ информации, полученной с помощью управляющего вычислительного комплекса, с отображением ее на цветном мониторе, а также распределение обработанной метеорологической информации удаленным потребителям (прил.).

С помощью комплекса «Метеоячейка» реализуется решение следующих основных задач:

- проведение наблюдений, обработка и анализ данных МРЛ в

режиме конических разрезов пространства обзора для ближней (до 40 км) и дальней (30–300 км) зон, представление обработанной информации в виде горизонтальных и вертикальных сечений пространства обзора. Максимальная высота обзора составляет 16 км, а общее количество декартовых ячеек представления — 1600 (40×40 ячеек). Информация о вертикальном профиле облачности представляется в виде вертикальных сечений для дальней зоны с размером ячеек представления 15×15 км (масштаб 150 км) или 30×30 км (масштаб 300 км), а также для ближней зоны с размером ячеек представления 5×5 км;

- прием и обработка пеленгов грозовых разрядов, принятых грозопеленгатором-дальномером в радиусе 100 и 420 км;

- прием и обработка формализованных сообщений о наблюдаемых опасных явлениях погоды, поступающих от наземных метеорологических станций штормового кольца в зоне обзора МРЛ, вводимых в комплекс по мере их поступления.

- проведение автоматического комплексного анализа радиолокационных характеристик метеорологических объектов на базе моделей классификации и распознавания типов опасных явлений с вероятностью правильного распознавания не ниже 87%;

- отображение метеорологической информации на цветном мониторе с указанием на справочном поле цветовой кодировки, масштаба и режима работы, времени наблюдений и используемых размеров координатной сетки;

- передача обработанной информации в виде специализированных телеграмм по каналам связи.

Комплекс аппаратуры «Метеоячейка» состоит из следующих основных устройств:

- аппаратура первичной обработки, размещаемая в МРЛ-5;
- аппаратура вторичной обработки, размещаемая в КДП;
- аппаратура абонентского пункта.

В комплексе аппаратуры обработки и анализа данных имеются два блока устройства предварительной обработки (дистанционное) УПО-Д и командно-диспетчерский пункт (КДП). Блок УПО-Д содержит два канала обработки и управления. Устройство обработки осуществляет предварительную обработку эхосигналов и выдает обработанную информацию в каждое устройство управления. Устройство управления передает в блок обработки команды управления обработкой, содержащиеся в командном сообщении. После исполнения каждой команды устройство обработки осуществляет передачу в блок управления сообщение об исполнении и характеристику завершения. Блок управления через устройство коммутации реализует также управление

функционированием и контроль работоспособности метеорологического радиолокатора, передавая в КДП обработанную информацию и сообщения о состоянии МРЛ-5. Устройство коммутации, кроме подключения УПО-Д к МРЛ и КДП, осуществляет включение и отключение питания выбранной секции обработки и управления. Принятые устройством коммутации сигналы о состоянии радиолокатора и метеорологическая информация поступают в компьютер, где происходит окончательная обработка и анализ данных радиометеорологического зондирования атмосферы. С помощью пульта управления осуществляется управление метеорологическим радиолокатором через устройства коммутации и управления.

Работа всего комплекса управляется с помощью стандартного и специального математического обеспечения. Стандартное программное обеспечение поддерживает работу системы в реальном масштабе времени, обеспечивает взаимодействие со всеми видами периферийных устройств, а также функциональный контроль в рабочем и автономном режимах. Математическое обеспечение позволяет решать функциональные задачи по управлению комплексом, обработке и распределению метеорологической информации.

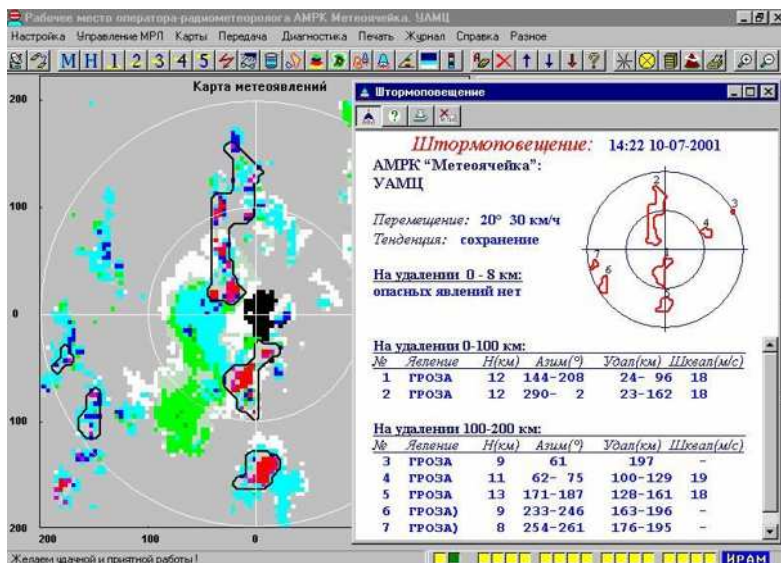


Рис. 25. Карта метеоявлений и штормоповещения, АМРК «Метеоячейка»

С помощью аппаратуры абонентского пункта пользователь, удаленный на расстояние до 5 км, может получать карты метеорологических явлений, верхней границы облачности и отражаемостей в заданном слое, вертикального сечения по заданному азимуту. Дополнительно возможно получение таблиц штормового оповещения, а также карт интенсивности осадков, видимости в осадках, отражаемостей на 5 уровнях и наличия шквалов. В телеграмме, формируемой для передачи в канал связи, содержится информация о времени измерения, используемом типе разреза, масштабе измерений, обнаруженных типах опасных явлений погоды, скорости перемещения и направлении перемещения опасных явлений погоды, о координатах точек контура каждого опасного явления погоды с указанием высоты облачности, с которой связано данное опасное явление. Стандартная метеорологическая информация совмещается с картой зоны аэродромного узла, границами секторов УВД и используемыми воздушными трассами. Радиолокационная метеорологическая информация с АРМК «Метеоячейка» может отображаться на индикаторах диспетчеров управления воздушным движением (рис. 25, 26).

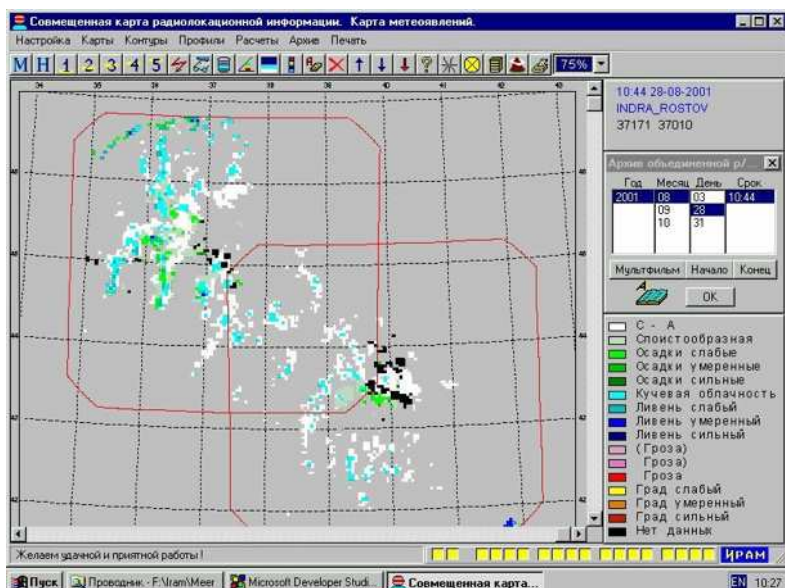


Рис. 26. Совмещенная карта АРМК «Метеоячейка»

3. 5. Доплеровские системы зондирования атмосферы

3.5.1. Особенности метеорологических доплеровских радиолокаторов

Метеорологические доплеровские радиолокаторы предназначены для измерения скоростей перемещения облаков, осадков, невидимых неоднородностей тропосферы, а также для измерений скоростей движений рассеивающих частиц внутри атмосферных образований. Принцип действия основан на использовании эффекта Доплера — частота отраженных сигналов изменяется, если наблюдатель и отражающий объект перемещаются относительно друг друга.

Гидрометеорные частицы атмосферных образований участвуют в сложных движениях: под действием ветра они перемещаются в горизонтальном направлении в составе всего образования; под действием гравитационных сил, восходящих и нисходящих воздушных потоков, участвуют в вертикальных движениях; вследствие турбулентных движений хаотически перемещаются в пространстве. Вследствие перемещений отражателей частота радиолокационных сигналов будет отличаться от частоты сигналов, излучаемых РЛС, т. е. будет наблюдаться доплеровский сдвиг частоты. Упорядоченное движение атмосферного образования как системы отражателей определяет средний доплеровский сдвиг частоты, а движение отдельных отражателей друг относительно друга влияет на ширину спектра доплеровских частот. Изучая спектр принимаемого сигнала, можно получить информацию о движении как атмосферного образования в целом, так и о движении гидрометеорных частиц внутри атмосферного образования.

Доплеровский сдвиг частоты связан только с радиальным перемещением отражающих объектов (с радиальными скоростями). Поэтому с помощью доплеровских радиолокаторов возможно измерение только радиальных скоростей. Для получения полного вектора скорости атмосферного образования или спектра полного вектора перемещения отдельных отражателей необходимо иметь три доплеровских РЛС, облучающих метеорологический объект с разных направлений. Выходным устройством метеорологических доплеровских РЛС является анализатор спектра доплеровских частот, который может быть построен по параллельному или последовательному принципу анализа частотного диапазона. Недостатком параллельного способа анализа доплеровского спектра является относительная сложность анализатора, а последовательного — большое время измерений. Применяются доплеровские РЛС: *когерентные с непрерывным излучением и коге-*

рентно-импульсные.

При использовании когерентно-импульсных РЛС проявление доплеровского эффекта имеет характерные особенности по сравнению с РЛС непрерывного излучения, связанные с импульсным режимом работы. В таких РЛС сравнение частот излученного и отраженного сигналов происходит за очень короткий промежуток времени — в течение длительности импульса. При таком режиме работы РЛС колебания доплеровских частот наблюдаются не в виде непрерывных функций времени, а в виде их дискретных значений за время длительности отраженных импульсов: доплеровские биения как бы просматриваются в стробоскоп, при этом роль частоты стробирования выполняет частота повторения отраженных сигналов. В когерентно-импульсных РЛС сигналы, отраженные от движущейся цели, на выходе приемника представляют собой последовательность видеоимпульсов, промодулированных по амплитуде доплеровской частотой (спектром доплеровских частот). В таких РЛС частота повторения импульсов накладывает определенные ограничения на измеряемые доплеровские частоты. С целью увеличения диапазона возможных значений измеряемых доплеровских частот увеличивают частоту повторения излучаемых сигналов и длину волны. Это может оказаться затруднительным в связи с необходимостью обеспечить требуемую дальность действия РЛС, так как диапазон дальности ограничивается частотой повторения излучаемых сигналов.

В практике радиометеорологических наблюдений доплеровские РЛС с непрерывным излучением применяются для измерения скоростей совокупности всех частиц, находящихся в пределах антенного луча. Они успешно используются для предупреждения об особо опасных атмосферных образованиях, например, торнадо. Вследствие значительных скоростей перемещений и больших размеров эти объекты не требуется селективировать по дальности, и они лучше обнаруживаются РЛС непрерывного излучения. С помощью таких РЛС можно более точно измерять скорости, законы распределения скоростей частиц и законы распределения размеров капель в осадках. Когерентно-импульсные РЛС применяются для исследования движений гидрометеорных частиц в каждом разрешаемом объеме внутри атмосферных образований и для изучения таких явлений, как турбулентность.

При использовании доплеровских РЛС с непрерывным излучением метеорологическая информация заключена в доплеровской частоте или спектре доплеровских частот непрерывного выходного сигнала. В случае применения когерентно-импульсных РЛС метеорологическая информация заключена в изменениях амплитуд отражен-

ных импульсов, вследствие чего должен анализироваться спектральный состав огибающей импульсных сигналов на выходе радиоприемного устройства. В практике радиометеорологических исследований наибольшее распространение получили когерентно-импульсные метеорологические РЛС.

3.5.2. Связь спектра доплеровских частот со скоростями движения рассеивающих частиц

Рассмотрим доплеровскую РЛС непрерывного излучения, которая обнаружила две одинаковые по размеру гидрометеорные частицы, перемещающиеся вдоль радиолуча со скоростями v_1 и v_2 . В момент начала наблюдения частицы находятся на одинаковом расстоянии от РЛС. Результирующий отраженный сигнал этих частиц может быть представлен в виде

$$E(t) = E \cos \omega \left(t - \frac{2v_1 t}{c} \right) + E \cos \omega \left(t - \frac{2v_2 t}{c} \right), \quad (3.26)$$

где E — амплитуда волны, отраженной отдельной частицей; c — скорость распространения радиоволн. Используя формулу для суммы косинусов, имеем

$$E(t) = 2E \cos \omega \frac{v_1 - v_2}{c} + \omega t \cos \omega \left[t - \frac{(v_1 + v_2)}{c} t \right]. \quad (3.27)$$

Из соотношения (4.27) следует, что пара гармонических колебаний образует биение, амплитуда которого изменяется с частотой $\omega(v_1 - v_2)/c$, пропорциональной разности скоростей частиц, а высокочастотное заполнение смещено по частоте на величину $\omega(v_1 + v_2)/c$, пропорциональную их средней скорости.

Эту информацию можно извлечь из радиолокационного сигнала, исследуя его спектр. Однако обработку сигналов в РЛС обычно производят по видеочастоте, детектируя высокочастотный сигнал. В доплеровских РЛС применяют фазовый детектор, на который подается опорное напряжение с частотой ω зондирующего колебания. Фазовое детектирование соответствует смещению частотного спектра сигнала на ω . При этом информация, содержащаяся в радиолокационном сигнале, не меняется. С помощью спектроанализатора можно определить спектральные линии $\omega v_1/c$, $\omega v_2/c$, соответствующие скоростям частиц, либо измерить среднюю скорость метеоцели и ширину спектра скоростей движения частиц.

Иначе обстоит дело с некогерентными РЛС. Обычный амплитудный детектор выделяет огибающую биений, создавая сигнал с раз-

ностной частотой $\omega(v_1 - v_2)/c$. Высокочастотное заполнение сигнала, определяемое вторым сомножителем выражения (3.27), устраняется. В результате теряется информация о средней скорости движения метеопели.

В общем случае метеорологический объект можно представить как совокупность множества частиц со скоростями, распределенными в пределах $v_1 - v_2$. Для такой модели, приведенные выше рассуждения, остаются в силе. Высокочастотный радиолокационный сигнал можно характеризовать распределенным спектром шириной

$$\Delta\omega = \omega \frac{v_1 - v_2}{c} \quad (3.28)$$

и средним доплеровским сдвигом

$$\Omega_{\text{д.ср}} = \omega \frac{v_1 + v_2}{c} . \quad (3.29)$$

Эти величины позволяют определить ширину спектра радиальных скоростей частиц и среднюю скорость их движения. Когерентная РЛС позволяет измерить оба эти параметра, некогерентная — лишь ширину спектра скоростей.

