

## СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
ГЛАВА 7. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ .....	187
7.1 Общие сведения .....	187
7.1.1 Метеорологический радиолокатор .....	187
7.1.2 Характеристики радиолокаторов, термины и единицы измерения .....	188
7.1.3 Требования к точности измерений радиолокаторов .....	188
7.2 Принципы радиолокационного измерения .....	190
7.2.1 Импульсные радиолокаторы .....	190
7.2.2 Распространение радиолокационных сигналов .....	194
7.2.3 Ослабление в атмосфере .....	196
7.2.4 Рассеяние облаками и осадками .....	197
7.2.5 Рассеяние в безоблачной атмосфере .....	197
7.3 Уравнение радиолокации для целей при наблюдении за осадками .....	198
7.4 Система и данные основного метеорологического радиолокатора .....	200
7.4.1 Отражательная способность .....	200
7.4.2 Доплеровская скорость .....	202
7.4.3 Двойная поляризация .....	205
7.5 Обработка сигнала и данных .....	206
7.5.1 Доплеровский спектр .....	206
7.5.2 Оценка параметра мощности .....	206
7.5.3 Отражение от наземных объектов и точечные цели .....	207
7.5.4 Решение доплеровской дилеммы .....	210
7.6 Оптимизация характеристик радиолокатора .....	214
7.6.1 Выбор радиолокатора .....	214
7.6.2 Длина волны и ширина луча .....	215
7.6.3 Передатчики и мощность излучения .....	216
7.6.4 Длительность импульса .....	217
7.6.5 Частота повторения импульсов .....	217
7.6.6 Антенная подсистема .....	217
7.6.7 Подсветка .....	219
7.6.8 Стандартные характеристики метеорологических радиолокаторов .....	219
7.6.9 Стратегия радиолокационного сканирования по объему .....	219
7.6.10 Эксплуатационные характеристики радиолокатора .....	222
7.7 Обслуживание и калибровка .....	223
7.7.1 Обслуживание .....	223
7.7.2 Калибровка .....	224
7.8 Установка радиолокаторов .....	227
7.8.1 Выбор оптимального места .....	227
7.8.2 Обмен данными, организация сетей, база данных и обработка данных ..	229
7.9 Источники ошибки .....	230
7.10 Обзор метеорологических применений .....	239
7.10.1 Общее слежение за погодой .....	239
7.10.2 Обнаружение опасных явлений погоды и предупреждение о них .....	240
7.10.3 Прогнозирование текущей погоды .....	245
7.10.4 Оценка осадков .....	248
7.10.4.1 Вертикальный профиль отражаемости .....	248
7.10.4.2 Соотношение $Z-R$ .....	251
7.10.4.3 Корректировка осадкомеров .....	253
7.10.4.4 Методики измерения осадков с помощью радиолокаторов с двойной поляризацией .....	254
7.10.5 Оценка скорости ветра/составление карт ветров .....	257
7.10.5.1 Измерения профиля ветра .....	257
7.10.5.2 Характеристики конвективного ветра .....	258
7.10.5.3 Составление карты ветров .....	258
7.10.6 Инициализация и модели численного прогнозирования погоды .....	258
7.10.7 Оценка влажности .....	259
7.11 Метеорологическая продукция .....	259

Стр.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.А. РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ВМО ПО РАЗМЕЩЕНИЮ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ/ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ОБЩЕГО СПЕКТРА РАДИОЧАСТОТ .....	263
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.В. РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ВМО ПО ВЗАИМОСОГЛАСОВАННОМУ РАЗМЕЩЕНИЮ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК .....	265
СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	267

## **ГЛАВА 7. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

### **7.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Данная глава содержит общее описание метеорологических радиолокаторов. Особое внимание в ней уделяется техническим и оперативным характеристикам, которые должны учитываться при планировании, разработке и эксплуатации отдельных радиолокаторов и радиолокационных сетей, используемых в поддержку метеорологических и гидрологических служб. Это связано с использованием и применением данных метеорологических радиолокаторов. Радиолокаторы, используемые для получения вертикальных профилей ветра, рассматриваются в части II, глава 5.

#### **7.1.1 Метеорологический радиолокатор**

Метеорологические радиолокаторы предназначены, в первую очередь, для обнаружения осадков и связанных с ними метеорологических явлений. В то же время, метеорологический радар может обнаруживать другие объекты, такие как насекомые, птицы, самолеты, песок и пыль, отраженные сигналы от наземных объектов и даже колебания показателя преломления в атмосфере, которые образуются в результате локальных колебаний температуры или влажности.

В этой главе речь идет о радиолокаторах, предназначенных для обычного оперативного или близкого к оперативному использованию во всем мире. Метеорологические радиолокаторы с характеристиками, которые наилучшим образом подходят для наблюдений и исследований атмосферы, излучают электромагнитные импульсы в диапазоне частот 3–10 ГГц (длина волны 3–10 см, соответственно). В первую очередь, они предназначены для обнаружения и составления карт зон осадков, измерения их интенсивности и направления перемещения, а также определения их типа. Радиолокационные эхосигналы от птиц, насекомых или в результате отражения Брэгга (турбулентные колебания), могут также давать данные о радиальной скорости ветра с помощью доплеровского радиолокатора. Их распределения интенсивности могут выявлять расположение нижних слоев атмосферы, которые показывают области нижнего уровня конвергенции, где может произойти образование или развитие гроз.

Более высокие частоты (35 и 94 ГГц) используются для обнаружения гидрометеоров меньшего размера, таких как облако, туман, морось, слабый снег и осадки; эти частоты становятся преобладающими в научно-исследовательском сообществе. Эти частоты, как правило, не используются в оперативном прогнозировании из-за сильного ослабления радиолокационного сигнала средой, в которой он проходит, и их относительно малого радиуса действия, особенно в доплеровском режиме.

На более низких частотах (915–1 440 МГц, ~400–440 МГц и ~50 МГц) радиолокаторы способны обнаруживать неоднородности показателя преломления в безоблачной атмосфере, и используются для получения вертикальных профилей скорости ветра. Несмотря на то, что они могут обнаруживать осадки, их возможности сканирования ограничены размером и типом антенны, и они обычно показывают вертикальные или почти вертикальные профили скорости ветра.

Обратный сигнал, поступающий после отражения излучаемого импульса от любой цели, именуемый эхосигналом, имеет амплитуду, фазу и поляризацию. Амплитуда связана с распределением частиц по размеру и с их количеством в (импульсном) объеме, облучаемым радиолокационным лучом. Данная амплитуда используется для определения коэффициента отражения ( $Z$ ), который используется для оценки интенсивности осадков с помощью эмпирических соотношений. Важнейшим применением является мгновенное обнаружение, составление карт и оценка осадков на уровне земной поверхности в практически непрерывном режиме и над большими территориями.

Доплеровские радиолокаторы позволяют определять разность фаз между переданным и принятым импульсом, что является мерой средней радиальной скорости частиц. Это является отражаемостью, средневзвешенной по радиальным компонентам скоростей перемещения гидрометеоров в импульсном объеме. Ширина доплеровского спектра является мерой пространственной изменчивости доплеровских скоростей и обеспечивает измерение вариации радиальной скорости, которая интерпретируется в показатели сдвига ветра и турбулентности. Важной характеристикой доплеровского радиолокатора является его способность распознавать при обработке сигналов эхосигналы, образовавшиеся в результате отражения от наземных целей.

Современное поколение радиолокаторов обладает функцией поляризации. В процессе работы импульсы излучаются одновременно с горизонтальной и вертикальной поляризацией. В прошлом импульсы излучались последовательно, но требовали мощного переключателя поляризации, который был подвержен сбоям в работе. Два приемных устройства (физические или виртуальные) используются для измерения горизонтального и вертикального компонентов обратного сигнала. Главными выгодами являются более высокое качество данных благодаря способности идентифицировать характеристики цели (птицы, насекомые, осадки и их тип, радиолокационные помехи), классификация гидрометеоров и оценка осадков. Что касается прогностических применений, то благодаря двойной поляризации можно идентифицировать границу града и дождя-снега. Высокая интенсивность осадков затрагивает горизонтальную и вертикальную фазу излученных и принятых импульсов, и это можно использовать для оценки осадков даже при частично заблокированных лучах или ослабленных сигналах. Калибровку двойной поляризации можно осуществлять посредством независимо согласованных соотношений между параметрами.

Метеорологические радиолокаторы не функционируют более в автономном режиме. Учитывая существующие возможности в области телекоммуникации, осуществляется обмен данными, результатом чего является наличие сетей метеорологических радиолокаторов. Это позволило расширить сферу их использования для локальных применений (например, предупреждения о суровой погоде и прогнозирование текущей погоды), региональных применений (например, ассимиляция данных, оценка осадков) и глобальных применений (например, обнаружение изменения климата).

Современные метеорологические радиолокаторы должны иметь характеристики, ориентированные для получения наилучших данных для оперативных потребностей. Они являются самыми сложными из всех эксплуатируемых метеорологических измерительных средств и требуют специальной подготовки и обширных познаний об этом инструменте. Расположение радиолокатора является исключительно важным для удовлетворения потребностей, связанных с проведением наблюдений и обнаружения. Имеется широкий спектр вариантов конфигурации для подготовки радиолокатора к эксплуатации; компоненты должны быть должным образом установлены и контролироваться в плане их износа и сбоя в работе. Таким образом, для того чтобы этот прибор был постоянно полезным, требуется программа технического обслуживания и поддержки.

### 7.1.2 **Характеристики радиолокаторов, термины и единицы измерения**

Выбор характеристик радиолокатора определяется метеорологическими применениями (Таблицы 7.1, 7.2 и 7.3).

### 7.1.3 **Требования к точности измерений радиолокаторов**

Количественное использование данных радиолокаторов в применениях конечного пользователя зависит от точности и прецизионности радиолокационных наблюдений. Современные радиолокаторы, установленные должным образом, откалиброванные и регулярно обслуживаемые, являются относительно стабильными и не дают значительных погрешностей измерений благодаря стабильности приборного оборудования. В то же время, техническое обслуживание и калибровка радиолокатора до сих пор представляют

**Таблица 7.1. Радиолокационные частотные диапазоны**

Радиолокационный диапазон	Частота	Длина волны	Номинальная длина волны
UHF	300–1 000 МГц	1–0,3 м	70 см
L	1 000–2 000 МГц	0,3–0,15 м	20 см
S	2 000–4 000 МГц	15–7,5 см	10 см
C	4 000–8 000 МГц	7,5–3,75 см	5 см
X	8 000–12 500 МГц	3,75–2,4 см	3 см
K <sub>u</sub>	12,5–18 ГГц	2,4–1,66 см	1,50 см
K	18–26,5 ГГц	1,66–1,13 см	1,25 см
K <sub>a</sub>	26,5–40 ГГц	1,13–0,75 см	0,86 см
W	94 ГГц	0,30 см	0,30 см

**Таблица 7.2. Некоторые параметры и единицы измерения, используемые метеорологическими радиолокаторами**

Условное обозначение	Параметр	Единицы измерения
$Z_e$	Эквивалентный или эффективный коэффициент радиолокационной отражаемости	мм <sup>6</sup> ·м <sup>-3</sup> или дБZ
$V_r$	Средняя радиальная скорость	м·с <sup>-1</sup>
$\sigma_v$	Ширина спектра	м·с <sup>-1</sup>
$Z_{DR}$	Дифференциальная отражаемость	дБ
$K_{DP}$ $\varphi_{DP}$	Специальная дифференциальная фаза, дифференциальная фаза	Градус/км, градус
$\rho_{HV}$	Коэффициент корреляции	
LDR	Степень линейной деполяризации	дБ

собой существенную проблему и требуют наличия высококвалифицированного персонала. Погрешности измерений по-прежнему существуют и требуются инженерные и научные специальные знания для мониторинга, диагностики и уменьшения систематических ошибок.

Такие внешние факторы, как эффекты отражения от наземных объектов, аномальное распространение, эффекты ослабления и прохождения, влияние параметров луча, состав цели, особенно ее вариации и изменения по вертикали, неадекватности соотношения между интенсивностью и отражаемостью дождя, а также метеорологическая ситуация, вносят постороннюю информацию в данные, которая должна быть устранена во время обработки научных данных для их использования в количественных применениях. С учетом ошибок, относимых только на счет радиолокационной системы, измеряемые радиолокационные параметры можно определить с допустимой точностью (таблица 7.4).

Таблица 7.3. Физические радиолокационные параметры и единицы измерения

Условное обозначение	Параметр	Единицы измерения
$c$	Скорость света	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
$f$	Излучаемая частота	Гц
$f_d$	Доплеровский сдвиг частоты	Гц
$P_r$	Принимаемая мощность	мВт или дБм
$P_t$	Излучаемая мощность	кВт
ЧПИ	Частота повторения импульсов	Гц
$T$	Период повторения импульсов (= 1/ЧПИ)	мс
$\Omega$	Скорость вращения антенны	градус/с или об/мин
$\lambda$	Длина излучаемой волны	см
$\varphi$	Азимутальный угол	градус
$\theta$	Ширина диаграммы направленности на уровне половины мощности	градус
$\tau$	Длительность импульса	мкс
$\gamma$	Угол места	градус

Table 7.4. Accuracy requirements

Параметр	Определение	Допустимая точность <sup>а</sup>
$\varphi$	Азимут	0,1°
$\gamma$	Угол места	0,1°
$V_r$	Средняя доплеровская скорость	1,0 $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
$Z$	Коэффициент отражаемости	1 дБZ
$\sigma_v$	Ширина доплеровского спектра	1 $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
$Z_{DR}$	Дифференциальная отражательная способность	0,2 дБ
$K_{DP}$	Специальная дифференциальная фаза	< 0,5 град·км <sup>-1</sup>
$\rho_{HV}$	Корреляция перекрестной поляризации	0,001

Примечание:

- а Данные значения определены по отношению к нормальному гауссову спектру со стандартным отклонением менее  $4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Точность измерения скорости снижается при увеличении ширины спектра, а точность определения отражаемости повышается.

## 7.2 ПРИНЦИПЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ

### 7.2.1 Импульсные радиолокаторы

Принципы радиолокационных наблюдений за явлениями погоды были установлены в 1940-е годы. С тех пор сделаны огромные шаги в направлении улучшения оборудования, обработки сигналов и данных, а также их интерпретации. Для получения более подробной информации заинтересованному читателю следует ознакомиться с некоторыми другими соответствующими работами. Хорошими справочниками являются Skolnik (1970, 1990) по аспектам, связанным с конструкцией и оборудованием; Battan (1973) по метеорологическим явлениям и применениям; Atlas (1964, 1990), Sauvageot (1982) и ВМО (WMO, 1985) — общий обзор; Rinehart (2004) по вопросам перспективы для метеорологов;

Doviak и Zrnic (1993) по принципам и применениям доплеровских радиолокаторов; Bringi и Chandrasekar (2001) и Meischner (2003) по вопросам двойной поляризации. Существенное понимание вопросов, связанных с качеством радиолокаторов, их техническим обслуживанием, мониторингом и калибровкой приборного оборудования можно почерпнуть из материалов семинаров, посвященных RADCAL 2000 (Joe, 2001), RADCAL 2013 (Chandrasekar and Baldini, 2013) и RADMON 2010 (Joe, 2010). Краткое резюме этих принципов следует ниже.

На рисунке 7.1 показаны типовой радиолокатор и место установки радиолокатора. Антенна (2–8,5 м) находится внутри обтекателя наверху вышки высотой порядка 10–30 м или более. Вышка используется для того, чтобы поднять антенну выше местных препятствий. При определении высоты вышки следует учитывать растущие поблизости деревья. Слишком большая высота вышки приведет к значительно более сильному отражению от наземных объектов из-за стороны основного лепестка и боковых лепестков. В одном из зданий находится радарная электроника (передатчик/приемник и вычислительная техника), а в других размещаются источник бесперебойного питания (ИБП) и дизельный генератор. Радиолокаторы часто размещаются в сельской местности, и хорошее кондиционирование системы энергоснабжения часто не является нормой. ИБП играет исключительно важную роль в устранении перепадов напряжения и других аномалий энергоснабжения и является ключевым элементом для поддержания функционирования. Дизельный или другие виды генераторов могут функционировать в течение 2–3 дней, однако их технические характеристики следует определять в соответствии с потребностями. Следует отметить громоотвод, находящийся наверху обтекателя антенны РЛС, который соединен с кабелями заземления (не показаны). Это исключительно важно, поскольку молния может причинить серьезный и долгосрочный ущерб радиолокационным компонентам. Колебания мощности, вызванные молниями, могут превышать мощность ИБП. Следует отметить также красные сигнальные огни наверху обтекателя антенны, предназначенные для предупреждения летчиков.

Электромагнитные волны на выборных фиксированных частотах излучаются направленной антенной в атмосферу в виде высокочастотных коротких импульсов. Разрешение по дальности радиолокационных данных определяется длительностью импульсов и обработкой дальности. Одной из появляющихся технологий, применяемой



**Рисунок 7.1. Типовой метеорологический радиолокатор в составе канадской сети. Показаны основные физические компоненты радиолокационной системы. Высота вышки около 30 м с обтекателем, на котором установлены предупредительные световые сигналы и громоотвод.**

в оперативных радиолокаторах, является использование передатчиков низкой мощности (твердотельные, лампы бегущей волны), в которых используется метод, именуемый сжатием импульсов, когда применяется комбинация длительных импульсов низкой мощности, частотная модуляция и передовая обработка сигналов, с тем чтобы достичь высокое разрешение по дальности и высокую чувствительность, которые конкурируют с традиционными импульсными системами. Антенны с фазированной решеткой являются новейшей технологией, которая формирует луч посредством электронного сдвига фазы. Они обладают способностью направляться на разные места быстрым и непоследовательным образом. В то же время, все они используют направленный радиолуч, который может обеспечивать разрешение целей по дальности, азимуту и углу места.

На рисунке 7.2 показана направленная радиолокационная антенна, которая посылает импульсный луч электромагнитной энергии над поверхностью Земли и облучает различные цели, включая неметеорологические цели. Многие из физических ограничений, касающихся методик наблюдений, непосредственно очевидны из этого рисунка. Например: (i) имеется ограничение по минимальной высоте, на которой могут проводиться наблюдения на больших расстояниях, вызванное кривизной земной поверхности; (ii) имеются неметеорологические цели; (iii) имеются другие излучатели (локальные радиосети, Солнце); (iv) имеется аномальное прохождение луча; (v) имеется блокировка или частичная блокировка, создаваемая горами; (vi) имеются осадки разных типов; и (vii) имеются взаимодействия между электромагнитным излучением и осадками, результатом которых является усиление эхосигналов (яркая полоса), и т.д.

Параболический отражатель антенной системы фокусирует электромагнитную энергию в виде узконаправленного конусообразного луча. Линейная ширина луча увеличивается с расстоянием; например, номинальный луч с угловой шириной в  $1^\circ$  расходится на 0,9, 1,7 и 3,5 км на расстояниях 50, 100 и 200 км соответственно.

У импульсного радиолокатора высокочастотные импульсы электромагнитной энергии поглощаются и рассеиваются облучаемыми метеорологическими и неметеорологическими целями. Некоторая часть рассеянной энергии отражается обратно в направлении радиолокационной антенны и приемника. Поскольку электромагнитная волна распространяется со скоростью света (т.е.  $2,99 \times 10^8$  м·с<sup>-1</sup>), расстояние до цели может быть определено при помощи измерения интервала времени между излучением импульса и приемом отраженного сигнала. Между излучениями последовательных



**Рисунок 7.2. Метеорологический радиолокатор может обнаруживать многие объекты помимо метеорологических целей. На этой схеме показаны многие из этих характеристик. Знаки + или – показывают увеличение или уменьшение отражательной способности цели в результате этой характеристики. Эти артефакты необходимо удалять в случае количественных применений.**

импульсов приемник принимает любую отраженную волну. Отраженный от цели сигнал обычно называют радиолокационным эхо. Время между последовательными импульсами определяет максимальную однозначную дальность действия радиолокатора. Эхосигналы могут быть получены в то же время от целей, находящихся за пределами этого максимального расстояния, и они известны как эхо-сигналы с временем запаздывания, превышающем несколько периодов повторения зондирующих импульсов.

У радиолокатора со сжатием импульсов и частотной модуляцией расстояние до цели определяется частотой в пределах длительного импульса. В то же время, максимальное однозначное расстояние все же определяется интервалом времени между последовательными импульсами. При излучении длительных импульсов приемник радиолокатора защищается от большой мощности передаваемого импульсного сигнала и образуется значительная слепая зона (10–30 км, в зависимости от продолжительности импульса). В случае этого типа радиолокатора короткие импульсы (с соответствующими небольшими слепыми зонами, < 2 км) излучаются для выявления объектов, которые находятся в пределах этой слепой зоны.

Уравнение радиолокационной дальности соотносит мощность отраженного от цели сигнала с характеристиками радиолокатора. Мощность отраженного сигнала позволяет оценивать количество осадков в пределах разрешения радиолокатора. Эта оценка зависит от предположения о типе частиц осадков и их распределения по размеру в пределах разрешения радиолокатора.

Измерения мощности определяются общей мощностью обратного рассеяния целью в пределах объема, облучаемого в любой данный момент времени. Этот объем называется импульсным объемом или объемом излучения. Размеры импульсного объема (который определяет разрешение радара) зависят от пространственной протяженности радиолокационного импульса ( $h$ ) и ширины луча антенны в вертикальной ( $\phi_b$ ) и горизонтальной ( $\theta_b$ ) плоскостях. Ширина луча и, соответственно, импульсный объем возрастают с расстоянием. Поскольку энергия, которая возвращается к радиолокатору, проходит двойное расстояние, длина импульсного объема составляет только половину пространственной протяженности импульса ( $h/2$ ) и не изменяется с расстоянием. Местоположение импульсного объема в пространстве определяется положением антенны по азимуту, углом места, дальностью цели, а также нелинейной траекторией распространения луча радиолокатора в направлении от радиолокатора. У радиолокатора со сжатием импульсов импульсный объем, в первую очередь, определяется разрешением частотной модуляции и способностью принимающей системы обеспечивать разрешение изменений по частоте.

Частицы в пределах импульсного объема непрерывно перемещаются относительно друг друга. Это проявляется в интенсивности флуктуаций средней для целей интенсивности. Измерение интенсивности одного эхосигнала от метеорологической цели имеет небольшую значимость. Необходимо проинтегрировать по меньшей мере 25–30 импульсов для получения приемлемой оценки средней интенсивности, хотя это будет зависеть от уровня качества данных, которое считается приемлемым (Smith, 1995). Обычно это осуществлялось раньше электронным способом в схеме интегратора, однако в настоящее время это делается при помощи цифрового процессора сигналов. Помимо этого, для увеличения облучаемого объема и повышения точности оценки часто проводится осреднение импульсов по дальности, азимуту и времени за счет более грубого пространственного разрешения. Важное отличие от неметеорологических радиолокаторов заключается в том, что обработка сигналов и интерпретация данных основаны на предположении, согласно которому обратное отражение происходит от распределенной цели, а не от точечной цели (такой как самолет). Это требует обработки количественных данных измерений (а не просто обнаружения) и иной зависимости от данности уровня мощности отраженного сигнала (иное уравнение радиолокатора) по сравнению с радиолокаторами для обнаружения точечных целей (таких как радиолокаторы для управления воздушным движением).

Доплеровские радиолокаторы имеют электрическую схему для измерения разности сдвига по фазе последовательных импульсов из того же импульсного объема радара.

Сдвиг по фазе пропорционален длине волны радиолокатора и соответственно расстоянию в интервал времени между импульсами. Этот сдвиг по фазе используется для оценки радиальной или доплеровской скорости.

Радиолокатор с двойной поляризацией может быть нескольких видов. Поляризация может быть циркулярной, и, хотя этой характеристикой обладали прекрасные исследовательские радиолокаторы, она, как правило, не используется в метеорологической деятельности. Радиолокаторы с линейной двойной поляризацией могут направлять импульсы с горизонтальной и вертикальной поляризацией в меняющемся или синхронном режиме. В первом случае требуется наличие быстрого мощного переключателя (переключает каждый импульс), но он проблематичен и поэтому их функционирует лишь небольшое количество. В случае метода синхронного излучения и приема с двойной поляризацией (режим STAR) излучается равная мощность как в горизонтальной, так и вертикальной поляризациях, и прием сигнала осуществляется отдельно в горизонтальной и вертикальной поляризациях. Это оказалось решением проблемы эксплуатации, поскольку исключается использование мощного быстрого переключателя, характеризуемого высокой степенью неработоспособности. Существуют вариации этих методов создания сигнала с двойной поляризацией. Основное преимущество альтернативного режима двойной поляризации является то, что в этом режиме можно измерять обратное отражение от цели с использованием перекрестной поляризации (степень линейной деполяризации — СЛП), и это является особенно полезным для обнаружения яркой полосы. Главным недостатком режима STAR является потеря СЛП (поскольку уже имеется перекрестная поляризация в излучаемом импульсе), потеря 3 дБ силы сигнала в обоих каналах (из-за разделения мощности) и взаимосвязанных артефактов, особенно в фазе ледяных штормов.

### 7.2.2 Распространение радиолокационных сигналов

В однородной среде электромагнитные волны распространяются по прямым линиям. В то же время атмосфера вертикально стратифицирована, и лучи изменяют направление в зависимости от изменений в показателе преломления (который является функцией температуры и влажности). Когда волны встречаются на своем пути осадки и облака, то часть энергии поглощается, а часть энергии рассеивается во всех направлениях, в том числе и обратно в направлении радиолокатора.

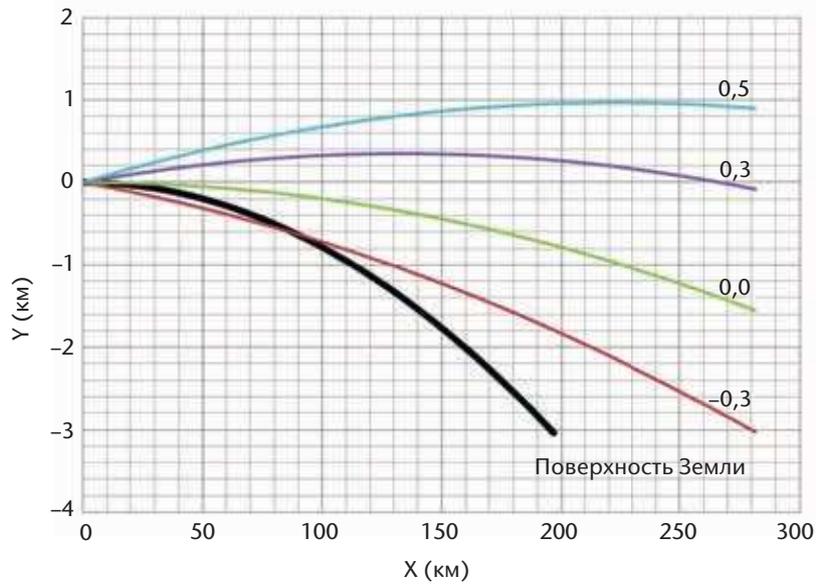
Величину отклонения электромагнитных волн можно прогнозировать, используя вертикальные профили температуры, влажности и давления (Bean and Dutton, 1966). В нормальных атмосферных условиях волны распространяются по кривой, слегка наклоняясь к земной поверхности (рисунок 7.3). Изображение показано в физическом пространстве (Земля изображена с радиусом в 6 371 км), и на рисунке показано, что луч отклоняется в нисходящем направлении, но в то же время поднимается по мере расстояния относительно поверхности Земли. В модели Земли в масштабе четыре третьих (4/3), где поверхность Земли изображена с радиусом в 8 975 км (4/3 x 6 371 км), лучи представляют собой прямые линии (рисунок 7.4).

Эта модель 4/3 применяется наиболее часто, однако некоторые радиолокаторы (вершина горы) используют модель 5/4. Высота над радиолокатором приводится в виде следующего уравнения:

$$h = \left[ r^2 + (k_e a)^2 + 2rk_e a \sin \theta_e \right]^{1/2} - k_e a \quad (7.1)$$

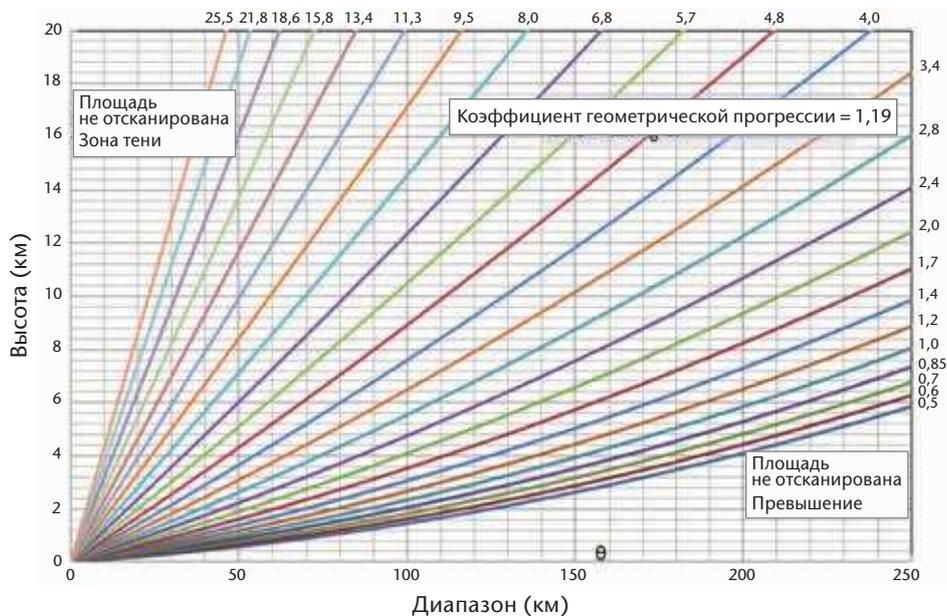
где  $h$  — это высота над антенной радиолокатора;  $r$  — расстояние вдоль луча;  $a$  — радиус Земли;  $e$  — угол подъема над горизонтом; и  $k_e a$  — эффективный радиус Земли.

Траектория луча может отклоняться либо вверх (отрицательная рефракция), либо больше к земной поверхности (сверхрефракция). В обоих случаях высота луча будет содержать ошибку, если используется допущение о стандартной атмосфере. Это явление известно, как аномальное распространение. С точки зрения измерения осадков самая большая проблема возникает в условиях супер-рефракции или «волноводного распространения»,



**Рисунок 7.3. Схематическая диаграмма высоты луча для отдельных углов возвышения (-0,3; 0; 0,3 и 0,5) над поверхностью Земли для стандартного индекса профиля рефракции в атмосфере, вычерченная в физическом пространстве с кривизной земной поверхности, эквивалентной радиусу Земли.**

когда луч может искривиться достаточно для того, чтобы коснуться земной поверхности и вызвать эхосигналы от нее, которые обычно не встречаются. Это явление происходит, когда показатель преломления резко уменьшается с высотой. Это случается при повышении температуры и уменьшении влажности с высотой. Эти эхосигналы должны исключаться при подготовке карты осадков. Случай отрицательной рефракции, когда



**Рисунок 7.4. Диаграмма высоты луча также является полезным инструментом для интерпретации радиолокационной продукции. Высота луча вычерчивается относительно плоской Земли, что является более традиционным представлением. Последовательность углов места — это последовательность, предложенная Маршаллом и Баллантайном (1978 г.) для получения оптимальной горизонтальной продукции (CAPPI's, верхние точки эхосигналов).**

траектория луча отличается от нормальной или отклоняется в верхнем направлении, не является очевидным для его установления и, соответственно, также является проблемой. В фактической практике вертикальный профиль показателя рефракции неизвестен, и поэтому точное местоположение луча неизвестно.