При случайном движении рассеивателей спектр доплеровских частот также будет случайным и для его анализа необходимо определить корреляционную функцию флуктуации частоты принимаемых сигналов. Рассмотрим характер корреляционной функции и соответствующий ей спектр флуктуации сигнала, отраженного от совокупности случайно перемещающихся в пространстве рассеивателей, скорости, перемещения которых будем считать стационарными случайными процессами. Сигнал, отраженный от совокупности таких рассеивателей, можно записать в виде

$$E(t) = \sum_{i=1}^N E_i \cos(\omega t - \alpha_i), \quad (3.30)$$

где E_i — амплитуда волны отраженной рассеивателем; N — число частиц в одновременно отражающем объеме; $\alpha_i = 2kl_i(t)$ — фаза сигнала элементарного рассеивателя, где $k = 2\pi/\lambda$, $l_i(t)$ — проекция смещения i -го рассеивателя на направление радиолуча в момент времени t . Корреляционная функция отраженных сигналов может быть записана в виде

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \overline{E_i E_j \cos(\omega t - \alpha_i) \cos(\omega t' - \alpha'_j)} = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \overline{E_i E_j \cos[\omega(t + t') - (\alpha_i + \alpha'_j)]} + \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N E_i E_j \cos[\omega(t-t') - (\alpha_i - \alpha'_j)] = \frac{1}{2} A_1 + \frac{1}{2} A_2 \cdot \quad (3.31)$$

где $\alpha'_j = 2kl'_j = 2kl_j(t')$ — фаза j -го отражателя в момент времени t' .

Проанализируем слагаемые, входящие в правую часть выражения (3.31). Первое слагаемое A_1 , представляющее собой среднее значение быстро изменяющейся гармонической функции с медленно изменяющейся по сравнению с ω случайной фазой, при бесконечных пределах усреднения обращается в нуль ($A_1 = 0$). Второе слагаемое с точностью до постоянного множителя может быть представлено в виде

$$A_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N E_i E_j \cos \omega(t-t') \cos(\alpha_i - \alpha'_j) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N E_i E_j \sin \omega(t-t') \sin(\alpha_i - \alpha'_j). \quad (3.32)$$

Второй член в выражении (3.32) при осреднении в бесконечных пределах оказывается равным нулю, а в первом слагаемом отличны от нуля будут лишь те члены, для которых $i = j$. Введем обозначения: $\tau = t - t'$, $2k\tau v = \alpha_i - \alpha_j$, где v — скорость изменения расстояния между двумя частицами, которую полагаем постоянной за время корреляции. Тогда выражение (3.31) для корреляционной функции может быть представлено как

$$R(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \overline{E_i^2 \cos 2k\tau v \cos \omega \tau}. \quad (3.33)$$

Для атмосферного образования, состоящего из частиц одинакового размера, выражение (3.33) будет иметь вид

$$R(\tau) = \frac{1}{2} \overline{NE_i^2 \cos 2k\tau v \cos \omega \tau}. \quad (3.34)$$

Спектр флуктуации радиолокационных сигналов при известной корреляционной функции определяется соотношением

$$G(\Omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty R(\tau) \cos \Omega \tau d\tau = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty w(v) dv \int_0^\infty NE^2 \cos 2k\tau v \cos \omega \tau \cos \Omega \tau d\tau, \quad (3.35)$$

где $w(v)$ — закон распределения проекций абсолютных скоростей рассеивателей на направление радиолуча.

Изучая спектр флуктуации амплитуд радиолокационных сигналов, отраженных от облаков и осадков, на выходе когерентно-импульсных РЛС, можно получить информацию о спектре скоростей движения рассеивателей внутри указанных атмосферных образований.

3.5.3. Связь ширины спектра доплеровских частот со скоростью диссипации турбулентной энергии

Пусть Δv — разность между радиальной скоростью некоторого отдельного отражателя и радиальной скоростью частицы, находящейся в середине разрешаемого объема. В этом случае закон распределения разности скоростей рассеивателей может быть записан в виде

$$w(\Delta v) = \int_{-\infty}^{+\infty} w_0(v_0) w(v_0 + \Delta v) dv_0, \quad (3.36)$$

где

$$w(v_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} w_l(v_0) p(l) dl$$

— распределение разности скоростей радиального перемещения рассеивателей относительно рассеивателя, находящегося в центре исследуемого объема; $w_l(v_0)$ — условное распределение радиальных скоростей рассеивателей, находящихся на расстоянии l от центра рассеивающего объема, и скорости рассеивателя, расположенного в его центре; $p(l)$ — относительный вклад в общую мощность радиолокационного сигнала отражений от частиц, находящихся на расстоянии l от центра объема.

Если разрешаемый объем, имеющий вид усеченного конуса, заменить эквивалентной сферой радиуса B , то

$$p(l) = \begin{cases} \frac{3}{B^3 l^2} & \text{при } l \leq B, \\ 0 & \text{при } l > B. \end{cases}$$

Введенное выше условное распределение $w_l(v_0)$ примем нормальным

$$w_l(v_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Dv_0(l)}} e^{-\frac{v_0^2}{2Dv_0(l)}}, \quad (3.37)$$

где $Dv_0(l)$ — структурная функция, определяемая выражением

$$Dv_0(l) = [v_0(R+l) - v_0(R)]^2 = C_\xi \xi^{2/3} l^{2/3}. \quad (3.38)$$

Здесь R — радиус-вектор относительно центра рассеивающего объема, ξ — проекция этого радиус-вектора на направление радиолуча, C_ξ — структурная постоянная.

Средняя ширина закона распределения $w_0(v_0)$ и его дисперсия с учетом соотношений (3.37) и (3.38) будут иметь вид

$$\Delta \bar{v}_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} v_0 w_0(v_0) dv_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} C_{\xi} \xi \int_0^{\infty} l^{1/3} p(l) dl, \quad (3.39)$$

$$\Delta \bar{v}_0^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} v_0^2 w_0(v_0) dv_0 = C_{\xi} \xi^{2/3} \int_0^{\infty} l^{2/3} p(l) dl. \quad (3.40)$$

В результате интегрирования получаем

$$\Delta \bar{v}_0 = \frac{9}{10} \sqrt{\frac{2}{\pi}} C_{\xi}^{1/2} \xi^{1/2} B^{1/3}, \quad (3.41)$$

$$\Delta \bar{v}_0^2 = \frac{9}{11} C_{\xi} \xi^{2/3} B^{2/3}. \quad (3.42)$$

С учетом полученных соотношений средняя и средняя арифметическая ширина спектра мощности отраженных сигналов будут определяться соотношениями

$$\Delta \bar{F} = \frac{2}{\lambda} \Delta \bar{v}_0 = 1,01 \frac{2}{\lambda} C_{\xi}^{1/2} \xi^{1/2} B^{1/3}, \quad (3.43)$$

$$\Delta \bar{F}^2 = \Delta \bar{v}_0^2 \left(\frac{2}{\lambda} \right)^2 = 1,64 \left(\frac{2}{\lambda} \right)^2 C_{\xi} \xi^{2/3} B^{2/3}. \quad (3.44)$$

Из выражений (3.43) и (3.44) следует, что, измеряя среднюю и среднюю квадратическую ширину спектра флуктуации мощности отраженных сигналов, можно получить информацию о скорости диссипации турбулентной энергии ветра. Полученные соотношения справедливы для случая, когда влиянием других метеорологических факторов на спектр мощности отраженных сигналов по сравнению с турбулентными пульсациями ветра можно пренебречь. В частности, в реальных условиях такая постановка задачи справедлива для некоторых типов облаков, не дающих осадков, а также для снегопада при вертикальном зондировании. Если разрешаемый объем не заменить равновеликой сферой, то соответствующие соотношения усложняются.

3.5.4. Доплеровские метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ)

Обзорный доплеровский метеорологический радиолокатор WSR-88D. Радиолокатор WSR-88D с длиной волны 10,7 см является основным радиолокатором оперативной сети США. Предназначен для наблюдений при облачном и ясном небе, его можно назвать всепогодным МРЛ. Он разработан с учетом оперативного опыта успешной работы с серийными метеорологическими радиолокаторами WSR-74, WSR-81, которые были установлены в 60 странах мира. Дальность действия локатора в режиме измерения радиолокационной отражаемо-

сти составляет 450 км (рис. 27).

Радиолокатор отличается следующими особенностями:

- доплеровский режим и режим измерения интенсивности;
- автоматическое тестирование работы;
- диагностическое тестирование рабочих характеристик;
- программируемая чувствительность к дождю, льду, снегу;
- подавление местников;
- шесть калиброванных интенсивностей дождя с выбранным

цветом;

- девять калиброванных значений скорости от 0 до 50 м/с;
- шесть калиброванных значений турбулентности.

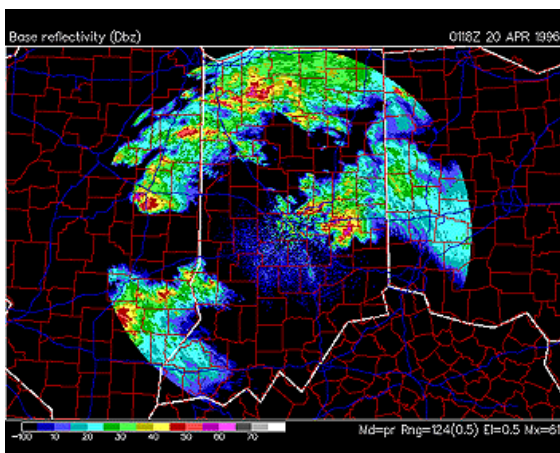


Рис. 27. Радиолокационное изображение ДМРЛ WSR-88D

Структура WSR-88D: метеорологическая радиолокационная станция, командно-диспетчерский пункт и абонентские пункты удаленных пользователей. В состав МРЛ входят антенно-волноводная система, приемопередатчик и аппаратура первичной обработки радиолокационной информации. Всю совокупность информационных продуктов, образующихся на выходе системы обработки можно подразделить на базовые и производные. Основные (базовые) продукты: карты отражаемости, карты скорости, карты ширины спектра, производные – общий сдвиг ветра, вершины радиоэха, индекс града (рис. 28), мезоциклон, признак вихря торнадо, структура шторма, вертикально проинтегрированная водность, накопление осадков, вероятность опасных явлений погоды.

Метеорологический доплеровский радиолокатор METEOR-500

С. Радиолокатор состоит из следующих основных подсистем:

- антенная система CLP10 с большой точностью позиционирования;
- магнетронный передатчик мощностью 250 кВт, управляемый твердотельным двухимпульсным модулятором и приемник с низким коэффициентом шума;
- процессор сигналов;
- система управления DIRAS для сбора и контроля за параметрами ДМРЛ и радиолокационными данными, созданная на базе современной технологии управления и автоматизации;
- программа RAINBOW для создания выходных продуктов.

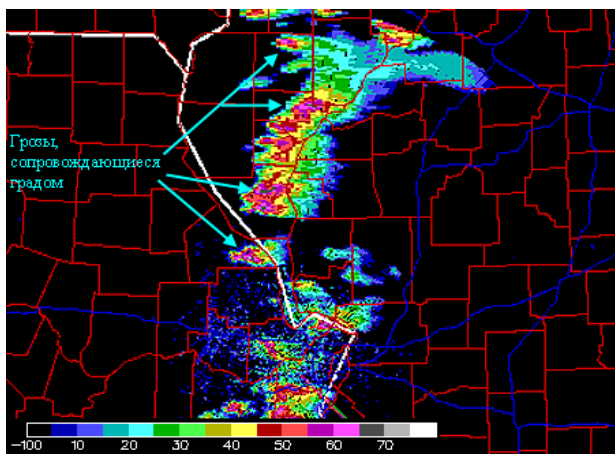


Рис. 28. Радиолокационное обнаружение града, изображение с ДМРЛ WSR-88D

Максимальная дальность действия радиолокатора в доплеровском режиме составляет 125 км, в режиме измерения радиолокационной отражаемости — 550 км.

Все радиолокационные продукты получают из откорректированных первичных данных по отражаемости, средней скорости и ширине спектра. Все управление метеорологическим радиолокатором осуществляет радиолокационный менеджер RAINBOW. Дисплейные программы RAINBOW создают изображение и остальную информацию на рабочих станциях.

Метеорологические продукты, получаемые с *METEOR 500 C*:

основные — ИКО, ИДВ, вертикальный разрез, высота верхней границы радиоэха, нижняя кромка радиоэха, максимальное отображение, дисплей скорость-азимут; дополнительные — обработка скорости в объеме, вертикальный профиль ветра, отображение общего момента, горизонтальная скорость ветра и др.; гидрологические характеристики — накопленные осадки, накопление в речном водосборе, суммарные осадки в точке и др.; обнаружение сдвига ветра — горизонтальный и вертикальный сдвиг, турбулентности в слое, радиальный сдвиг и др.; продукты штормового предупреждения — продукт автоматического штормового предупреждения, прогноз дождя; обнаружение и синоптический анализ — предсказание сдвига ветра, обнаружение микро-взрыва, обнаружение фронта порывистости и др.

3.5.5. Результаты измерений ДМРЛ параметров атмосферы

Доплеровские РЛС могут быть использованы для измерения структуры ветра, турбулентности, микрофизических характеристик осадков, локализации торнадо (рис. 29) и других характеристик атмосферы.

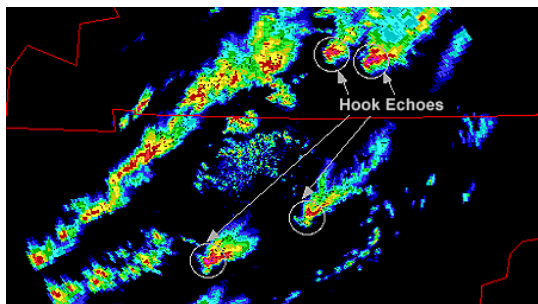


Рис. 29. Локализация торнадо, изображение с ДМРЛ WSR-88D

Измерение параметров ветра. При наблюдении за облаками и осадками, выпадающими в районе размещения РЛС, антенна направляется горизонтально. Если ветер отсутствует, то выпадающие капли дождя не будут иметь радиальной составляющей скорости и доплеровская частота отраженных сигналов на выходе РЛС будет равна нулю. При наличии ветра у выпадающих капель дождя появится радиальная составляющая скорости, что приведет к доплеровскому сдвигу частоты отраженного сигнала. При изменении азимутального направления антенны доплеровская частота изменится, и приобретет максимальное

значение, когда антенна ориентирована по направлению ветра или навстречу ему.

Определение вертикальных движений рассеивающих частиц, свободно увлекаемых воздушным потоком (мелкокапельные облака, диэлектрические неоднородности атмосферы), производится при антенне, направленной в зенит. В результате измерений доплеровской частоты отраженных сигналов дождевых облаков может быть получена картина вертикальных движений частиц, являющаяся результатом действия, как их гравитационного падения, так и увлечения вертикальными воздушными потоками.