Некоторые эхосигналы от «ясного неба» возникают из-за турбулентных неоднородностей показателя преломления. Это встречается в зонах турбулентности, слоях повышенной стабильности, ячейках сдвига ветра или глубоких инверсиях (отражение Брэгга). Очертания этих эхосигналов по большей части распознаваемы, но не должны приниматься в качестве полей осадков (Gossard and Strauch, 1983).

### 7.2.3 Ослабление в атмосфере

Микроволны ослабляются вследствие их поглощения и рассеивания атмосферными газами, облаками и осадками.

#### Ослабление газами

Газы ослабляют микроволны в диапазонах 3–10 см. Поглощение атмосферными газами происходит, главным образом, молекулами водяного пара и кислорода. Ослабление водяным паром прямо пропорционально давлению и абсолютной влажности и почти линейно возрастает по мере понижения температуры. Концентрация кислорода до высот порядка 20 км является относительно однородной.

Ослабление газами незначительно изменяется в зависимости от климата и сезона. Оно является значительным для длин волн метеорологических радиолокаторов при больших дальностях и может составить 2–3 дБ на более длинных волнах и 3–4 дБ на более коротких волнах на расстоянии 200 км. Компенсацию можно весьма легко выполнять автоматически.

#### Ослабление гидрометеорами

Ослабление сигнала гидрометеорами может быть результатом как поглощения, так и рассеяния. Это самый значительный источник ослабления. Оно зависит от формы, размера, количества и состава частиц. Наличие подобной зависимости весьма затрудняет решение проблемы ослабления каким-либо количественным способом, используя только радиолокационные наблюдения, хотя достигнут значительный прогресс благодаря использованию радиолокаторов с двойной поляризацией.

Ослабление зависит от длины волны. На длинах волн порядка 10 см ослабление существует, но оно достаточно мало, в то время как на длинах волн в 3 см оно является весьма значительным. На длине волны 5 см ослабление может быть приемлемым для различных климатических условий, в особенности в высоких и средних широтах. Для достоверных измерений интенсивности осадков не рекомендуется использовать длины волн менее 5 см, за исключением применений на малых дальностях (таблица 7.5). Общее ослабление сигнала может происходить на 3 и 5 см. Радиолокаторы с меньшей длиной волн являются более чувствительными к ослаблению и коррекции ослабления, и большее значение для итоговых данных имеет количественная оценка осадков, основанная на измерениях специальной дифференциальной фазы с двойной поляризацией. Эти методы являются эффективными, начиная с более низких значений интенсивности осадков для меньших длин волн.

В отношении оценок осадков с помощью радиолокатора можно высказать несколько общих соображений, связанных с величиной ослабления. Ослабление зависит от массы воды в цели, таким образом, более сильные дожди ослабляют сигнал больше; облака с гораздо меньшей массой ослабляют сигнал меньше. Ледяные кристаллы вносят значительно меньшее ослабление в сравнении с жидкими частицами. Облака и ледяные облака вызывают небольшое ослабление и обычно его можно не принимать в расчет.

**Таблица 7.5. Соотношения ослабления при прямолинейном распространении луча**

Длина волны (см)	Соотношение (дБ км <sup>-1</sup> )
10	0,000 343 R <sup>0,97</sup>
5	0,00 18 R <sup>1,05</sup>
3,2	0,01 R <sup>1,21</sup>

Примечание: По Burrows and Attwood (1949).  
 Принятое ослабление при прямолинейном распространении луча при температуре 18 °С.  
 R — в единицах мм·ч<sup>-1</sup>.

Снежинки или ледяные кристаллы (либо градины) могут достигать гораздо большего размера, чем капли дождя. Они становятся влажными по мере таяния, в результате чего сильно увеличиваются их отражаемость и, следовательно, ослабляющие свойства. Это обстоятельство может исказить оценки осадков.

### 7.2.4 Рассеяние облаками и осадками

Мощность эхосигнала, обнаруживаемого и обрабатываемого радиолокатором, является мощностью волны обратного рассеяния целями в объеме разрешения (гидрометеоры, наземная поверхность, деревья и т. д.). Эффективная площадь обратного рассеяния ( $\sigma_b$ ) определяется как площадь изотропного отражателя, который возвращает в направлении излучателя такое же количество энергии, что и фактическая цель. Эффективная площадь обратного рассеяния сферических частиц была впервые определена Мие (1908). Рэлей обнаружил, что если соотношение диаметра части к длине волны является равным или меньше 0,06, то для определения эффективной площади обратного рассеяния может быть использовано простое выражение:

$$\sigma_b = \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4} \tag{7.2}$$

которое является основой для уравнения 7.3.  $|K|^2$  — коэффициент преломления, равный 0,93 для жидкой воды и 0,197 для льда.

Измерения мощности радиолокатора применяются для расчета интенсивности рассеяния целью с использованием уравнения 7.2 в форме:

$$z = \frac{C \bar{P}_r r^2}{|K|^2} \tag{7.3}$$

Метод и трудности приведения коэффициента преломления к величине интенсивности осадков (R) описываются в разделе 7.10.

### 7.2.5 Рассеяние в безоблачной атмосфере

В регионах без осадкообразующих облаков было обнаружено, что эхосигналы обусловлены, главным образом, отражением от насекомых или большими градиентами показателя преломления в атмосфере (рассеяние Брэгга). Эхосигналы имеют низкую интенсивность и определяются большинством современных радиолокаторов, если они не исключаются посредством пороговой фильтрации данных. Значения, эквивалентные  $Z_{et}$  для явлений в безоблачной атмосфере, как правило находятся в диапазоне от -55 до -5 дБZ, хотя они и не являются истинными параметрами Z; при этом физические процессы, порождающие эхосигналы, совершенно различны. Для измерения осадков такие эхосигналы являются «шумом» в сигнале. Однако обычно они могут быть связаны с некоторыми метеорологическими явлениями, такими как морской бриз или отток воздуха из зоны грозы, и поэтому они полезны для идентификации областей потенциального

Таблица 7.6. Эффективные площади обратного рассеяния для различных целей

Объект	$\sigma_b$ (м <sup>2</sup> )
Воздушное судно	10–1 000
Человек	0,14–1,05
Шар-зонд	0,01
Птицы	0,001–0,01
Пчелы, стрекозы, мотыльки	$3 \times 10^{-6} - 10^{-5}$
Капли воды диаметром 2 мм	$1,8 \times 10^{-10}$

возникновения конвекции. Эхосигналы в безоблачной атмосфере также могут быть связаны с очень малыми скоплениями птиц и насекомых. Не является редкой мощностью эхосигналов от 5 до 35 дБZ, особенно в периоды миграций (таблица 7.6).

Хотя обычная радиолокационная обработка интерпретирует сигнал в значениях  $Z$ , рассеивающие свойства флуктуации показателя преломления существенно отличаются от соответствующих свойств гидрометеоров. Это явление известно также как рассеяние Брэгга. Рассеяние чаще всего выражается в значениях структурного параметра показателя преломления  $Cn^2$ . Это мера среднеквадратических флуктуаций показателя преломления как функции расстояния (Gossard and Strauch, 1983).

### 7.3 УРАВНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗА ОСАДКАМИ

Метеорологические цели представляют собой частицы льда и/или воды, свободно распределенных в пространстве. Энергия обратного рассеяния от объема цели зависит от количества, размера, состава, относительного расположения, формы и ориентации рассеивающих частиц. Общая энергия обратного рассеяния представляет собой сумму значений энергии обратного рассеяния каждой из рассеивающих частиц.

Используя данную модель цели и теорию электромагнетизма, Probert-Jones (1962 г.) вывел уравнение, связывающее мощность эхосигнала, полученного радиолокатором, с параметрами радиолокатора, расстоянием до целей и характеристиками рассеяния. Оно является общепринятым в качестве достоверного соотношения и обеспечивает количественный расчет отражаемости с высокой точностью и учетом реальных допущений, и имеет вид:

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \cdot \frac{P_t h G^2 \theta_b \phi_b}{\lambda^2} \cdot \frac{|K|^2 10^{-18} Z}{r^2} \quad (7.4)$$

где  $\bar{P}_r$  — принятая обратно радиолокатором мощность, осредненная по нескольким импульсам, в ваттах;  $P_t$  — пиковая мощность импульса, излучаемого радиолокатором, в ваттах;  $h$  — пространственная протяженность импульса, в метрах ( $h = c\tau/2$ , где  $c$  — скорость света и  $\tau$  — длительность импульса);  $G$  — коэффициент направленного действия антенны по отношению к изотропному излучателю;  $\theta_b$  и  $\phi_b$  — ширина диаграммы направленности антенны соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях на уровне  $-3$  дБ при передаче в одном направлении, в радианах;  $\lambda$  — длина излучаемой волны, в метрах;  $|K|^2$  — коэффициент показателя преломления цели;  $r$  — наклонная дальность от радиолокатора до цели, в метрах; и  $Z$  — коэффициент преломления радиолокатора (обычно принимаемый равным коэффициенту отражаемости  $Z_e$ , когда характеристики цели достоверно неизвестны), в мм<sup>6</sup>·м<sup>-3</sup>.

Второй член уравнения содержит параметры радиолокатора, а третий — параметры, зависящие от дальности и характеристик цели. Параметры радиолокатора являются

относительно фиксированными, и если при работе передатчика поддерживается постоянная выходная мощность (как это и должно быть), то уравнение можно упростить следующим образом:

$$\bar{P}_r = \frac{C|K|^2 Z}{r^2} \quad (7.5)$$

где  $C$  — константа радиолокатора.

Имеется ряд основных допущений, неизбежных при выводе уравнения, значимость которых зависит от конкретного применения и интерпретации результатов. Несмотря на то, что они являются достаточно реалистичными, условия не всегда соответствуют действительности, что при особых условиях будет влиять на результаты измерений (Aoyagi and Kodaira, 1995).

Эти допущения резюмируются следующим образом:

- a) частицы осадков, на которых происходит рассеяние в объеме цели, являются однородными диэлектрическими сферами, диаметры которых малы по сравнению с длиной волны, т.е.  $D < 0,06 \lambda$  для строгого применения аппроксимаций рассеяния Рэлея;
- b) весь импульсный объем заполнен свободно распределенными частицами осадков;
- c) коэффициент отражения  $Z$  является однородным по всему облучаемому импульсному объему и приблизительно постоянным в течение интервала зондирования;
- d) все частицы являются каплями воды или ледяными кристаллами, т.е. все частицы имеют одинаковый коэффициент показателя преломления  $|K|^2$ , и рассеяние энергии частицами является изотропным;
- e) многократное рассеяние (между частицами) пренебрежимо мало;
- f) в промежуточной среде между радиолокатором и объемом цели не происходит никакого ослабления;
- g) радиолокатор использует линейные поляризации (в основном,  $H$  или  $V$ );
- h) основной лепесток диаграммы направленности антенны имеет гауссову форму;
- i) коэффициент направленного действия антенны радиолокатора известен или может быть вычислен с достаточной точностью;
- j) вклад боковых лепестков диаграммы направленности антенны в принимаемую мощность пренебрежимо мал;
- k) затенение излучаемого сигнала отражениями от наземных объектов на пути луча пренебрежимо мало;
- l) пиковая излучаемая мощность ( $P_p$ ) является фактической мощностью, излучаемой антенной, т.е. учтены все потери в волноводах и т.д., а также ослабление в обтекателе антенны;
- m) средняя измеряемая мощность ( $P_r$ ) осредняется по достаточному числу импульсов или независимых измерений для репрезентативности среднего по импульсному объему цели.

Это упрощенное выражение связывает мощность эхосигнала, измеренную радиолокатором, с коэффициентом преломления радиолокатора  $Z$ , который, в свою очередь, связан с интенсивностью осадков. Эти коэффициенты и их взаимосвязь являются

исключительно важными для интерпретации энергии, отраженной от цели, и для оценки количества осадков по данным радиолокационных измерений. Несмотря на многие допущения, данное выражение обеспечивает приемлемую оценку массы осадков. Эта оценка может быть улучшена дополнительным учетом факторов, принятых в допущениях.

#### 7.4 СИСТЕМА И ДАННЫЕ ОСНОВНОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА

Базовый метеорологический радиолокатор состоит из следующих элементов:

- a) антенна для фокусирования излучаемых микроволн в узкий луч и приема отраженной энергии;
- b) вышка для поднятия антенны над близлежащими препятствиями;
- c) передатчик для излучения энергии в микроволновом частотном диапазоне и модулятора, создающего импульсы и пульсацию;
- d) приемник для обнаружения, усиления и преобразования микроволнового сигнала в низкочастотный сигнал;
- e) процессор сигнала для извлечения полезной информации из полученного сигнала;
- f) система управления радиолокатором и обработки данных в переменные значения радиолокатора;
- g) система отображения данных для визуализации информации в доступной форме;
- h) система регистрации для архивации данных в целях их использования для обучения, исследования и систематизации.

Базовый метеорологический радиолокатор может быть некогерентным (например, магнетронный передатчик или генератор мощности), т.е. фаза последовательно излучаемых импульсов является случайной. Доплеровские измерения могут производиться в том случае, если фаза излученного импульса измеряется и обратный сигнал обрабатывается по отношению к этой фазе. Это известно под названием когерентного на приеме доплеровского радиолокатора. Когерентный на передаче радиолокатор (например, клистрон, усилитель мощности, твердотельный передатчик или передатчик на лампе бегущей волны) излучает каждый импульс в одинаковой фазе. Мощность, излучаемая метеорологическим радиолокатором, обычно составляет от нескольких сотен киловатт до мегаватта пиковой мощности, сконцентрированной в импульсе длительностью в микросекунду, при этом средняя мощность обычно равна нескольким сотням ватт. Твердотельные передатчики или передатчики на лампе бегущей волны излучают импульс гораздо меньшей мощности, однако в качестве компенсации они используют длинные импульсы.

##### 7.4.1 Отражательная способность

Мощность обратного рассеяния типичного радиолокатора имеет порядок от  $10^{-8}$  до  $10^{-15}$  Вт, охватывая диапазон около 70 дБ от самых сильных до самых слабых целей, которые можно обнаружить. По сравнению с мощностью передатчика эта величина меньшая, более чем на 20 порядков. Для одновременного измерения самых слабых и самых сильных сигналов требуются приемники с широкими динамическими диапазонами (> 90 дБ), и в настоящее время они являются общедоступными (Heiss et al., 1990; Keeler et al., 1995). В прошлом для измерений отражательной способности использовались логарифмические приемники с динамическим диапазоном в 90 дБ. Для доплеровских

измерений необходимы линейные приемники (которые поддерживают линейность фазы). В прошлом они имели ограниченный динамический диапазон (40–50 дБ), что требовало автоматической регулировки усиления.

Коэффициент отражаемости является самым важным параметром для интерпретации радиолокационных данных. Этот коэффициент выводится из модели рассеяния Рэля и теоретически определяется как сумма диаметров частиц (капель), возведенных в шестую степень, в облучаемом объеме:

$$Z = \sum_{\text{vol}} N(D) D^6 \quad (7.6)$$

где единица измерения  $Z$  —  $\text{мм}^6 \cdot \text{м}^{-3}$ . Во многих случаях, когда количество частиц, их состав и форма неизвестны, определяется эквивалентный или эффективный коэффициент отражаемости  $Z_e$ . Например, частицы снега и льда должны описываться эквивалентным  $Z_e$ , который равен  $Z$ , при допущении о том, что все частицы обратного рассеяния являются сферическими каплями с плотностью  $\rho$ .

Интенсивность дождевых осадков выражается формулой:

$$R = \sum_{\text{vol}} N(D) V_T \rho \pi / 6 D^3 \quad (7.7)$$

Однако значение  $N(D)$  неизвестно, и были выведены эмпирические соотношения между  $Z$  и  $R$ ; наиболее известным соотношением является соотношение Маршалла-Палмера:

$$Z = 200R^{1.6} \quad (7.8)$$

В целях охвата диапазона значений общепринятой практикой является работа с логарифмической шкалой или единицами дБZ, которые численно определяются как  $\text{dBZ}_e = 10 \log_{10} Z_e$ .

Пространственные наблюдения за атмосферой обычно проводятся при помощи сканирования антенной при фиксированном угле места с последующим его увеличением при каждом обороте. Важным аспектом является разрешение целей. Для фокусировки волн в луч конической формы или гауссову форму используются антенны с параболическим отражателем или фазированной решеткой (при помощи сдвига фаз). Более широкие отражатели создают более узкие лучи, имеют более высокое разрешение и чувствительность при более высоких затратах. Ширина диаграммы направленности антенны, часто определяемая по уровню половинной мощности, равна половине мощности на оси, зависит от длины волны и может быть аппроксимирована по формуле:

$$\theta_e = \frac{70\lambda}{d} \quad (7.9)$$

где единицы измерения для  $\theta_e$  — градусы;  $d$  — диаметр антенны в тех же единицах, что и  $\lambda$ . Современные метеорологические радиолокаторы имеют ширину диаграммы направленности антенны  $0,5^\circ$ – $1^\circ$ . Однако лучи с большей шириной практически используются для применений на малых дальностях.

Полезная дальность действия метеорологических радиолокаторов зависит от вида применения и характера погоды. В зависимости от временного интервала между импульсами (характеризуемого частотой повторения импульсов (ЧПИ)), например 300 импульсов в секунду), максимальный диапазон однозначного определения дальности действия радиолокатора может составлять несколько сотен километров (например 500 км). Однако учитывая траекторию распространения луча и кривизну Земли, луч и, соответственно, импульсный объем характеризуются большой высотой и шириной (например, при дальности в 250 км ширина луча радиолокатора с углом места в  $1^\circ$  составляет 9 км по высоте и 6 км по ширине, рисунок 7.4). Луч может пройти мимо метеорологического явления, импульсный объем может быть не заполнен, а чувствительность радиолокатора может оказаться недостаточной для точного измерения интенсивности осадков. В то же время, если эхосигналы наблюдаются, они покажут весьма интенсивные и опасные грозовые бури или явления погоды. Типовые метеорологические радиолокаторы действуют с максимальной дальностью порядка 250–600 км.

Для проведения надежных количественных измерений осадков полезная дальность радиолокатора с шириной луча  $1^\circ$  составляет порядка 80 км. Чем меньше ширина луча радиолокатора, тем больше эффективный радиус действия (например, при луче шириной  $0,65^\circ$  эффективная дальность равна приблизительно 120 км). На больших расстояниях данные должны быть экстраполированы до уровня поверхности земли. Расширение луча и недостаточное заполнение импульсного объема приводят к получению недостаточной информации об интенсивности осадков. Это зависит от погодного режима, а рассмотренные результаты относятся к средним широтам.

#### 7.4.2 **Доплеровская скорость**

Разработка доплеровских метеорологических радиолокаторов и их внедрение в процесс слежения за погодой открыли новые возможности для проведения наблюдений (Heiss et al., 1990). Доплеровский радиолокатор обеспечивает измерение скорости метеорологических целей вдоль радиальной линии. Таким образом, он обеспечивает измерение скоростного компонента ветра в направлении либо к радиолокатору, либо от него.

Обычные скорости метеорологических целей составляют менее  $50 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , за исключением случая торнадо/ураганов. Как рассматривалось выше, для оценки доплеровской скорости используются поимпульсные изменения фазы. Если фаза изменяется более чем на  $\pm 180^\circ$ , оценка скорости является неоднозначной. Для однозначного и точного измерения доплеровской скорости метеорологических целей частота повторения импульсов должна быть высокой (меньшие интервалы времени между импульсами), а именно такой, когда максимальная однозначная дальность уменьшается по сравнению с обычным радиолокатором, измеряющим только отражаемость. На более высоких скоростях для получения истинного значения скорости требуются дополнительные этапы обработки сигналов. Максимальная однозначная доплеровская скорость зависит от длины волны радиолокатора ( $\lambda$ ) и ЧПИ и может быть выражена следующим образом:

$$V_{\max} = \pm \frac{\text{PRF} \cdot \lambda}{4} \quad (7.10)$$

Максимальную однозначную дальность можно выразить следующим образом:

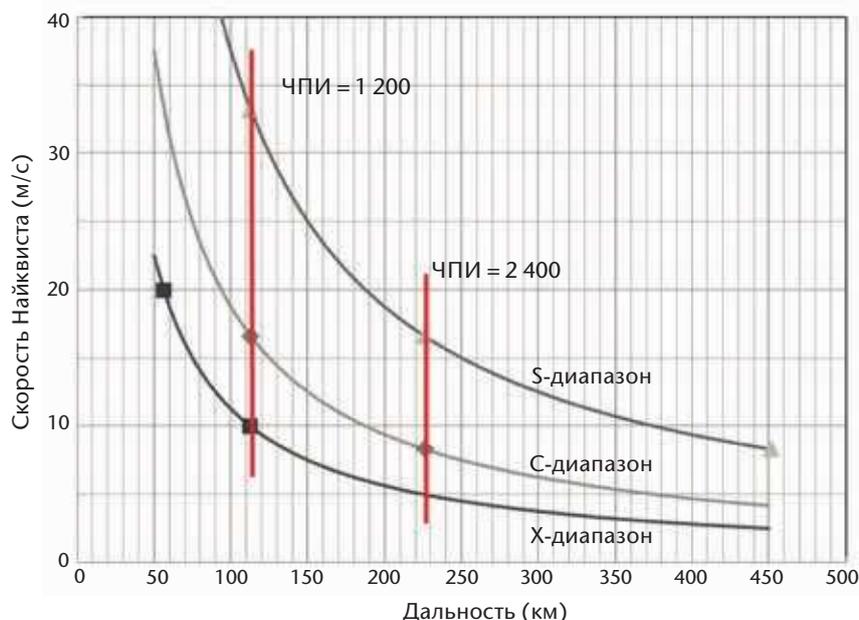
$$r_{\max} = \frac{c}{\text{PRF} \cdot 2} \quad (7.11)$$

Таким образом,  $V_{\max}$  и  $r_{\max}$  связаны уравнением:

$$V_{\max} r_{\max} = \pm \frac{\lambda c}{8} \quad (7.12)$$

Эти соотношения показывают ограничения, налагаемые выбором длины волны и ЧПИ (см. рисунок 7.5). Для увеличения однозначной скорости желательна высокая ЧПИ; низкая ЧПИ желательна для увеличения дальности действия радиолокатора. До тех пор пока не будет доступна более совершенная технология получения однозначной информации вне этих ограничений, требуется компромисс, связанный с условиями функционирования радиолокатора. Это известно, как доплеровская дилемма и рассматривается далее в разделе настоящей главы, посвященном обработке сигналов и данных. Максимальная однозначная скорость или дальность часто называется скоростью Найквиста или диапазоном Найквиста.

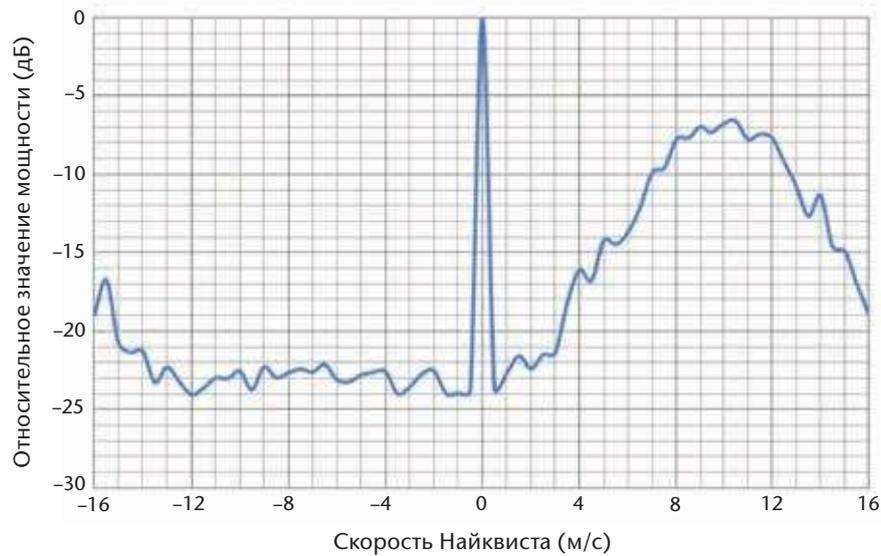
Одним из существенных последствий высоких ЧПИ является то, что за пределами диапазона Найквиста все же часто имеются обнаруживаемые эхосигналы. Эти эхосигналы называются вторичными (или множественными) эхо, поскольку они приходят от ранее излученных импульсов. Если цели являются достаточно сильными, то радиолокатор все же может принимать энергию от этих целей. Однако цели будут неправильно определены в качестве первых обратных эхосигналов, поскольку радиолокатор не может определить, является ли данный эхосигнал результатом текущего или предыдущего импульса, поскольку время или дальность эхосигнала основаны на самом последнем излученном импульсе.



**Рисунок 7.5.** Это иллюстрация доплеровской дилеммы для трех частотных диапазонов обычных радиолокаторов (X, C, S). Эта дилемма возникает потому, что один из параметров, а именно частота повторения импульсов, т. е. время между излучаемыми импульсами, определяет максимальную однозначную скорость и максимальную однозначную дальность в противоположных направлениях. Маркеры и красные линии показывают общепринятые установочные параметры.

Некоторые доплеровские радиолокаторы являются полностью когерентными; их передатчиками являются генераторы, и они излучают одинаковую фазу последовательных импульсов. В этих когерентных радиолокаторах обычно применяются клистроны, твердотельные или аналогичные передатчики. Поскольку радиолокаторы этих типов излучают одинаковую фазу для каждого импульса, скорость вторичных эхосигналов будут определять различные средние радиальные скорости. Радиолокатор этого типа не может разделять (без новейшей системы обработки) дальность или скорость эхосигналов со временем запаздывания, превышающим несколько периодов повторения зондирующих импульсов.

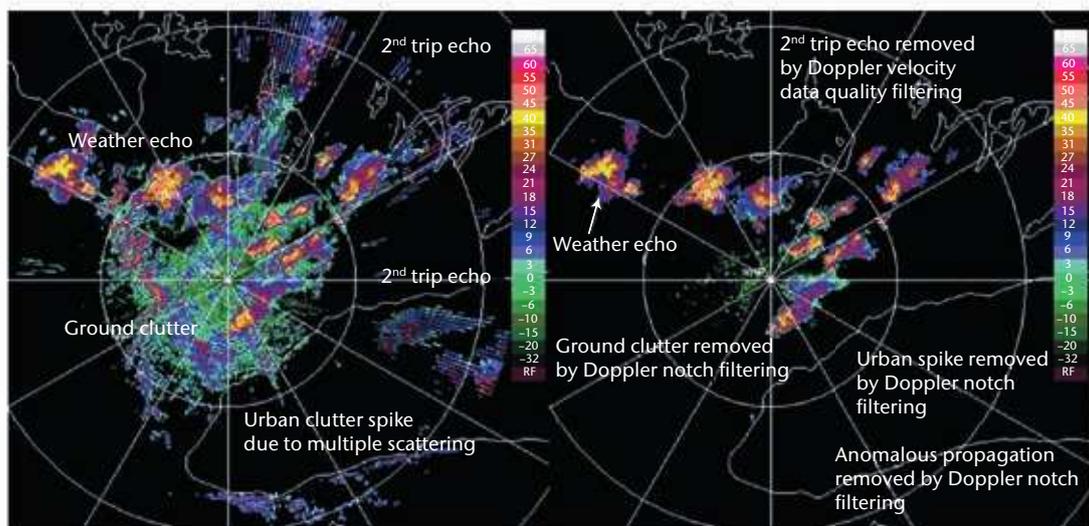
У доплеровских радиолокаторов, когерентных на приеме, например с передатчиком с магнетронным усилителем, фаза от импульса к импульсу является случайной. У радиолокатора этого вида фаза самого последнего излученного импульса измеряется и фазы всех эхосигналов сравниваются с ней. Поэтому серия фаз от вторичных эхосигналов с временем запаздывания от 1 до 2 периодов повторения зондирующих импульсов, которые сравниваются с самой последней фазой, будет случайной и проявляться в виде шума в доплеровском спектре. Рисунок 7.6 является смоделированным примером настройки типового радиолокатора С-диапазона. Острый пик на нулевой скорости образуется эхосигналами от стационарных наземных объектов и характеризуется узким распределением мощности. Широкий пик с правой стороны — это эхосигнал от метеорологического объекта. Он шире, чем пик отражений от наземных объектов, поскольку он образуется в результате распределения капель, которые смешиваются. Следует отметить, что «хвост» справа, являющийся результатом влияния метеорологических условий, налагается и появляется с левого края графика. Сигнал колеблется приблизительно на уровне собственных шумов вследствие теплового шума в системе и также в пределах спектра метеорологических условий из-за колебаний, вызываемых смешением целей в виде осадков. При помощи динамической оценки мощности шума эта энергия может быть вычтена из общей мощности для получения более ясной оценки мощности первичных эхосигналов (рисунок 7.7). Это пример, показывающий: (а) каким образом отражение от стационарного наземного объекта



**Рисунок 7.6.** Этот доплеровский спектр показывает распределение мощности в пределах объема единого радиолокационного импульса как функции доплеровской скорости.

может фильтроваться благодаря использованию режекторного фильтра нулевой скорости; и (b) каким образом вторичные эхосигналы могут фильтроваться посредством использования фильтра шума (показатель качества сигнала).

Для обработки доплеровских параметров используются две системы обработки сигналов разной сложности. В более простой системе обработки пары импульсов (ОПИ) применяется сравнение последовательных импульсов во времени для получения средней скорости и ширины спектра. Во второй и более сложной системе используется



**Рисунок 7.7.** Современные доплеровские радиолокаторы могут фильтровать неверные данные или отражения от земли на этапе технологической цепочки, связанном с обработкой сигналов. На левом изображении показаны необработанные данные, а на правом — способность фильтрации доплеровского сигнала и обработки данных. На рисунке 7.29 показана возможность многовариантности поляризации для обеспечения качества данных.

процессор, реализующий быстрое преобразование Фурье (БПФ) для получения полного спектра скоростей в каждом облучаемом объеме. Система ОПИ работает быстрее, в ней производится меньше операций с большим объемом вычислений, и она более надежна при низких соотношениях сигнал-шум, но ее характеристики по устранению помех от отражения наземными объектами хуже, чем у системы БПФ.