Примеры интерпретация радиолокационной доплеровской скорости. Для того чтобы понять доплеровскую радиальную скорость, необходимо рассмотреть геометрию сканирования радиолокатора. Радиолокационный луч посылается под углом подъема больше нуля, поэтому он по мере удаления от МРЛ, поднимается все выше и выше над поверхностью земли. Из-за этого радиолокационные сигналы, отраженные от объектов вблизи радара представляют область ветров низкого уровня, а отраженные сигналы от отдаленных объектов — область высоких уровней.

На дисплее расстояние от радиолокатора представляет собой изменение расстояния, как по горизонтали, так и по вертикали. Чтобы определить область ветра в конкретной точке подъема над радаром, необходимо изучить радиальные скорости в кольце с фиксированным радиусом, равным расстоянию от радара. Точка подъема, представленная конкретным кольцом, зависит от угла подъема радиолокационного луча.

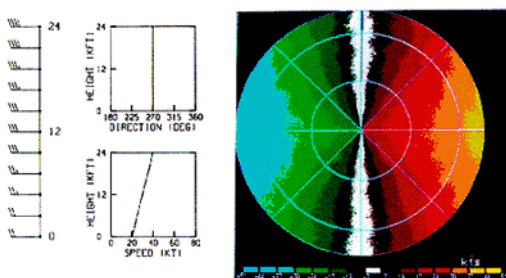


Рис. 30. Радиальные скорости, соответствующие вертикальному профилю ветра (пример 1)

На примерах (рис. 30, 31, 32, 33) показаны изображения допле-

ровских радиальных скоростей, созданных ДМРЛ только по вертикальным компонентам ветров. Эти упрощенные образы радиальных скоростей помогают понимать более сложные, которые связаны с грозовыми движениями. Изображение доплеровских скоростей (рис. 4.16, справа) соответствует вертикальному профилю ветра (рис. 4.16, слева), флажки ветра указывают скорость ветра и направление от земли до 24000 футов. Отрицательные доплеровские скорости (синий и зеленый цвета на диаграмме) означают движение по направлению к радиолокатору, а положительные (желтый и красный цвета) — от него, положение радиолокатора — в центре.

В первом примере направление ветра не меняется с высотой (рис. 4.16), но наблюдается увеличение скорости ветра от 20 узлов (10 м/с) вдоль поверхности земли до 40 узлов (20 м/с) на высоте 24000 футов. Максимум радиальной скорости, соответствующей движению по направлению к радиолокатору это западная точка диаграммы, а максимум скорости, соответствующей движению от радара — восточная точка диаграммы. На севере и юге ДМРЛ регистрирует нулевую радиальную скорость. Дело в том, что ветры оказываются перпендикулярными радиолокационному лучу, когда мы смотрим на север или юг.

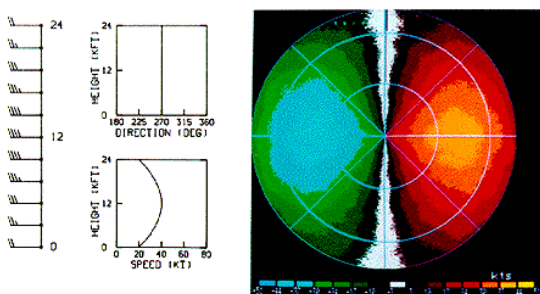


Рис. 31. Радиальные скорости, соответствующие вертикальному профилю ветра (пример 2)

Во втором примере (рис. 31), ветры усиливаются от 20 до 40 узлов между 0 и 12000 футами, а затем скорость ветра уменьшается до 20 узлов на 24000 футах. Направление ветра постоянно. Максимум скорости приходится на уровень 12000 футов, что наблюдается на радиолокационном дисплее.

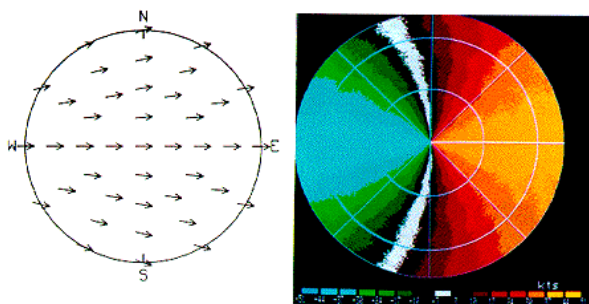


Рис. 32. Радиальные скорости, соответствующие вертикальному профилю ветра (пример 3)

В третьем примере (рис. 32) видим область ветра, направление которого изменяется с севера на юг, но скорость не изменяется с высотой. Теперь линия, характеризующая нулевую радиальную скорость, изгибается так, чтобы везде быть перпендикулярной области ветра. Максимальные радиальные скорости наблюдаются там, где радиолокационный луч указывает на направление движения ветра или направление, прямо ему противоположное. В четвертом примере (рис. 33) видим тот же эффект с той лишь разницей, что поток ветра является сходящимся, а не расходящимся, как в предыдущем случае.

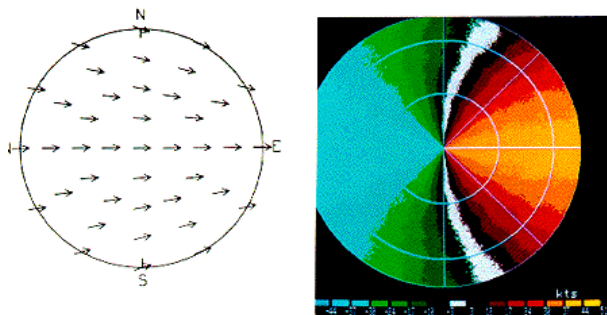


Рис. 33. Радиальные скорости, соответствующие вертикальному профилю ветра (пример 4)

С помощью доплеровских метеорологических радиолокационных систем получают информацию о микроструктуре и динамических процессах облаков и осадков.

4. АЭРОДРОМНЫЕ И ТРАССОВЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ

4.1. Общие сведения

Обзорные первичные трассовые РЛС предназначены для обеспечения радиолокационного контроля воздушного пространства на трассах и во внеаэродромном пространстве. При отсутствии ВРЛ они являются основным источником информации о наличии и координатах ВС в зоне наблюдения для диспетчеров районных центров и пунктов подхода. ОРЛС-Т обеспечивают обнаружение всех ВС, в том числе и не имеющих бортовых ответчиков, а также получение оперативной информации о метеорологической обстановке.

Использование первичных РЛС (ПРЛС) связано с рядом ограничений:

- отраженные сигналы чрезвычайно малы и сильно ослабляются при распространении, поэтому для обнаружения ВС на больших дальностях необходимы значительные энергетические потенциалы РЛС, что, в свою очередь, требует значительных габаритных размеров и массы передающих и антенных устройств и большого энергопотребления;
- первичное опознание ВС и непрерывное поддержание его наблюдения представляет определенные трудности;
- процедура передачи управления от одного диспетчера и органа УВД к другому диспетчеру или органу УВД не проста и не всегда однозначна;
- на диспетчерском индикаторе иногда бывает значительное число ложных сигналов.

Эти недостатки ликвидируются при одновременной работе ПРЛС и ВРЛС. Радиолокаторы, в которых они конструктивно объединены, называют радиолокационными комплексами (РЛК), а составляющие их станции — первичным и вторичным каналами (ПРК и ВРК). Кроме ПРК и ВРК, комплексы включают аппаратуру первичной обработки отраженных и ответных сигналов (АПОИ) и модемы аппаратуры передачи данных (АПД) от РЛК на КДП.

Трассовые РЛС подразделяют на обзорные трассовые радиолокаторы ОРЛ-Т (вариант А) с максимальной дальностью 400 км и (вариант В) с максимальной дальностью 250 км (табл. 4).

Аэродромные обзорные РЛС (ОРЛС-А) предназначены для получения информации о воздушной обстановке, необходимой при контроле и УВД в районе аэродрома и для ввода ВС в зону действия

посадочных средств.

Таблица 4

Нормы на параметры обзорных РЛС и РЛК

Параметр	РЛС и РЛК			
	аэродромные трассовые			
	Вариант			
	В ₁	В ₂	Б	А
Дальность действия, км: минимальная максимальная				
	100	160	250	400
	1,5	1,5	5	5
Максимальная высота обнаружения, км	7	12	20	20
Максимальный угол обзора в вертикальной плоскости, градус				
	45	45	45	45
Максимальная дальность действия, км, на высоте полета 1 000 м				
	70	90	110	120
Максимальная дальность действия, км, на высоте полета 4500 м				
	100	160	200	240
Период обновления информации по первичному каналу, с				
	4	6	12	12
Разрешающая способность по дальности для первичного канала, м				
	350	500	1000	1000
Разрешающая способность по азимуту для первичного канала, градус				
	2	2	1,5	1,5
Средняя квадратическая погрешность измерения дальности по индикатору для первичного канала, м				
	350	500	1000	1000
Средняя квадратическая погрешность измерения азимута по индикатору для первичного канала, градус				
	1	1	1	1
Средняя квадратическая погрешность измерения дальности РЛК на выходе АПОИ, м : для первичного канала для вторичного канала				
	150	200	300	300
	250	250	250	250
Средняя квадратическая погрешность измерения азимута РЛК на выходе АПОИ, градус: для первичного канала для вторичного канала				
	0,2	0,2	0,25	0,25
	0,25	0,25	0,25	0,25
Диапазон рабочих волн ПРЛ, см	23	23	23	23

4.2. Принцип работы трассового радиолокатора

Существует несколько вариантов построения структурных и функциональных схем трассовых радиолокаторов. Наиболее характерными особенностями этих схем является двухкомплектное двухканальное построение схемы с одновременной работой двух комплектов на разных несущих частотах. Двухкомплектное построение РЛ предполагает, что имеются два идентичных комплекта аппаратуры, включающие в себя отдельные передающие и приемные устройства и работающие на общую антенную систему. Выход из строя одного из комплектов не вызывает отказ в работе всего РЛ, а лишь несколько уменьшает его максимальную дальность. В некоторых случаях предусматривается нормальная работа с одним комплектом. Вторым комплектом в это время находится в нагруженном резерве. У некоторых радиолокаторов предусматривается третий резервный комплект аппаратуры, который в случае необходимости в так называемом форсированном режиме может работать одновременно с первым и вторым комплектами.

Для устранения перегрузки волноводных трактов, обеспечения возможности введения особых режимов работы каждого из комплектов и для уменьшения флуктуации результирующих сигналов каждый комплект РЛ работает на своей несущей частоте f_1 , или f_2 . Разнос частот между комплектами обычно составляет 40–60 МГц. Объединение и разделение сигналов отдельных комплектов производится с помощью волноводных мостов или избирательных фильтров. Для устранения нежелательных взаимных влияний сигналов, излучаемых и принимаемых на разных несущих частотах, в радиолокаторах предусмотрен небольшой временной сдвиг зондирующих импульсов одного комплекта относительно импульсов другого комплекта. Этот сдвиг обычно равен 4–8 мкс. В приемном тракте при суммировании сигналов разных комплектов осуществляется соответствующая компенсация временного сдвига.

Двухканальный принцип построения РЛ означает, что ДН такого РЛ в вертикальной плоскости имеет два лепестка. Нижний лепесток формируется облучателем основного канала, а верхний — дополнительным каналом, предназначенным для индикации высотных целей. Такое построение РЛ позволяет гибко изменять его зону обзора в зависимости от помеховой ситуации и, в какой-то мере, оптимизировать конфигурацию зоны обзора, добываясь необходимой вероятности обнаружения целей, расположенных на нижних и верхних эшелонах, при достаточно низких энергетических затратах. Основной канал ра-

ботает, как правило, на передачу и прием излучаемых сигналов. Дополнительный канал работает только на прием. В этом случае принимается та часть энергии, которая излучается основным каналом в секторе угла места дополнительного канала.

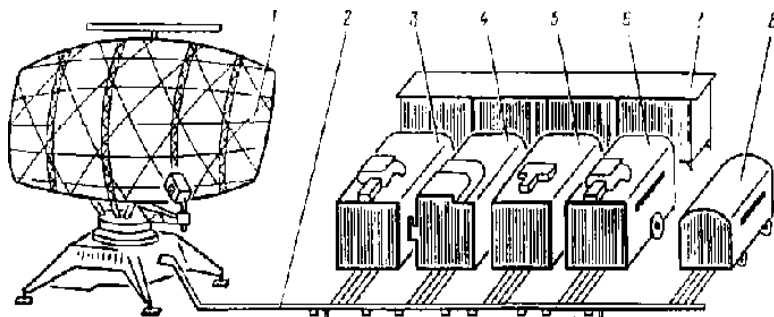


Рис. 34. Радиолокационный комплекс «Скала-МПР»: 1 — антенное устройство; 2 — волноводные и кабельные тракт передачи; 3,4 - приемопередающие модули; 5 — модуль обработки и передачи информации; 6 — модуль электропитания; 7 — общий переход; 8 — дизель-электростанция

Комбинируя сигналы, принимаемые основным и дополнительным каналами, по жесткой или гибкой программе, можно оптимизировать конфигурацию зоны обнаружения РЛ. У некоторых РЛ переключение каналов производится автоматически по адаптивной программе в зависимости от помеховой ситуации. При этом вся зона разбивается на большое число более мелких участков и для каждого участка автоматически выбирается определенное соотношение сигналов верхнего и нижнего каналов. Такой принцип формирования зоны обнаружения используется в радиолокаторах АТСР-22, АТСР-44, «Скала-МПР» (рис. 34), «Скала-МПА».

Важным преимуществом работы РЛ в двухкомплектном режиме с разнесом частот является увеличение дальности действия вследствие уменьшения влияния флуктуации эффективной отражающей площади целей (рис. 35).

Действительно, отношение сигнал/шум обеспечения заданного значения вероятности правильного обнаружения, различно для флуктуирующих и нефлуктуирующих целей. В общем случае большинство радиолокационных целей являются флуктуирующими, поскольку их размеры намного превосходят длину волны, на которой работает РЛ.

При этом необходимо иметь в виду, что для флуктуирующих целей влияние отношения сигнал/шум на вероятность обнаружения зависит от характера флуктуации. При анализе флуктуации радиолокационных целей обычно рассматривают четыре наиболее характерных случая.

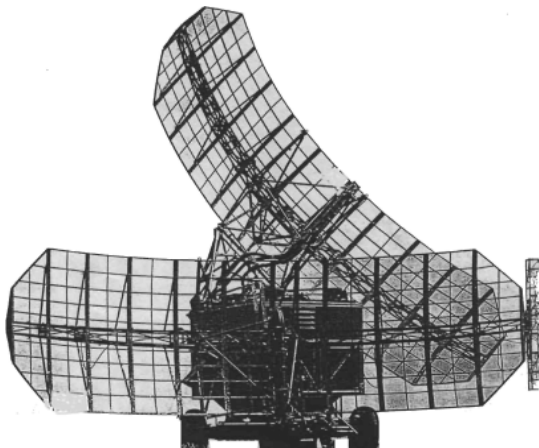


Рис. 35. Радиолокационная комплекс с V-образным лучом типа П-37

Случай 1. Распределение амплитуд отраженных сигналов подчиняется закону Рэлея:

$$w(U) = \frac{U}{\sigma^2} \left(-\frac{U^2}{2\sigma^2} \right),$$

где σ^2 — дисперсия амплитуды сигнала. Отраженные сигналы в пачке полностью коррелированы, отсутствует корреляция между сигналами в пачках, принадлежащих различным периодам обзора пространства.

Случай 2. Распределение амплитуд отраженных сигналов подчиняется закону Рэлея. Отраженные сигналы являются некоррелированными от импульса к импульсу в одной и той же пачке, а не от обзора к обзору цели.

Случай 3. Корреляция сигналов соответствует первому из рассмотренных случаев, но распределение амплитуд отраженных сигналов соответствует обобщенному закону Рэлея, скорректированному модифицированной функцией Бесселя первого рода нулевого порядка.

Случай 4. Корреляция сигналов соответствует второму из рассмотренных случаев, но с распределением амплитуд, соответствующих третьему случаю.

Случай 5. Сигналы, отраженные от целей, не флуктуируют.

Влияние характера флуктуации отраженных сигналов на отношение сигнал/шум, обеспечивающее определенное значение вероятности правильного обнаружения цели можно определить по кривым (рис. 36). Кривые относятся к пяти указанным случаям флуктуации сигналов при интеграции десяти импульсов в пачке и вероятности ложных тревог. Для обеспечения одного и того же значения вероятности правильного обнаружения необходимые значения отношения сигнал/шум будут иметь наибольшие значения для 1-й и 3-й моделей Сверлинга. Когда флуктуации происходят от импульса к импульсу и интегрируется большое число импульсов, группа импульсов в среднем дает полный отраженный сигнал, сходный с сигналом стабильной цели.

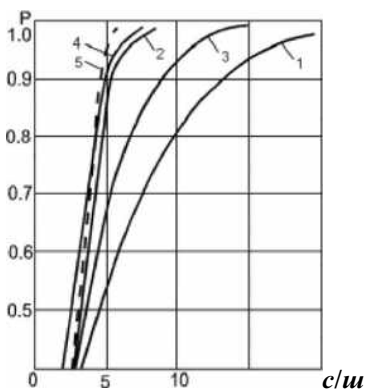


Рис. 26. Зависимость вероятности обнаружения целей от отношения сигнал-шум ($c/\text{ш}$) для различных характеристик флуктуаций отраженных сигналов

Изменение несущей частоты от импульса к импульсу приводит к декорреляции флуктуации импульсов внутри пачки отраженных сигналов, то есть к переходу от моделей 1-й и 3-й к моделям 2-й и 4-й Сверлинга. Такая декорреляция будет возможна только в том случае, если разнос между несущими частотами f_1 и f_2 будет достаточно большим, чтобы флуктуации отраженных сигналов на этих частотах были некоррелированы. Условие декорреляции может быть записано в виде

$$f_1 - f_2 \geq c/L,$$

где c — скорость света; L — физический фактор ВС в линейных единицах.

Введение двух комплектов, работающих на разных несущих частотах, и последующего объединения сигналов обоих комплектов

приводит к эффекту, аналогичному изменению несущей частоты РЛ от импульса к импульсу. При этом можно считать, что повышение вероятности правильного обнаружения целей эквивалентно увеличению дальности действия РЛ при постоянном значении вероятности обнаружения целей. Дальность действия РЛ при работе его в двухкомплектном режиме с разнесом частот по сравнению с работой в однокомплектном режиме увеличивается.

$P_{n.o}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
R_{max2}/R_{max1}	1,11	1,16	1,21	1,26	1,3	1,36	1,41

Следовательно, относительное изменение дальности действия РЛ зависит от вероятности обнаружения целей. При малых вероятностях правильного обнаружения эффект от включения второго комплекта соответствует случаю простого удвоения излучаемой мощности. При больших значениях вероятности правильного обнаружения целей на эффект увеличения дальности действия РЛ значительное влияние оказывает декорреляция флуктуации отраженных сигналов. Использование двухкомплектного двухканального принципа с одновременной работой двух комплектов на разных несущих частотах характерно для трассовых РЛ третьего поколения. Для РЛ третьего поколения характерно применение адаптивных устройств управления параметрами РЛ и цифровая обработка сигналов.

4.3. РЛС обзора летного поля

Радиолокационные станции обзора летного поля (ОЛП) обеспечивают безопасность движения самолетов по летному полю в сложных метеорологических условиях. Они осуществляют наблюдение за самолетами, идущими на посадку при удалении от начала ВПП на 4 км и с высоты 50 м, за движением самолетов по ВПП и рулежным дорожкам; контроль за взлетающими самолетами; наблюдение и контроль за автотранспортом, пересекающим ВПП и движущимся по рулежным дорожкам.

Радиолокатор ОЛП — это радиолокационная станция, которая выдает информацию о координатах (азимут, наклонная дальность) различных объектов, находящихся на летном поле, об их взаимном расположении.

Высокая разрешающая способность по дальности и азимуту дает возможность раздельно наблюдать два объекта, близко находящихся друг к другу, расположенных на летном поле и правильно определять их взаимное расположение. Разрешающая способность по дальности зависит от длительности импульсов τ , параметров индика-

тора-масштаба M , длины развертки дальности I_p и диаметра светового пятна dn :

$$\Delta r = c\tau/2 + dnM/I_p$$

Для обеспечения высокой разрешающей способности по дальности станция должна работать короткими импульсами, а индикатор – иметь достаточно большой диаметр экрана и небольшие масштабы развертки. Для получения высокой разрешающей способности по азимуту РЛС ОЛП должна иметь узкую ДНА в горизонтальной плоскости. Координаты, дальность и азимут, измеряемые РЛС ОЛП, равноценны при определении взаимного расположения объектов, поэтому разрешаемое расстояние по углу должно быть примерно равно разрешаемому расстоянию по дальности. Для обеспечения хорошего кругового обзора всего летного поля РЛС ОЛП устанавливают на вышках высотой в несколько десятков метров непосредственно на аэродроме. Малая мертвая зона позволяет наблюдать объекты, находящиеся вблизи от РЛС. Мертвая зона определяется минимальной дальностью действия радиолокатора

$$r_{\min} = c(\tau + t_B)/2,$$

где t_B — время восстановления приемника. Уменьшение длительности импульса и времени восстановления приемника влечет за собой уменьшение минимальной дальности действия. Специальные схемные решения ускоряют восстановление приемного устройства. Радиолокатор «Обзор-2» устанавливается на территории аэропорта. В его состав входят антенный пост, оборудование преобразователей частоты электропитания, усилительные устройства, аппаратура КДП.

В аппаратуре КДП предусмотрена возможность сопряжения с оборудованием стартового диспетчерского пункта (СДП). Радиолокационная информация на СДП передается в виде телевизионного сигнала по радиоканалу. Передающее устройство аппаратуры передачи информации входит в состав оборудования СДП, но находится на КДП. На СДП устанавливаются приемное и телевизионный ИКО. Один комплект этой аппаратуры обеспечивает обслуживание одной ВПП с обоих направлений, т. е. два стартовых диспетчерских пункта.

Зона обнаружения РЛ при интенсивности осадков в виде дождя до 4 мм/ч, снега до 10 мм/ч и тумана с горизонтальной видимостью более 50 м простирается от 50 м до 5 км. При дожде с интенсивностью более 4 мм/ч, но менее 10 мм/ч дальность действия сокращается до 4 км. Приведенные данные гарантируются для целей с эффективной площадью рассеяния более 2 м² при вероятности правильного обнаружения 0,9.

Ширина ДНА в горизонтальной плоскости равна 0,2°. В верти-

кальной плоскости ДНА имеет форму $\cos \theta$. Ее ширина на уровне половинной мощности приближается к 1° . Длительность зондирующего импульса по сравнению с радиолокатором ОЛП-1 сокращена приблизительно до 0.03 мкс. При таких технических параметрах разрешающая способность станции при оценке ее на краю экрана индикатора, работающего в круговом режиме с масштабом 2 км, будет не хуже 16 м. Импульсная мощность передатчика РЛС равна 20 кВт. Передатчик работает в миллиметровом диапазоне волн. Несущая частота зондирующего импульса лежит в пределах 36550–36880 МГц. Частота повторения импульсов равна 10000 Гц. Частота вращения антенны 60 об/мин.

4.4. Общие сведения об аппаратуре первичной обработки радиолокационной информации

Важнейшей составной частью РЛК, входящих в состав АС УВД, является аппаратура первичной обработки информации, выполняющая следующие основные операции: обнаружение полезных сигналов с помощью логического обнаружителя и формирование радиолокационных отметок; определение пространственных координат целей по результатам одного обзора РЛС. Кроме того, в процессе первичной обработки выполняются дополнительные операции: декодирование информации, поступающей по вторичному каналу, и привязка этой информации к координатам целей; формирование стандартных сообщений для передачи их через узкополосную линию связи.



Рис. 37. РЛС ОП типа ASDE (фирма Raytheon)

В цифровых системах обработки перечисленным операциям

предшествуют вспомогательные операции двоичного квантования по амплитуде на два уровня (0 или 1) и временной дискретизации сигналов, подаваемых на АПОИ с аналогового приемного устройства РЛС (рис. 37).

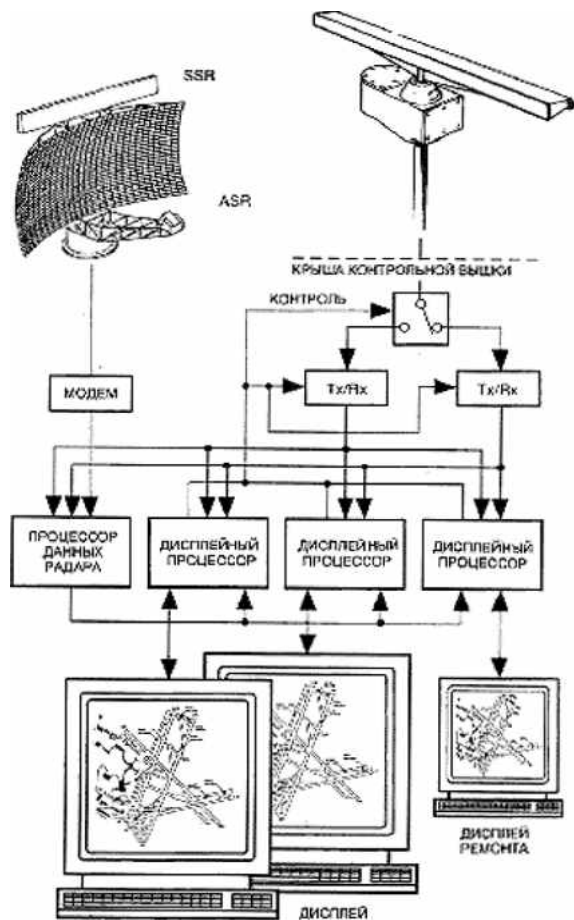


Рис. 38. Структура обработки информации в ASDE с учетом информации от обзорного и вторичного радиолокаторов

В АПОИ логика работы обнаружителя сводится к возможности получения ответа на вопрос: имеются ли на входе приемного устройства РЛС, сопрягаемой с АПОИ, полезный сигнал и помеха или

только помеха (рис. 38). В зависимости от алгоритма работы обнаружителей в современных образцах АПОИ реализуется весовой или критерийный метод обнаружения пачки двоично-квантованных сигналов.

Обработка двоично-квантованных сигналов в АПОИ осуществляется на отдельных элементарных участках дальности. С этой целью вся просматриваемая дальность обнаружения квантуется на дискреты дальности. Длительность каждого кванта дальности должна быть согласована с полосой пропускания приемного устройства РЛС и длительностью зондирующих импульсов. Весовой метод обнаружения сигнала основан на задержке импульсов пачки на время, кратное периоду повторения, и последующем сложении их в соответствии с весовыми коэффициентами, отражающими форму диаграммы направленности.

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПОСАДКИ САМОЛЕТОВ

В классификации средств обеспечения безопасности посадки во внимание принимаются два параметра:

- высота принятия решения;
- дальность видимости на ВПП.

Как известно, под высотой принятия решения понимается определенная относительная высота, на которой должен быть начат уход на второй круг в случае, если не был установлен необходимый визуальный контакт для продолжения посадки. Обычно высота принятия решения указывается по отношению к порогу ВПП (порог ВПП — начало участка ВПП, который может использоваться для посадки); под необходимым визуальным контактом понимается контакт с той частью визуализирующих средств или зоны захода на посадку, как таковой, которая, должна быть видна пилоту в течение времени, достаточного для оценки положения самолета и скорости изменения этого положения относительно номинальной траектории. Под дальностью видимости на ВПП понимается максимальное расстояние в направлении взлета или посадки, на котором ограничивающие ВПП огни или маркеры могут быть видны с точки, находящейся над осевой линией, на высоте, соответствующей среднему уровню глаз пилота в момент приземления (5 м).

Указанный принцип предполагает разделение всех средств обеспечения посадки на три категории. Средства категории I обеспечивают выполнение полетов со снижением до высоты принятия решения 60 м при дальности видимости на ВПП не менее 800 м с высокой вероятностью успешных заходов на посадку. Средства категории II обеспечивают выполнение полетов со снижением до высоты принятия решения 30 м при дальности видимости на ВПП не менее 400 м также с высокой вероятностью успешных заходов на посадку. Средства категории III обеспечивают выполнение полетов без ограничения по высоте принятия решения со снижением до поверхности ВПП и подразделяются по трем подкатегориям. Подкатегория А предусматривает визуальную внешнюю ориентировку во время конечной фазы посадки (пробега) при дальности видимости на ВПП не менее 200 м. Подкатегория В предусматривает возможность внешней ориентировки лишь при рулении в условиях, когда дальность видимости на ВПП составляет не менее 50 м. Подкатегория С предполагает полное отсутствие внешней ориентировки как при посадке, так и при рулении.

5.1. Общая характеристика посадки

Под посадкой понимают всю совокупность процессов предпосадочного маневрирования, обеспечивающего вписывание самолета в заданную траекторию снижения, движение по этой траектории и собственно посадку. В соответствии с различием задач, решаемых в этих процессах, обычно рассматривают фазы посадки I, II и III (рис. 29). На первой фазе самолет вначале выводится на осевую линию ВПП (точка 1), затем производится выпуск шасси, закрылков и других средств механизации крыла, а скорость полета уменьшается до скорости планирования $V_{план}$.

В течение всей первой фазы высота полета сохраняется постоянной и равной 350–400 м. Заканчивается первая фаза в точке 2 пересечения траектории с радиотехнической глиссадой.

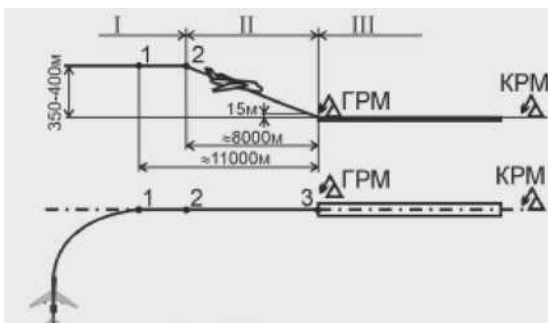


Рис. 39. Фазы посадки

На второй фазе осуществляется планирование самолета с постоянной скоростью $V_0 = V_{план}$. Концом второй фазы удобно считать точку 3 начала выравнивания, что соответствует в среднем высоте 15 м, поскольку над порогом ВПП высота глиссады составляет как раз 15 м. В нормальных условиях вторая фаза должна заканчиваться над порогом ВПП.