### 7.4.3 Двойная поляризация

В настоящее время используются две основные радиолокационные системы. Одна система излучает волну с круговой поляризацией, и при этом измеряются кополяризация и ортогональная поляризации. Другая система излучает попеременно или одновременно импульсы с горизонтальной ( $H$ ), затем с вертикальной ( $V$ ) поляризацией, используя при этом переключатель большой мощности. Радиолокаторы с синхронным излучением импульсов  $H$  и  $V$  не требуют быстрого переключателя. Сложность, связанная с развертыванием микрофизических характеристик эхосигнала, все еще является проблемой, и производство высококачественных систем с круговой поляризацией может быть более дорогостоящим. Система с линейной поляризацией, как правило, предпочтительнее, поскольку получение метеорологической информации требует меньше вычислений и обычные радиолокаторы могут быть легче преобразованы в радиолокаторы с двойной поляризацией. За исключением нескольких ситуаций, переключатель большой мощности зарекомендовал себя в качестве проблематичного для изменения поляризации, в результате чего система синхронной передачи и приема является общепринятой в оперативных радиолокаторах.

Как правило, методика поляризации основана на микроразличиях в рассеивающих частицах. При свободном падении в атмосфере капли дождя приобретают эллиптическую форму с большой осью в горизонтальной плоскости. Сплюснутость капли связана с ее размером. Мощность обратного рассеяния сплюснутого сфероида больше для горизонтально поляризованной волны, чем для вертикально поляризованной, при условии рэлеевского рассеяния. Это также справедливо, что также касается других целей, таких как насекомые, птицы и отражение от наземных объектов.

Таблица 7.2 содержит описание самых общих параметров разнообразных поляризаций. Дифференциальная отражаемость, обозначаемая  $Z_{DR}$ , определяется как 10-кратный логарифм отношения отражаемости при горизонтальной поляризации  $Z_H$  и отражаемости при вертикальной поляризации  $Z_V$ . Сравнения эквивалентной отражаемости  $Z_e$  и дифференциальной отражаемости  $Z_{DR}$  свидетельствуют о том, что осадки можно классифицировать как град, дождь, морось или снег (Seliga and Bringi, 1976).

Поскольку электромагнитная волна распространяется через среду со сплюснутыми частицами, фаза падающего луча изменяется из-за разностей ослабления (приводящих к разностям в скорости распространения) по вертикали и горизонтали. Влияние на вертикальные и горизонтальные компоненты фазы зависит от сплюснутости и учитывается в интегральном параметре, именуемом дифференциальной фазой ( $\varphi_{DP}$ ). Если может быть рассчитана соответствующая производная дальности, то можно также оценить конкретную дифференциальную фазу ( $K_{DP}$ ). Для измерений сильного дождя  $K_{DP}$  имеет определенные преимущества (Zrníć and Ryzhkov, 1995). English et al. (1991) продемонстрировали, что для оценки дождевых осадков гораздо лучше использовать  $K_{DP}$ , чем  $Z$  при интенсивности осадков выше  $20 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ , измеренной в S-диапазоне. Поскольку это является измерением фазы и может быть локализовано или относится конкретно к элементу разрешения по дальности, этот параметр может быть использован для решения проблем калибровки мощности и частичного затенения луча. При большем ослаблении (более короткие длины волн) эффективность этого метода повышается при более низких величинах отражательной способности или интенсивностях осадков.

Соотношение между временными рядами данных о вертикальных и горизонтальных параметрах обеспечивает статистическое измерение отличия профилей рассеивания  $H$  и  $V$  от гидрометеоров. Следует отметить, что эта статистическая характеристика, и поэтому

дождь и снег фактически имеют высокую корреляцию в статистическом смысле, хотя они обладают, по-видимому, совершенно разными характеристиками рассеяния, если исходить из параметров отдельных частиц. Bebbington (1992) ввел для радиолокатора с круговой поляризацией параметр, названный степенью поляризации, который является нечувствительным к эффектам распространения (линейная корреляция также не зависит от эффектов распространения). Этот параметр аналогичен линейной корреляции для радиолокаторов с линейной поляризацией и является, по-видимому, полезным для распознавания целей. Например, его экстремально низкие значения указывают на наличие случайно ориентированных рассеивающих частиц, таких, которые возникают в случае помех, вызванных самолетами или отражениями от наземных объектов (Holt et al., 1993).

## 7.5 ОБРАБОТКА СИГНАЛА И ДАННЫХ

### 7.5.1 Доплеровский спектр

Радиолокатор обнаруживает электромагнитную волну, вернувшуюся от цели. Эта волна образуется от всех источников рассеяния, находящихся в облучаемом радиолокатором объеме. Математически волна характеризуется амплитудой и фазой или эквивалентом в виде комплексных чисел в качестве реальных или мнимых частей фазирующего устройства. Это также называется синфазными или квадратурными (I, Q) сигналами. Волна измеряется несколько раз, и результатами являются временные ряды значений I и Q. Если к данным применяется преобразование Фурье, то величина коэффициентов преобразования Фурье представляет собой доплеровский спектр. Доплеровский спектр — это представление автокорреляции временных рядов I и Q в частотно-пространственном диапазоне (Weiner, 1964). Чем больше временных выборок сигналов, тем выше разрешение в домене частот. Процесс обработки во временном домене эквивалентен этому процессу в частотном домене. На рисунке 7.6 показан типичный доплеровский спектр, и он полезен для характеристики различных аспектов информации в едином облучаемом радиолокатором объеме. Уровень шума (интегрированный по всему спектру) представляет собой уровень минимального сигнала или максимум обнаруженного сигнала элементе разрешения по дальности. Пик при нулевой частоте или нулевой скорости — это вклад эхосигналов от неподвижных объектов или отражение от наземных объектов. Более широкий пик обусловлен метеорологической целью. Следует отметить, что пик при нулевой скорости расширяется в результате движения антенны, плохой стабильностью фазы радиолокационной системы и меньшего количества выборочных измерений. Спектральная ширина отражений от наземных объектов, как правило, меньше спектральной ширины метеорологических эхосигналов и в большинстве случаев может быть использована для отделения эхосигналов от наземных объектов от метеорологических эхосигналов. Область под метеорологическими эхосигналами и над уровнем шума является мощностью метеорологического радиосигнала. Область под спектром отражений от наземных объектов является мощностью, обусловленной отражением от наземных объектов.

### 7.5.2 Оценка параметра мощности

Гидрометеоры распределяются в пределах объема импульса и перемешиваются относительно друг друга и создают флуктуирующий сигнал. Требуется осреднение для уменьшения дисперсии измерений до допустимых пределов погрешности. Обычно для оценки отражаемости требуется 30 независимых импульсов (Doviak and Zrnić, 1993). Это подразумевает, что необходимо осуществлять дискретизацию импульсов во временные интервалы, превышающие время декорреляции импульсного объема, проводить их дискретизацию в разных по дальности местах или применять какую-либо другую методику (смешение частот).

В оперативном порядке это делается различными способами, в зависимости от применения и основного подхода к процессу обработки. Антенна могла бы медленно осуществлять сканирование, и отражаемость можно было бы оценивать в пределах одного

градуса азимута и в пределах объема импульса, или могла бы вращаться быстрее, при этом могло бы применяться осреднение дальности в сигнале или процессоре данных. Помимо этого, сниженное качество данных могло бы быть приемлемым, и на более позднем этапе могло бы применяться осреднение данных.

**7.5.3 Отражение от наземных объектов и точечные цели**

Отражение может происходить от разнообразных целей, включая здания, холмы, горы, воздушные суда и дипольные отражатели, к примеру это лишь некоторые из них. Правильное расположение радиолокатора является первой линией защиты против эффектов отражений от наземных объектов. Однако эффект отражения всегда присутствует в определенной степени, поскольку стороны основного луча и боковые лепестки взаимодействуют с близлежащей местностью (рисунок 7.8). Луч радиолокатора не является идеально коническим, напротив — он излучается во всех направлениях, хотя основная мощность проходит по линии визира. Ширина луча часто определяется на уровне половинной мощности (–3 дБ мощности вдоль линии визира). Эта конфигурация излучения определяется геометрией рупорного облучателя антенны, расстоянием от фокальной точки, параболической антенной и телескопическими опорами, на которых располагаются рупорный облучатель. Высота первого бокового лепестка (помечено) в большей или меньшей степени определяется этими факторами и часто используется в качестве меры качества антенны. Уменьшение или передвижение этого бокового лепестка по азимуту посредством сдвига рупорного облучателя приводит либо к расширению основного луча, либо к потере мощности.

Интенсивность отражения от наземных объектов обратно пропорциональна длине волны (Skolnik, 1970, 1990), в то время как обратное рассеяние от дождя обратно пропорционально четвертой степени длины волны. Поэтому более коротковолновые радиолокаторы меньше подвержены влиянию отражения от наземных объектов. Эхосигналы отражений от наземных объектов следует исключать при оценке осадков; однако эхосигнал отражения от наземных объектов можно использовать для измерений влажности (Fabry, 2004). Точечные цели, такие как воздушные суда, можно исключить, если они являются изолированными, путем удаления эхосигналов, которые занимают единичный объем элемента разрешения радиолокатора. Метеорологические цели занимают несколько элементов разрешения радиолокатора. Точечные цели могут



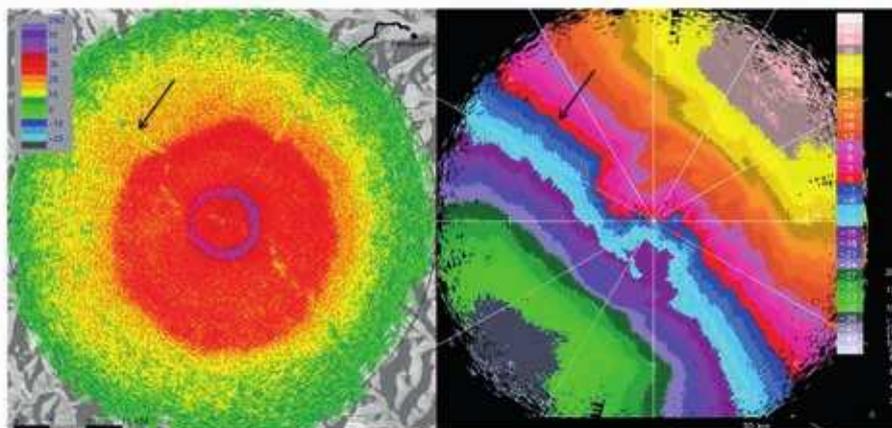
**Рисунок 7.8.** Общая диаграмма направленности излучения антенны. Следует отметить, что ширина антенного луча обычно определяется в точках половинной мощности (50 % или –3 дБ). Если цель обладает высокой отражаемостью, то мощность излучается и принимается со стороны главного лепестка и других боковых лепестков.

быть устранены на этапе обработки данных. Точечные цели, такие как эхосигналы от воздушного судна, совмещенные с эхосигналами от осадков, не всегда можно исключать с помощью данной методики, и это зависит от их относительной силы.

Для устранения отражений от наземных объектов концептуально привлекательная идея заключается в использовании карт отражений. Для построения такой карты используются изображения радиолокационных эхосигналов при отсутствии осадков, которые в дальнейшем вычитаются из радиолокационного изображения, полученного в условиях осадков. Проблема данной методики заключается в том, что очертания наземных помех изменяются во времени. Эти изменения прежде всего связаны со сменой метеорологических условий; самым простым примером является аномальное прохождение эхосигналов, которое длится несколько часов и затем исчезает. Микроизменения в окружающей среде вызывают небольшие флуктуации очертаний эхосигналов от наземных объектов, что вносит путаницу при использовании карт отражений. В адаптивных методиках (Joss and Lee, 1993) предпринята попытка динамически определить контуры помех для учета краткосрочных флуктуаций, но для повсеместного использования они недостаточно исследованы.

В методике доплеровской обработки предпринимается попытка устранить помехи из метеорологического эхосигнала в процессе его обработки. Основные допущения состоят в том, что эхосигнал вследствие мешающих отражений имеет малую спектральную ширину и что помехи являются постоянными. Однако для удовлетворения первых критериев необходимо принять и обработать значительное число импульсов, чтобы достичь спектрального разрешения, достаточного для различения эхосигналов от метеорологического объекта и эхосигналов вследствие мешающих отражений. Выделение метеорологического эхосигнала возможно только при относительно большом интервале Найквиста (см. рисунок 7.6). Спектральная ширина отражений от наземных объектов и эхосигналов от метеорологического объекта, как правило, гораздо меньше  $0,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и обычно больше  $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  соответственно. Поэтому необходимы интервалы Найквиста примерно  $8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Помеха обычно является стационарной и выделяется на спектре как узкий пик на нулевой скорости (рисунок 7.6). Пик имеет ограниченную ширину, поскольку эхосигнал от наземных целей, таких как раскачивающиеся деревья, несет в себе некоторые соответствующие характеристики движения.

Временная фильтрация для исключения компонента с нулевой скоростью из конечной последовательности осуществляется при помощи цифрового фильтра верхних частот. Ширина и глубина цифрового фильтра, необходимые для обеспечения соответствия отражательной способности, должны предусматриваться для всей области сканирования, и несоответствия являются неизбежными, поскольку отражательная способность изменяется (Zrnić and Hamidi, 1981). Адаптивная спектральная обработка (преобразование Фурье) позволяет определять сигналы отражения от наземных объектов, эвристически определить эхосигнал мешающих отражений и исключить мощность отражения от наземных объектов из суммарной мощности, устраняя таким образом мешающие отражения от наземных помех из эхосигналов от метеорологического объекта, даже если они перекрываются (Passarelli et al., 1981; Crozier et al., 1991; рисунок 7.7). Трудным может оказаться отделение эхосигналов от метеорологического объекта от эхосигналов от наземных помех в тех случаях, когда эхосигнал от метеорологического объекта является узким (как в случаях небольшого снега), а средняя доплеровская скорость близка к нулю. В подобной ситуации может быть удалено слишком много эхосигналов от метеорологического объекта. При узком спектре эхосигнала от метеорологического объекта, как это бывает в случае снега или мороси, режекторный фильтр-нулевик не может отличать мешающие отражения от метеорологических объектов от помех от наземных объектов. Это особенно касается тех случаев, когда антенна быстро вращается, вызывая расширение спектра эхосигналов от наземных объектов, и когда средняя радиальная скорость метеорологического объекта близка к нулю. Удаляется слишком большая мощность, результатом чего является аномальное уменьшение параметра отражаемости (рисунок 7.9, изображение слева). Стрелка показывает то место, где замирание эхосигнала соответствует нулевой линии в изображении радиальной скорости (рисунок 7.9, изображение справа). Это является незначительным недостатком в работе режекторного фильтра доплеровского радиолокатора.



**Рисунок 7.9.** Режекторная доплеровская фильтрация может удалять слишком много эхосигналов, когда доплеровский спектр метеосигналов узок и при почти нулевой доплеровской скорости (см. стрелку). Эта проблема является незначительной по сравнению с другими ложными сигналами, показанными на рисунке 7.2.

Усовершенствования, связанные с идентификацией эхосигналов мешающих отражений, включают более эффективные методики для идентификации этих сигналов (адаптивная обработка с использованием модели Гаусса) и методы использования текстуры данных (дисперсия отражаемости), связанные с отражениями до применения фильтров помех (Hubbert et al., 2009a; Hubbert et al., 2009b). Системы без применения доплеровского метода могут использовать эти методы анализа текстуры для удаления помехи у земной поверхности и эхосигналы аномального распространения.

При альтернативном подходе, именуемом «устранение микропомех», используется преимущество наблюдений, связанное с тем, что структуры объектов, вносящих вклад в отражение от наземных объектов, весьма малы по своему размеру (меньше, к примеру, 100 м). Определение дальности проводится с очень высоким разрешением (менее 100 м), а помехи определяются при обработке отражаемости и доплеровского сигнала. Осреднение дальности (до конечного разрешения, равного 1 км) выполняется по элементам разрешения по дальности, свободным от радиолокационных помех. Смысл такого приема заключается в обнаружении и игнорировании элементов разрешения по дальности, содержащих отражения от местных предметов, а не в корректировке этих помех (Joss and Lee, 1993; Lee et al., 1995). Это коренным образом отличается от ранее описанных методик, и остается проверить, будет ли эта методика эффективной во всех ситуациях, в частности при аномальном распространении радиоволн, когда помехи являются повсеместными.

Радиолокаторы с поляризацией могут также идентифицировать отражения от наземных объектов, поскольку эти отражения имеют иные поляриметрические характеристики по сравнению с осадками. Помимо этого, могут быть идентифицированы другие виды мешающих целей.

Помехи можно уменьшить путем тщательного выбора места размещения радиолокатора (см. ниже). Радиолокаторы, используемые для наблюдений на больших расстояниях, например, для обнаружения тропических циклонов, или при широко размещенной сети наблюдений, обычно располагают на вершинах холмов, чтобы расширить их полезную дальность, и, вероятно, поэтому они способны отмечать множество эхосигналов мешающих отражений. Простая методика подавления таких помех заключается в автоматическом сканировании при нескольких углах места и в отбраковывании данных, полученных на малой дальности при малых углах места, где существует большая часть помех. При помощи переработки данных радиолокатора в продукцию индикатора кругового обзора постоянной высоты (CAPPI) данные, полученные при малых углах места на малой дальности, выбраковываются автоматически (Marshall and Ballantyne, 1978). На

рисунке 7.4 показана геометрическая последовательность сканирования, предложенная Маршаллом и Баллантайном (1978 г.), которая оптимизирована для получения продукции постоянной высоты, такой как CAPPI и эхосигналы целей на большой высоте.

#### 7.5.4 Решение доплеровской дилеммы

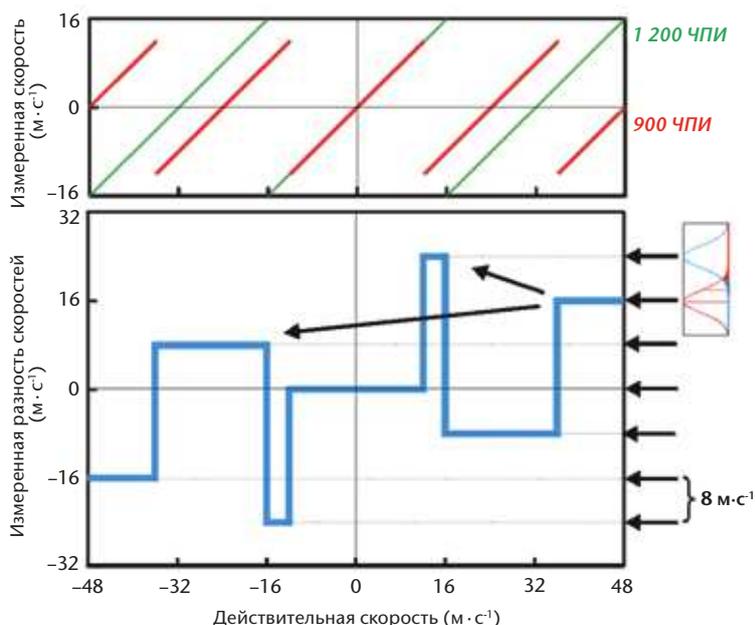
Качество оценок доплеровской скорости определяется при помощи интервала Найквиста и дискретизации сигналов. Интервал Найквиста ( $\pm 180^\circ$ ) должен быть достаточно широким для охвата спектра эхосигналов от метеорологического объекта. Как правило, эхосигналы от метеорологического объекта имеют ширину  $4\text{--}6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , и поэтому интервал Найквиста должен быть, как минимум, вдвое шире. Может иметь место наложение «хвостов» спектра, однако если сигнал является сильным, то все же можно оценить среднюю скорость.

Для получения статистически стабильной оценки скорости требуется порядка 20–30 выборочных измерений. Необходима корреляция этих измерений, и поэтому их необходимо проводить быстро. Следует отметить, что это требуется в меньшей степени по сравнению с отражаемостью, и теоретически возможно восстанавливать скорость при более низких отношениях сигнал-шум (меньшая сила сигнала) по сравнению с отражаемостью и в более короткий период времени.

Для обнаружения обратных сигналов на разных удалениях от радиолокатора следует периодически, обычно примерно каждую 1 мкс, производить выборку эхосигналов для получения информации приблизительно через каждые 150 м по дальности. Эта выборка может продолжаться до тех пор, пока не наступит время передачи следующего импульса (приблизительно каждую 1 мс). Элемент дискретизации во времени (соответствующий расстоянию от радиолокатора) называется селектором дальности. Интервал между излучением импульсов определяет максимальную однозначную дальность. Длина волны в сочетании с интервалом излучения сигнала определяет максимальную однозначную скорость. Длины волн метеорологических радиолокаторов и метеорологические сценарии характеризуются конфликтом этих максимальных параметров, и это называется доплеровской дилеммой, поскольку увеличение одного показателя приводит к уменьшению другого. Это показано на рисунке 7.5. Таким образом, фундаментальная проблема использования любого импульсного доплеровского радиолокатора заключается в смягчении воздействий факторов ограниченной дальности и скорости.

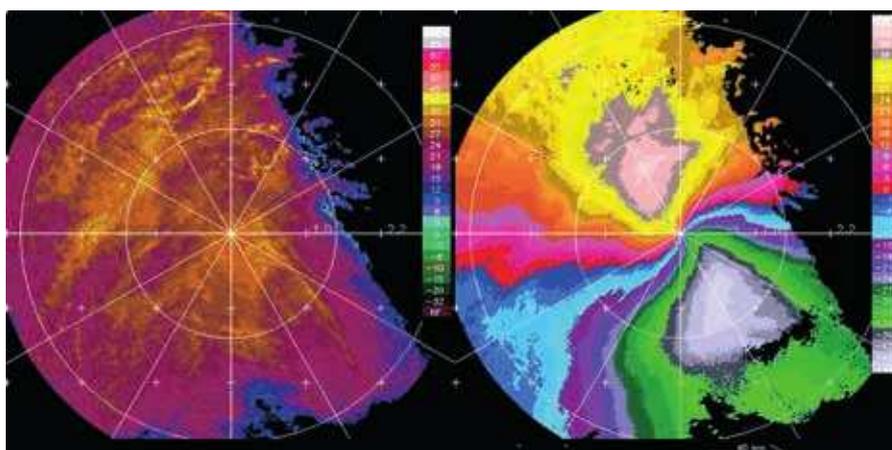
К общепринятым методикам уменьшения ограничения скоростей или разделения скоростей относятся методика множественной ЧПИ (Doviak and Zrnić, 1993; Crozier et al., 1991) или методика непрерывности (Eilts and Smith, 1990). В первой из них оценки радиальной скорости определяются на двух или нескольких разных ЧПИ с различными максимальными однозначными скоростями и объединяются для получения новой оценки радиальной скорости с расширенной однозначной скоростью. Например, радиолокатор С-диапазона, использующий ЧПИ, равные 1 200 и 900 Гц, имеет номинальные однозначные скорости  $16$  и  $12 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  соответственно. Величина наложения может быть вычтена из разницы между двумя оценками скорости для разделения скорости в расширенном диапазоне скорости Найквиста, равном  $\pm 48 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . На рисунке 7.10 показано то, каким образом метод двойной ЧПИ способен расширить однозначную скорость. Наверху графика показано то, что доплеровский радиолокатор способен измерять в качестве функции реальной радиальной скорости (от  $-48$  до  $48 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ). В этом примере ЧПИ приводятся в соотношении 4:3; возможны другие соотношения, такие как 7:5 и 3:2. В нижней части графика представлено уникальное различие в измеряемых доплеровских скоростях в качестве функции реальной радиальной скорости. Исходя из этой разности, может быть определено кратное число и может быть выведена реальная скорость. Предел выведения определяется однозначными скоростями Найквиста и их соотношением. Этот предел называется расширенной скоростью Найквиста и в данном случае равен  $48 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . На рисунке 7.11 приводится пример результатов, полученных с использованием этой методики.

Обычно используемыми комбинациями соотношений ЧПИ являются 5:4, 4:3 или 3:2. Как правило, используется максимальная однозначная скорость  $16 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , хотя это не является



**Рисунок 7.10.** Это пример радиолокатора С-диапазона, работающего в импульсном режиме 900 и 1 200 с<sup>-1</sup> при однозначных скоростях Найквиста 12 и 16 м·с<sup>-1</sup> соответственно. В основе данного метода лежит разность между измеренными радиальными скоростями (ордината на нижнем изображении), служащая для определения кратного числа (абсцисса на нижнем изображении) и его последующего использования с соответствующей измеренной радиальной скоростью для оценки истинной радиальной скорости.

строгим требованием. Результатом более низких скоростей будут бóльшие максимальные дальности. Разница в использовании различных соотношений заключается в том, что дисперсия средней скорости приводит к нарушению предположения о единообразной скорости и возникновению «ошибок двойной ЧПИ» (Joe and May, 2003).



**Рис. 7.11.** На этом рисунке показана необходимость и способность увеличения скорости радиолокатором С-диапазона по меньшей мере до 48 м·с<sup>-1</sup>. Речь идет в данном случае об урагане/внетропическом переходном участке траектории и скоростях порядка 48 м·с<sup>-1</sup>. В подобной ситуации соблюдаются допущения, предусмотренные методом использования частоты повторения двойных импульсов (две измеренные расчетные скорости на разных ЧПИ являются производной той же самой радиальной скорости), и результат характеризуется незначительным шумом (изображение справа, сравнить с рисунком 7.20).

Методика непрерывности основана на наличии эхосигнала, достаточного для обнаружения наложенных скоростей и их корректировки при допущении о непрерывности скорости (нет разрывов больше  $2V_{\max}$ ). Кратные числа определяются, начиная от нулевой линии, и во всех случаях, когда встречается прерывание интервала Найквиста, это кратное число увеличивается или уменьшается, а интервал Найквиста добавляется или вычитается.

Второй фундаментальной проблемой является ограничение по дальности, налагаемое использованием высоких ЧПИ (около 1 000 Гц и более). Эхосигналы с расстояний, превышающих максимальную дальность, будут совмещаться с сигналами первоначальной дальности. Для радиолокаторов с когерентными передатчиками (например, клистронные или твердотельные системы) эхосигналы окажутся в пределах первоначальной дальности. Для систем, когерентных на приеме, вторичные эхосигналы будут проявляться как шум (Joe et al., 1995; Passarelli et al., 1981; рисунок 7.12). Для последней системы этот шум является результатом случайно излученных фаз сигналов. Доплеровские радиолокаторы с их короткой дальностью Найквиста подвержены воздействию помех в виде вторичных эхосигналов независимо от того, являются ли они когерентными на приеме (магнетронными) или когерентными на передаче (клистронными). На рисунке 7.12 с магнетронного радиолокатора С-диапазона вторичный сигнал проявляет себя в виде клинообразных эхосигналов в отражаемости (черные стрелки), и это может быть использовано для их идентификации. В поле радиальной скорости данные характеризуются шумом (желтые стрелки), и это может быть использовано на этапе обработки сигналов для их устранения, поскольку их доплеровский спектр является весьма широким, повышая уровень шума. Если эти данные были получены радиолокатором клистронного типа, то радиальная скорость появится в виде когерентных данных.

Методы фазового кодирования были разработаны для когерентных доплеровских радиолокаторов, с тем чтобы различать вторичные эхосигналы. Обработка может производиться в отношении текущего импульса первичного эхосигнала и предыдущего импульса для вторичного эхосигнала. Это называется обработкой случайной фазы. Она является эффективной, если чувствительность радиолокатора является хорошей (низкой), с тем чтобы вторичный эхосигнал можно было обнаружить выше уровня шума, а также, если стабильность фазы является хорошей (низкой), с тем чтобы можно было восстанавливать фазу или скорость на дальних расстояниях. Для когерентных передатчиков может генерироваться псевдослучайная последовательность. В большей степени лучшим способом является модуляция фазы известным способом для точного отделения первичного эхосигнала от вторичного. Frush et al. (2002) разработали эту методику для клистронных систем.

В когерентной на приеме (например, магнетронной) системе вариация фазы является неявно случайной. В когерентной на передаче (например, клистронной) системе

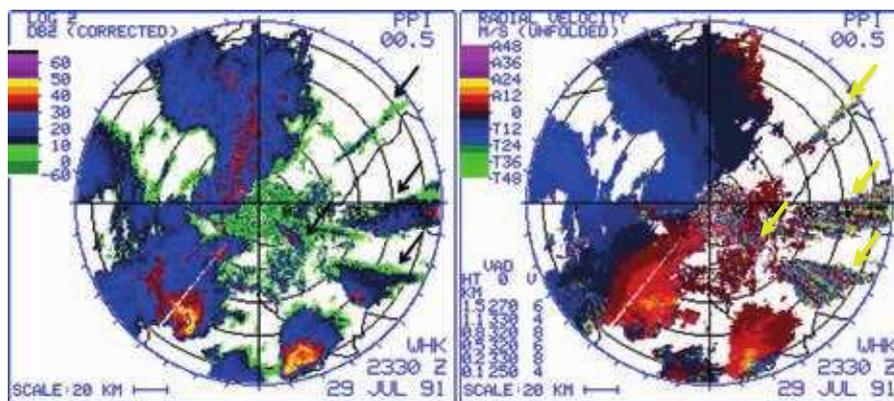
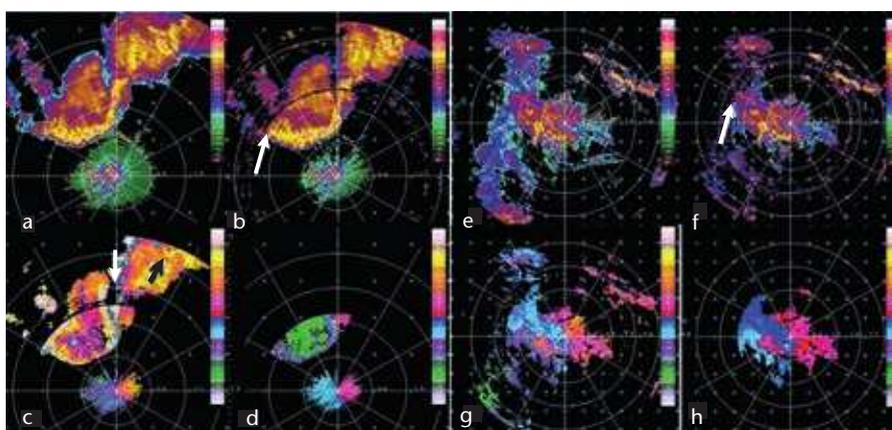


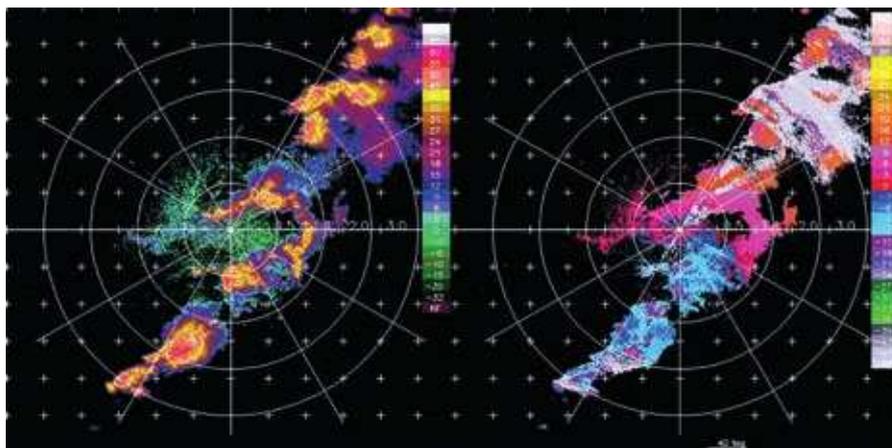
Рисунок 7.12. Пример вторичных эхосигналов, связанных с отражаемостью (слева) и радиальной скоростью (справа), для магнетронного радиолокатора.