На третьей фазе (рис. 40) траектория самолета обычно содержит участки выравнивания, выдерживания, парашютирования и пробега. При автоматическом управлении задаваемая траектория движения самолета на воздушном участке имеет, как правило, вид экспоненты (пунктир на рис. 40).

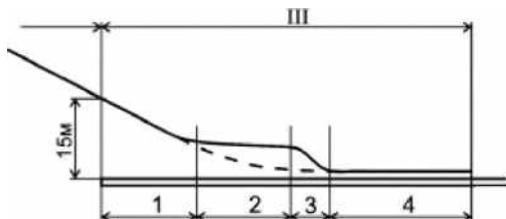


Рис. 40. Третья фаза посадки: 1 — выравнивание; 2 — выдерживание; 3 — парашютирование; 4 — пробег

Управление самолетом на второй фазе посадки представляет наиболее сложную задачу вследствие двух причин. Во-первых, высокие требования к точности стабилизации самолета на глиссаде ужесточаются по мере приближения к ВПП. Во-вторых, именно на этой фазе летчику приходится принимать решения о возможности успешного завершения посадки или об уходе на второй круг.

5.2. Взлетно-посадочная полоса

В широком смысле под ВПП понимается определенная прямоугольная площадь, подготовленная для пробега и разбега самолета вдоль ее длины. Основное требование, предъявляемое к ВПП способность обеспечить нормальную эксплуатацию тех типов самолетов, для которых она предназначена. Для тяжелых самолетов применяют, как правило, бетонные ВПП. Последние часто дополняют концевыми участками прекращения полета (называемые обычно концевыми полосами безопасности) и концевыми участками разгона.

ВПП вместе с участками прекращения взлета и прилегающими обочинами образуют летную полосу. Геометрические размеры ВПП, концевых участков прекращения взлета и разгона, как и геометрические размеры летной полосы в целом, могут быть весьма разнообразны и определяются местными условиями и эксплуатационными характеристиками самолетов.

ВПП аэродромов, способных обеспечивать выполнение взлета и захода воздушного судна на посадку II категории, оборудуются светосигнальной системой ОВИ-2 (рис. 41). Она включает в себя следующие подсистемы: огни приближения, огни световых горизонтов, огни световых горизонтов прожекторного типа, огни концевой полосы безопасности, входные ограничительные огни, посадочные огни, глиссадные огни, осевые огни ВПП, огни зоны приземления, огни дистан-

ции, огни быстрого ухода с ВПП. В зависимости от МДВ в ОВИ-2 предусмотрена шестиступенчатая регулировка яркости огней.

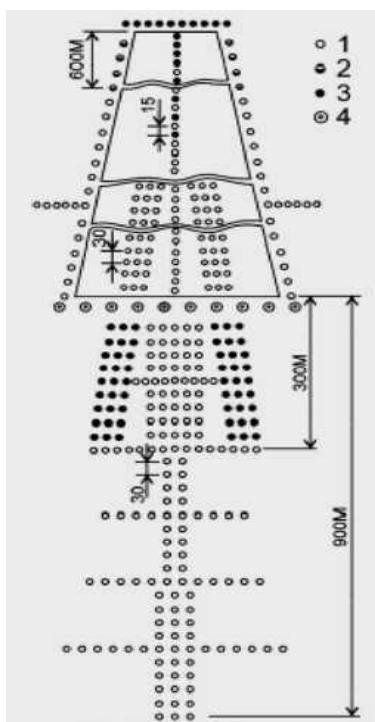


Рис. 41. Схема расположения огней в системе ОВИ-2

Управление огнями посадочного оборудования осуществляется диспетчером посадки (ДПСП), управление рулежным оборудованием-диспетчером руления и диспетчером СДП. В каждом аэропорту на основании инструкции летному и диспетчерскому составу по использованию системы огней высокой интенсивности и управлению ими, а также инструкции завода изготовителя составляется инструкция применительно к этому типу эксплуатируемого оборудования, которой и руководствуется диспетчерский состав при эксплуатации систем ОВИ.

Система ОВИ используется ночью и днем в широком диапазоне значений видимости. Она включается при ночных полетах — за 15 мин до захода солнца или до расчетного времени прибытия (вылета) воздушного судна; днем — при видимости 2000 м и менее; в других

В условиях категории III посадка самолетов не может обеспечиваться светосигнальными средствами, и здесь основную роль играют радиотехнические средства.

В настоящее время применяют три типа систем посадки: упрощенную, радиомаячную и радиолокационную.

Наземное оборудование такой системы (рис. 32) включает две приводные аэродромные радиостанции (ПАР), два или три маркерных радиомаяка (МРМ). КВ (или УКВ) радиопеленгатор (РП), связные командно-стартовые радиостанции (КСРС) и светотехническое оборудование. МРП и ПАР образуют дальний (ДП) и ближний (БП) приводы.

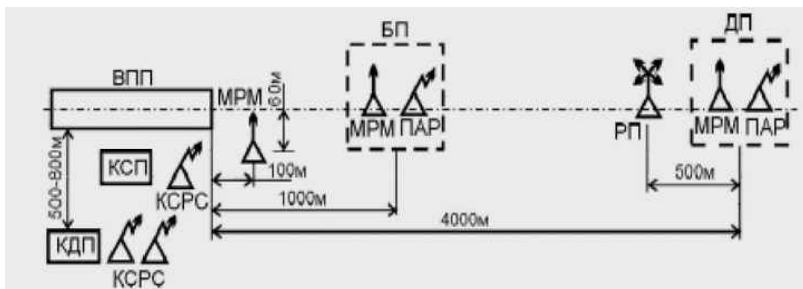


Рис. 42. Схема размещения наземного оборудования упрощенной системы посадки: БП — ближний приводной пункт;
РП — радиопеленгатор

В составе бортового оборудования используется связанная радиостанция, автоматический радиокомпас (АРК), радиовысотомер малых высот, радиоприемник сигналов маркерных радиомаяков (МРП) и пилотажно-навигационные приборы (компас, авиагоризонт, часы и др.). Работой системы управляют с командно-диспетчерского (КДП) или командно-стартового (КСП) пункта.

Экипаж самолета, подходящего к аэродрому, устанавливает

двустороннюю радиосвязь с руководителем полетов и, получив разрешение на посадку на данном аэродроме, сообщает ему о своем местоположении, высоте полета, количестве оставшегося горючего и т.п. Руководитель полетов информирует экипаж об условиях посадки (курс, высота полета в районе аэродрома, метеосостояние и др.).

С помощью АРК самолеты приводятся на приводную аэродромную радиостанцию ДПР, именуемую дальней приводной радиостанцией (ДПРС).

Наиболее точным, хотя и самым продолжительным способом захода на посадку, является построение большой «коробочки» (рис. 43). Момент полета над ДПРС фиксируется по сигналам маркерного маяка (два тире в секунду) и поворотом стрелки АРК на 180° .

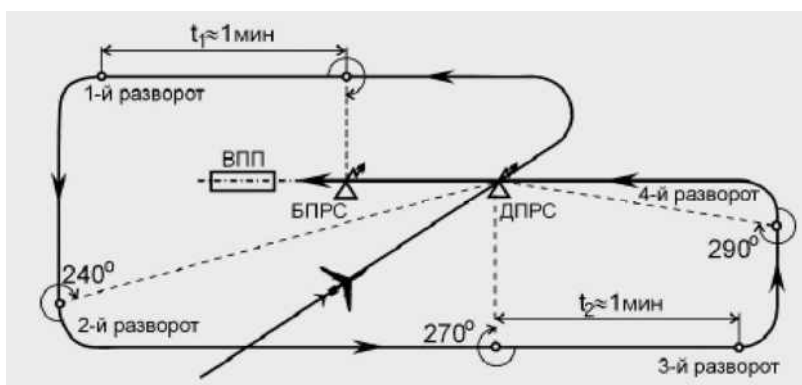


Рис. 33. Схема построения большой «коробочки» при заходе на посадку

После пролета ДПРС экипаж выводит самолет на заданный посадочный курс и летит параллельно ВПП. АРК переключается на волну ПАР БП, называемую ближней ПАР (БПРС). После пролета траверзы БПРС (КУР = 270°) экипаж продолжает полет тем же курсом в течение примерно 1 мин. После этого производится разворот на 90° и АРК переключается на волну ДПРС. Когда КУР ДПРС станет равным 240° , делается разворот на 90° и продолжается полет по новому курсу. При прохождении траверзы ДПРС (КУР = 270°) фиксируется время и примерно через 1 мин выполняется третий разворот на 90° , после чего полет продолжается до установления КУР ДПРС, равного 290° . В этот момент осуществляется четвертый разворот, после которого самолет выходит на курс посадки. С курсом посадки производится полет на

ДПРС и пробивание облачности. Правильность курса можно проверить, переключая АРК на БПРС; при этом стрелка АРК должна оставаться на нуле. К ДПРС самолет должен подойти на высоте $H_1 = 200$ м, что контролируется с помощью радиовысотомера. После этого АРК переключается на волну БПРС и продолжается дальнейшее снижение. В момент пролета БПРС (сигналы ближнего МРМ — шесть точек в секунду) высота должна быть $H_2 = 50\text{--}80$ м. Дальнейшее снижение осуществляется при визуальной ориентировке по наземному светотехническому оборудованию системы. Над маркерным радиомаяком (если он установлен), расположенным в 100 м от ВПП (рис. 43), самолет должен пролететь на высоте $H_3 = 15$ м.

Наземный РП служит для контроля положения самолетов относительно аэродрома и осуществляет расчет захода на посадку, например, при выходе из строя АРК. В последнем случае экипаж управляет самолетом по командам с земли. Упрощенная система посадки может использоваться при наличии горизонтальной видимости не менее 500–1000 м и высоте нижней кромки облаков не ниже 60–80 м. Пропускная способность системы — 15–20 самолетов в час. Контроль и управление движением самолетов во внешней зоне, в районе аэродрома, и при посадке, система не обеспечивает, что является ее существенным недостатком, так как не гарантируется безопасность полета при наличии большого количества самолетов в воздухе. Преимуществом упрощенной системы является простота оборудования, дающая возможность применять ее для любых типов самолетов и аэродромов.

5.3.2. Радиомаячная система посадки

Радиомаячная система посадки позволяет проводить посадку в более сложных метеоусловиях, чем упрощенная (высота нижней кромки облаков до 30 м и горизонтальная видимость до 400 м).

В состав радиомаячной системы входит оборудование упрощенной системы и дополнительно включается диспетчерское и радиомаячное оборудование. Примерами подобной системы являются отечественная система СП-50 и зарубежная ИЛС (ILS).

Диспетчерское оборудование содержит обзорный и диспетчерский радиолокаторы, УКВ радиопеленгатор, специальные вычислительные устройства и средства командной радиосвязи. С его помощью осуществляют наблюдение за воздушной обстановкой в районе аэродрома, а также управление и контроль за движением самолетов в районе аэродрома и на летном поле.

Радиомаячное оборудование содержит курсовой и глиссадный

радиомаяки, устанавливаемые на Земле, и соответствующие бортовые радиоприемники. Оно служит для указания экипажу линии планирования при посадке (в состав радиомаячного оборудования могут быть включены и маркерные радиомаяки, входящие в упрощенную систему посадки).

Курсовой радиомаяк (КРМ) создает равносигнальную плоскость, совпадающую с вертикальной плоскостью посадочного курса. КРМ устанавливают в 300–1000 м позади ВПП на ее оси.

Глиссадный радиомаяк (ГРМ) предназначен для указания экипажу плоскости планирования, с которой совпадает создаваемая радиомаяком равносигнальная плоскость. Его размещают обычно левее ВПП на расстоянии 100–150 м от ее оси (так, чтобы антенна маяка не мешала посадке) примерно на траверзе оптимальной точки приземления. Известны глиссадные радиомаяки с невыступающими антеннами, устанавливаемые непосредственно на оси ВПП.

Радиомаячная система обеспечивает снижение до высоты порядка 30–40 м. Дальнейшее снижение осуществляется визуально (с помощью светотехнической аппаратуры).

Пропускная способность радиомаячной системы примерно 30 самолетов в час.

Выходные сигналы курсового и глиссадного радиоприемников, пропорциональные угловым отклонениям центра тяжести летательного аппарата от линии планирования, могут быть использованы в качестве сигналов рассогласования при автоматизации процесса посадки.

5.3.3. Радиолокационная система посадки

В состав системы входит оборудование упрощенной системы, диспетчерское оборудование (такое же, как в радиомаячной системе) и посадочный радиолокатор.

При выполнении посадки положение самолета относительно линии планирования и ВПП измеряется посадочным радиолокатором, операторы которого определяют требуемый маневр самолета и передают команды управления экипажу по радиотелефонному каналу.

Посадочный радиолокатор работает в сантиметровом диапазоне волн и позволяет определить азимут, угол места и расстояние до самолета.

Азимут и угол места отсчитываются относительно оси ВПП и линии горизонта соответственно, а дальность — относительно оптимальной точки приземления. Система позволяет производить посадку

в таких же метеоусловиях, что и радиомаячная. Снижение с помощью посадочного радиолокатора осуществляется до высоты порядка 20–30 м, после чего требуется визуальная ориентировка. Пропускная способность системы — 15–20 самолетов в час. Она может быть повышена при автоматизации в радиолокаторе процессов съема координат самолета и передачи команд управления.

При определенных условиях для выполнения посадки могут быть использованы активные или пассивные бортовые РЛС, обеспечивающие возможность наблюдения на экране индикатора изображения ВПП.

5.4. Особенности использования и основные требования к РЛС-П

Радиолокационные станции посадки (РЛС-П) или, как они именуются в ряде документов, посадочные радиолокаторы (ПРЛ) являются частью радиотехнических средств обеспечения посадки (РТС ОП) наряду с радиомаячными системами посадки (РМСП). Маячная система обеспечивает получение на борту информации, необходимой для движения ВС по заданной линии посадки, а с помощью РЛС-П осуществляется наземный контроль за снижением ВС по линии курса (ЛК) и глиссады (ЛГ) путем определения удаления ВС от расчетной точки приземления (ТП) и его отклонений от ЛК и ЛГ. Измеренные диспетчером или автоматически значения удаления и отклонений передаются на борт ВС.

В документах ИКАО указывается, что наличие РЛС-П желательно во всех системах средств обеспечения посадки, однако их содержание и использование относительно дороги, и в ряде случаев состав РТСОП ограничивается только РМСП. РЛС-П является трехкоординатной станцией, осуществляющей обзор воздушного пространства (ВП) в зоне предпосадочного и посадочного маневров. Для оценки удаления ВС от ТП и отклонений от ЛК и ЛГ на ИУ станции строятся два изображения: курсовое и глиссадное.

К РЛС-П предъявляются высокие требования по разрешающей способности и точности определения удаления и отклонений ВС от ЛЗП. Поэтому для РЛС-П выбран сантиметровый диапазон радиоволн (около 3,2 см), в котором легче создаются узкие ДН (меньше 1°), необходимые для получения высокой разрешающей способности по углу. Этот диапазон волн позволяет создать антенны приемлемых габаритных размеров с относительно небольшой массой и организовать быстрое сканирование антенн для получения короткого времени обновления информации (1 с).

Существенный недостаток сантиметрового диапазона — довольно сильное поглощение энергии в осадках — в РЛС-П компенсируется сравнительно большой мощностью излучения (около 150 кВт), что достаточно, так как РЛС-П должны обеспечивать дальность действия 20–30 км. В сантиметровом диапазоне проще создать импульсы малой длительности (около 0,5 мкс), которые необходимы для получения высокой разрешающей способности по дальности и точности определения отклонений. Кроме того, в этом диапазоне волноводы канализации энергии также имеют небольшие габаритные размеры.

Высокая вероятность обнаружения сигналов, отраженных от ВС при значительных внутренних шумах, присущих сантиметровому диапазону, а также точность оценок отклонений ВС обеспечена значительным количеством импульсов в пачке отраженных сигналов, так как РЛС-П имеет высокую частоту повторения (около 2 кГц). Все указанные особенности позволили создать РЛС-П в относительно небольших габаритах. Это дало возможность разместить ее антенную и высокочастотную части вблизи ВПП.

По межведомственным нормам рекомендуется иметь как пассивный, так и активный режимы работы РЛС-П. В ГА используются РЛС-П, изготавливаемые фирмой «Tesla» (РП-3Ф, РП-3Г, РП-4Г и РП-5Г). Все эти РЛС-П работают только в пассивном режиме и создают прямоугольные изображения. В нашей стране эксплуатируются также РЛС с клиновидными изображениями (ранее ПРЛ-4, ПРЛ-5, ПРЛ-6, ныне ПРЛ-7 и ПРЛ-8), работающие в пассивном и активном режимах.

5.5. Отображение пространства на индикаторах РЛС-П

Отображение пространства в РЛС-П бывает двух видов: клиновидное и прямоугольное. При этом клиновидное отображение — с радиально-секторной разверткой луча ЭЛТ (рис. 44 а), прямоугольное — со строчно-кадровой разверткой (рис. 44 б). На клиновидном изображении ЛГ и ЛК отображаются прямыми линиями, на прямоугольном — кривыми параболической формы.

В первом случае пространство отображается в естественном, неискаженном виде, а при прямоугольном оно искажается. Однако при этом с уменьшением удаления ВС видимое на экране отклонение ВС от ЛГ и ЛК увеличивается, что обеспечивает большую точность определения отклонения, чем на клиновидном изображении.

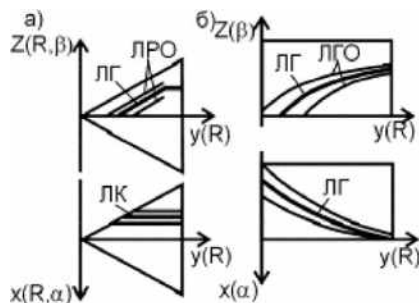


Рис. 44. Схемы клиновидных (а) и прямоугольных (б) изображений линий — глиссады, курса и равных отклонений

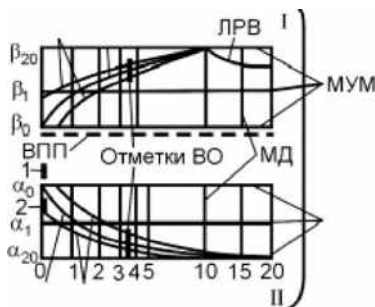


Рис. 45. Глиссадное (I) и курсовое (II) прямоугольные изображения.
1 и 2 — отметки от уголков

Искажению подвергаются все линии, не проходящие через точку расположения РЛС-П. Кроме ЛК и ЛГ, называемых также линиями заданного положения (ЛЗП), на экране (рис. 45) отображаются: линии равных высот ЛРВ, линии равных отклонений ЛРО от ЛК и ЛГ, необходимые для контроля посадочного маневра и оценки отклонений ВС, метки дальности МД для определения удаления ВС и метки азимутов α_0 , α_1 , α_{20} (МА) и углов места β_0 , β_1 , β_{20} (МУМ) для контроля правильности отображения местности на экране. Так как числовая оценка азимута ВС и угла места диспетчеру не нужна, то на вертикальных осях изображений эти величины отсутствуют. Дальность откладывается по горизонтальной оси изображения и может иметь линейный или нелинейный (обеспечивает большую точность оценки малых дальностей) масштабы. Для определения дальностей имеются метки — опорные через 5 км, основные через 1 км.

6. СИСТЕМЫ ВТОРИЧНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

6.1. Принципы построения и характеристики

Основной особенностью вторичной радиолокации является получение на КДП не только информации о местоположении ВС в пространстве наблюдения, но также сведений для опознавания ВС.

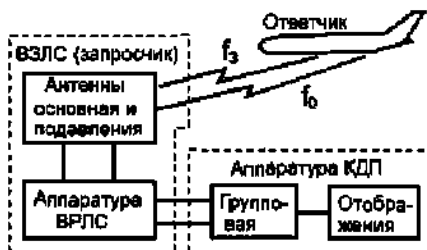


Рис. 46. Структурная схема системы вторичной радиолокации

Совокупность наземной вторичной РЛС (запросчика) и ответчика, установленного на ВС (рис. 46), называется системой вторичной радиолокации (СВРЛ).

Вторичные РЛС (ВРЛС) могут быть автономными и встроенными. Автономная ВРЛС является самостоятельным устройством, которое может работать самостоятельно либо совместно с ПРЛС. Их антенны вращаются синхронно и синфазно, а запросные посылки ВРЛС синхронизируются зондирующими сигналами ПРЛС, так как ВРЛС обычно имеет большую дальность действия. Встроенные ВРЛС конструктивно совмещены с ПРЛС и имеют некоторые общие устройства.

Обзорные ВРЛС подразделяются на аэродромные (с дальностью до 120 км), аэроузловые (до 200 км) и трассовые (до 400 км). Минимальная дальность должна быть $R_{\min} < 2$ км, угол обзора в вертикальной плоскости $0,5\text{--}45^\circ$. Ширина ДН $2,5\text{--}5^\circ$, уровень боковых лепестков на 22 дБ ниже основного. Разрешающая способность по дальности меньше 1 км, а по углу меньше 1,2 ширины ДН.

Существуют четыре режима функционирования СВРЛ: УВД, RBS, совмещенный RBS и УВД и УВД-М. Они отличаются друг от друга системами кодирования и создавались по различным нормам и рекомендациям: отечественным — УВД и международным (межведомственным) — RBS (Radar Beacon System). Отечественная система кодирования обеспечивает передачу большего количества информации

о состоянии ВС, однако необходимость в обеспечении международных полетов привела к созданию ответчиков, работающих как в режиме УВД, так и в режиме RBS, затем к введению режима RBS+УВД, обеспечивающего одновременное управление отечественными и зарубежными ВС. Кроме того, для перспективной бортовой и наземной аппаратуры СВРЛ вводится режим УВД-М, при котором ответные сигналы кодируются так, как принято в режиме УВД, а передаются на частоте, определенной для работы в режиме RBS. Это оказалось необходимо для освобождения от загрузки телевизионного диапазона частот 700–800 МГц и в некоторой степени упрощает бортовую аппаратуру.

Параметры РЛС и ответчика выбираются таким образом, чтобы $R_{maxo} = R_{max3}$. Это требование выполняется при условии: $P_3 P_{p.o.} = P_p P_{p.з.}$

6.2. Структуры и форматы сигналов

Рассмотрим структуру и форматы сигналов, передаваемых по каналам «Земля–борт–земля». Сигнал запроса ВРЛ построен на базе интервально-временного кода. На рис. 47а приведена эпюра сигналов запросного кода. Бортовой ответчик срабатывает при наличии на его входе первого и третьего импульсов (P_1 , P_3). Второй импульс P_2 используется для подавления ответов на запросы по боковым лепесткам в трехимпульсной системе подавления.

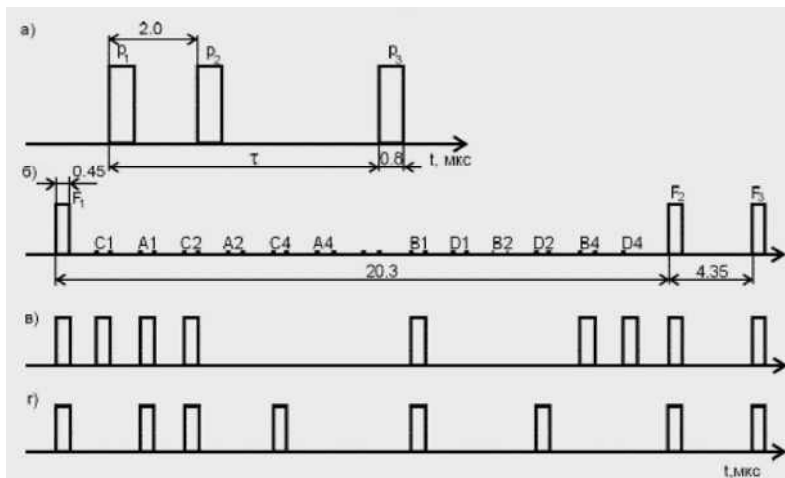


Рис. 47. Форматы запросных и ответных кодов ИКАО

При изменении кода меняется интервал между первым и третьим импульсами в соответствии с новым значением τ . Излучение запросных сигналов производится в любом сочетании кодов в порядке, установленном с помощью генератора режимов. Выбор последовательности чередования режимов запроса является сложной оптимизационной задачей, определяющей в общем случае качественные характеристики системы ВРЛ. Решая ее, стремятся обеспечить минимальную загрузку информационного канала «Земля–борт–земля» при постоянном расширении объема передаваемой информации, обеспечить отсутствие пропусков в координатных пакетах и совместимость существующих и новых ответчиков.

Отличие формата ответного кода ИКАО и УВД более существенно. Так по нормам ИКАО вся информационная посылка о бортовом номере или высоте передается группами импульса (A, B, C, D) по три импульса в каждой группе (12 кодовых позиций), расположенными во временном интервале $(20,3 \pm 0,1)$ мкс, ограниченном опорными импульсами F_1 и F_2 (рис. 47). Тринадцатая позиция, центральная, зарезервирована для использования в перспективных системах УВД. Через 4,35 мкс после импульса F_2 предусмотрена позиция для специального импульса опознавания SP1 (F_3). Таким образом, база информационного слова при кодировании по стандартам ИКАО составляет 20,3 мкс, что позволяет различать самолеты, разнесенные на 3 км по дальности.

6.3. Недостатки систем вторичной радиолокации

Системы ВРЛ имеют ряд серьезных недостатков, которые ограничивают развитие АС УВД. Основные следующие:

- невысокие точностные характеристики определения координат ВС;
- значительная (до 100 км) зона влияния боковых лепестков, обуславливающая большой уровень ложных сигналов и снижение вероятности получения информации при увеличении ИВД и числа запросчиков из наложения ответных кодов;
- влияние отражения от местных предметов на принимаемые сигналы;
- недостаточный объем информации, содержащейся в ответах;
- ограниченная разрешающая способность по информационному обмену;
- невысокая пропускная способность.

Последние два недостатка вызваны значительной перегрузкой приемных и обрабатывающих каналов запросчиков сигналами, так как

«Запрос» является общим для всех ВС, и ответные сигналы имеют относительно большую длительность, особенно в режиме УВД. При этом образуются весьма интенсивные внутрисистемные помехи, вызванные наложениями кодов, которые вызывают искажение информации из-за приема единиц на тех позициях, на которых двоичное число содержит нули или приводит к подавлению переданных в ответном сигнале единиц или нулей импульсами наложенных кодов. Условиями наложения ответных кодов являются нахождение нескольких ВС с ответчиками в пределах ДНА запросчика и расположение ВС на расстояниях друг от друга, соответствующих длительностям антенных посылок. Возможно также наложение запросных сигналов на входах приемников ответчиков в случае облучения пространства наблюдения несколькими запросчиками при высокой ИВД. Все это приводит к снижению вероятностных характеристик получения ответной информации: 0,8–0,9 вместо 0,95–0,99 в случае нахождения ВС на близких расстояниях друг от друга (5–30 км).

Наличие боковых лепестков у ДН антенны ВРЛС, по которым излучаются значительные мощности сигналов запроса, и неидеальная защита ответчика от приема этих сигналов, а также недостаточная защита от приема боковыми лепестками ДН антенны запросчика ответных кодов приводят к еще большему ухудшению достоверности приема ответной информации.

Радикальное устранение существенных недостатков СВРЛ будет осуществлено при внедрении дискретно-адресной ВРЛС (ДАС). Аналогичная зарубежная система обозначается DABS (Diskrete Adresa Beacon System). Основной принцип работы ДАС заключается в использовании индивидуальной адресации запроса и ответа, для чего всем ВС (ответчикам) присваиваются номера-адреса, а в сигналы запросов и ответов включаются адреса ответчиков ВС. При этом значительно уменьшается вероятность наложения кодов, так как поток ответных сигналов уменьшается в 10–20 раз. Следовательно, увеличивается пропускная способность ответного канала ВРЛС. Это позволяет увеличить объем передаваемой информации и использовать его для речевого обмена между диспетчером и экипажем ВС.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Краткое описание функций автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса (АМРК) «Метеоячейка»

Взаимодействие пользователя, абонента АМРК (руководителя полетов, радиометеоролога, синоптика-консультанта, синоптика-прогнозиста) с ПЭВМ осуществляется вводом команд.

Запуск

Запуск автоматизированного рабочего места (АРМ) осуществляется двойным щелчком левой клавишей мыши по ярлыку АРМ-АП на экране ПЭВМ. Выбор функций осуществляется нажатием левой клавишей мыши на соответствующем пункте меню или кнопке.

Используется многозадачный режим системы. При этом могут выполняться и другие функции системы. Прием метеоданных осуществляется в фоновом режиме.

Главное окно АРМ-АП

После загрузки на экран выводится окно АРМ-АП (рис. 1).

Главное окно АРМ-АП содержит следующие окна.

1. Карту метеоявлений (рис. 1).