вариация фазы налагается модулятором контролируемым образом. Примером является фазовый модулятор SZ2, используемый в системе WSR-88D США. На рисунке 7.13 приводятся два примера (a-d, e-h) для иллюстрации преимуществ и ограничений методики случайной фазы. Изображения 7.13(a) и 7.13(e) приводятся с низкой ЧПИ и показывают «истину». Изображения 7.13(b) и 7.13(f) получены при помощи методики случайной фазы. Демаркация границы между первичным–вторичным эхосигналами показана белой стрелкой. Разрыв определяется тем, что во время передачи импульса приемник выключается. На изображениях 7.13(a-d) линия шквала не достигла радиолокатора. Эхосигналы вблизи радиолокатора являются слабыми относительно эхосигналов на дальних расстояниях, и данная методика хорошо срабатывает, поскольку восстанавливается большая часть вторичного эхосигнала (сравните 7.13(a) с 7.13(b)). На изображениях 7.13(e-h) часть системы осадков достигла радиолокатора, и поэтому вблизи радиолокатора имеются относительно сильные эхосигналы по сравнению с эхосигналами на больших расстояниях. Данная методика действует менее эффективно из-за большого количества эхосигналов, которые не восстанавливаются (сравните 7.13(e) с 7.13(f)). При применении этой методики возможно использование данных только одной ЧПИ, а скорость Найквиста равна  $16 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  (изображения 7.13(c) и 7.13(g)). Данные двойной ЧПИ с расширенной скоростью Найквиста в  $48 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  показаны на изображениях 7.13(d) и 7.13(h). В случае наложения хорошо подготовленный аналитик может все же интерпретировать и эффективно использовать данные одной ЧПИ. Например, на изображении 7.13(c) можно наблюдать «заклучительный вихрь» (белые и черные стрелки). Соответствующие изображения отражаемости — это внутренние (первичный эхосигнал) части изображений 7.13(b) и 7.13(f). Важным аспектом обработки случайной фазы является то, что первичный эхосигнал будет характеризоваться более высоким качеством данных, поскольку осуществляется фильтрация воздействий вторичного эхосигнала.

Предыдущая методика использует радиолокатор наблюдения с низкой ЧПИ для определения местоположения отраженного эхосигнала. Затем, когда происходит дублирование эхосигналов в доплеровском режиме при меньшей дальности, мощность и скорость эхосигнала определяются местом с большей отражательной способностью (рисунок 7.14). Это срабатывает, если мощность значительно отличается ( $> 5 \text{ дБ}$ ). Радиолокатор с большой дальностью обзора используется для выявления места отраженного эхосигнала. Доплеровский радиолокатор малой дальности используется для измерения доплеровской или радиальной скорости. Радиальная скорость определяется по отраженному эхосигналу наибольшей мощности. Если мощности каждого из этих сигналов находятся в пределах 5 дБ, то данная методика не работает эффективно и данные радиальной скорости не восстанавливаются и обозначаются как умноженная



**Рисунок 7.13.** Пример увеличения дальности обнаружения с использованием случайной фазы: Пример слева (a-d) показывает ситуацию, при которой первичный эхосигнал является слабым, а вторичный сигнал в значительной степени может быть восстановлен. В правой части этого примера (e-h) показан сильный первичный эхосигнал, который исключает возможность восстановления вторичного эхосигнала.



**Рисунок 7.14.** Для восстановления вторичного эхосигнала применяется множество методик, связанных с ЧПИ, при этом не проводится дополнительная обработка кодированного по фазе сигнала. Для пространственной локализации интенсивности эхосигнала используются сканирования с низкой ЧПИ, действующие на большой дальности. Для измерения радиальной скорости используется сканирование с высокой ЧПИ, но на малом расстоянии. Радиальная скорость привязана к элементу разрешения по дальности при наивысшей мощности.

дальность. Они отмечены белым цветом на рисунке 7.14. Используются некоторые цветные схемы, на которых эти эхосигналы обозначены пурпурным цветом, и поэтому их часто называют «пурпурной мглой».

Для одновременного ограничения обеих проблем может быть использована комбинация множества ЧПИ и методики фазового разнообразия (WMO, 2012; Yamauchi et al., 2013).

## 7.6 ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАТОРА

### 7.6.1 Выбор радиолокатора

Радиолокатор является высокоэффективной наблюдательной системой. В то же время, эффективность любого конкретного радиолокатора и радиолокационной системы определяются конкретным применением, климатическими условиями, местной окружающей средой (затенение) и структурой сети. Любая характеристика радиолокатора требует компромиссного решения. Ни один радиолокатор не может быть спроектирован таким образом, чтобы быть максимально эффективным для всех видов наблюдений. Можно опытным путем выбрать характеристики для достижения максимальной эффективности, с тем чтобы наилучшим образом соответствовать нескольким видам наблюдений, таким как обнаружение торнадо или обнаружение снежного шквала, но не для всех применений (по сравнению с наблюдениями на больших расстояниях). Существенным соображением являются финансовые затраты. Большинство взаимосвязей можно проследить из уравнения радиолокации дальности.

Важным соображением является структура радиолокационной сети и вид применения. Радиолокационные сети X-диапазона предлагаются для разнообразных локальных применений, когда требуется дальность порядка 50 км или меньше и когда исключительно важной является зона охвата на низком уровне, например, снежный шквал низкого уровня, обнаружение торнадо, обнаружение микропорыва, сложная местность (гористая), городская гидрология и, возможно, смягчение воздействий ветроэнергетических установок. Изначальная цель этих сетей заключалась в адаптивном зондировании атмосферы для многочисленных видов применений — от погоды до управления воздушным движением. Этот процесс осуществляется в сочетании с работой антенны с фазированной решеткой, которая обладает способностью к ориентации и может

осуществлять совместное сканирование (McLaughlin et al., 2009). Инновационный характер этой технологии заключается в низких требованиях в плане инфраструктуры антенны с фазированной решеткой, которую можно монтировать на стене здания или на имеющейся вышке.

### 7.6.2 Длина волны и ширина луча

Чем больше длина волны, тем выше стоимость радиолокационной системы, в частности антенна оценивается по сопоставимым параметрам ширины луча (т.е. разрешение). Это связано как с увеличением количества расходного материала, так и со сложностями обеспечения соответствия допускам при увеличении размера. В пределах диапазонов, представляющих интерес для метеорологических радиолокаторов (S, C и X), чувствительность радиолокатора или его способность обнаруживать цель в значительной степени зависит от длины волны. Однако эта зависимость уменьшается в практическом плане за счет мощности передачи сигнала. Она также тесно связана с размером антенны, который влияет на коэффициент направленного действия антенны, ширину луча и заполнение луча. Для таких специализированных применений, как обнаружение тумана или облачности, доступными становятся радиолокаторы с меньшей длиной волны (35 ГГц и 94 ГГц), или они используются с платформ космического базирования для проведения измерений параметров облачности или осадков (например, Проект по измерению осадков в тропиках (TRMM); Глобальное измерение осадков (ГПМ); CloudSat; и спутник для изучения облаков, аэрозоль и радиации Земли (EarthCARE)).

Параметры дальности доплеровского радиолокатора в радиолокационной сети имеют большое значение для выбранной длины волны. При одинаковой скорости Найквиста S-диапазон будет иметь двойной частотный диапазон Найквиста по сравнению с радиолокатором C-диапазона и соответственно будет в значительной мере влиять на обеспечение однозначного охвата. Этот эффект может быть ослаблен благодаря рассмотренной ранее методике, связанной со скоростью и расширением диапазона.

Ослабление радиолокационных лучей наиболее значительно в дожде, меньше — в снеге и на ледяных кристаллах, и еще меньше — в облаках и атмосферных газах. В более широком смысле ослабление в S-диапазоне относительно незначительное. Радиолокатор S-диапазона, несмотря на его стоимость, имеет существенное значение при сканировании целей с очень высокой отражаемостью в сильных штормах с градом в умеренных и субтропических широтах. Ослабление у радиолокаторов X-диапазона может быть сильным на коротких дистанциях.

Значительный недостаток состоит в том, что более короткие волны ослабляются гораздо сильнее. Еще остается убедиться в том, может ли методика двойной поляризации  $K_{DP}$  компенсировать ослабление до того, как произойдет полное ослабление (что случается весьма нечасто), и оправданным ли является игнорирование ослабления в S-диапазоне. Если методика  $K_{DP}$  окажется более эффективной для оценки осадков по сравнению с методикой расчета радиолокационной отражаемости, то волна меньшей длины является более чувствительной к ослаблению и поэтому может оказаться более эффективной.

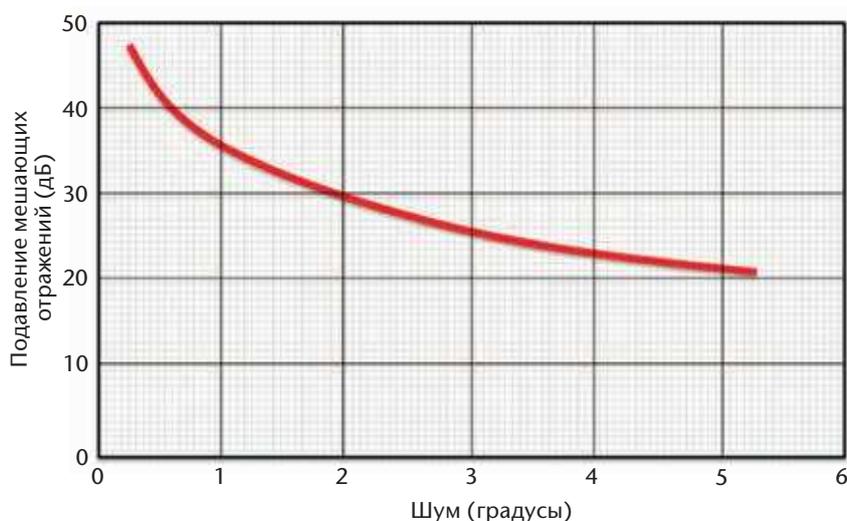
Радиолокационный сигнал может быть полностью утерян в C- и X-диапазонах, особенно, если обтекатель антенны является влажным. Хотя это может показаться катастрофическим, ключевой вопрос заключается в том, приводит ли потеря сигнала (как правило, на десятки минут в случае распространяющегося шторма) к фактическому отсутствию предупреждений о суровом шторме или оповещения о быстроразвивающемся бурном паводке. Опыт показывает, что предупреждения будут уже, как правило, выпущены, а потеря одного или двух элементов данных не является катастрофической ситуацией для гидрологических целей.

### 7.6.3 Передатчики и мощность излучения

Возможность обнаружения цели непосредственно связана с пиковой выходной мощностью радиолокационного импульса. Однако имеются практические ограничения для величины выходной мощности, которые диктуются технологией мощных генераторных ламп. Неограниченные увеличения мощности не являются самым эффективным средством повышения возможности обнаружения цели. Например, удвоение мощности повышает чувствительность системы только на 3 дБ. Технически максимально возможная выходная мощность возрастает с увеличением длины волны и ширины импульса. Улучшения, связанные с дискретизацией, чувствительностью приемника, коэффициентом усиления антенны, шириной импульса и выбором длины волны, могут быть более действенными средствами увеличения способности радиолокатора обнаруживать цели.

Широко распространенными источниками энергоснабжения являются магнетроны и клистроны. Магнетроны являются менее дорогостоящими, но они являются генераторами электропитания, и поэтому менее стабильны по частоте. Многие доплеровские радиолокаторы выполнены в настоящее время на магнетронах и при наличии коаксиальных магнетронов и цифровой технологии фазовый шум этих систем может быть сопоставим с шумом клистронных систем. Благодаря меньшему фазовому шуму обеспечивается бóльшая возможность для подавления мешающих отражений (рисунок 7.15). Фазовый шум менее  $0,5^\circ$  — это минимальный уровень эффективности работы современных радиолокаторов. При нормальных рабочих длинах волн типовые радиолокаторы должны обнаруживать осадки с интенсивностью порядка  $0,1 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$  на расстоянии 200 км и иметь пиковые выходные мощности порядка 250 кВт и 1 000 кВт или больше в S-диапазоне и S-диапазоне соответственно.

В последнее время оперативно устанавливаются твердотельные передатчики. Благодаря им рассчитывают обеспечить меньший объем технического обслуживания при высокой надежности технологии твердотельной электроники, прекрасную фазовую стабильность и электронную стабильность для проведения измерений с двойной поляризацией. Твердотельные передатчики, как правило, обладают низкой мощностью и требуют множества длинноволновых импульсов и компрессии импульсов для достижения требуемых параметров чувствительности. Они представляют собой комбинацию импульсных радиолокаторов и радиолокаторов с частотной модуляцией —



**Рисунок 7.15. Когерентность (фазовый шум) — это мера качества работы доплеровского радиолокатора, и она непосредственно связана со способностью удалять помехи, вызванные отражением от земной поверхности, и способностью восстанавливать вторичные эхосигналы, используя методику кодирования по фазе.**

незатухающими колебаниями. Проблемой являются боковые лепестки по дальности в том, что касается схем модуляции с компрессией импульсов, и еще предстоит установить, являются ли они значимыми в случае метеорологического применения.

#### 7.6.4 Длительность импульса

Длительность импульса определяет разрешающую способность радиолокатора по дальности. Разрешающая способность по дальности, или способность радиолокатора различать две отдельные цели, пропорциональна половине импульса в пространстве. У большинства клистронов и магнетронов максимальное отношение ширины импульса к ЧПИ составляет около 0,001. Обычная длительность импульса находится в пределах от 0,3 до 4 мкс. Длительность импульса в 2 мкс соответствует разрешающей способности в 300 м, а импульс длительностью 0,5 мкс может иметь разрешение в 75 м.

При допущении о том, что импульсный объем заполнен целью, удвоение длительности импульса повышает чувствительность радиолокатора на 6 дБ при использовании соответствующей приемнику фильтрации, хотя при этом уменьшается разрешение; сокращение длительности импульса снижает чувствительность, хотя при этом повышается разрешение. Импульсы с меньшей длительностью позволяют получать более независимые данные зондирования цели в пределах дальности действия и обеспечивают потенциал для повышения точности оценки.

#### 7.6.5 Частота повторения импульсов

Для получения максимального числа измерений цели в единицу времени ЧПИ должна быть настолько высокой, насколько это практически осуществимо. Исходным ограничением ЧПИ является нежелательное обнаружение вторичных эхосигналов. Большинство радиолокаторов, измеряющих только отражаемость, имеют однозначные дальности, превышающие полезную дальность метеорологических наблюдений, осуществляемых радиолокатором. Важным ограничением полезной дальности обнаружения метеорологической цели является значительная высота луча над земной поверхностью даже на дальности 250 км.

В доплеровских радиолокационных системах высокие ЧПИ ( $\sim 1\ 200\ \text{с}^{-1}$ ) используются для повышения предела однозначного измерения доплеровской скорости. Результатом этого является доплеровская дилемма, когда принимается компромиссное решение между такими параметрами, как максимальная дальность и максимальная скорость. Фактор ЧПИ не связан со значительными финансовыми расходами, но сильно влияет на эффективность работы системы. Вкратце, высокая ЧПИ желательна для увеличения количества измерений, повышения максимальной однозначно измеряемой скорости и получения возможно более высоких скоростей сканирования. Низкие ЧПИ ( $\sim 300\ \text{с}^{-1}$ ) желательны для увеличения максимальной однозначной измеряемой дальности и обеспечения оптимального режима работы.

#### 7.6.6 Антенная подсистема

Для получения сфокусированного узкого конического луча в метеорологических радиолокаторах обычно используется параболическая антенна с рупорным облучателем. Тремя важными характеристиками являются ширина луча (угловое разрешение), коэффициент усиления антенны и боковые лепестки. Для общепринятых метеорологических радиолокаторов размер антенны увеличивается с ростом длины волны с фиксированной шириной луча и с уменьшением ширины необходимого луча. Для обычной цели ширина луча антенны метеорологического радиолокатора составляет  $1^\circ$ , хотя в своей основе это число не является чем-то особенным.

В ходе научных исследований ведется изучение методик, связанных с антеннами с фазированной решеткой, и в настоящее время эти антенны, работающие в X-диапазоне,

являются доступными по приемлемым ценам. Эти антенны состоят из излучающих элементов с управляемой фазой, которые формируют луч. Могут быть разработаны адаптируемые стратегии сканирования для конкретных целей или обусловленные свойствами цели, благодаря которым может быть теоретически обеспечено быстрое сканирование или соблюдены требования к высокому качеству данных, однако это еще предстоит продемонстрировать в ходе практической работы. Исключение отражений от местных наземных объектов может быть высшего качества, поскольку эти системы не сканируют, а фактически совершают моментальный обзор по каждому азимуту, и таким образом не происходит размытия лучом эхосигналов, отраженных от земной поверхности.

### Размер антенны и ширина луча

Ширина луча метеорологических радиолокаторов обычно находится в пределах  $0,5-2^\circ$ . Для луча шириной  $0,5$  и  $1^\circ$  в С-диапазоне диаметр зеркала антенны составляет как минимум  $7,1$  и  $3,6$  м соответственно; в S-диапазоне —  $14,3$  и  $7,2$  м. С увеличением размеров зеркала антенны цена антенной системы и ее платформы резко возрастает. Существуют также технически реализуемый и стоимостной пределы. Кроме того, соответствующим образом должна быть выбрана опора, которая сможет выдержать вес антенны.

Требование обеспечения узкого луча для максимального разрешения и увеличения вероятности заполнения луча целью является особенно критичным с ростом дальности. Для луча в  $0,5^\circ$  азимутальная (и вертикальная) ширина сечения луча на дальности  $50$ ,  $100$  и  $200$  км составляет  $0,4$ ,  $0,9$  и  $1,7$  км соответственно. Для луча в  $1^\circ$  этот параметр соответственно равен  $0,9$ ,  $1,7$  и  $3,5$  км. Также при таких относительно узких лучах их ширина на больших расстояниях существенно возрастает.

Коэффициент усиления антенны также обратно пропорционален ширине луча, и поэтому более узкие лучи повышают чувствительность системы при помощи этого коэффициента, равного дифференциальному коэффициенту усиления. Оценки отражаемости и осадков требуют установленного минимального количества зондирований цели для обеспечения приемлемой точности измерений. Следовательно, луч должен иметь достаточное время задержки на цели при эксплуатации в режиме кругового сканирования. Таким образом, существуют пределы скорости вращения антенны. Уменьшение цикла сканирования будет иметь последствия. Для значимых измерений распределенных целей их частицам необходимо время, достаточное для смены положения перед проведением независимой оценки. В основном системы сканируют в диапазоне скорости вращения антенны примерно  $0,5-6$  об/мин.

Большинство метеорологических радиолокаторов с одной поляризацией являются линейно поляризованными, с горизонтально либо вертикально направленным вектором излучаемого электрического поля. Причины предпочтения горизонтальной поляризации заключаются в следующем: (а) эхосигналы от поверхности моря и земли обычно меньше при горизонтальной поляризации; (b) меньшие размеры по горизонтали боковых лепестков диаграммы направленности обеспечивают более точные измерения по вертикали; и (с) большее обратное рассеяние от дождя в связи с эллиптичностью падающих капель. Однако при малых углах места антенны лучшее отражение горизонтально поляризованных волн от плоских поверхностей на земле может привести к нежелательному эффекту, зависящему от дальности.

В большинстве, если не во всех, оперативных радиолокаторах с двойной поляризацией применяется режим излучения STAR с равной мощностью при двух ортогональных линейных поляризациях (обычно горизонтальной и вертикальной). Это исключает необходимость использования часто выходящего из строя мощного переключателя поляризации.

### 7.6.7 Подсветка

Неотъемлемой характеристикой любой антенны являются боковые лепестки диаграммы направленности. Боковые лепестки охватывают также стороны главного лепестка. Ширина луча обычно определяется на уровне половинной мощности основного луча, и мощность присутствует на угловых расстояниях от основного луча. Основными элементами, влияющими на боковые лепестки, являются рупорный облучатель антенны и его опорные стойки. Опорные лепестки могут ослабляться в результате чрезмерной подсветки тарелки, однако результатом этого являются более широкий луч и меньшая чувствительность.

Таким образом, малая ширина луча влияет на чувствительность системы, ее способность обнаруживать цели, горизонтальное и вертикальное разрешение, эффективную дальность действия и точность измерения. Основным ограничением для использования малой ширины луча являются расходы. По этим причинам самая малая допустимая ширина луча, как доказано, значительно повышает полезность радиолокатора (Crozier et al., 1991).

### 7.6.8 Стандартные характеристики метеорологических радиолокаторов

Стандартные характеристики радиолокаторов, в основном используемых в метеорологической практике, приводятся в таблице 7.7.

Как указывалось, характеристики и параметры радиолокатора являются взаимозависимыми. Технические ограничения для компонентов радиолокатора и доступность промышленно производимых компонентов являются важными обстоятельствами при проектировании радиолокационных систем.

Радиолокаторы типа «только Z» являются некогерентными импульсными радиолокаторами, которые использовались десятилетиями. Доплеровские радиолокаторы относятся к современному поколению радиолокаторов, которые открывают новые возможности применения. Они обеспечивают оценки радиальной скорости. Для более эффективного обнаружения мелкомасштабных микровихрей и торнадо по очень ограниченным районам были разработаны специализированные доплеровские радиолокаторы, например для защиты аэропортов. Ведется установка радиолокаторов с двойной поляризацией и свой путь к внедрению в оперативную практику находят их применения, предназначенные для обеспечения качества данных, классификации целей и количественной оценки осадков, включая гидрологию, численное прогнозирование погоды и исследования изменения климата.

### 7.6.9 Стратегия радиолокационного сканирования по объему

Большинство современных радиолокаторов автоматически выполняют сканирование по объему, включающее в себя ряд полных вращений антенны по азимуту при нескольких углах места. Это называется стратегией сканирования и имеются самые разнообразные стратегии для разных целей (Marshall and Ballantyne, 1978; Brown et al., 2005; Crum and Albery, 1993; Germann et al., 2006a, Seltmann et al., 2013).

Таблица 7.7. Технические характеристики обычных метеорологических радиолокаторов

Тип	S	S	S	S	C	C	C	C	C	X
Частота (ГГц)	2 800– 3 000	2 700– 3 000	2 700– 3 000	2 700– 3 000	5 400– 5 900	5 600– 5 650	5 600– 5 650	5 500– 5 700	5 300– 5 850	9 300– 9 500
Длина волны (см)	10,7	10,7	10,7	10,7	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	3
Максимальная мощность (кВт) на канал	475	850	750	20	500	1 000	250	250	12	75
Длительность импульса (мкс)	1,57, 4,5	0,2–2,0	0,4–4,5	0,5–200	0,2–3,0	0,4–4,5	0,4–4,5		0,5–200	0,3–3,3
ЧПИ (/с)	318–1 403, 318–452	200– 2 400	250– 2 000	100– 20 000	200– 2 400	200– 2 400	250– 2 000		100– 20 000	250– 3 000
Мин. дБЗ на 50 км	–28,7	–15,5		–5,5	–17,5	–19,5		–15	–5	
МДС (дБм)	–113	–114	–114	–114	–114	–114	–114	–115	–114	–113
Динамическая дальность приемника (дБ)		105	115	110	105	105	115	99	110	90
Диаметр антенны (м)	8,53	8,5	8,5	8,5	4,2	4,2	4,2	4,5	4,2	2,4
Ширина луча (градусы)	1	0,95	1	0,95	0,95	0,95	1	1	0,95	1,05
Коэффициент усиления антенны (дБ)	45	45	44,5	45	45	45	44,5	45	45	44,5
Поляризация	Частота (ГГц)	Частота (ГГц)	Частота (ГГц)	Частота (ГГц)	Частота (ГГц)	Частота (ГГц)	Частота (ГГц)	Частота (ГГц)	Частота (ГГц)	Частота (ГГц)
Максимальная скорость вращения (об/мин)	6	10	6	6	10	10	8	6,7	6	6
Тип передатчика	клистрон	коакси- альный магнитрон	клистрон	твердо- тельный	коакси- альный магнитрон	клистрон	клистрон	коакси- альный магнитрон	твердо- тельный	коакси- альный магнитрон
Подавление пассивных помех	50	46	55	55	46	46	55	55	55	

Для проведения наблюдений на больших расстояниях необходимы сканирования большой дальности 500 км или больше (результатом чего является ограниченная скорость Найквиста). Для охвата меняющейся морфологии конвективной грозы требуется быстрое обновление в течение приблизительно 5 минут. В случае авиационных применений, определяющих нисходящий воздушный поток, требуются еще более короткие циклы сканирования (Michelson et al., 1990). Научно-исследовательские радиолокаторы сканируют ограниченные области или сектора с циклом сканирования в 1 минуту или менее (Wurman et al., 1996). Для максимального захвата эхосигналов в безоблачной атмосфере необходимо проведение медленных маловысотных сканирований импульсами большой длительности. Медленное сканирование будет оптимизировать доплеровскую фильтрацию эхосигналов от наземных объектов. Многочисленные методики ЧПИ требуют наличия предположения об однородности радиальной скорости и могут осуществляться на основе последовательности лучей или сканирований.

Проведение сканирований при максимально возможных малых углах возвышения необходимо для оптимизации получения количественных оценок осадков, а также для организации обнаружения метеорологических явлений на низкой высоте и в приземном слое. Для получения оптимальных CAPPI или эхосигналов целей на большой высоте требуется геометрическая последовательность углов возвышения (Marshall and Ballantyne, 1978). Появляющиеся сети радиолокаторов с фазированной антенной решеткой, работающих в X-диапазоне, такие как сети проекта по совместному адаптивному зондированию атмосферы (CASA) или многофункциональный радиолокатор с фазированной антенной решеткой (MPAR), революционизируют концепцию стратегии сканирования, поскольку электронное сканирование может адаптироваться в зависимости от метеорологического объекта или применения (McLaughlin et al., 2009; Weber et al., 2007), либо имеющиеся недостатки могут быть снижены благодаря получению данных с соседних радиолокаторов.

Возможность компромисса обеспечивает качество данных. Например, медленные сканирования для получения высокого спектрального разрешения с целью ослабления мешающего отражения от земной поверхности или низкий разброс в данных препятствуют реализации стратегии сканирования при множестве углов возвышения и соответственно приводят к плохому вертикальному разрешению. Качество данных — это нечетко сформулированная концепция, поскольку с точки зрения качества оно означает компромиссы, связанные с временным охватом или временным разрешением (время цикла), пространственным разрешением (азимут, дальность, возвышения), погрешностью данных (погрешность скорости или отражаемость) и разбросом данных. Этот фактор трудно объективно оптимизировать, поскольку исходные параметры успеха являются совершенно разными, а установление числа последовательности угла возвышения не является точной наукой.

Первоочередным соображением является характер метеорологических условий и то место, которое необходимо охватить. Например, последовательность сканирования для радиолокатора, расположенного в долине или используемого для локальных целей и на короткую дальность, будет либо может весьма отличаться от радиолокатора, который используется для дальнего обзора выходящих на сушу ураганов (Joe et al., 2014).

Хотя в концептуальном плане привлекательным является установление изменений угла возвышения равным ширине луча, небольшие изменения угла возвышения даже в  $0,1^\circ$  могут стать причиной значимых вариантов представлений данных, зависящих от стратифицированного характера осадков (снег, яркая полоса, профили дождя) и профиля ветра.

Необработанные данные, представленные в полярных координатах, хранятся в трехмерном (дальность, азимут, возвышение) или множественном (параметр радиолокатора) массиве, обычно именуемом «сканированием по объему». Это служит источником данных для дальнейшей обработки и архивирования. Может быть несколько вариантов необработанных данных из-за разных процессов обеспечения качества данных.

**Таблица 7.8. Минимальный обнаруживаемый сигнал типовых радиолокаторов с высокими эксплуатационными характеристиками**

Радиолокатор	МОС на 50 км
Z9110	-8,0 дБZ (несколько дней в августе) -10,0 дБZ (2 месяца)
Z9220	-1,0 дБZ
King City CONVOL (2 мкс)	-11,0 дБZ
King City DOPVOL (0,5 мкс)	-5,0 дБZ
Twin Lakes, OK	-7,5 дБZ
Lake Charles, LA	-8,5 дБZ

### 7.6.10 Эксплуатационные характеристики радиолокатора

#### Минимальный обнаруживаемый сигнал

Минимальный обнаруживаемый сигнал (МОС) — это мера совокупных эксплуатационных характеристик, таких как мощность излучения, размер антенны, ширина луча или коэффициент усиления антенны, продолжительность импульса, длина волны и другие факторы. Это часто описывается в единицах мощности или температуры шума системы. Однако для радиолокационного аналитика отражаемость на установленной дальности служит более интуитивной мерой эксплуатационных характеристик радиолокатора. Высокая чувствительность является весьма желательной, с тем чтобы обнаруживать эхосигналы в безоблачной атмосфере и легкие осадки, а также повышать эффективность поиска вторичных эхосигналов. В таблице 7.8 показаны некоторые МОС типовых радиолокаторов с высокими эксплуатационными характеристиками.

#### Фазовая стабильность

Фазовая стабильность, или флуктуация фазы, — это мера среднего изменения фазы от импульса к импульсу. Некоторые виды программного обеспечения для тестирования радиолокаторов обеспечивают проведение этого измерения посредством использования акустической линии задержки или внешних целей. Преимущество последнего метода заключается в том, что с его помощью тестируется стабильность на разных дальностях или временные задержки и полное изменение в процессе обработки. Результатом хорошей фазовой стабильности ( $< 0,5^\circ$ ) является более лучшая оценка скорости, устранение отражений от местных наземных объектов и более эффективный поиск вторичных эхосигналов магнитронными системами.

#### Корреляция перекрестной поляризации и ZDR

Мерой качества работы радиолокатора с двойной поляризацией является корреляция перекрестной поляризации ( $\rho_{HV}$ ). Если радиолокатор направлен на легкий дождь или морозящие осадки, которые, как правило, характеризуются единообразной круглой формой, то корреляция должна быть весьма близкой к 1,0. Эффективные радиолокаторы сообщают значения, как правило, в 0,995 или еще более точно. Это свидетельствует о том, что двойная поляризация является весьма хорошей и хорошо конфигурированной.

Если вертикальные сканирования проводятся в условиях наличия слоистых форм, то значения  $Z_{DR}$  должны быть равны 0 и не иметь никакой азимутальной зависимости.

7.7 **ОБСЛУЖИВАНИЕ И КАЛИБРОВКА**

Радиолокатор является, вероятно, самым сложным из приборов, которые метеорологическая служба или поставщик услуг должны эксплуатировать и обслуживать. Он требует очень высокого уровня профессиональной подготовки и развития профессиональных навыков. Обслуживание является исключительно важным для обеспечения постоянной эксплуатации радиолокатора, а калибровка является исключительно важной для обеспечения качества данных. Как обслуживание, так и калибровка, должны осуществляться в соответствии с процедурами, предписанными производителем. Ниже следует их общее описание.