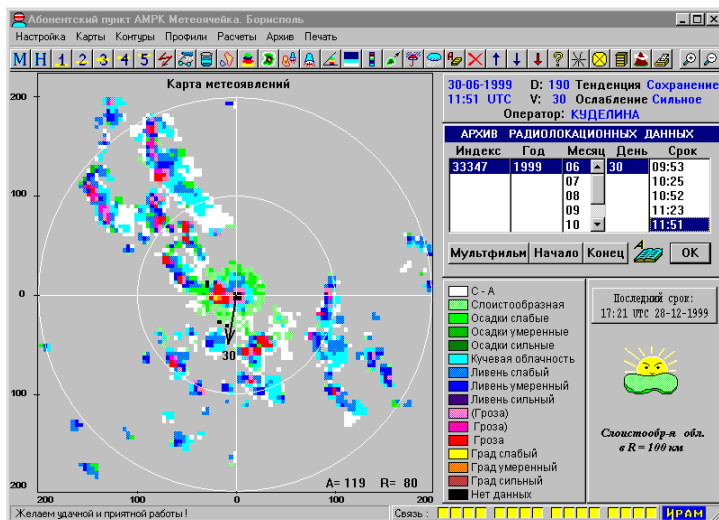


Рис. 1. Главное окно АРМ-АП

2. Окно визитка (рис. 2).
3. Окно с цветовой шкалой метеоявлений (рис. 3).
4. Окно — последний срок наблюдений (рис. 4).
5. Окно — связь (рис. 5).
6. Главное меню АРМ-АП (рис. 6).
7. Панель инструментов АРМ-АП (рис. 9).

Описание карты «Метеоявления»

Пример карты «Метеоявления» представлен в левой части рис.

1.1 в виде круга с соответствующей атрибутикой, а именно:

- ориентация карты по сторонам света соответствует ориентации географических карт;
- центр карты соответствует месту установки антенны МРЛ;
- внешняя окружность соответствует удалению от центра 200 км, то есть диаметр круга составляет 400 км; размер внешнего квадрата карты – 400х400 км;
- максимальное удаление метеоявлений от МРЛ варьируется от 200 км (в направлениях по меридиану — на С, Ю; по широте — на В, З) до 256 км (в направлениях по диагоналям квадрантов — на СВ, ЮВ, ЮЗ, СЗ);
- метеоявления отображаются на карте по дискретным квадратам площадью 4х4 км (в масштабе 200 км), различным цветом в соответствии с цветовой шкалой метеоявлений (рис. 3).

Окно «Визитка»

Окно визитка (рис. 2) содержит:

- дату наблюдений – 30-06-1999 г.;
- срок (время окончания) наблюдений АРМК Метеоячейка, *utc* – 11 ч 51 мин;

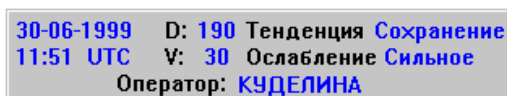


Рис. 2. Окно Визитка

- радиометеорологическое направление (куда перемещается) в градусах (1900) и скорость перемещения радиозо в км/ч (30 км/ч), значения которых указываются кратными 5;
- тенденцию изменения радиозо метеобъектов (начиная со второго обзора) между последовательными сроками наблюдений —

сохранение;

- условия наблюдений в радиусе 60 км от МРЛ, характеризующие степень ослабления радиолокационного сигнала — сильное;
- фамилию дежурного оператора АМРК Метеоячейка – Куделина.

Окно «Шкала метеоявлений»

Окно с цветовой шкалой метеоявлений представлено на рис. 3 и при выводе на экран карты, содержит следующие обозначения:

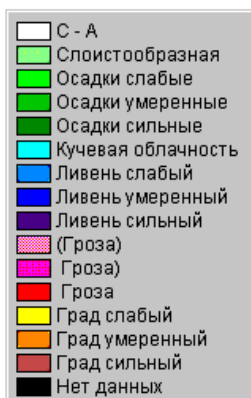


Рис. 3. Окно с цветовой шкалой метеоявлений

- С-А — слоистообразная облачность с нижней границей 1,0 км и более, без осадков;
- слоистообразная — слоистообразная облачность с нижней границей менее 1,0 км, без осадков;
- осадки слабые, осадки умеренные, осадки сильные — осадки из слоистообразной облачности слабой, умеренной и сильной интенсивности по радиолокационной оценке;
- кучевая облачность — конвективная облачность с нижней границей более 0,0 км, без осадков;
- ливень слабый, ливень умеренный, ливень сильный — осадки из конвективной облачности слабой, умеренной и сильной интенсивности по радиолокационной оценке: летом — 0,5 мм/ч; 3,0 мм/ч; 25,1 мм/ч соответственно; зимой — 0,02 мм/ч; 0,11 мм/ч; 1,1 мм/ч соответственно;
- (гроза), гроза, гроза — грозоопасные кучево-дождевые об-

лака с вероятностью совпадения с данными гидрометеорологических станций (ГМС) 30–70%, 70–80%, более 80% соответственно;

· град слабый, град умеренный, град сильный — градоопасные облака с вероятностью совпадения с данными ГМС 30–70%, 70–80%, более 80% соответственно.

Каждый цвет шкалы (при выводе на экран той или иной карты) будет соответствовать конкретному элементу метеорологической радиолокационной информации.

Отображение информации за последний срок

В правом нижнем углу карты при каждом обращении к информации АМРК, за любой срок наблюдений (текущий или из архива), отображается наиболее опасное явление (рис. 4) за последний срок наблюдений в радиусе 100 км от МРЛ.



Рис. 4. Окно — последний срок

Отображение каналов связи

Окно Связь с отображением состояния каналов связи с абонентами представлено на рис. 5.



Рис. 5. Окно — связь

Индикация реализована цветовым отображением состояния связи с данным абонентом в соответствующем этому абоненту окне — индикаторе связи. При этом:

- желтый цвет означает, что нет связи с абонентом (не включена ПЭВМ абонента, ПЭВМ абонента находится в нерабочем режиме и др.);

- зеленый – есть связь с абонентом;
- голубой – обмен данными;
- синий – конец обмена данными.

Главное меню АРМ-АП

Главное меню АРМ-АП (рис. 6) предназначено для реализации основных разделов программного обеспечения абонентского пункта АРМК Метеоячейка посредством списка функций (команд), открывающегося при активизации каждого из разделов.

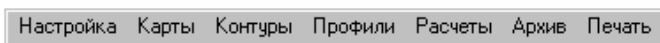


Рис. 6. Главное меню АРМ-АП

Для активизации любого раздела главного меню АРМ-АП и вывода на экран соответствующего каждому разделу списка (меню) требуется подвести указатель мыши к наименованию выбранного раздела (пункту меню) и кратковременно нажать на левую клавишу мыши, тогда на экране открывается список (меню) функций (команд).

Назначение устройств

Для размещения приложений, архивов данных, файлов связи, чтобы настроить работу приложений в зависимости от конфигурации ПЭВМ АП, предназначена функция — назначение устройств.

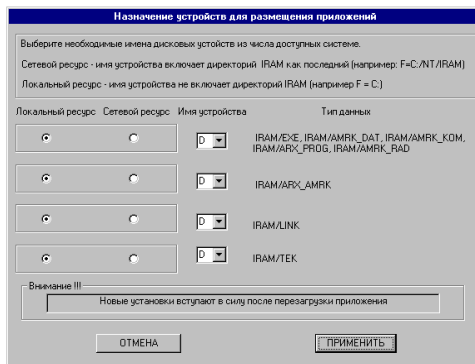


Рис. 7. Окно назначение устройств для размещения приложений

При активизации открывается окно назначение устройств для размещения приложений (рис. 7).

Выбор функций приложения

Для выбора оптимального набора функций для каждого приложения (АП АМРК) предназначена функция — выбор функций приложения. При её активизации открывается окно выбор рабочих функций приложения (рис. 8).

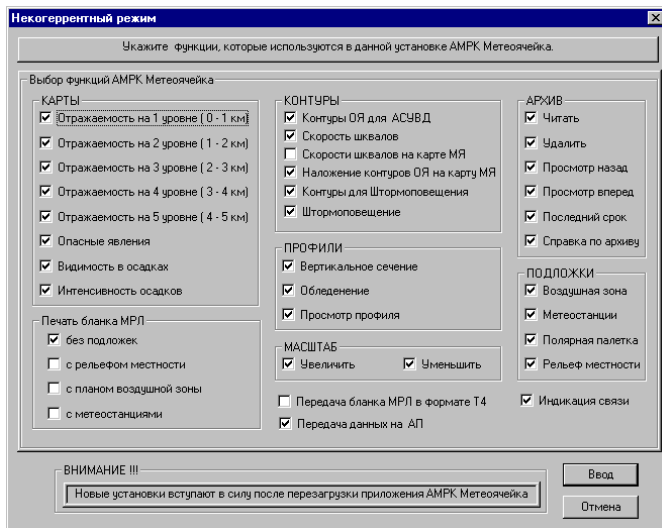


Рис. 8. Окно Выбор рабочих функций приложения

Функции, не установленные в окне выбор рабочих функций приложения, программным обеспечением АМРК не реализуются.

Панель инструментов АРМ-АП

Панель инструментов АРМ-АП (рис. 9), состоящая из кнопок с пиктограммами, предназначена для немедленного или с наименьшими затратами времени отображения любой карты или любой информации, предусмотренных СПО. Для вывода на экран ПЭВМ АП указанных данных требуется нажать левой клавишей мыши на кнопке с соответствующей пиктограммой.



Рис. 9. Панель инструментов АРМ-АП

Кнопки команд на панели инструментов

1.  Карта метеоявлений (рис. 1).
2.  Карта высот. Карта высоты (верхней границы) радиозвуха.
3.  Отражаемость в 1 слое (0-1 км). Карта отражаемости в слое 0,0-1,0 км.
4.  Отражаемость во 2 слое (0-2 км). Карта отражаемости в слое 1,0-2,0 км.
5.  Отражаемость в 3 слое (0-3 км). Карта отражаемости в слое 2,0-3,0 км.
6.  Отражаемость в 4 слое (0-4 км). Карта отражаемости в слое 3,0-4,0 км.
7.  Отражаемость в 5 слое (0-5 км). Карта отражаемости в слое 4,0-5,0 км.
8.  Опасные явления. Карта опасных явлений погоды.
9.  Видимость в осадках. Карта видимости в осадках.
11.  Интенсивность осадков. Карта интенсивности осадков.
12.  Контурь ОЯ для АС УВД. Карта контуров опасных явлений.
13.  Скорость шквалов. Карта скорости шквалов.
14.  Скорость шквалов 15 м/сек на карте метеоявлений. Карта метеоявлений с контурами шквалов со $V_{ш} = 15$ м/сек
15.  Наложение контуров на карту метеоявлений. Наложение карты контуров опасных явлений на карту метеоявлений.
16.  Контурь ОЯ для штормоповещения. Наложение карты контуров опасных явлений для штормоповещения на карту метеоявлений.

17.  *Штормоповещение*. Таблица штормоповещение (рис. 1.12).
18.  *Вертикальное сечение*. Многофункциональная карта вертикального сечения (рис. 11).
19.  *Обледенение*. Многофункциональная карта обледенения.
20.  *Просмотр профиля*. Окно вертикальный профиль с распределением отражаемости по 11-ти слоям.
21.  *Прогноз перемещения поля радиозха*. Карта прогноза поля радиозха (рис. 12).
22.  *Прогноз по метеостанциям*. Таблица инерционный прогноз ОЯП (рис. 13).
23.  *Расчет количества осадков*. Карта количества осадков (рис. 14).
24.  *Читать архив*. Окно — архив радиолокационных данных.
25.  *Удалить архив*. Происходит удаление отмеченных в архиве сроков наблюдений.
26.  *Предыдущий срок наблюдений*. Карта метеоявлений предыдущего срока наблюдений.
27.  *Следующий срок наблюдений*. Карта метеоявлений следующего срока наблюдений.
28.  *Последний срок наблюдений*. Карта метеоявлений последнего в архиве срока наблюдений.
29.  *Справка по архиву*. Окно — справка по архиву.
30.  *План воздушной зоны*. Наложение на карту (горизонтального сечения), выведенную на экран, подложки план воздушной зоны.

31.  *Полярная палетка.* Наложение на карту подложки полярная (азимутальная) палетка.
32.  *Метеостанции.* Наложение на карту подложки метеостанции (сеть ГМС штормового кольца).
33.  *Рельеф местности.* Наложение на карту подложки рельеф местности.
34.  *Печать бланка формы 2.* Распечатывание на принтере бланк-карты МРЛ.
35.  *Увеличить.* Исходная карта в увеличенном (укрупненном) на 50% масштабе.
36.  *Уменьшить.* Исходная карта в уменьшенном на 50% масштабе.

Вывод на экран таблицы «Штормоповещение»

Окно штормоповещение (рис. 10) содержит распределение ОЯ в радиусе 200 км от МРЛ с указанием направления и скорости перемещения, тенденции изменения поля радиоэхо, а также для каждого ОЯ:

- типа ОЯ и степени его опасности;
- высоты верхней границы радиоэхо (км);
- полярных координат ОЯ (азимут или сектор, удаление или диапазон расстояний);
- шквалистого усиления скорости ветра (15 м/с), связанного с ОЯ.

Окно штормоповещение выводится на экран или кнопкой  на панели инструментов АРМ-АП (рис. 9), или командой штормоповещение из меню контуры главного меню АРМ-АП (рис. 6).

В окне штормоповещение приводятся (рис. 10) следующие сведения:

- наименование пункта — Борисполь.
- срок наблюдений на АРМ-АП Метеоячейка — 11:51 *utc*.
- дата: 30-06-99 г.
- характеристики перемещения радиоэхо — перенос: радиометеорологическое направление перемещения радиоэхо (куда перемещается) — 190 гр, то есть радиоэхо перемещается в направлении на ЮЮЗ от МРЛ; скорость перемещения радиоэхо — 20 км/ч.

ШТОРМОПОВЕЩЕНИЕ				
Печать штормоповещения				
Борисполь 11:51 30-06-99				
перенос: 190 гр 30 км/ч тенденция: СОХРАНЕНИЕ				
очагов: града - 1, гроз - 7, слн.ливней - 0				
НО ЯВЛЕНИЕ	ВЫСОТА (км)	АЗИМУТ (гр) ВОКРУГ	УДАЛЕНИЕ (км)	ШКВАЛ (м/с)
1 ГРОЗА	13		0-200	17
2 ГРОЗА	9	85-121	80-97	-
3 ГРОЗА	11	141-176	45-90	19
4 ГРОЗА	10	198-229	85-106	17
5 ГРАД	13	256-270	16-24	17
6 (ГРОЗА)	7	112-120	147-177	-
7 ГРОЗА	9	133-136	133-144	-
8 ГРОЗА	10	299-308	147-192	17
НАД МРЛ в радиусе 8 км ОЯ				

Рис. 10. Окно штормоповещения

- тенденция изменения поля радиоэхо: Сохранение.
- количество очагов:
 - града – 1 – означает, что градоопасных очагов – один;
 - гроз – 7 – грозоопасных очагов – семь;
 - слн. ливней – 0 – очагов сильных ливневых осадков –

нет.

- графа № — номер ОЯ по порядку: от 1 до 8; при этом черта между 5 и 6 строками разделяет очаги, отмечаемые в радиусе 100 км (с номерами 1–5), от очагов, отмечаемых на расстояниях более 100 км (с номерами 6–8).

- графа явление – тип ОЯ; например, в строке 4: ГРОЗА – грозоопасные очаги с вероятностью совпадения с грозами, отмечаемыми ГМС, 80% и более.