7.7.1 **Обслуживание**

Современные радиолокаторы, если она надлежащим образом установлены и эксплуатируются, не должны часто выходить из строя. Некоторыми производителями заявлено, что для их радиолокаторов среднее время наработки на отказ (СВНО) составляет около года. Однако эти заявления зачастую являются оптимистичными, и реализация СВНО требует планового профилактического обслуживания. Для минимизации времени ремонта необходимы плановое повседневное обслуживание и достаточное количество технического персонала. Наиболее частыми являются сбои в работе механических и электронных компонентов (Sireci et al., 2010; рисунок 7.16).

Следует отметить, что факторы, не связанные непосредственно с радиолокатором, могут привести к тому, что данные не будут доходить до пользователей. К ним относятся сбои в работе или плохое качество силовой сети, или же могут иметь место слишком многочисленные перепады или колебания напряжения. Работа энергосети может быть нарушена из-за удара молнии или по другим причинам. Может быть нарушена телекоммуникация. Могут произойти сбои в работе систем кондиционирования воздуха, результатом чего будет отключение чувствительных электронных систем.

Профилактическое обслуживание должно включать по меньшей мере квартальную проверку всех подверженных износу частей радиолокатора, таких как редукторы, моторы,

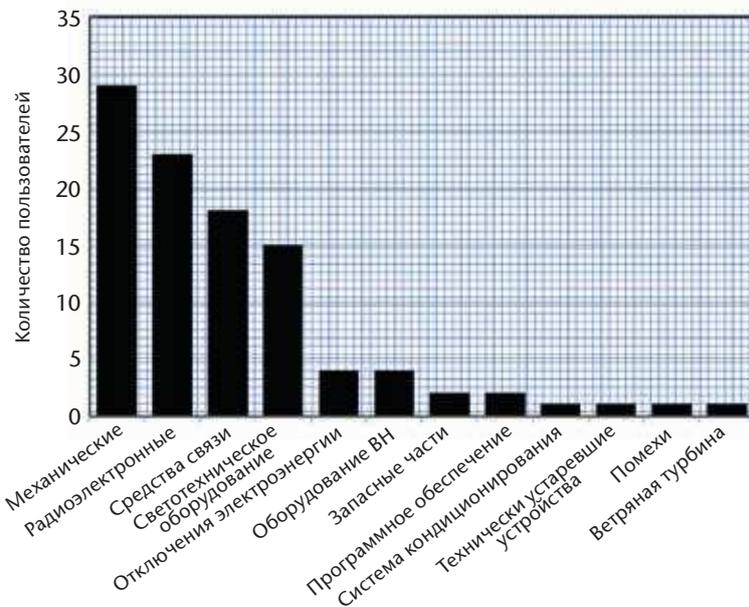


Рисунок 7.16. Результаты проведенного ВМО обзора метеорологических радиолокаторов, показывающие основные отказные режимы радиолокатора (Sireci et al, 2010); рисунок любезно предоставлен Oguzhan Sireci из Турецкой государственной метеорологической службы.

вентиляторы и инфраструктуры. Местный обслуживающий персонал должен вносить результаты проверок в журнал обслуживания радиолокатора и, по мере надобности, посылать их в центральную обслуживающую организацию. Когда имеется много радиолокаторов, можно организовать, вероятно, централизованную службу материально-технического снабжения и ремонтный цех. Последний получает вышедшие из строя части радиолокаторов, ремонтирует их и передает их в службу материально-технического снабжения для хранения в качестве запасных частей, которые будут использоваться по мере необходимости в месте эксплуатации. Обязательным условием является ведение основной документации.

Для выполнения ремонтных работ служба должна быть достаточным образом укомплектована, а именно:

- a) запасными частями для всех самых важных элементов радиолокатора с длительным сроком изготовления, такими как радиолампы, твердотельные компоненты, панели, шасси, моторы, редукторы, блоки питания и т.д. Опыт показывает, что желательно предусмотреть 30 % первоначальных затрат на радиолокатор для приобретения запасных частей, хранимых в месте его расположения. Если имеется много радиолокаторов, то эта процентная доля может быть снижена до уровня примерно 20 % при соответствующем распределении между централизованным и местным обслуживанием;
- b) испытательной аппаратурой, включая оборудование для калибровки, упомянутое выше. Обычно затраты на нее составляют приблизительно 15 % от стоимости радиолокатора;
- c) хорошо подготовленным персоналом, способным определить проблему и быстро и эффективно произвести ремонтные работы, что является исключительно важным.

Продуманная организация обслуживания повысит регулярность работы радиолокатора до 96 % времени в течение года при наличии стандартного оборудования. Более высокая эффективность работы возможна при более высоких расходах.

Рекомендуемый минимум оборудования для калибровки и обслуживания включает следующие виды:

- a) генератор микроволновых сигналов;
- b) микроволновый измеритель мощности;
- c) мегагерцевый осциллограф;
- d) микроволновый измеритель частоты;
- e) рупорные антенны со стандартным усилением;
- f) генератор сигналов промежуточной частоты;
- g) микроволновые компоненты, включая нагрузочные устройства, блоки сопряжения, аттенюаторы, соединительные устройства, кабели, адаптеры и т. д.;
- h) универсальный анализатор микроволнового спектра в центральной службе;
- i) стандартные электрические и механические инструменты и оборудование.

### 7.7.2 Калибровка

В идеальном случае для полной калибровки отражаемости используется внешняя мишень с известным коэффициентом радиолокационной отражаемости, такая как

сфера с металлическим покрытием. Идея заключается в том, чтобы проверить антенну и волноводы на соответствие их номинальным характеристикам. Однако данный метод используется очень редко из-за практических трудностей подъема сферы и многочисленных отражений от наземных объектов, а также необходимого времени и квалификации (Brunkow, 2001).

Стандартная процедура заключается в использовании солнца в качестве источника калибровки в плане мощности и точности наведения. Солнце является источником микроволнового излучения и имеет вид диска порядка 0,5 градуса (Tapping, 2001). Однако путем максимизации мощности может быть достигнута большая точность. Эффекты распространения луча могут сказаться на низких углах возвышения, и поэтому более высокие углы часто используются для калибровки по солнцу. Проведение повторных измерений обеспечит статистически более точные результаты. Следует отметить, что точность направленности угла места антенны может зависеть от угла, и поэтому следует проводить измерение разных углов.

При обычной калибровке антенна, как правило, не проверяется, а калибруются волноводный тракт и приемо-передающая система. Обычно предписываются следующие мероприятия:

- a) измерение излучаемой мощности и формы волнового фронта в соответствующем диапазоне частот;
- b) проверка излучаемой частоты и частотного спектра; при этом следует фильтровать внеполосную мощность;
- c) подача известного микроволнового сигнала на вход приемника, с тем чтобы проверить правильность связи определяемых радиолокатором уровней отражаемости с мощностью входного сигнала;
- d) измерение отношения сигнал-шум, которое должно быть в пределах номинального диапазона, соответствующего техническим характеристикам радиолокатора.

Если по результатам этих калибровочных проверок выявлены какие-либо изменения или отклонения, необходимо произвести корректирующие настройки.

Доплеровская калибровка включает: проверку и настройку фазовой стабильности с использованием фиксированных целей или искусственных сигналов, масштабирование реальной и мнимой частей комплексного видеосигнала и тестирование процессора сигналов по известным искусственно генерируемым сигналам.

Установка по горизонтали и угла места лучше всего проверяется отслеживанием положения солнца в режиме «только прием» и путем использования имеющейся информации о положении солнца; в противном случае нужна механическая установка уровня антенны. Наличие или отсутствие эхосигналов от неподвижных наземных целей может также служить грубой проверкой азимутальной диаграммы направленности антенны и качества работы передатчика или приемника.

Несмотря на то, что современные радиолокаторы обычно снабжаются очень стабильными электронными устройствами, калибровки необходимо проводить достаточно часто, чтобы гарантировать надежность и точность данных. Калибровка должна производиться либо квалифицированным персоналом, либо с помощью автоматических методик, например, с использованием контрольно-диагностического оборудования, которое работает в непрерывном режиме. В первом случае, который требует участия оператора, оптимальными являются по крайней мере калибровки, проводимые каждые 6 месяцев. Для выполнения калибровки в автоматическом режиме могут быть спроектированы новые системы. Простые сравнительные проверки по мощности и местоположению эхосигнала можно осуществлять часто, используя два или более радиолокаторов с перекрывающимися зонами обзора и следящих за соответствующей целью (Zhang et al., 2005).

Методики сбора и обработки данных, такие как накопления данных по отражаемости, распределения вероятности отражаемости как функции дальности для минимального обнаруживаемого сигнала, мониторинг ячейки передачи-приема, а также эхопроверка и установка углов места могут быть использованы для мониторинга рабочего состояния радиолокатора. Погрешности в накоплениях данных о радиальной скорости могут выявить проблемы фильтрации мешающих помех — обычно недостаточной фильтрации, результатом чего являются отклонения в радиальной скорости в направлении нуля (Joe, 2010).

Радиолокаторы с двойной поляризацией требуют наличия двух приемников, которые должны соответствовать друг другу. Допуски в отношении всех компонентов необходимо ужесточить, поскольку измеряются малые величины. Затем для проверки этого могут быть использованы самосогласованность и сканирования чашеобразной антенной для режекции  $Z_{DR}$ . Калибровка самосогласованности означает выведение  $Z$  из  $K_{DP}$  с использованием эмпирического соотношения, полученного по данным измерителя дождевых капель (рисунок 7.17) и рассчитанных при помощи теоретической формулы. После этого проводится корректировка отражаемости (погрешность калибровки) до тех пор, пока выведенная отражаемость  $K_{DP}$  не будет соответствовать скорректированному показателю отражаемости. Исходя из качества соотношения  $Z-K_{DP}$  (плотность рассеяния) можно рассмотреть вопрос об использовании KDP в качестве независимого параметра для оценки осадков. В случае вертикальной направленности радиолокатора (тарелка антенны выглядит как чашеобразная поилка для птиц) в условиях дождя, выпадающего из слоистообразных облаков,  $Z_{DR}$  должна быть равна нулю, а если нет, то необходимо внести поправки. Мониторинг сообщенного максимума  $\rho_{HV}$  обеспечит проверку всей работы системы, а именно хорошие радиолокаторы должны сообщать значение, равное 0,995 или еще лучше.

Инновационной методикой является использование радиолокатора космического базирования TRMM или ГПМ для калибровки метеорологических радиолокаторов наземного базирования. Это единственный и стабильный инструмент нижнего обзора, который совершает облеты метеорологических радиолокаторов наземного базирования. В качестве успешной метрики для обеспечения согласованности при калибровке

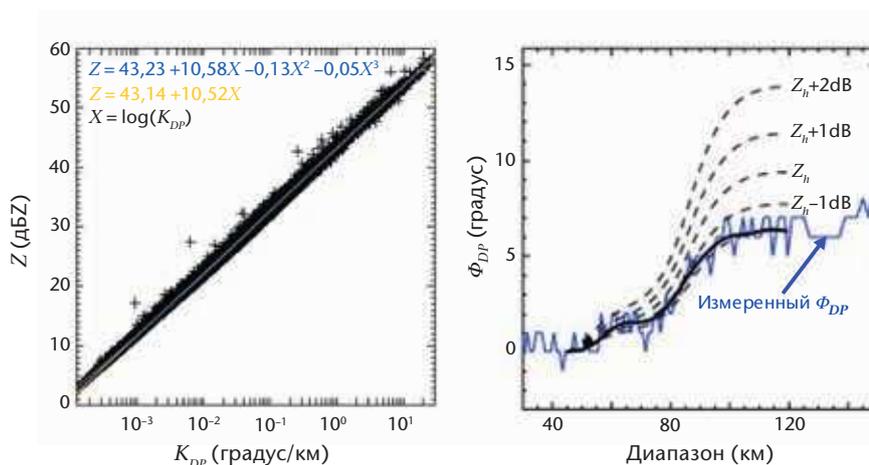


Рисунок 7.17. Существует тесная взаимосвязь между отражаемостью и конкретной дифференциальной фазой ( $Z$  и  $K_{DP}$ ). На левом рисунке эта взаимосвязь показана по данным измерения дисдрометра. На правом рисунке показано одно радиальное направление данных со значительной дифференциальной фазой. Посредством корректировки отражаемости и перерасчета дифференциальной фазы можно осуществить последовательную калибровку радиолокатора (рисунки любезно предоставлены Isztar Zawadzki).

радиолокаторов используются сравнения вершин эхосигналов при фиксированной и умеренно низкой чувствительности, когда ослабление не является значимым (Anagnostou et al., 2001).

## 7.8 УСТАНОВКА РАДИОЛОКАТОРОВ

### 7.8.1 Выбор оптимального места

Выбор оптимального места для установки метеорологического радиолокатора зависит от предполагаемого использования. Когда имеется определенная зона, по которой требуются штормовые предупреждения, то обычно самым лучшим компромиссом является расположение оборудования на расстоянии 20–50 км от интересующей зоны и, как правило, в направлении навстречу ветру в соответствии с основной траекторией движения штормов. Рекомендуется устанавливать радиолокатор несколько в стороне от основной траектории, с тем чтобы избежать сложностей измерения при прохождении штормов над радиолокатором. Одновременно это приведет к получению высокого разрешения над интересующей зоной и созданию более заблаговременного предупреждения о надвигающихся штормах (Leone et al., 1989).

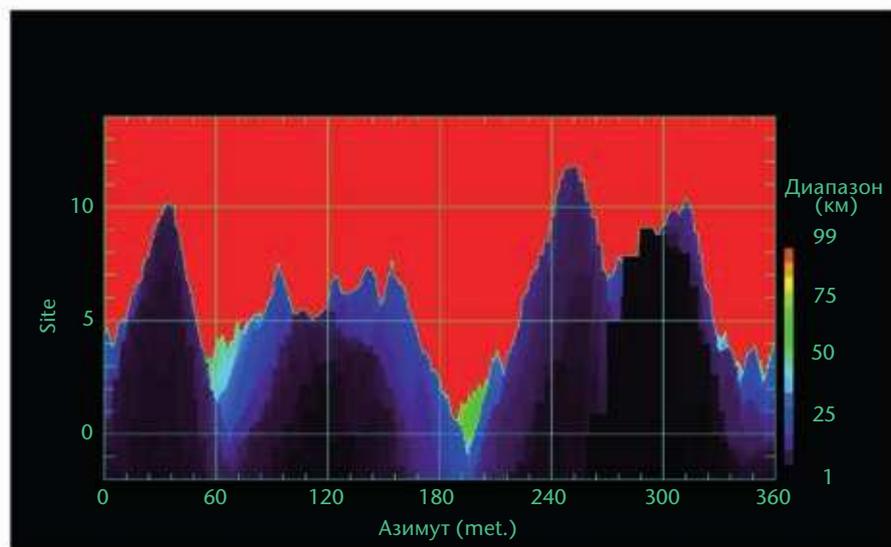
В том случае, если радиолокационная сеть предназначается прежде всего для синоптических применений, в средних широтах, радиолокаторы следует располагать на расстоянии приблизительно 150–200 км друг от друга. Расстояние может быть увеличено на широтах, более близких к экватору, если радиолокационные эхосигналы, представляющие интерес, часто достигают больших высот. Во всех случаях радиолокаторы с узким лучом будут давать наилучшую точность для измерения осадков.

Благодаря адекватности и доступности таких цифровых комплектов данных об угле места, как GTOPO30 (<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>), SRTM30 и SRTM03 (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>), появились программные приложения, которые помогают выбрать место. Базовым продуктом является карта дальности радиолокационного горизонта, на которую наносится угол возвышения над горизонтом относительно угла по азимуту радиолокатора, при этом учитывается распространение луча в атмосфере (рисунок 7.18). На этом рисунке дальность до земной поверхности показана цветовой кодировкой как функция углов по азимуту и высоте. Цветом показана дальность, на которой луч радиолокатора (в этом случае предполагается модель Земли 4/3) будет собирать пригодные для использования данные. Это особенно полезно при сложном характере земной поверхности, когда радиолокатор, расположенный в долине, должен обеспечивать охват на низких уровнях (в долине), но с ограниченной дальностью, поскольку характер осадков значительно меняется на пути от горного хребта до горной долины. Например, радиолокатор может видеть на расстоянии 50 или 60 км вдоль азимута в  $190^\circ$  при углах места в 1 или  $2^\circ$ . Подобный анализ не может учитывать наличие деревьев или искусственных опор.

Благодаря этому графическому изображению могут быть конкретно определены углы сканирования для оптимального наблюдения за требуемыми наиболее важными участками. Комплекты данных не могут учитывать блокировку, вызванную местными предметами, такими как деревья, здания или вышки.

На выбор места установки радиолокатора влияют многие экономические и технические факторы, а именно:

- a) существование дорог для подъезда к радиолокатору;
- b) наличие электролиний и линий связи. Часто необходимо добавлять серийно выпускаемые установки для защиты от молний;
- c) стоимость земли;
- d) близость средства контроля и обслуживания;



**Рисунок 7.18.** Глобальные данные цифровой модели рельефа (ЦМР) имеются и являются достаточно точными для их использования с целью оценки и определения места установки метеорологического радиолокатора. Изображение показывает расстояние, на котором могут быть собраны полезные данные, при этом учитываются азимут и угол места.

- e) необходимо исключить затенение луча препятствиями. Не должно быть никаких препятствий при угле места антенны над горизонтом, большем половины ширины луча, либо препятствий с горизонтальными размерами больше половины ширины луча;
- f) необходимо, насколько это возможно, избегать влияния отражений от локальных наземных объектов. Для радиолокатора, который будет использоваться для работы на относительно малой дальности, после внимательного обследования места установки и изучения подробных топографических карт, иногда можно найти относительно плоскую территорию внутри небольшого понижения, края которого будут служить естественной защитой от помех для боковых лепестков диаграммы направленности антенны при минимуме блокирования основного луча. Во всех случаях обследование места установки должно включать фото- и оптико-теодолитную проверку на потенциальные препятствия. В определенных случаях полезно применить подвижную радиолокационную систему для подтверждения того, что данное место является подходящим. В некоторых современных радиолокационных системах имеется программное и аппаратное обеспечение, которое подавляет большую часть отражений от наземных объектов при минимальном отбраковывании эхосигналов от метеорологических объектов (Heiss et al., 1990);
- g) когда радиолокатор используется в целях обнаружения метеорологических объектов на больших расстояниях, как это может быть в случае тропических циклонов или других применений на побережье, то его обычно устанавливают на вершине холма. В зону его видимости попадает значительное количество отраженных сигналов от местных наземных предметов, которые могут не иметь особой важности на большой дальности (см. раздел 7.5.3, посвященный подавлению помех);
- h) каждое обследование потенциальных мест установки радиолокатора должно включать тщательную проверку на наличие электромагнитных помех в целях максимально возможного исключения взаимного влияния с другими системами связи, такими как телевидение, микроволновые линии, или с другими радиолокаторами.

Следует также убедиться, что микроволновое излучение радиолокатора не представляет угрозы для здоровья населения, живущего вблизи предполагаемого места его установки (Skolnik, 1970, 1990; Leone et al., 1989).

### 7.8.2 **Обмен данными, организация сетей, база данных и обработка данных**

Достижения в области телесвязи и компьютерной технологии предоставляют возможность передачи радиолокационных данных из большого числа мест на центральный узел для обработки и визуализации при помощи общих компьютерных систем. С учетом существующей сейчас сети Интернет, тарифов и расходов, связанных с сотовыми телефонами и даже спутниковыми данными, возможным является глобальный обмен данными — по крайней мере ограниченными, но полезными и подходящими для использования радиолокационными данными, хотя необходимо исследовать подробную информацию о сетях телесвязи. Следует помнить о том, что радиолокаторы часто располагаются в удаленных местах, где отсутствуют современные системы телесвязи или требуются первоначальные капиталовложения для минимизации затрат на их эксплуатацию и техническое обслуживание.

В некоторых странах существует множество радиолокационных сетей, предназначенных для различных применений, таких как погода, опасные для авиации явления в аэропортах, управление гидрологическими ресурсами, управление воздушным движением и даже таможенная служба и иммиграция. Обмен данными является возможным, но при этом следует учитывать, что применения носят весьма конкретный характер и зависят от весьма специфичных методологий сбора данных и возможно даже технологий. В некоторых местах это является функциональным, однако требует значительных усилий для интеграции и интерпретации.

У ВМО имеются действующие стандарты для некоторых видов радиолокационной продукции. Предполагая возникновение потребности в радиолокационных данных для целей численного прогнозирования погоды на региональном и глобальном уровнях, ВМО приступила к реализации проекта ВМО по обмену радиолокационными данными в целях определения стандартов для необработанных радиолокационных данных (Michelson et al., 2013). Помимо этого, была создана база радиолокационных данных ВМО, предназначенная для сообщения базовых метаданных о радиолокаторах и радиолокационных сетях в глобальном масштабе (Sireci et al., 2010).

Обмен радиолокационной продукцией осуществляется в целях создания комбинированной или мозаичной продукции по данным от многих радиолокаторов, которая обычно предназначается для представления осадков, выпадающих на значительной территории, в целях обеспечения слежения за погодой. Это является общепринятой практикой, осуществляемой как в странах, так и между ними. Консорциум ОПЕРА (Европейская оперативная программа по обмену метеорологическими радиолокационными данными) — это централизованная мультинациональная модель по объединению сетей и обработке данных (Duru et al., 2010). Консорциум БАЛТРАД (<http://baltrad.eu>) — это еще одна модель объединения сетей и обработки данных, предназначенная для работы с гетерогенными радиолокационными сетями, которая представляет собой открытый источник, действующий по принципу равноправного обмена данными и программным обеспечением для обработки данных, что позволяет отдельным членам консорциума получать или отправлять данные, конфигурировать и обрабатывать программное обеспечение по своему усмотрению (Michelson et al., 2010). Отдельная проблема заключается в подготовке набора гетерогенных радиолокационных данных, представляющих собой продукцию, полученную по разным географическим проекциям, с разным пространственным и временным разрешением и видом обработки. Это привело к появлению концепции обмена полярными необработанными радиолокационными данными для уменьшения подобных проблем. Однако в зависимости от типа радиолокатора и его конфигурации к необработанным данным уже применялись в

различной степени разные виды обработки. Подобные проблемы касаются также обмена радиолокационными данными в пределах страны, поскольку радиолокаторы могут принадлежать к разным поколениям.

Что касается обработки данных, то на сегодняшний день существует множество выборов. Каждый производитель предлагает свои собственные системы обработки и визуализации радиолокационных данных, при этом обычно с разными условиями, такими как включенная возможность организации сети или получения лицензии. Существуют также такие системы, как ТИТАН (идентификация, отслеживание, анализ и текущее прогнозирование гроз), которая представляет собой популярное и доступное бесплатно программное обеспечение, используемое во многих научных исследованиях и несколькими метеорологическими службами (Dixon and Weiner, 1993). Изначально эта система была задумана в качестве инструмента, предназначенного для деятельности в области активного воздействия на погоду, однако стала затем многоцелевой. Имеется множество сложных коммерческих систем, которые являются независимыми и специализируются на самых современных применениях, связанных с суровой погодой, таких как Система поддержки принятия решений о выпуске предупреждений — Комплексная информация (WDSS II) (Lakshmanan et al., 2007; <http://www.wdssii.org/>). Можно создать радиолокационную систему, используя средства, предоставляемые БАЛРАД или Библиотекой НАСА по радиолокационному программному обеспечению (Wolff and Kelley, 2009). В отношении создания своей собственной системы имеется возможность проведения переговоров или сотрудничества с НМГС или каким-либо правительственным агентством. Функциональные возможности варьируют от самых базовых декодеров до систем, генерирующих базовую продукцию, систем с возможностью обеспечения высокого качества данных и автоматического обнаружения суровых штормов и их классификации. Принимаемая к эксплуатации система должна быть основана не только на функциональных возможностях, но и определяться также видом применения и наличием доступных возможностей в области научно-технической поддержки и обслуживания.

## 7.9 ИСТОЧНИКИ ОШИБКИ

Ошибки в радиолокационных данных необходимо рассматривать в контексте конкретного применения. Задачей часто является оценка осадков, и необходимо применение строгих процедур обеспечения качества данных, с тем чтобы удалять и корректировать артефакты. Существуют разные уровни контроля качества данных. Гидрологические применения требуют оценок даже в случае плохого качества данных, в то время как при ассимиляции данных допускается наличие отсутствующих данных, но не их плохое качество. Многие проблемы плохого качества радиолокационных данных вызваны воздействием внешней среды, но не самого радиолокатора (рисунок 7.2). Следует отметить, что эти количественные применения метеорологического радиолокатора все еще находятся на этапе разработки, в то время как качественное использование радиолокационных данных для понимания и обнаружения суровых штормов является совершенным, и оно полностью оправдывает существование радиолокационных сетей.

Радиолокационное уравнение выводится с учетом многих предположений. В тех случаях, когда эти предположения не оправдываются, отражаемость может рассматриваться в качестве ошибки. Например, если цель является единообразной или полностью заполненной либо является смешанной, то данное уравнение не является соответствующим. Помимо этого, если параметры, включенные в данное уравнение, такие как коэффициент усиления антенны, потери в волноводе или длительность импульсов являются неправильными, то константа радиолокатора будет представлять собой ошибку, результатом которой будут систематические погрешности при преобразовании показателей мощности в показатели отражаемости. Ниже рассматриваются различные источники ошибки применительно к качественным и количественным применениям.

### Заполнение радиолокационного луча

Во многих случаях, и в особенности на больших расстояниях от радиолокатора, ширина луча является значительной и импульсный объем не целиком заполняется однородными осадками, т.е. радиолокационный луч может быть лишь частично заполненным. Это особенно справедливо в отношении низко расположенных метеорологических систем (< 1 км по высоте, например снежные бури, связанные с эффектом озера), когда луч полностью проходит мимо зоны осадков и на расстоянии порядка 50 км не видно никаких эхосигналов осадков. На больших расстояниях импульсный объем является весьма большим и, естественно, происходит значительное сглаживание по мере свертывания радиолокационного луча целью. В подобной ситуации луч находится также очень высоко над земной поверхностью и не очень хорошо количественно отражает осадки над поверхностью Земли. В случае систем, работающих на большей высоте (например, 15 км), радиолокатор способен обнаруживать эти системы на больших расстояниях (> 250 км) и представляет собой значительную ценность для прогнозистов, поскольку эти системы будут весьма интенсивными. Как правило, радиолокационные измерения могут оказаться полезным с точки зрения количественных параметров на расстояниях менее 80 км при ширине луча радиолокатора в  $1^\circ$  и порядка 110 км при ширине луча радиолокатора в  $0,65^\circ$ , без внесения при этом дополнительных корректировок в данные (см. рисунок 7.33).

### Неоднородность вертикального распределения осадков

Параметром, связанным с заполнением радиолокационного луча, является несоответствие интенсивности осадков как функция высоты. Первым параметром, представляющим интерес при радиолокационных измерениях, обычно являются осадки на уровне земной поверхности. Что касается горизонтальной изменчивости, то вертикальная изменчивость или вертикальный профиль играют существенную роль в оценке осадков на поверхности земли. Из-за эффектов, связанных с шириной луча, его наклоном и кривизной Земли, радиолокационные измерения осадков на больших расстояниях или эквивалентно по высоте осуществляются на меньших высотах по сравнению с измерениями осадков над поверхностью земли (см. раздел 7.10.4.1).

### Ослабление из-за воздействия осадков

Ослабление сигнала из-за дождя может быть значительным, в особенности на более коротких длинах волн радиолокатора (5 и 3 см). Ослабление из-за снега меньше, чем ослабление при дожде, но может быть все же более существенным на больших расстояниях. Вопреки общему мнению, ослабление в случае радиолокатора, работающего в S-диапазоне, существует, но определить его более трудно. Методика двойной поляризации использует параметр специальной дифференциальной фазы ( $K_{DP}$ ), который не зависит от ослабления и является более эффективным на более коротких длинах волн.  $K_{DP}$  — это параметр шума, и эта методика все еще совершенствуется (см. раздел 7.10.4.4).

### Затенение луча

В зависимости от места установки радиолокатора его луч может быть частично или полностью заслонен рельефом или препятствиями, расположенными между радиолокатором и целью. Это ведет к недооценкам отражаемости и соответственно к ошибкам в интенсивности выпадения дождевых осадков.  $K_{DP}$  — это локальный параметр, являющийся мерой дифференциального ослабления (определенного по фазе) в пределах облучаемого радиолокатором объема, и поэтому он не зависит от затенения луча. В случае узкого затенения интерполяция данных может быть достаточной для количественного применения. В случае качественного применения затенение луча является проблемой, которую аналитик может преодолеть. При полном затенении луча с определенной степенью успеха могут быть использованы вертикальные корректировки на основе профиля отражаемости.

### Ослабление за счет намокания ветрозащитного обтекателя антенны радиолокатора

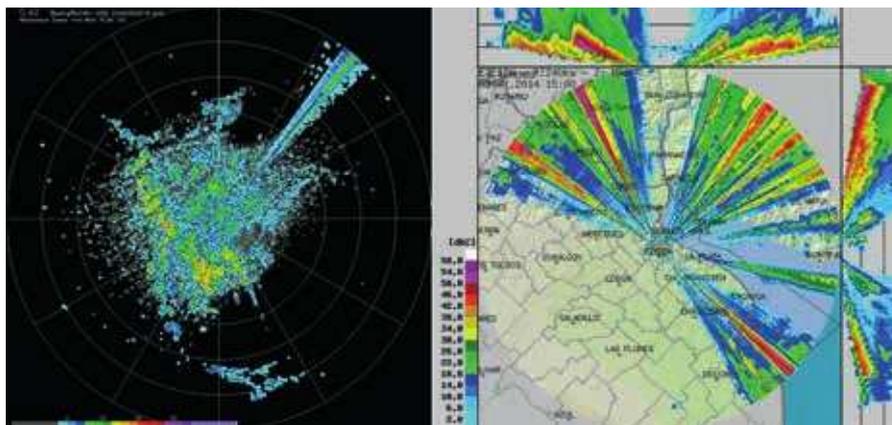
Большинство радиолокационных антенн защищены от ветра и дождя обтекателем, который обычно изготавливается из стеклопластика. Обтекатель спроектирован таким образом, чтобы вызывать минимальные потери излучаемой энергии. Например, благодаря такому устройству обтекателя потери при двойном прохождении сигнала могут довольно легко поддерживаться на уровне ниже 1 дБ в С-диапазоне при нормальных условиях. Однако при обильном дожде поверхность обтекателя может покрыться тонкой пленкой воды или льда, вызывающей сильное, зависящее от азимута, ослабление.

При сочетании с ослаблением из-за осадков и на более коротких длинах волн эхосигналы радиолокатора могут быть полностью подавлены. Хотя это может показаться катастрофическим, но в реальности это происходит в течение ограниченного времени (около 10 минут), и в плане качественного использования предупреждения будут уже, вероятно, выпущены. Что касается ассимиляции данных, то доступной будет двойная поляризация данных ( $K_{DP}$ ), что свидетельствует о том, что имело место резкое ослабление, и остальные данные будут непригодными для использования. Для гидрологических применений, которые действуют во временных масштабах в размере часов или суток, краткосрочная потеря данных для прогнозирования паводков не является существенной. В зависимости от режима метеорологических условий затронуто может быть прогнозирование быстроразвивающихся бурных паводков.

### Электромагнитные помехи

Электромагнитные помехи от других радиолокаторов или установок, таких как локальные радиосети (RLAN), становятся все более значительными и требуют принятия существенных мер по защите от них. Помехи, создаваемые между соседними радиолокаторами, уменьшаются за счет использования несколько иных частот (но все же в той же самой полосе) с применением надлежащих фильтров, установленных на передатчике и приемнике. Иногда случайные помехи могут возникать от радиолокаторов воздушного и наземного базирования, которые работают в С-диапазоне и используют ту же самую частоту.

Использование электромагнитного спектра определяется на основе соглашения и его порядок регулируется Международным союзом электросвязи. На Всемирной конференции радиосвязи 2003 г., после запроса со стороны сообщества пользователей беспроводной связи о предоставлении спектра телекоммуникационной индустрии был открыт доступ к частотам С-диапазона на регулируемой, вторичной основе без необходимого лицензирования и с условием несоздания помех и совместного использования с метеорологическим сообществом. Для того, чтобы не создавать помехи, предполагается, что в аппаратуре RLAN будет применяться устройство динамического выбора частоты, которое предназначено для освобождения канала в С-диапазоне в том случае, если обнаружен метеорологический радиолокатор. Однако алгоритмы, используемые для обнаружения метеорологического радиолокатора, являются недостаточными для предотвращения помех до того, как они освобождают данный канал. Доплеровский спектр сигналов RLAN появляется в виде белого шума и может быть устранен при помощи адаптивных методов шумоподавления. Однако они повышают уровень шума и уменьшают чувствительность метеорологического радара в случае обнаружения RLAN. ВМО выпустила директивные документы, касающиеся совместного использования частот С-диапазона. На рисунке 7.19 показаны некоторые примеры подобных помех для источников на разном расстоянии. Тем не менее системы интерференции, подобные этим, наблюдаются все более часто. Слева на рисунке показано изображение общей отражаемости (без фильтрования доплеровского отражения от местных наземных объектов) на экране индикатора кругового обзора (ИКА) при угле места  $0,42^\circ$ , полученное в ходе контролируемого исследования, когда радиолокатор С-диапазона с RLAN конкретно размещался в известных местах на расстоянии 6,4 км с азимутом порядка  $40^\circ$ . RLAN наблюдается при азимуте  $7^\circ$ – $10^\circ$ . Более близкое (или далекое) расположение RLAN приведет к расширению (или сужению) систем интерференции. В данном эксперименте наблюдение за RLAN может



**Рисунок 7.19.** Изображение слева демонстрирует тип предполагаемых помех со стороны локальной радиосети, находящейся на расстоянии 6,4 км с углом места  $0,42^\circ$ . Изображение справа получено оперативным метеорологическим радиолокатором и любезно предоставлено Claudia Campetella из Национальной метеорологической службы Аргентины.

осуществляться на расстоянии до 16,7 км (максимальная величина в вертикальном столбе в пределах сканирования по объему). Изображение справа — это продукт «максимальной отражаемости» от оперативного радиолокатора Эзейза в Аргентине, и оно показывает систему, включающую, возможно, 12 RLAN, которые находятся в пределах 5 км от радиолокатора. Это пример экстремальной интерференции. Помимо этого, в случае близкого нахождения, интерференция может повлиять на трехмерные данные радиолокатора.

Необходимо проявлять предельную осторожность, поскольку эти системы будут разворачиваться в массовом порядке и на безлицензионной основе, и в этом случае будет трудно пресекать нарушения. Сотрудничество и совместная работа ожидаются, требуются и поощряются. Помехи возникают также в S-диапазоне из-за беспроводной технологии 4G, а также других радиолокаторов S-диапазона (управление воздушным движением). ВМО подготовила директивные указания или заявления относительно совместного использования частотного спектра с учетом этих новых технологий (см. приложение 7.A).

### Отражение от местных наземных объектов

Искажение эхосигналов от дождя отражениями от наземных объектов может повлечь очень большие ошибки в оценке интенсивности осадков и скорости ветра. Антенны большинства современных радиолокаторов имеют стандартные технические характеристики боковых лепестков, которые трудно улучшить, поскольку это является геометрической проблемой. Боковые лепестки могут быть улучшены или сдвинуты в иные угловые положения, однако отдаление рупорного облучателя антенны от фокальной точки приводят к ухудшению коэффициента усиления антенны или ширины луча. Исходным методом для минимизации отражения от наземных объектов является правильный выбор места установки радиолокатора. В идеальном варианте радиолокатор следует размещать в углубленном месте или в месте его размещения должны быть деревья для поглощения и рассеяния боковых лепестков без блокирования при этом главного лепестка. Методы подавления сигналов и изъятия данных широко рассмотрены.

### Аномальное распространение

Аномальное распространение нарушает траекторию радиолокационного луча и ведет к усилению отражений от наземных объектов в результате преломления луча в направлении к Земле. Оно может также способствовать обнаружению радиолокатором

циклонов, находящихся гораздо дальше обычного радиуса действия, но с ошибками в определении их удаления из-за искажения дальности. В некоторых районах аномальное распространение является частым, когда в атмосфере происходит сильное уменьшение влажности и/или повышение температуры с высотой. Отражения сигналов, связанные с аномальным распространением, могут весьма запутать неопытного наблюдателя. Эти эхосигналы устраняются таким же образом, что и отражения от наземных объектов.

Следует отметить, что, как правило, местонахождение луча неизвестно, поскольку атмосферный профиль индекса рефракции является идеализацией (Joe, 1999). Ассимиляция данных, связанных с объемом облучения радиолокатора, при типичном числе углов места (10–24) является проблематичной, поскольку модели численного прогнозирования погоды имеют в настоящее время, как правило, 50–80 модельных уровней. Нехватка точной информации о местоположении луча и несоответствие между количеством радиолокационных данных и модельными уровнями исключают возможность использования этих данных для ассимиляции на расстояниях более 100 км.

### **Точность установки диаграммы направленности антенны**

В хорошо сконструированной системе положение антенны может быть известно в пределах  $0,1^\circ$ . Однако ошибки в положении антенны могут увеличиваться из-за наклонной платформы антенны или нестабильности в контуре или механизме обратной связи, вызванной износом оборудования. Это является особенно важным при низких углах места, поскольку малые изменения угла места могут приводить к большим изменениям в охвате параметров погоды в приземном слое атмосферы.

### **Электронная стабильность**

Современные электронные системы с течением времени претерпевают небольшие изменения и были значительно усовершенствованы с ранних дней метеорологических радиолокаторов, когда приходилось ежедневно осуществлять калибровки приемника. Хорошо сконструированный радиолокатор может характеризоваться стабильностью (изменение  $< 1$  дБ) в течение месяца. Добавление системы мониторинга со встроенной температурой тестирования может привести в действие подачу предупреждающего сигнала или послать сообщение по электронной почте при обнаружении неисправности, а также минимизировать время простоя радиолокаторов.

### **Вариации соотношения $Z-R$**

Для преобразования отражаемости в интенсивности осадков необходимо эмпирическое соотношение между  $Z$  и  $R$ . Соотношением, которое является самым знаменитым и наиболее часто используемым применительно к оперативным радиолокаторам, является соотношение Маршалла-Палмера (1948 г., в настоящее время известно, как соотношение Маршалла-Ганна, 1952 г.). Как сообщалось, степень неопределенности этого соотношения характеризуется коэффициентом 2. Это также относится к снегу. Отражаемость — это функция распределения размера капель, и разные распределения размера капель могут давать одинаковое значение  $Z$ . Таким образом, с разными степенями успеха были сформулированы разнообразные соотношения  $Z-R$  для разных типов осадков — конвективных, слоистых и снега (см. раздел 7.10.4.2). Для радиолокатора с двойной поляризацией сейчас разработана методика, использующая параметр двойной поляризации  $K_{DP}$ . Предстоит убедиться в том, может ли корректировка вертикального профиля конкурировать с методом  $K_{DP}$  в ситуациях частичного затенения.

### **Радиальная скорость**

Скорости, измеряемые при помощи доплеровского радиолокатора, характеризуются только радиальным направлением, что может быть причиной неоднозначных показаний.

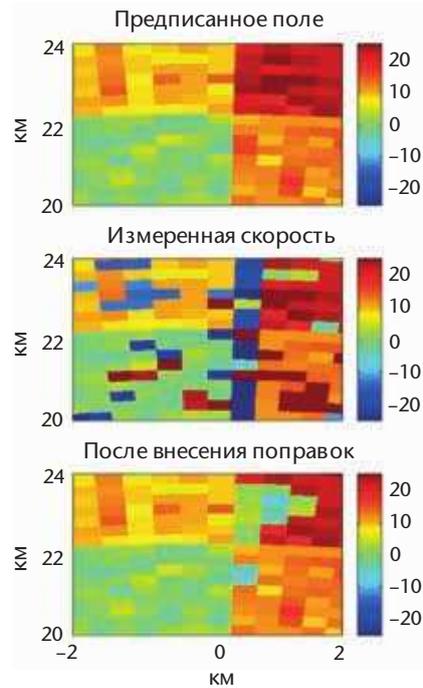
Автоматизированная интерпретация все еще представляет собой область активных исследований, однако интерпретации возможны в определенных ситуациях, а именно крупномасштабные синоптические потоки и мелкомасштабные конвективные потоки, при условии наличия компетентных и хорошо подготовленных аналитиков.

Скорости представляют собой взвешенные оценки отражаемости или движение осадков/цели. Если радиальные компоненты вертикальных движений являются ничтожными (например, низкие углы места), то они представляют движение осадков, которое часто может интерпретироваться в качестве ветра. Однако следует проявлять осторожность, с тем чтобы не интерпретировать скорость в качестве движения эхосигнала осадков или самой системы. Например, в случае ленткулярного потока над горной вершиной движение эхосигнала (показанного отражаемостью) может быть стационарным, но частицы осадков движутся через это явление, и эхосигнал будет иметь ненулевое доплеровское значение. Насекомые и птицы могут вносить погрешности в значения радиальных скоростей. В целом эти погрешности являются относительно небольшими (Wilson et al., 1994), если птицы или насекомые не мигрируют. Отражение от местных наземных объектов может также смещать значение радиальных скоростей в направлении нулевой скорости (недооценка), если недостаточно удаляется эхосигнал от земной поверхности.

Если ветер в облучаемом радиолокатором объеме не является равномерным и характеризуется значительными сдвигами, то результатом будут неточные оценки радиальной скорости. Рассмотрим экстремальный случай торнадо, который полностью и частично входит в облучаемый радиолокатором объем. В первом варианте ожидается нулевая средняя радиальная скорость при весьма значительной спектральной ширине. Во втором может ожидаться ненулевая скорость, если скорость Найквиста является достаточно высокой. Если скорость Найквиста относительно мала, то средняя скорость может налагаться несколько раз и может быть выведена любая скорость (Fabry et al., 2013). Помимо этого, наложение может также иметь место в случае метеорологического спектра, затрудняя таким образом получение данных как о средней скорости, так и ее спектральной ширине. Методика двойной ЧПИ также не срабатывает в данном случае, поскольку нарушается предположение о единообразии оценок двух двойных ЧПИ. Также происходит вращение антенны, и поэтому это предположение может быть нарушено в областях высокого сдвига, в которых две выборки скорости на разных ЧПИ производятся в разных азимутальных местах и в которых скорость характеризуется значительной изменчивостью или спектральной шириной. В последней ситуации методическая ошибка определяется посредством этой изменчивости и разности в однозначных скоростях Найквиста (соответственно, отношение ЧПИ). Методы коррекции могут улучшить ситуацию с изменчивостью доплеровских частот (Joe and May, 2003). Имитация ситуации приводится на рисунке 7.20. Верхнее изображение показывает предписанное модельное поле с временным шагом в поле скорости. Средний рисунок показывает, что будет измеряться доплеровским радиолокатором С-диапазона. Нижний рисунок показывает результаты методики подавления помех.

### Загрязнение боковых лепестков

При наличии существенных градиентов отражаемости, например в случае гроз с крупным обводненным градом, боковые лепестки могут вызывать эхосигнал, в то время как главный лепесток направлен на цель с существенно низкой или нулевой отражаемостью. Боковые лепестки, как правило, находятся на уровне ниже 25 дБ и еще ниже (односторонний или 50 дБ-двусторонний) значения основного луча (рисунок 7.8). Таким образом, если боковой лепесток направлен на цель, показатель отражаемости которой составляет 60 дБZ, как это имеет место в случае обводненного града, а основной луч направлен на цель с показателем 10 дБZ, то радиолокатор будет сообщать эхосигнал с характеристиками отражаемости, радиальной скорости и двойной поляризации, исходя при этом из предположения о том, что данная мощность создавалась главным лучом. Эхосигналы боковых лепестков появляются в виде кольцевых артефактов как по азимуту, так и углу места, при постоянной дальности. Это может иметь вид «крыльев» вблизи областей с высокими значениями отражаемости или «высоких верхних



**Рисунок 7.20. Метод двойной ЧПИ предполагает, что измерения производятся по объему с одинаковой радиальной скоростью. Изображения показывают предписанное поле, измеренные и скорректированные данные. (Рисунок адаптирован из работы Joe and May, 2003).**

всплесков эхосигналов» (левое и правое изображения на рисунке 7.21 соответственно. Множественные эффекты рассеивания появляются в виде радиальных артефактов при постоянном азимуте, но с увеличением дальности. Они вызваны зонами с высокой отражаемостью плюс эффектами отражения от поверхности с высокой отражаемостью (поверхность земли, увлажненная дождем, например) и используется в качестве индикаторов града в радиолокаторах S-диапазона. Следует отметить, что на рисунке справа возможно имел место азимутальный боковой лепесток и/или трехмерное рассеяние, но это, вероятно, было затенено более сильными метеорологическими эхосигналами. Это не является очевидным в пределах самой грозовой области, поскольку в главном лепестке эхосигнал будет доминировать над отражаемостью. Однако это может быть очевидным в вертикальной плоскости и приводить к ложно высоким вершинам эхосигналов, которые были названы выбросом града и могут быть использованы для количественной диагностики града во время грозы (см. рисунок 7.21). Этот тип эхосигнала может также иметь место в районе слабого эхосигнала, который граничит с грозовой завесой града, которая может внести путаницу в интерпретацию признаков вращения, свидетельствующих о присутствии мезоциклона.

### Множественное рассеяние

Луч радиолокатора может отражаться множество раз вследствие условий распространения (см. рисунок 7.22). Его рассеяние может происходить также множество раз в пределах грозовой зоны, обладающей высокой отражательной способностью (обводненный град), в направлении влажной подстилающей поверхности и обратно к радиолокатору. Это явление называется трехмерным рассеянием, и его результатом является удлиненный по дальности эхосигнал, выходящий за пределы ядра сильной отражаемости (Zrnić et al., 2010). В радиолокаторах S-диапазона это используется в качестве признака града, который именуется факелом града, с тем чтобы отличать его от признака града в боковом лепестке (Lemon, 1998). Множественное рассеяние становится более частым по мере уменьшения длины волн, и данный признак может также проявляться при сильном дожде в C- и X-диапазонах.

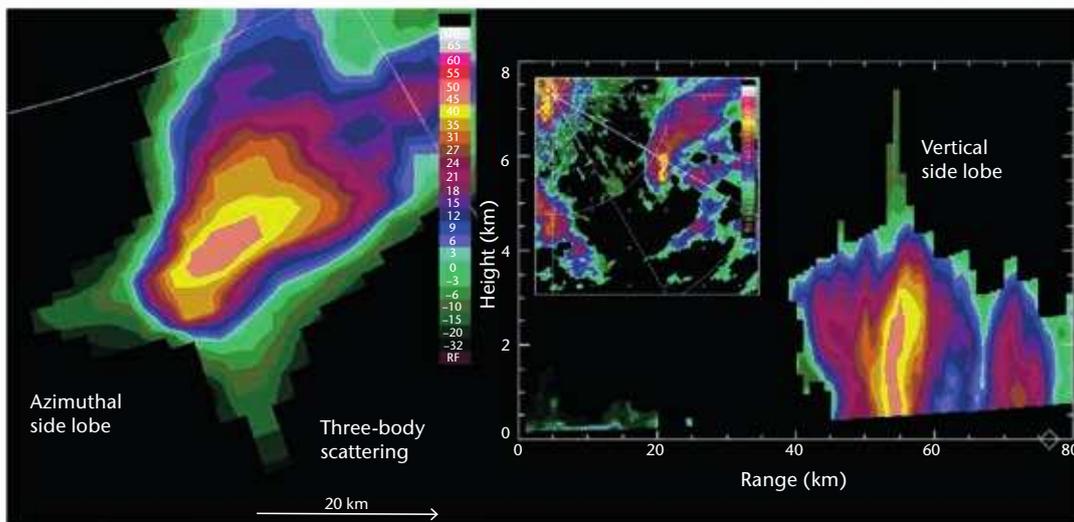


Рисунок 7.21. Эффекты боковых лепестков и множественного рассеяния приводят к появлению в некоторой степени похожих артефактов. Артефакты боковых лепестков наблюдаются на постоянной дальности, а множественное рассеяние — при постоянном азимуте.

**Вторичный/многократный эхосигнал**

При использовании высоких ЧПИ в доплеровских радиолокаторах могут иметь место многократные эхосигналы. Это явление уже рассматривалось ранее, и были отмечены

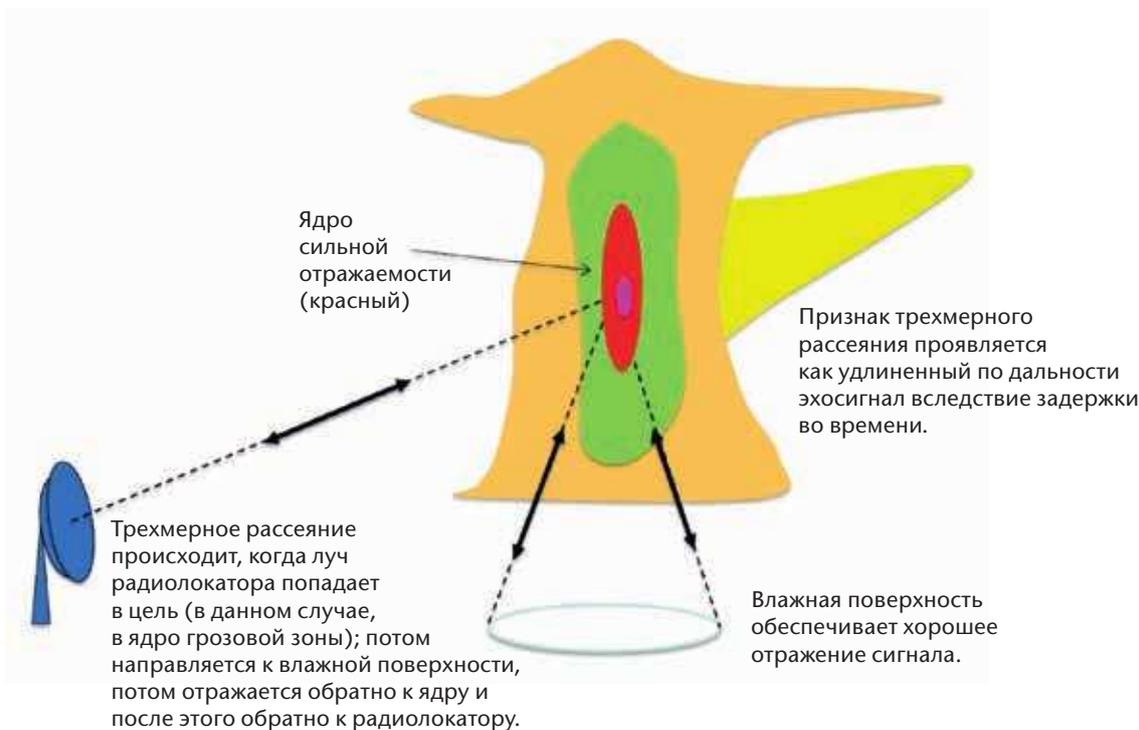


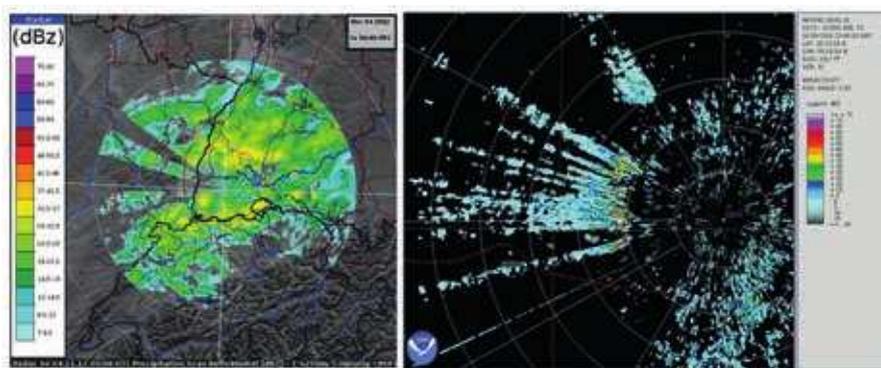
Рисунок 7.22. На этой схеме дается описание того как происходит трёхмерное рассеяние. Эхосигнал, распространяющийся вправо (яркий желтый цвет), является артефактом, вызванным трёхмерным рассеянием.

различия между когерентными на передаче и когерентными на приеме радиолокаторами. На рисунке 7.7 приводится пример вторичных эхосигналов в случае отражаемости и радиальной скорости для когерентного на приеме радиолокатора. В случае когерентного на передаче радиолокатора алгоритм вторичного эхосигнала показывает цветом перекрывающиеся друг друга эхосигналы как свернутые расстоянием.

### Ветряные турбины

Все большей проблемой является распространение ветроэнергетических установок и их воздействие на метеорологический радиолокатор. Ветряные турбины являются источником естественной энергии и находятся в отдаленных районах с ветреной погодой. Эти цели появляются в эхосигналах от земной поверхности (и соответственно в более низких лучах), однако лопасти турбины представляют собой движущуюся цель и соответственно генерируют доплеровский признак, и поэтому их трудно удалить. Помимо этого, турбины устанавливаются в виде кластеров по 100 и более единиц, образуя ветряные фермы. В связи с этим будут затронуты важные области. На рисунке 7.23 показано два разных воздействия ветряных турбин. Если турбины расположены поблизости от радиолокатора, то они могут образовывать заблокированные сектора (изображение слева). Они могут появляться в виде несколько изолированных эхосигналов (не показано). Может наблюдаться множественное рассеяние (изображение справа). В этом примере ветряные турбины находятся на расстоянии 80–100 км от радиолокатора. ВМО разработала руководящие указания по совместной эксплуатации при близком расположении ветряных турбин и радиолокаторов.

К числу одних из методов исключения эхосигналов являются карты помех. Однако при этом методе удаляются также эхосигналы от метеорологических объектов, и поэтому потребуются другие стратегии ослабления помех для восполнения отсутствующих данных (рисунок 7.23). Они могут включать интерполяцию на основе боковых данных или данных сверху, или использование источников данных для заполнения пробелов. В связи с распространением ветряных электростанций необходима текущая модификация или разработка адаптивных стратегий, с тем чтобы быть в состоянии поддерживать качество данных для метеорологических применений. Если ветряные турбины находятся очень близко от радиолокатора, то они могут быть препятствием для радиолокационного луча, причем не только для лучей низкого уровня, но также и для лучей с большим возвышением, в результате прямого затенения, а также вследствие многоканальности. ВМО разработала руководящие указания, касающиеся их установки (см. приложение 7.В).



**Рисунок 7.23.** На изображении слева (любезно предоставлено Метеорологической службой Германии) показано затенение (к западу от радиолокатора) ветряными турбинами, а на изображении справа показаны помехи и эффекты множественного рассеяния ветряными турбинами (любезно предоставлено Национальным управлением по исследованию океана и атмосферы).

## 7.10 ОБЗОР МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Радиолокационные наблюдения находят широкое применение для следующего:

- a) наблюдения за синоптическими и мезомасштабными системами погоды;
- b) обнаружение явлений суровой погоды, их отслеживание и предупреждение о них, включая обнаружение такого опасного явления как сильный ветер;
- c) прогнозирование текущей погоды;
- d) оценка интенсивности осадков, классификация эхосигналов;
- e) определение профилей ветра и составление карт ветров;
- f) инициирование моделей численного прогнозирования погоды;
- g) определение влажности.

### 7.10.1 Общее слежение за погодой

Радиолокаторы могут обеспечить практически непрерывный мониторинг погоды, связанной со штормовыми возмущениями синоптического масштаба и мезомасштаба на большой территории (например, радиус 220 км и площадь обзора 125 000 км<sup>2</sup>), если им не мешают здания, холмы, горы и т. п. Как правило, требуется только единое сканирование радиолокатором по малому углу в течение приблизительно 10–30 минут. Из-за кривизны Земли и траектории распространения радиолокационного луча максимальная практическая дальность метеорологических наблюдений составляет около 250–350 км, поскольку на больших расстояниях излучение радиолокатора будет проходить над метеорологическим объектом. Хотя радиолокаторы обладают достаточной чувствительностью для обнаружения объектов на большей дальности, предел современных радиолокаторов обусловлен высотой луча радиолокатора. Радиолокатор с шириной луча антенны в 1° с углом места в 0,5° над уровнем горизонта действует в пределах приблизительно 10 км над земной поверхностью при дальности в 350 км. Помимо этого, ширина луча при этой дальности составляет порядка 7 км. Менее продолжительные штормы не будут обнаруживаться или их представление будет искажаться. Поэтому штормы должны быть достаточными по масштабам для обнаружения на такой дальности, и практически оперативно используются процессы сканирования на расстоянии даже в 500 км и более, особенно по границам радиолокационных сетей. В случае обнаружения эхосигналов прогнозирующему предоставляется существенная информация об обширном и интенсивном шторме. Спутники и сети обнаружения молний могут предоставлять информацию об облачности и электрической активности метеорологических явлений, которые вызывают осадки или связаны с ними. Обмен радиолокационными данными для создания радиолокационной сети является необходимым и обязательным для создания мозаичной продукции с целью слежения.

Еще одним применением в области слежения является обнаружение погодных явлений в приземном слое (< 1 км), таких как снежные шквалы над озерами, морось и даже пыльные бури. Меньшая широта луча обеспечивает лучшее разрешение и большую эффективность при больших расстояниях, поскольку они могут сканировать при меньших углах места без дополнительных эффектов отражения наземных объектов, могут обеспечивать заполненный луч на больших дальностях и имеют большую чувствительность благодаря большему усилению. Появляются сети радиолокаторов X-диапазона, требующие меньшего технического обслуживания, менее значительной инфраструктуры и меньших расходов и которые могут заполнить этот пробел низкоуровневого сканирования радиолокаторов, работающих в широких S- и C-диапазонах.

Важное место в применениях радиолокаторов занимает в настоящее время кооперационный обмен метеорологическими радиолокационными данными

между различными операторами. Он может обеспечить более широкий анализ крупномасштабных систем осадков, таких как фронты синоптического масштаба и тайфуны. Стандартные форматы радиолокационных данных обеспечат возможность и содействие для эффективной разработки межсетевой продукции. Ярким примером этого является то, что делается в рамках консорциума ОПЕРА.

Появляются радиолокационные сети, применяющие адаптивные и кооперационные стратегии сканирования (McLaughlin et al., 2009; Weber et al., 2007). Ведется разработка радиолокаторов с фазированной антенной решеткой, которые могут осуществлять сканирование в неопределенных направлениях по азимуту и возвышению для обеспечения высокой временной выборки быстро изменяющихся метеорологических явлений, таких как торнадо и нисходящие воздушные потоки, и даже для других целей, таких как воздушные суда. Сопредельные радиолокаторы могут также восполнить низкоуровневые пробелы в охвате благодаря эффектам распространения луча на дальние расстояния и, возможно, «конус молчания», обусловленный ограниченным сканированием угла места.

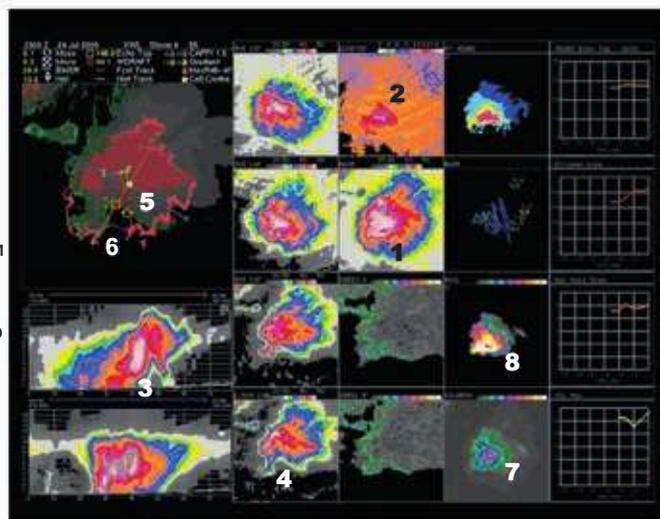
### 7.10.2 **Обнаружение опасных явлений погоды и предупреждение о них**

Радиолокатор — это единственное реальное средство мониторинга суровой погоды над обширной территорией (сотни километров дальности) благодаря временному разрешению (минута), пространственному разрешению (километры) и обнаруживаемым метеорологическим элементам (отражаемость от осадков). Величины интенсивности радиолокационных эхосигналов, их площадь и особенности используются для определения областей суровой погоды, включая грозы с возможным выпадением града и ветры разрушительной силы. Новые возможности открывают доплеровские радиолокаторы, которые могут определять и измерять параметры сильного ветра, связанные с фронтами порывов ветра, нисходящими микровихрями и торнадо (Lemon, 1978). Радиолокаторы с двойной поляризацией обладают способностью разделять эхосигналы, вызванные разными типами рассеивающих объектов, и могут отличать град от сильного дождя и дождь от снега (Zrníć et al., 2001). Номинальная дальность охвата одного радиолокатора составляет около 250 км, что является достаточным для местного краткосрочного прогноза с заблаговременностью порядка 1–2 часа и выпуска предупреждения. Радиолокационные сети расширяют охват и повышают заблаговременность прогноза (Germann et al., 2006b). Эффективные предупреждения требуют эффективной интерпретации, выполненной компетентным и хорошо подготовленным персоналом.