- графа высота (км) – высота верхней границы радиоэха кучево-дождевого облака с ОЯ, в километрах: 10 км (в строке 4).

- графа азимут (гр) – азимут (относительно меридиана МРЛ), в котором отмечается ОЯ, в градусах: в секторе 198-2310 (в строке 4).

- графа удаление (км) – расстояние от МРЛ до ОЯ, в километрах: в диапазоне 85–106 км (в строке 4).

- графа шквал (м/с) – скорость шквала, связанного с данным ОЯ — 16 м/с.

Просмотр карт вертикального сечения

Карты вертикального сечения — данные АМРК в вертикаль-

ной плоскости на расстояниях 0–200 км. К ним относятся:

- вертикальное сечение — для вывода вертикального сечения радиоэхо в произвольном азимуте или в выбранном воздушном коридоре с распределениями метеоявлений и отражаемости метеообъектов (рис. 1.13);
- обледенение — для вывода распределения качественной оценки интенсивности обледенения в произвольном азимуте или в выбранном воздушном коридоре;
- профиль — для вывода вертикального профиля радиоэха в выбранном квадрате 4 на 4 км с указанием метеоявления; минимальной видимости в осадках на расстояниях 0–100 км, максимальной высоты верхней границы радиоэха, вертикального профиля отражаемости по 11 слоям.

Описание карты «Вертикальное сечение»

При выборе кнопки на экране появляется карта с вертикальным сечением радиоэхо метеообъектов (рис. 11). В рабочем поле карты вертикальное сечение приводятся следующие части (окна):

1. В левом верхнем углу — схема воздушных коридоров, где:
 - начало любого коридора — крестик в центре схемы (в месте установки МРЛ);
 - в конце каждого коридора нанесен его номер;
 - протяженность каждого коридора — 200 км;
 - трассы могут быть прямыми и ломанными).
2. В правом верхнем углу левой половины рабочего поля мелкомасштабная карта метеоявлений, на которой имеется движущийся радиус;
3. Слева в нижней части рабочего поля — вертикальное сечение радиоэхо и отражаемости метеообъектов по выбранному азимуту (вдоль выбранного радиуса), где:
 - на расстояниях от 0 до 200 км представлено распределение отражаемости метеообъектов: на высотах — от нижней до верхней границы радиоэхо; с дискретностью: по дальности — 4 км, по высоте — 1 км;
 - значения отражаемости отображаются цветовыми градациями, кратными 5 dBZ, приведенными в шкале отражаемости в правой нижней части экрана;
 - верхняя граница радиоэхо метеообъектов отображается с точностью 250 м, нижняя граница с точностью 1000 м.
4. Над вертикальным сечением — горизонтальная цветовая линейка распределения метеоявлений от 0 до 200 км от МРЛ, в кото-

рой каждому цвету соответствует явление из шкалы метеоявлений в правой нижней части экрана.

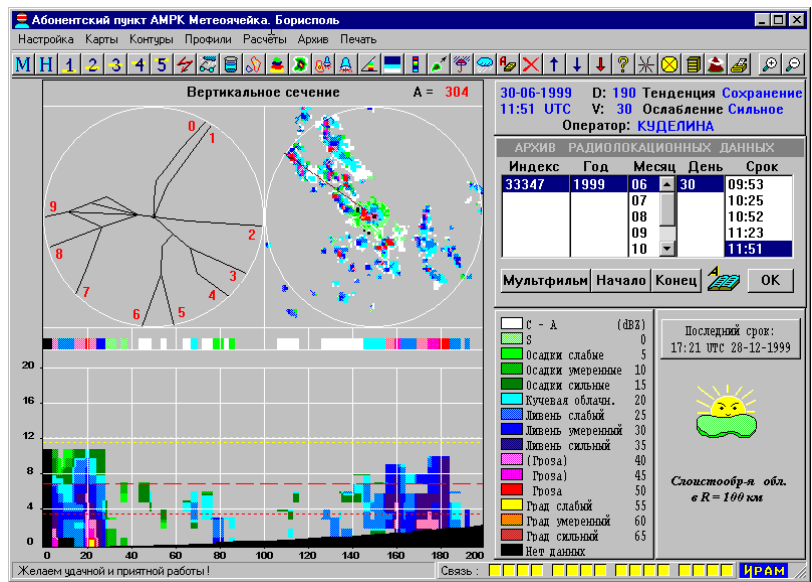


Рис. 11. Карта вертикальное сечение с линейкой распределения явлений по выбранному азимуту

Вывод инерционных прогнозов

К инерционным прогнозам, рассчитываемым на задаваемый период времени, относятся:

- прогноз поля радиоэхо – в виде карты ожидаемого местонахождения (перемещения) поля радиоэхо (рис. 12);
- инерционный прогноз ОЯП – в виде таблицы ожидаемых ОЯ для каждой ГМС ШК (рис. 13).

Расчет количества осадков

Расчет количества осадков выполняется за заданный период времени и отображается на экране в виде карты количества осадков.

Для вывода на экран карты Количество осадков требуется:

1. Вывести на экран окно Расчёт количества осадков. Для чего необходимо выбрать кнопку на панели инструментов.
2. В открывшемся окне установить время начала (срок) и время конца (срок) периода, за который должен выполняться расчёт.

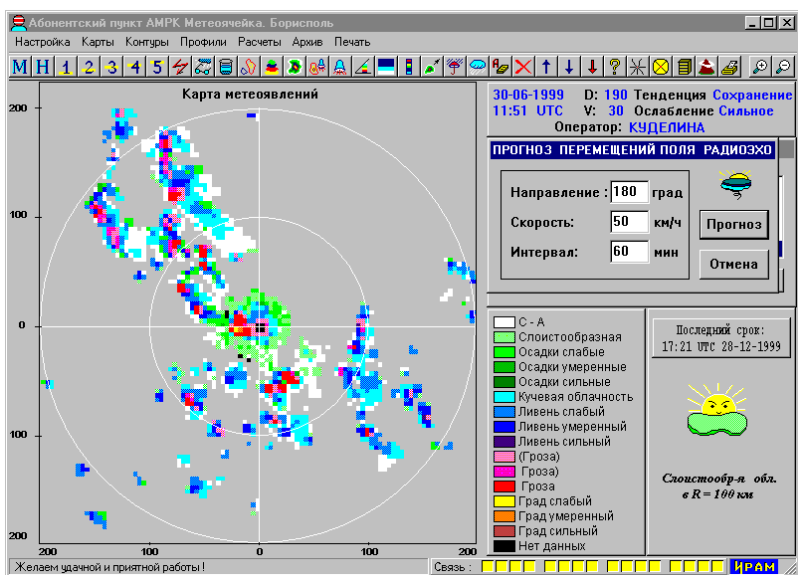


Рис. 12. Окно прогноза перемещения поля радиоэха

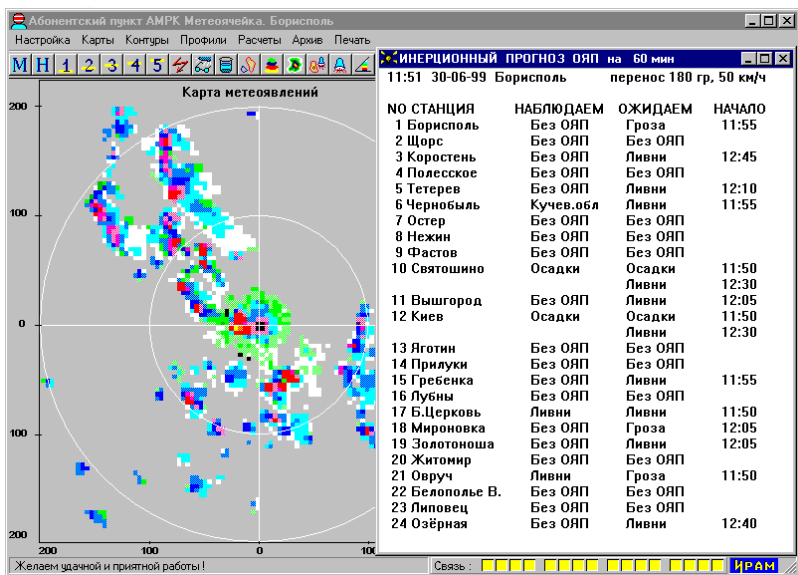


Рис. 13. Окно инерционный прогноз ОАП по ГМС
на фоне карты метеоявлений

3. Перемещаясь из одного окошка в другое, установить цифровыми клавишами: номер слоя по которому нужно рассчитать количество осадков; направление перемещения радиозэхо; скорость перемещения радиозэхо (при необходимости); период (в минутах), за который требуется выполнить расчет.

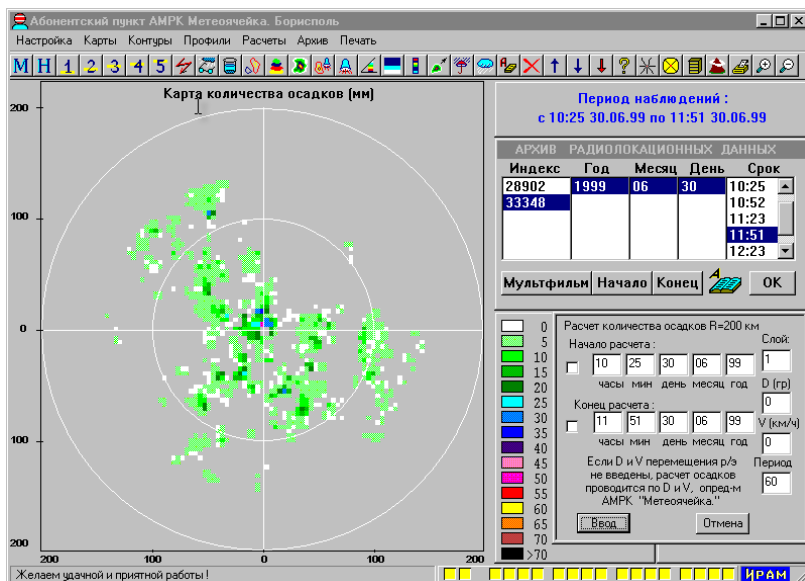


Рис. 14. Карта количества осадков с окном расчета

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.
- Базлова Т.А.* Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Т.А. Базлова, Н.В. Бочарников, Г.Б. Брылев, Л.И. Кузнецова и др. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 332 с.
- Бакулев П.А.* Радиолокационные и радионавигационные системы / П.А. Бакулев, А.А. Сосновский. М.: Радио и связь, 1994. 296 с.
- Баранов А.М.* Видимость в атмосфере и безопасность полетов / А.М. Баранов. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 206 с.
- Баранов А.М.* Авиационная метеорология / А.М. Баранов, О.Г. Богаткин, В.Ф. Говердовский, В.Д. Еникеева. С. Пб.: Гидрометеиздат, 1991. 345 с.
- Баранов А.М.* Авиационная метеорология / А.М. Баранов, С.В. Солонин. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 383 с.
- Баранов А.М.* Облака и безопасность полетов/ А.М. Баранов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 231 с.
- Бочарников Н.В.* Метеорологическое оборудование аэродромов и его эксплуатация / Н.В. Бочарников, Г.Б. Брылев, С.О. Гусев, В.П. Ковальков и др. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 592 с.
- Булгакова О.Ю.* Проблемы среднесрочного прогнозирования температуры воздуха и их решение на региональном уровне / О.Ю. Булгакова, Н.А. Калинин; Перм. ун-т. Пермь, 2005. 180 с.
- Васильев В.И.* Электронные промышленные устройства / В.И. Васильев, Ю.М. Гусев, В.Н. Миронов и др. М.: Высшая школа, 1988. 303 с.
- Верещак А.И.* Авиационное радиооборудование / А.И. Верещак, П.В. Олянюк. М.: Транспорт, 1996. 344 с.
- Городецкий О.А.* Метеорология, методы и технические средства наблюдений / О.А. Городецкий, И.И. Гуральник, В.В. Ларин. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 327 с.
- Евтихеев Н.Н.* Измерение электрических и неэлектрических величин / Н.Н. Евтихеев, А.Я. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугорое. М.: Энергоатомиздат, 1990. 350с.
- Качурин Л.Г.* Методы метеорологических измерений / Л.Г. Качурин. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 456 с.
- Коровин В.П.* Методы и средства гидрометеорологических измерений / В.П. Коровин, В.М. Тимец. СПб.: Гидрометеиздат, 2000.
- Крэкнелл А.П.* Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии / А.П. Крэкнелл. М.: Мир, 1984. 320 с.
- Кисилев В.Н.* Методы зондирования окружающей среды (ат-

мосферы) / В.Н. Кисилев, А.Д. Кузнецов. СПб.: РГГМУ, 2004. 429 с.

Кузнецов А.А. Радиолокационное оборудование автоматизированных систем управления воздушным движением / А.А. Кузнецов, А.И. Козлов, В.В. Криницын и др. М.: Транспорт, 1995. 344 с.

Матвеев Л.Т. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 778 с.

Мейсон Б.Д. Физика облаков / Б.Д. Мейсон Л.: Гидрометеиздат, 1961. 542 с.

Облака и облачная атмосфера: Справочник / Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.

Перевезенцев Л.Г. Радиолокационные системы аэропортов / Л.Г. Перевезенцев, В.Н. Огарков. М.: Транспорт, 1991. 360 с.

Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах / Под ред. Л.П. Афиногенова, Е.В. Романова Л.: Гидрометеиздат, 1981. 295 с.

Прэтт У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. М.: Мир. 1982. Т. 1. 310 с., Т. 2. 790 с.

Радиолокационные станции обзора Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радио и связь, 1983. 246 с.

Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 301 с.

Семенченко Б.А. Физическая метеорология / Б.А. Семенченко. М.: Аспект Пресс, 2002. 415 с.

Сменковский Е.Г. Автоматизация неустановившихся режимов полета самолетов / Е.Г. Сменковский. М.: Машиностроение, 1980. 138 с.

Толмачева Н.И. Основы метеорологических наблюдений / Н.И. Толмачева, Л.Н. Ермакова; Перм. ун-т. Пермь, 2005. 260 с.

Толмачева Н.И. Космические методы экологического мониторинга / Н.И. Толмачева, Л.С. Шкляева; Перм. ун-т. Пермь, 2006. 296 с.

Тучков Н.Т. Автоматизированные системы и радиоэлектронные средства управления воздушным движением / Н.Т. Тучков. М.: Транспорт, 1994. 368 с.

Ямпольский В.С. Основы автоматики и электронно-вычислительной техники / В.С. Ямпольский. М.: Просвещение, 1991. 223 с.

Учебное издание

Наталья Игоревна Толмачева

Ольга Юрьевна Булгакова

**МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАТОРЫ И
РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

Учебное пособие

Редактор *Л.Л. Савенкова*

Корректор *Л.И. Морскова*

Компьютерная верстка *Н.И. Толмачевой*

Подписано в печать 15.02.2007. Формат 60х84 1/16.

Усл. печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 7,8.

Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел Пермского университета
614990. Пермь, ул. Букирева, 15

Типография Пермского университета
614990. Пермь, ул. Букирева, 15