#### **Методика радиолокационного предупреждения о грозových образованиях**

Создание методики по использованию радиолокатора для выпуска предупреждений приписывается Lemon (1978), который описал характеристики отражаемости для определения необходимости подготовки предупреждений о мощных грозových явлениях, включая торнадо, сильный ветер, ливневый дождь, быстроразвивающийся бурный паводок и град. С тех пор к списку критериев были добавлены доплеровские характеристики и характеристики двойной поляризации, а также параметры отражаемости. На рисунке 7.24 перечислены (слева) и приведены в качестве примера (справа) характеристики суровой погоды (Lemon, 1978; Lemon et al., 1978). Эти характеристики включают сильную отражаемость в верхних слоях атмосферы, верхние границы эхосигналов, области слабого эхосигнала в верхних слоях атмосферы, характерных для сильных восходящих потоков воздуха, градиенты сильной низкоуровневой отражаемости и крючковидных изображений низкой облачности. Набор мультимодульных изображений (показаны в правой части рисунка 7.24) называется видом ячейки и создается автоматически, как только ячейка идентифицирована программным обеспечением для обработки радиолокационных данных. Подизображения являются производными радиолокационными продуктами, которые будут использованы аналитиком опасных явлений погоды для принятия решения относительно суровости бури, ее стадии в цикле развития и необходимости выпуска предупреждения. С учетом

1. Крупная ячейка с повышенной отражаемостью (MAXR>45 дБZ)
2. Высокий (эхосигнал на верхней границе зоны)
3. Зона слабого эхосигнала
4. Крюк/луч в форме почки
5. Эхосигнал на верхней границе восходящего потока/градиент низкого уровня отражаемости
6. Ротация Мезоциклоны
7. Нисходящие потоки
8. Град



**Рис. 7.24.** Методики предупреждений сильных штормов перечислены слева (Lemon, 1978). Продукция вида ячейки — это изображение, в центре которого находится ячейка обнаруживаемой в автоматическом режиме грозы и которое показывает соответствующую продукцию для принятия решения (число ячейки соответствует номеру списка).

местоположения различных параметров грозы (например, местоположение верхней границы эхосигнала, местоположение центра бури или местоположение ограниченного района слабого эхосигнала) может быть составлена конфигурация линий поперечного разреза и могут быть автоматически созданы вертикальные поперечные сечения.

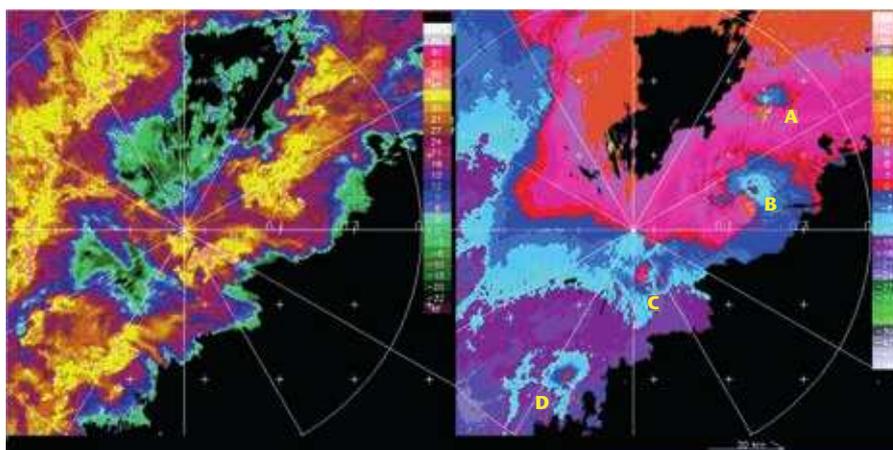
Временное и трехмерное пространственное отношение является важным для диагностики стадии развития бури для прогнозирования ее эволюции и соответственно для выпуска предупреждений о ней. Эта проблематичная задача, и не каждая грозовая система создает метеорологические условия, приближающиеся к пороговому критерию суровости для выпуска предупреждений (см. таблицу 7.9). Применялась первоначальная методика, которая до сих пор используется в настоящее время и суть которой заключается в анализе различных видов продукции радиолокаторов и тщательном исследовании данных с использованием разнообразных способов (рисунок 7.24).

**Таблица 7.9.** Характеристики грозы для разных предупредительных пороговых значений

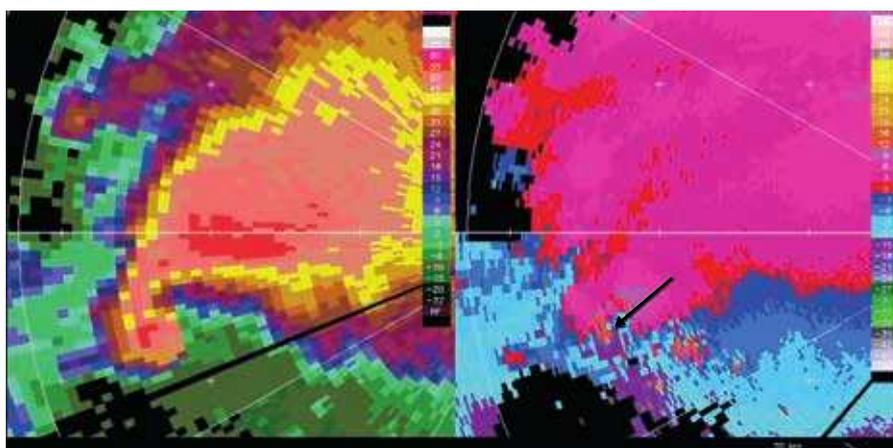
Пороговые значения	Ранги по весу	Класс (0–8)	Значение ограниченного района слабого эхосигнала (BWER) count	Мезомасштабный сдвиг (м·с <sup>-1</sup> /км)	Размер градин (см)	Нисходящий поток (м·с <sup>-1</sup> )	Интегрированное по вертикали содержание жидкой воды (кг·м <sup>2</sup> /км)	Макс. Z (дБZ)	Высота верхней границы эхосигнала 45 дБZ (км)
Минимум	1	0–2	5–11	4	0.5	10	2,2	30	5.5
Слабый	2	3–4	12–17	6	1.3	15	3,0	45	8.5
Умеренный	3	5–6	18–21	8	2.3	20	3,5	50	10.5
Суровый	4	7+	22–26	10	5.0	25	4,0	60	12.5

Первое применение доплеровского радиолокатора для обнаружения и отслеживания сильных гроз в режиме реального времени началось в начале 1970-х годов. Donaldson (1970) был, вероятно, первым, кто определил вихревую структуру потоков в сильной грозе. Квазиоперативные эксперименты продемонстрировали, что очень высокий процент этих признаков вихревых образований, определенных с помощью одного доплеровского радиолокатора, сопровождался вызывающим ущерб градом, сильным ветром одного направления или торнадо (Ray et al., 1980; JDOP, 1979). Это вихревое образование известно, как мезоциклон, который представляет собой вертикальный столб поднимающегося и вращающегося воздуха, обычно 2–10 км в диаметре. Признаком мезоциклона является незначительный аномальный режим доплеровской скорости, и он впервые наблюдался на средних уровнях шторма, который опускается до высоты образования облачности и может совпадать с явлением суровой погоды (Markowski, 2002; Burgess, 1976; Burgess and Lemon, 1990; рисунок 7.25). Вращение мезоциклонного происхождения во время сильных штормов является свидетельством сильного и длительного шторма, заслуживающего предупреждения о суровой погоде. Это явление идентифицируется как небольшие квазициркулярные области, движущиеся в направлении от шторма и к нему с радиальными скоростями, векторы которых расположены по одной линии приблизительно на постоянной дальности в азимутальном направлении, как видно из рисунка 7.25. Следует отметить, что необходимо исключить фактор движения шторма, с тем чтобы было легко видно соотношение векторов скоростей в противоположных направлениях. В северном полушарии вращение, как правило (но не всегда), происходит в направлении против часовой стрелки, а в южном полушарии — в обратном направлении. В ходе квазиоперативных экспериментов в Оклахоме (JDOP, 1979) такая последовательность дала возможность повысить заблаговременность предупреждения о сильном шторме и торнадо до 20 минут или больше. Во время этих экспериментов было отмечено, что приблизительно в 50 % всех случаев мезоциклонов возникали торнадо, сведения о которых были подтверждены; при этом все штормы, сопровождавшиеся разрушительными торнадо, формировались в средах со значительным сдвигом ветра и характеризовались сильными мезоциклонами (Burgess and Lemon, 1990).

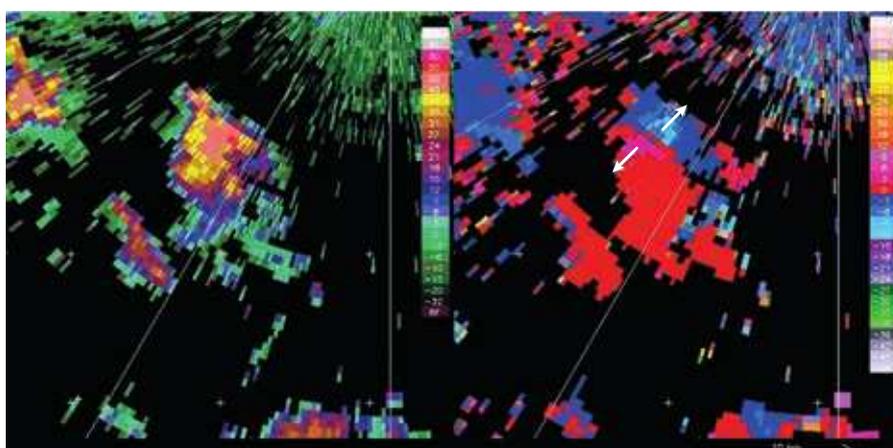
Диаметр торнадо составляет приблизительно 200–500 м. Это часто соответствует разрешающей способности данных радиолокатора и поэтому с трудом поддается последовательному обнаружению, если только не применяется увеличение с высоким коэффициентом. В случае обнаружения торнадо он наблюдается в виде большого разброса радиальной скорости в сопряженных объемах радиолокационных данных, именуемого признаком торнадообразующего вихря, и это образование происходит внутри мезоциклона (рисунок 7.26). В некоторых случаях признак торнадообразующего



**Рисунок 7.25.** Многочисленные мезоциклоны (A-D) наблюдаются по линии шквалов и идентифицируются как пары относительных скоростей в обратном и прямом направлениях при постоянной дальности. Симметричные признаки скорости, наблюдаемые в ходе шторма, не являются очевидными или были исключены.



**Рисунок 7.26.** Признак вихревого торнадо определяется как пара относительных скоростей в обратном/прямом направлении на сопряженных элементах разрешения по дальности (см. стрелку на изображении справа), входящих в зону мезоциклона. На изображении слева показан классический крючкообразный эхосигнал.



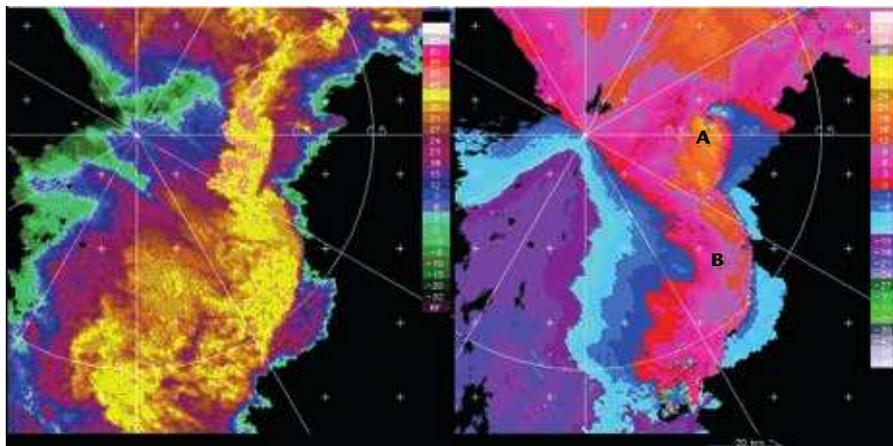
**Рисунок 7.27.** Нисходящий микровихрь (микро- или макро-) наблюдается в виде пары радиальных скоростей в обратном/прямом направлении, выравненных вдоль радиального вектора (см. стрелки на правом изображении). Это представляет собой быстро меняющуюся характеристику гроз и может быть следствием самых обычных и небольших гроз.

вихря обнаруживали на высоте почти за полчаса или больше до того, как торнадо касался земной поверхности. Опыт изучения признака торнадообразующего вихря в течение многих лет показал его большую пригодность для определения местоположения торнадо, обычно в пределах  $\pm 1$  км. Согласно оценкам, могут быть обнаружены 50 %–70 % торнадо, возникающих к востоку от высокогорных равнин Скалистых гор в США (Brown and Lemon, 1976). Большие значения ширины Доплеровского спектра (второй момент) были идентифицированы с местоположением торнадо. Однако большие значения ширины спектра также хорошо коррелируют с большими значениями турбулентности, возникающие во время шторма. На изображении отражаемости (рисунок 7.26, слева) наблюдается крючкообразный эхосигнал, являющийся признаком осадков, связанных с мощным нисходящим потоком воздуха в тыловой части грозы.

Дивергенция, вычисленная по данным о радиальной скорости, является, как представляется, хорошей мерой общей дивергенции. Оценки дивергенции на верхней границе шторма совпадают с оценками высоты вершины эхосигнала, которая является показателем мощности восходящего потока. Квазиоперативные эксперименты с доплеровскими радиолокаторами показали, что рост значения дивергенции может

быть, вероятно, самым ранним признаком усиления шторма. Помимо этого, большие значения дивергенции вблизи вершины шторма являются, как выяснилось, приемлемым признаком града. Признаки дивергенции на нижних уровнях в виде нисходящих микровихрей регулярно отслеживались с помощью аэронавигационных доплеровских метеорологических радиолокаторов для защиты воздушных судов во время взлета и посадки. Эти радиолокаторы специально построены для обеспечения слежения на ограниченной площади и непрерывного быстрого сканирования воздушного пространства вокруг терминалов аэропорта. Микровихрь имеет жизненный цикл от 10 до 20 минут, что требует наличия специализированных радиолокационных систем для эффективного обнаружения (см. рисунок 7.27). Это является примером увлажненного нисходящего потока воздуха, который характеризуется соответствующим значительным преломлением. Сухие нисходящие потоки не могут быть опознаны в данных радиолокатора, если осадки испаряются и нет никаких других целей, которые радиолокатор должен обнаруживать. В этом случае требуется высокочувствительный радиолокатор или доплеровский лидар либо сеть анемометров. В случае подобного применения радиолокационно-компьютерная система автоматически представляет предупреждения для центра управления воздушным движением (Michelson et al., 1990). Мезомасштабные ветры (масштаб 40–50 км) с трудом поддаются интерпретации при помощи доплеровского радиолокатора, поскольку ориентация потоков исключает предположение о единообразии. Предположения должны строиться на направлении ветра, основанном на результатах научных исследований и концептуальной модели воздушного потока в пределах этих систем (Smull and Houze, 1987). К счастью, в некоторых случаях потоки и структура преломления отличаются друг от друга и можно идентифицировать сильные ветры и выпускать предупреждения. На рисунке 7.28 показана система, перемещающаяся в восточном направлении, и, соответственно, полная сила прямолинейных ветров (также известных как сильные прямые штормовые ветры), которая является очевидной в случае радиальных скоростей отдаления (оранжевый цвет) (маркировано как А). В этом случае движение на скоростях удаления происходит в направлении движения на скоростях приближения. Это также проявляется в виде изгиба эхосигнала радиолокационной отражаемости (изображение слева). При других азимутах радиальный ветер не является перпендикулярным к направлению движения системы (маркировано как В), и поэтому эти факторы должны учитываться аналитиком.

Самым лучшим методом измерения ветра внутри зон осадков является кратный доплеровский метод, который использовался с середины 1970-х годов для научных исследовательских полевых программ ограниченной продолжительности. Однако на сегодняшний день оперативного использования в реальном масштабе времени двойных или тройных доплеровских анализов не ожидается из-за необходимости



**Рисунок 7.28.** Другой признак весьма интенсивных опасных ветров может наблюдаться в качестве линейной или нелинейной характеристики в данных об отражаемости (слева) или радиальной скорости (справа).

относительно близкого расположения радиолокаторов (~40 км). Исключением могут быть потребности аэропортов, касающиеся ограниченной зоны, где полезной может быть сеть радиолокаторов X-диапазона (McLaughlin et al., 2009; Wurman et al., 1995).

Для идентификации града с помощью 10-сантиметрового обычного радиолокатора было предложено множество методик, например по эхосигналу 50 дБZ на высотах 3 км или 8 км (Dennis et al., 1970; Lemon et al., 1978). Эмпирические, но ограниченные исследования показали способность предсказывать размер града (Treloar, 1998; Joe et al., 2004; Witt et al., 1998). Federer et al., (1978) обнаружили, что для определения вероятности выпадения града высота контура 45 дБZ должна превосходить высоту нулевой изотермы более чем на 1,4 км. Данный метод был доработан, прошел проверку в Королевском нидерландском метеорологическом институте и используется в оперативном режиме (Holleman et al., 2000; Holleman, 2001). Иной подход к более совершенному обнаружению града связан с применением радиолокаторов, работающих на двух длинах волн — обычно в диапазонах X и S (Eccles and Atlas, 1973). Физические аспекты того, что радиолокатор «видит» на этих разных длинах волн, являются исключительно важными для понимания сильных сторон и ограничений этих методик (изменения площади сечения гидрометеоров или распределение интенсивности).

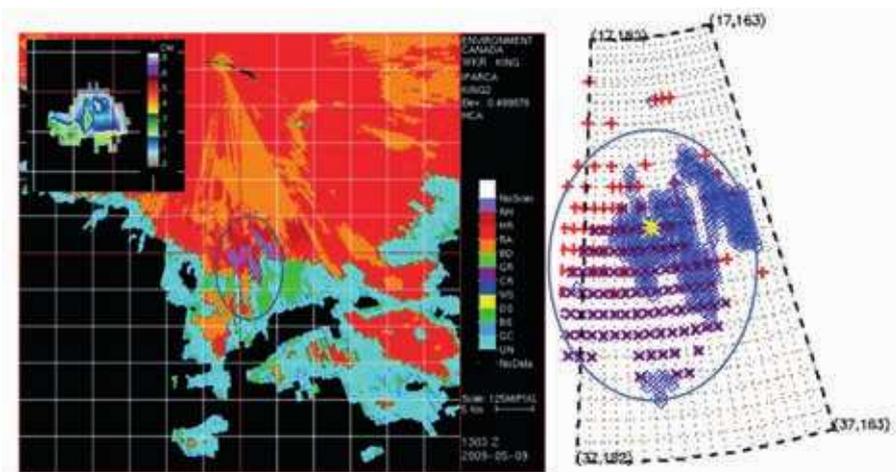
Исследования различных видов поляризации показывают определенные перспективы улучшения обнаружения града и оценки обильных осадков на основе дифференциальной отражаемости ( $Z_{DR}$ ), измеряемой с помощью доплеровского радиолокатора с двойной поляризацией (Seliga and Bringi, 1976; рисунок 7.29). Изображение слева показывает классификацию радиолокационных эхосигналов посредством использования двойной поляризации для описания признаков состояния града. Для сочетания различных параметров двойной поляризации, таких как  $Z$ ,  $Z_{DR}$ ,  $\rho_{HV}$  и  $K_{DP}$ , широко используется методика нечеткой логики, с тем чтобы идентифицировать характер радиолокационного эхосигнала. В этом случае на изображении слева показана схема классификации, и она включает (сверху-вниз): град, сильный дождь, дождь, большие капли, снежную крупу, кристаллы льда, мокрый снег, сухой снег, биологические рассеиватели и отражения от локальных наземных предметов. На вставленном изображении показана оценка размера градин, основанная на сочетании интегрированного по вертикали содержания жидкой воды (VIL), максимальной отражаемости и уровня замерзания (Treloar, 1998; Joe et al., 2004). Показан максимальный размер градин в 3,2 см. На изображении справа дается подробное сравнение обнаружения града посредством двойной поляризации с использованием данных в двух разных разрешениях (знаки плюс для разрешения 1 км и ромбы для разрешения 250 м) и несколько иных временных периодов по сравнению с более старым методом отражаемости (крестики). Синий эллипс соответствует синему эллипсу на изображении слева. Все три алгоритма проверены градинами в 3+ см, о которых сообщалось в сводке по аэропорту (желтый знак, середина красных линий сетки).

Последние достижения включают автоматизированное обнаружение и классификацию гроз посредством передовых методов обработки данных (Lakshmanan et al., 2007; Joe et al., 2002; Joe et al., 2012). Эволюция гроз происходит в минутном временном масштабе, и осадки начинают выпадать на высоте. В этой связи для идентификации суровой погоды используются характеристики радиолокаторов как на высоте, так и вблизи поверхности. Таким образом радиолокатор должен осуществлять сканирование по многим углам возвышения с цикличностью времени порядка 5 минут.

Доплеровские радиолокаторы особенно полезны для мониторинга тропических циклонов и предоставления данных об их «глазе», «стене глаза» и динамической эволюции спиральных облачных лент, а также о местоположении и интенсивности ветров ураганной силы (Ruggiero and Donaldson, 1987; Baynton, 1979).

### 7.10.3 Прогнозирование текущей погоды

Строгим определением прогнозирования текущей погоды является предсказание во временном масштабе 0–2 ч, и традиционно это означает автоматизированную линейную экстраполяцию текущей ситуации, сообщаемой наблюдателями. Первоначальная система

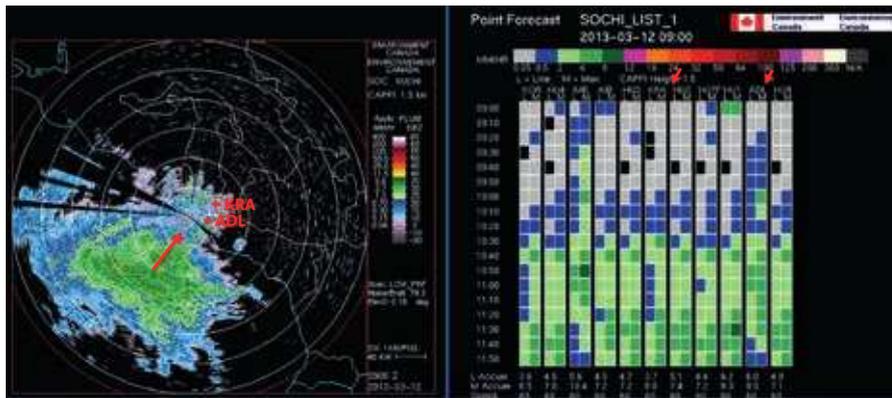


**Рисунок 7.29.** Приведенная иллюстрация — это отражательность, основанная на данных о размере градин, а большое изображение — продукт поляризационного разнесения для идентификации типа осадков, включая град. Изображение справа содержит подробный анализ этого примера. Рисунок любезно предоставлен Судеш Буду из Министерства окружающей среды Канады.

прогнозирования текущей погоды была основана на проведении анализа взаимной корреляции двух радиолокационных изображений (CAPPI) в отношении движения эхосигнала (Bellon and Austin, 1978). Анализ этого движения проводился в девяти секторах изображения и использовался метод экстраполяции эхосигналов до 90 минут вперед. Были определены точки для прогнозов текущей погоды и подготовлена метеограмма, которая показывала наиболее вероятные и возможные величины (рисунок 7.30). Рисунок слева — это единое изображение метеорологических условий, представленное как CAPPI, которая перемещается в направлении север-восток. Рисунок справа показывает прогноз текущей погоды (наиболее вероятный, колонка слева, и наиболее возможная отражаемость — колонка справа) для разных точек. Для ясности представления в этом примере указаны только две точки. Эта метеограмма, представленная в качестве изображения (текущее время указано сверху и будущие увеличения интервалов времени представлены с понижением до 10 минут). Характерным предположением в этом текущем прогнозе является то, что система осадков продолжает существовать в течение последующих 90 минут. Это иллюстрирует специфическую характеристику прогнозов текущей погоды и их точность в плане времени, пространства и метеорологического элемента. Точность данного прогноза текущей погоды весьма высока для первых 20–30 минут, и это обстоятельство используется в качестве принятия мер или подготовки предупреждения. Не предполагается никакого постепенного развития ситуации.

Благодаря использованию континентальной составляющей радиолокационных данных и масштабированного подхода к отфильтровыванию высокой частоты или мелкомасштабных характеристик отражаемости прогнозы текущей погоды крупномасштабных моделей обладают точностью до 6 или более часов, что превышает точность моделей численных прогнозов погоды в это же время. Это сопоставимо с 2–3 часами для более мелких масштабов. Однако эти уровни точности не могут обеспечить точность, необходимую для предупреждений о необходимости принятия мер.

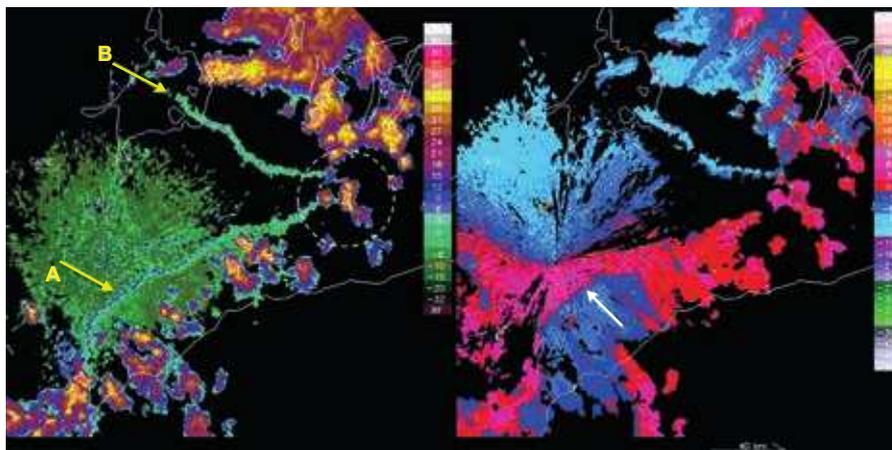
Проводимые с помощью доплеровских радиолокаторов исследования роли линий конвергенции пограничного слоя в формировании новых грозных систем подтверждают выводы более ранних спутниковых исследований облачных дуг. Имеются указания на то, что мезомасштабные линии конвергенции пограничного слоя (включая перекрещивающиеся фронтальные порывы ветра от предыдущей конвекции) играют основную роль в определении того, где и когда сформируются штормы. Wilson and Schreiber (1986) задокументировали и объяснили несколько случаев возникновения торнадо на линиях сдвига ветра при отсутствии осадков, которые наблюдались с помощью доплеровского радиолокатора (Mueller and Carbone, 1987).



**Рисунок 7.30.** Пример взаимно-корреляционного прогноза текущей погоды. Погодные условия перемещаются с юго-запада (изображение слева) и на метеограмме справа показаны наиболее вероятные и наиболее правдоподобные показатели интенсивности осадков в разных местах (на изображении слева фигурируют только KRA и ADL, которые находятся на шестом и десятом местах на изображении справа).

Важным прикладным аспектом прогнозирования текущей погоды является анализ радиолокационных полей для условий начала конвекции. Последние научные исследования показали, что грозы, возникающие в условиях воздушной массы, которые ранее считались редкими и непредсказуемыми, фактически образуются при наличии определенных мелкомасштабных пограничных условий атмосферы (Wilson et al., 1998). Такие условия могут быть обнаружены как в поле отражаемости, так и в поле радиальной скорости эхосигналов в безоблачной атмосфере в качестве линейных характеристик или линий конвергенции (рисунок 7.31). Эти границы формируются разнообразными механизмами, включая озерные бризы (А); оттоки воздуха из зоны грозы (В); дренажные стоки с горных долин; сухие линии и прочие. Усиленный подъем, происходящий на пересечении этих условий, может инициировать грозы. Следует отметить отчетливый признак конвергенции на изображении радиальной скорости (белая стрелка, изображение справа).

Источником эхосигналов в безоблачной атмосфере могут быть турбулентные флуктуации или насекомые. Исследования радиолокаторов с поляризацией показывают, что



**Рисунок 7.31.** Современные радиолокаторы достаточно чувствительны для того, чтобы видеть озерный бриз и оттоки воздуха из зоны грозы (А и В соответственно, изображение слева). Точки взаимопересечения являются местами ускоренного подъема и соответственно местами потенциального развития конвективных образований (см. явление образования шторма внутри штрихового круга белого цвета).

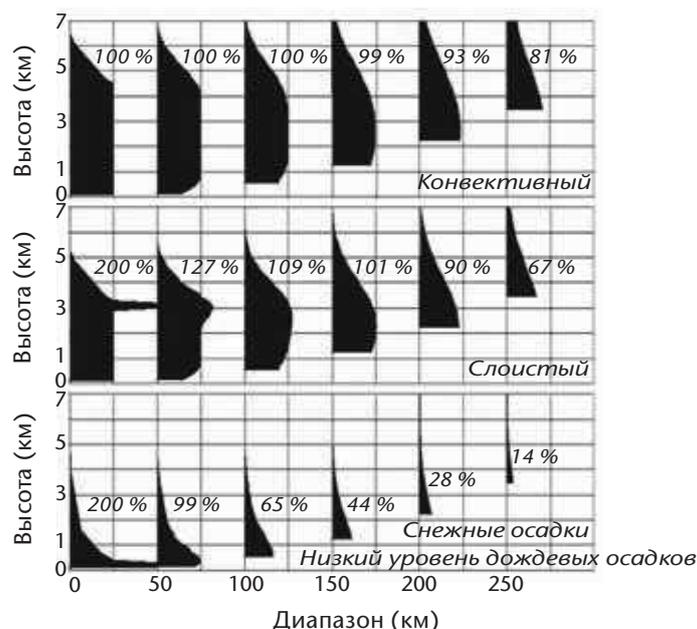
насекомые являются первичным источником таких отраженных радиолокационных сигналов. Расширения традиционных систем прогнозирования текущей погоды включают прогнозирование начала развития и рассеяния конвективных образований, моделирование жизненного цикла гроз и использование в данном анализе моделей численного прогнозирования погоды (Wilson et al., 1998; Sun et al., 2013). Помимо радиолокационных данных экстраполируются также соответствующие модельные поля, такие как температура и влажность (Crook and Sun, 2002; Sun et al., 2013). Ожидаемыми усовершенствованиями являются увеличение времени цикла (быстрое обновление до одного часа или еще меньше), уменьшение скорости раскрутки и улучшение физических характеристик моделей высокого разрешения (Sun et al., 2013). Еще одним появляющимся применением в области прогнозирования текущей погоды является разработка прогнозов выпадающих осадков по ансамблю, где малые масштабы проходят как процесс фильтрации, так и повторного создания, используя совокупность статистически последовательных оценок (Seed, 2003).

#### 7.10.4 **Оценка осадков**

Длительное время радиолокаторы используются для оценки распределения, интенсивности и, таким образом, количества осадков, осуществляемой с высоким разрешением во времени и пространстве. Большая часть исследований касается дождевых осадков, но при соответствующих допущениях о составе радиолокационной цели могут также производиться и измерения снега. Получение данных об интенсивности осадков основано, главным образом, на эмпирических связях отраженной мощности или отражаемости (Marshall and Palmer, 1948; Marshall and Gunn, 1952; Wilson and Brandes, 1979; Chandrasekar et al., 2003). Радиолокаторы с двойной поляризацией используют дополнительную информацию, основанную на сдвиге по фазе затухающей распространяющейся волны и на дифференциальном рассеятеле, обусловленном частицами несферической формы. Комплексные исследования града являются редкими из-за трудности, связанной со сбором наземных контрольных данных. Читателям следует ознакомиться с обзорами, подготовленными Joss and Waldvogel (1990) и Smith (1990), для всеобъемлющего обсуждения данных проблем и сложностей, а также вопросов эффективности и точности. Появляющиеся системы обработки данных радиолокаторов способны исключать отражения от локальных наземных объектов (включая аномальное распространение) разнообразными способами и уменьшать проблему вертикального профиля отражаемости посредством корректировки осадкомеров или дисдрометров в квазиреальном времени.

##### 7.10.4.1 **Вертикальный профиль отражаемости**

На больших расстояниях обычно преобладают ошибки, вызванные невозможностью наблюдать осадки вблизи земной поверхности и незаполнением луча. В связи с увеличением или испарением осадков, движением воздуха и изменением фазы (лед и вода в слое таяния или яркая полоса) наблюдаются весьма изменчивые вертикальные профили отражаемости как в пределах данного шторма, так и от бури к буре. В случае конвективных дождевых осадков, как показывает опыт, возникает меньше трудностей, связанных с проблемой вертикального профиля. Однако при дожде или снеге, выпадающем из слоистообразных облаков, значение вертикального профиля возрастает. С увеличением дальности луч становится шире и проходит выше над земной поверхностью. Поэтому также возрастают различия между оценками количества дождевых осадков, измеренных с помощью радиолокатора, и их сумм, измеренных у земной поверхности. Отражаемость обычно снижается с высотой; поэтому в условиях слоистообразной облачности или снега дождь недооценивается радиолокатором. На рисунке 7.32 показаны три идеализированных вертикальных профиля отражаемости для разных метеорологических ситуаций. Они показаны при нулевой дальности. Эти профили во все большей мере сглаживаются по мере увеличения дальности из-за расширения луча. Также происходит эффект продвижения луча, и нижняя часть профиля не вносит больше вклад в измеряемую величину. На больших дальностях для приземных штормов, и в особенности, когда при малых углах места антенны происходит затенение такими препятствиями,



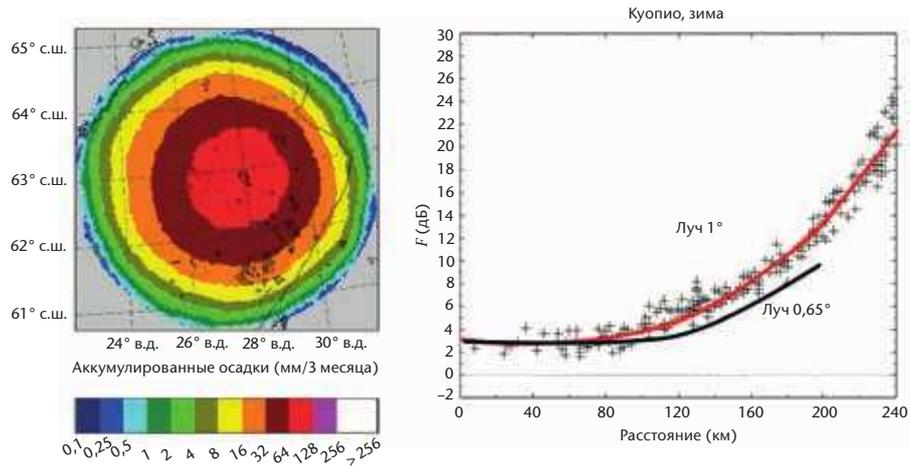
**Рисунок 7.32. Сглаживание луча и характер его распространения изменяют внешний вид вертикального профиля отражаемости по мере изменения дальности. Показаны три ситуации с максимальной отражаемостью в вертикальном столбе атмосферы в виде процентной доли выпадения осадков на поверхность суши, при этом учитывается яркая полоса (заимствовано из работы Joss and Waldvogel, 1990).**

как горы, недооценка может быть очень серьезной. Ошибка подобного типа часто преобладает над всеми остальными. Этому обстоятельству зачастую не придается значения в тех случаях, когда штормы наблюдаются только на близких расстояниях, или в случаях, когда анализируются штормы, которые располагаются приблизительно на одинаковом удалении. Эффективная дальность для количественной оценки осадков составляет порядка 80 км при ширине луча радиолокатора в 1° (рисунок 7.33) и больше для радиолокаторов с меньшей шириной луча (120 км для радиолокатора с шириной луча 0,65°) без внесения поправки.

При системе погоды в приземном слое атмосферы, которая преобладает в зимних условиях, эффект сглаживания луча (показан на рисунке 7.32) уменьшает отражаемость по мере увеличения дальности. Результатом этого являются накопленные значения (радиолокационная отражательная способность или производная интенсивности осадков), которые приобретают годовой характер, как это показано на изображении слева (рисунок 7.33). Неоднородное заполнение радиолокационного объема по мере изменения дальности также способствует быстрому уменьшению отражаемости. Сравнения с величинами, измеренными при помощи осадкомеров в течение сезона, показаны справа (соотношение радиолокационных измерений и измерений на месте при помощи осадкомеров) и являются иллюстрацией такого уменьшения измеряемых сумм осадков. В данном конкретном месте при ширине луча радиолокатора в 1° и при таком погодном режиме (Финляндия в зимний период) эффективная дальность (плоская часть кривой) составляет порядка 80 км для непосредственных оценок осадков. Поскольку дальний эффект является геометрическим, меньшая ширина луча увеличила бы эту эффективную дальность. Это проиллюстрировано для ширины луча в 0,65°, когда эффективная дальность увеличена почти до 110–120 км.

Ни один из методов осуществляемой в реальном масштабе времени компенсации эффектов вертикального профиля отражаемости не является широко признанным. Однако можно определить три метода компенсации, а именно:

- а) корректировка зависимости от расстояния: эффект вертикального профиля связан с сочетанием возрастания высоты осей луча и его расширения при увеличении

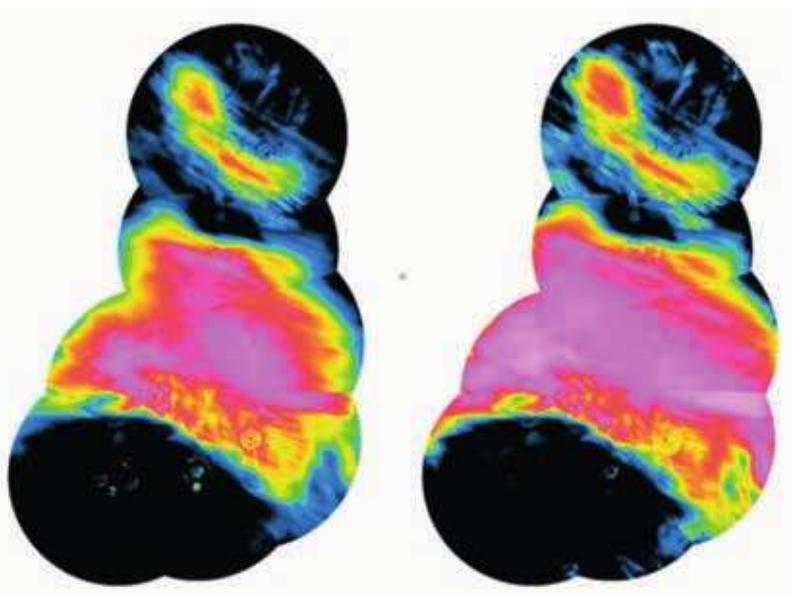


**Рис. 7.33.** На этом рисунке показаны аккумулярованные за зимний сезон суммы осадков, рассчитанные по данным радиолокатора. Описание годового режима осадков объясняется, в первую очередь, отсутствием заполнения луча на дальних расстояниях для приземных метеорологических систем. На изображении справа показано, каким образом это представляется в виде погрешности определения дальности путем сравнения данных датчиков радиолокатора (рисунок любезно предоставлен Даниэлем Микельсоном из Шведского метеорологического и гидрологического института, а также использованы данные, предоставленные Финским метеорологическим институтом).

дальности. Соответственно для получения корректировки первого порядка может применяться средний климатический коэффициент зависимости от расстояния. Разные коэффициенты могут быть приемлемыми для разных категорий штормов, например конвективный шторм в отличие от слоистообразного;

- b) пространственно изменяющаяся корректировка: в ситуациях, когда характеристики осадков систематически изменяются в зоне слежения или когда зона охвата радиолокатора является неоднородной из-за топографии или локальных препятствий, полезными могут быть поправки, изменяющиеся как по азимуту, так и по дальности. Если имеется достаточная справочная информация, то можно вносить средние поправочные коэффициенты в соответствующие справочные таблицы. В противном случае, поправки должны выводиться из самих данных об отражаемости или из сравнений с показаниями осадкомеров;
- c) полные вертикальные профили: вертикальные профили в штормах изменяются по месту и времени, а самый низкий уровень, видимый для радиолокатора, обычно изменяется из-за нарушения радиогоризонта. Соответственно для получения наилучших результатов может понадобиться осуществляемый от точки к точке процесс корректировки с использованием репрезентативного вертикального профиля для каждой представляющей интерес зоны. Репрезентативные профили могут быть получены с помощью самих радиолокационных данных по объему сканирования, климатологических справочников или из моделей штормов. Это наиболее сложный подход, но он может быть осуществлен с помощью современных систем данных (Joss and Lee, 1993).

На рисунке 7.34 показан пример последнего упомянутого метода корректировки вертикального профиля отражаемости в случае эффекта расстояния, который в настоящее время используется в повседневной практике радиолокационной сети. На рисунке слева показано 24-часовое накопление значений интенсивности осадков, полученных при помощи радиолокатора, в течение прохождения стационарного атмосферного фронта. Предполагается, что общие характеристики будут весьма разнообразными. Рисунок справа создан посредством корректировки эффекта



**Рисунок 7.34.** Этот рисунок показывает случай стационарного атмосферного фронта, ориентированного по направлению восток-запад. На изображении слева показано резкое снижение по мере увеличения дальности (см. рисунок 7.33). На изображении справа показана внесенная в данные корректировка дальности (рисунок любезно предоставлен Ярмо Коистиненом, Финский метеорологический институт).

вертикального профиля на дальних расстояниях и соответственно увеличены накопления по краям. Различие в изображениях также иллюстрирует выгоды сетевого подхода к созданию продукции по осадкам, поскольку эффект вертикального профиля отдельных радиолокаторов не является столь очевидным внутри сети.

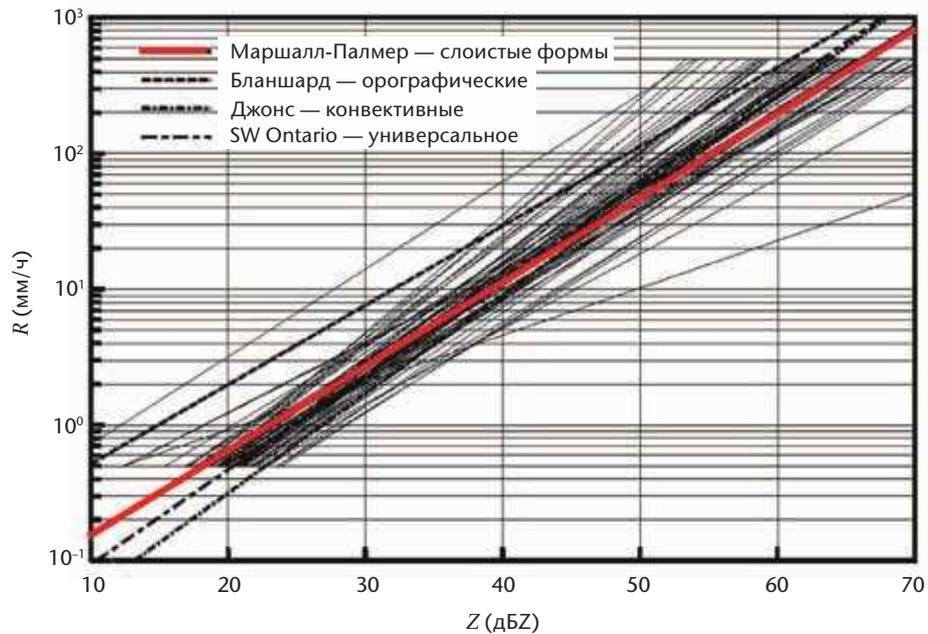
Улучшения в области цифровой обработки радиолокационных данных и интеграция в режиме реального времени с сетями осадкомеров привели к разработке новых количественных, основанных на данных радиолокаторов видов продукции для гидрометеорологических применений. Ряд европейских стран и Япония используют такие виды радиолокационной продукции наряду с численными моделями для оперативного прогнозирования паводков и контроля за ними (Berenguer et al., 2012; Cluckie and Owens, 1987). Синтез данных радиолокаторов и данных осадкомеров предоставляет весьма эффективный продукт прогнозирования текущей погоды для мониторинга дождевых осадков. Анализ радиолокационных данных об осадках (AMeDAS) является одним из видов продукции, представляемых в Японии (Makihara, 2000). Интенсивность эхосигнала, полученная от сети радиолокаторов, преобразуется в интенсивность осадков с использованием соотношения  $Z-R$ , а количество осадков, выпавшее за один час, оценивается по интенсивности осадков. Оценочные количества осадков затем калибруются с использованием значений количеств осадков, полученных при помощи осадкомеров, для подготовки с высокой точностью карты осадков, выпавших за один час.

#### 7.10.4.2 Соотношение $Z-R$

В оптимальных условиях (близко к радиолокатору, никаких ложных сигналов) осадки обычно оцениваются с использованием соотношения  $Z-R$ :

$$Z = A R^b \quad (7.13)$$

где  $A$  и  $b$  — постоянные величины. Это соотношение не является единственным, и для различных климатических условий или местоположений, а также типов штормов, было разработано очень много эмпирических зависимостей. Номинальные и типовые значения коэффициента и показателя степени составляют:  $A = 200$ ,  $b = 1,60$  (Marshall and



**Рисунок 7.35. Графическое изображение множества соотношений  $Z-R$  из работы Battan (1973).**

Palmer, 1948; Marshall and Gunn, 1952). Эти значения могут применяться при точности коэффициента 2 как для дождя, так и снега. Данное уравнение выведено в рамках ряда допущений, которые не всегда бывают полностью справедливыми. Тем не менее история и опыт показали, что это соотношение в большинстве случаев дает надежную оценку осадков у земной поверхности, если только не присутствуют очевидные аномалии (рисунок 7.35). Обзор использования соотношений  $Z-R$  в мировом масштабе показал, что соотношение Маршалла-Палмера используются в 80 % оперативных метеорологических радиолокаторов, что является замечательным достижением, учитывая весьма малое число измерительных точек, использованных для формулирования первоначального соотношения (Sireci et al., 2010). Красной линией на рисунке 7.35 показано первоначальное соотношение Маршалла-Палмера (приводится в работе Marshall and Gunn, 1952, и Marshall and Palmer, 1948). В течение ряда лет предпринимались попытки внести улучшения; черные линии показывают эти другие соотношения (Battan, 1973). Примечательно, что первоначальное соотношение, полученное по незначительному числу измерений и в конкретном режиме метеорологических условий, прошло испытание временем.

Имеются некоторые общие положения, которые можно констатировать. При длинах волн 5 см и 10 см аппроксимация Рэля действительна для большинства практических целей до тех пор, пока не появляются зародыши градин ( $Z > 57$  дБZ во многих случаях принимается как линия раздела между дождем и градом). Большие концентрации ледяных кристаллов, смешанные с каплями, могут вызывать аномалии, особенно вблизи уровня таяния. Принимая во внимание коэффициент преломления для льда (т.е.  $|K|^2 = 0,208$ ) и выбирая соответствующие соотношения между коэффициентом отражаемости и интенсивностью осадков ( $Z$  по отношению к  $R$ ), можно достаточно точно оценить количество осадков при наличии снега (значение, равное 0,208 вместо 0,197 для льда, используется для учета изменения диаметра капель воды и ледяных кристаллов в эквивалентной массе). Однако измерения выпадающего снега при помощи осадкомеров являются проблематичными и имеется недостаточное количество всеобъемлющих исследований, посвященных соотношениям между радиолокационной отражаемостью и интенсивностью снегопада.

Интенсивность дождя ( $R$ ) является производной от влагозапаса и скорости падения частиц в облучаемом радиолокатором объеме. Она примерно пропорциональна четвертой степени диаметров частиц. Поэтому не существует единого соотношения между

радиолокационной отражаемостью и интенсивностью осадков, поскольку оно зависит от распределения частиц по размерам. Таким образом, естественная изменчивость распределений капель по размерам является важным источником неопределенности при радиолокационных измерениях осадков в тех случаях, когда учитываются другие факторы.

Эмпирические связи  $Z-R$ , а также их изменчивость от шторма к шторму или во время единичного шторма были предметом многих исследований на протяжении последних 40 лет, особенно в исследованиях штормовых событий. Соотношение  $Z-R$  может быть получено путем расчетов значений  $Z$  и  $R$  по измеренным распределениям капель по размерам, выполненным с помощью прибора, известного как дисдрометр. Альтернативой является сравнение величины  $Z$ , измеренной на высоте с помощью радиолокатора (тогда она называется эквивалентной радиолокационной отражаемостью и обозначается  $Z_e$ ), с величиной  $R$ , измеренной у земной поверхности. В последнем подходе предпринимается попытка учесть любые различия между осадками на высоте и осадками, которые достигают земной поверхности. Он также может включать ошибки калибровки радиолокатора, поэтому результат не определяется строго соотношением  $Z-R$ . Дисдрометры используются в настоящее время в оперативных сетях для определения соотношения  $Z-R$  для целей климатологии, исследований штормов и корректировки в режиме реального времени; дисдрометры являются весьма чувствительными и могут обнаруживать очень слабые осадки.

Достаточно большое внимание уделялось эмпирическому соотношению  $Z-R$  в зависимости от классификации штормов по типу дождя (такого как конвективный, неячейковый, орографический). Несмотря на то, что изменения в распределении капель по размерам, бесспорно, являются важными, их относительная значимость часто переоценивается. После некоторого осреднения по времени и/или пространству ошибки определения интенсивности выпадения дождя, связанные с этими изменениями, редко превышают 100 % (в два раза). Они являются основными источниками ошибок в четко организованных экспериментах на малых дальностях.

#### 7.10.4.3 **Корректировка осадкомеров**

Существует общее согласие в отношении того, что сравнение с данными осадкомеров следует производить регулярно, как и проверку эффективности работы радиолокатора, и вводить соответствующие поправки, если отклонения данных радиолокатора четко определены. Однако это следует делать осмысленно, поскольку внесение поправок в одну ситуацию может вызвать проблемы в другой ситуации. В ситуациях, когда радиолокационные оценки сильно расходятся с принятыми за эталон из-за калибровки радиолокатора или других причин, такие поправки могут привести к значительным улучшениям.

Оценки осадков на уровне земной поверхности, получаемые с помощью радиолокационных систем, осуществляются для площадей с пространственным разрешением, как правило, 1–4 км<sup>2</sup> и за последовательные 5–15-минутные интервалы с помощью индикатора кругового обзора (ИКО) при малом угле возвышения (углы возвышения < 1°), комбинированной продукции ИКО постоянной высоты или даже продукции более высокой категории сложности. Согласно полученным данным, радиолокационные оценки интенсивности осадков сравнимы с локальными измерениями по осадкомеру с коэффициентом в пределах 2. Осадкомер отбирает пробы на исключительно небольшой площади (100 см<sup>2</sup>, 200 см<sup>2</sup>), в то время как радиолокатор определяет среднее значение по объему в гораздо более крупном масштабе (1–4 км<sup>2</sup>). Это различие объясняет значительную степень несоответствия. Имеются указания на то, что точность осадкомера может, для некоторых задач, оказаться гораздо ниже зачастую предполагаемой, особенно если оценки получены по данным относительно небольшого количества осадкомеров (Neff, 1977). Важным аспектом является система сбалансированных показателей. Сезонные средние значения могут быть приемлемыми

в некоторых применениях и единое соотношение  $Z-R$  может быть достаточным. Однако для предупреждений о быстроразвивающихся бурных паводках может потребоваться введение поправок в режиме реального времени.

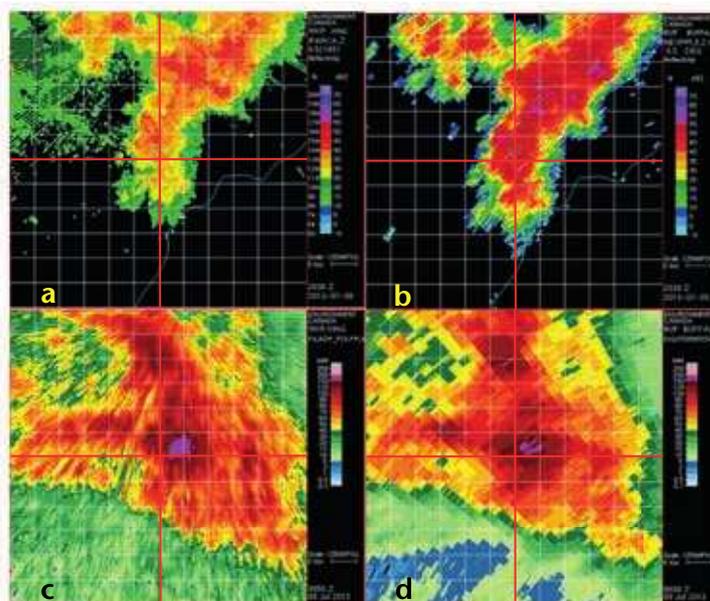
Следует обратить внимание на то обстоятельство, что такие поправки автоматически не обеспечивают улучшения радиолокационных оценок, и иногда скорректированные оценки хуже, чем исходные. Это в особенности справедливо для конвективных дождей, когда вертикальное расширение эхосигнала смягчает проблемы, связанные с вертикальным профилем, и данные осадкомеров являются сомнительными из-за нерепрезентативности измерений. Кроме того, пространственный радиус корреляции может быть малым, и соотношение осадкомер-радиолокатор становится все более неточным с увеличением расстояния от осадкомера. Общий принцип заключается в том, что поправки будут давать существенное улучшение только тогда, когда систематическая разница (т.е. отклонение) между оценками осадков по осадкомеру и радиолокатору больше, чем стандартное отклонение случайного рассеяния при сравнении данных осадкомера и радиолокатора. Такой принцип позволяет судить о том, следует ли использовать данные осадкомеров для корректировок, а также приводит к заключению, что имеющиеся данные необходимо проверять перед непосредственным введением любой поправки. Были исследованы различные методы выполнения этой процедуры, но к настоящему времени широко применяемого подхода не имеется.

#### 7.10.4.4 **Методики измерения осадков с помощью радиолокаторов с двойной поляризацией**

Для использования радиолокатора с поляризационным эффектом в целях улучшения измерений жидких осадков предложены разные методики. В частности, было выдвинуто предположение о том, что различие между значениями отражаемости, измеренными при горизонтальной и вертикальной поляризации ( $Z_{DR}$ ), или сдвиг по фазе ( $\phi_{DP}$  или  $K_{DP}$ ), может дать полезную информацию о распределениях капель по размерам (Seliga and Bringi, 1976). Эти методы зависят от гидродинамических возмущений формы больших капель дождя; более интенсивные дожди с более крупными каплями дают более сильные признаки поляризации. В первую очередь, должно быть скорректировано ослабление сигнала и затем вновь применена методика двойной поляризации. Однако все еще имеются значительные расхождения во мнениях по поводу того, имеет ли эта методика перспективу оперативного использования при измерениях осадков (English et al., 1991). На длинных волнах более высокими являются пороговые значения интенсивности дождя, при которых методика  $K_{DP}$  является эффективной (например, в S-диапазоне эта величина составляет порядка  $20 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ , а в X-диапазоне — порядка  $4 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ ).

На малых дальностях (при высоком пространственном разрешении) радиолокаторы с поляризационным эффектом могут дать ценную информацию о распределениях частиц осадков и других параметрах, относящихся к физике облаков. На больших дальностях нельзя быть уверенным в том, что луч радиолокатора заполнен однородно распределенными гидрометеорами. Соответственно неопределенность эмпирической связи признака поляризации с распределением капель по размерам растет. Конечно, поможет увеличение знаний о соотношении  $Z-R$ , но даже если многопараметрические методики будут работать прекрасно, можно уменьшить ошибку, вызываемую соотношением  $Z-R$ , только с 33 % до 17 %, как это указывается в работе Ulbrich and Atlas (1984). Для гидрологических применений на малых дальностях поправки для других отклонений (уже описанных) обычно гораздо больше, возможно, на порядок величины или более.

Радиолокаторы с двойной поляризацией способны решать проблему ослабления сигнала, частичного заполнения луча и частичного затенения лучей. На рисунке 7.36 показан радиолокатор S-диапазона, в котором методика поляризации используется для корректировки ослабления сигнала. Параметры двойной поляризации чувствительно реагируют на размер и форму крупных частиц, и чем меньше длина волны, тем больше чувствительность радиолокатора. В этом примере наблюдения за системой осадков, которая вызвала локализованное наводнение, велась при помощи радиолокатора



**Рисунок 7.36.** На верхних рисунках показано ослабление сигнала радиолокатора С-диапазона (а) по сравнению с радиолокатором S-диапазона (b) в фиксированный момент времени. На нижних рисунках представлены аккумуляции осадков равномерно в течение всего периода явления и продемонстрировано поразительное сходство после введения поправок с использованием метода поляризационного разнесения (см. также рисунок 7.37, любезно предоставленный Судешом Буду из Министерства окружающей среды Канады).

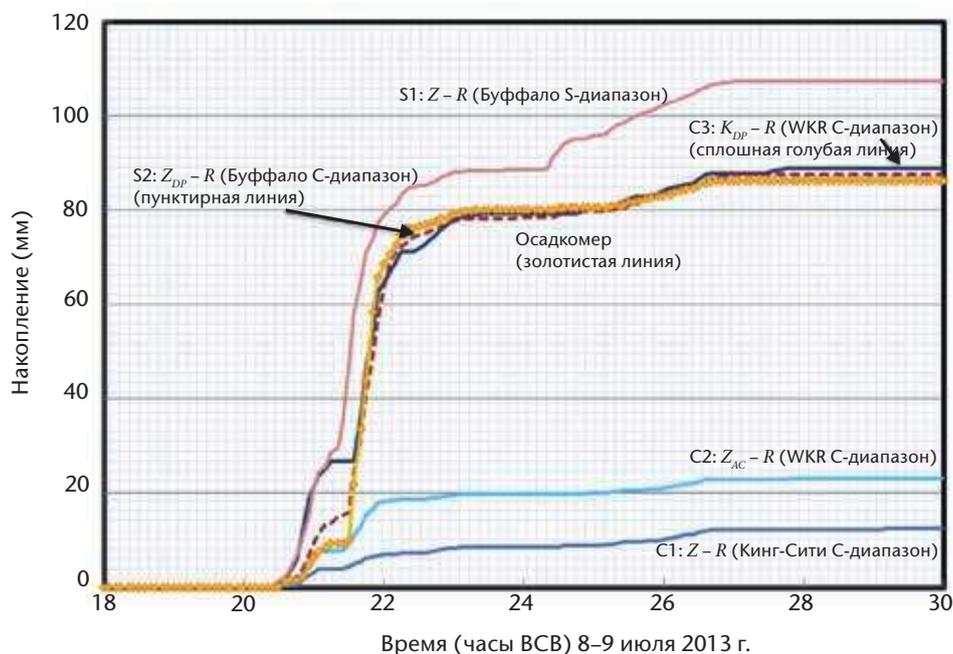
С-диапазона и радиолокатора S-диапазона. Радиолокатор С-диапазона (Кинг-Сити, с шириной луча  $0,65^\circ$ ) находился на расстоянии порядка 40 км от места наводнения, а радиолокатор S-диапазона (Буффало, с шириной луча  $1^\circ$ ) — на расстоянии примерно 100 км. На изображениях (а) и (b) показан один пример низкого уровня радиолокационной отражаемости с обоих радиолокаторов. Красные сетевые линии — это базовые линии. Осадкомер находится в месте, расположенном около 7 км к юго-западу. Сигналы радиолокатора S-диапазона ослаблены по сравнению с сигналами радиолокатора S-диапазона (изображение (b) является более насыщенным по цвету по сравнению с изображением (а)). Во время этого явления происходило намочание антенного обтекателя радиолокатора С-диапазона, что также вызывало значительное затухание сигнала. На изображениях (c) и (d) показаны аккумуляции осадков, данные о которых основаны на соответствующей информации об осадках, полученной при помощи двойной поляризации за восьмичасовой период продолжительности этого явления (см. также рисунок 7.37). Различие в разрешении является очевидным, однако структуры аккумуляции осадков являются схожими. Это является иллюстрацией значительного потенциала радиолокатора S-диапазона с двойной поляризацией для преодоления существенного ослабления сигнала. Интересным является тот факт, что оценка осадков с двойной поляризацией посредством радиолокатора S-диапазона фактически является более низкой и более близкой к данным осадкомера (не показано) по сравнению с использованием традиционного соотношения  $Z-R$ , поскольку для предотвращения переоценки использовалась классификация частиц града в сопоставлении с дождевыми каплями.

На рисунке 7.37 показано сравнение разных оценок дождевых осадков, полученных при помощи радиолокаторов С- и S-диапазонов и данных осадкомера. Нижняя (S1) и верхняя (C1) линии — это аккумуляции, данные о которых основаны на традиционной простой отражаемости, преобразованной в интенсивность дождя ( $Z = 300 R^{1.4}$ ) по данным радиолокатора С-диапазона (40 км от площадки осадкомера) в Кинг-Сити и радиолокатора S-диапазона (100 км от площадки осадкомера) в Буффало. Оба радиолокатора хорошо откалиброваны, и к этим данным применялась только

доплеровская фильтрация отражений от местных наземных предметов. Линия  $Z_{AC}-R$  (C2) — это только отражаемость с корректировкой ослабления сигнала  $Z_{DR}$ , преобразованная в интенсивность дождя и суммарное накопление. Пунктирная (S2) и темно-синяя (C3) линии — это оценки осадков, полученные при помощи методики смешанной двойной поляризации по данным радиолокатора S-диапазона (S2) и методики  $K_{DP}-R$  по данным радиолокатора C-диапазона (C3) соответственно. Улучшенные результаты радиолокатора в Буффало S-диапазона объясняются устранением вызванной градом погрешности с использованием методики классификации частиц при помощи двойной поляризации. Точность оценок радиолокатора в Кинг-Сити C-диапазона повышается благодаря методике специальной дифференциальной фазы ( $K_{DP}-R$ ), которая не реагирует на ослабление сигнала, частичное затенение луча и частичное заполнение луча. Это является иллюстрацией воздействия двойной поляризации на количественное использование радиолокаторов как S-, так и C-диапазона. Это также иллюстрирует более значительное влияние двойной поляризации на работу радиолокаторов C-диапазона.

### Проведение различия между дождем, снегом/градом и другая классификация целей

В случае обычных или работающих только по принципу радиолокационной отражаемости радиолокаторов для получения грубой оценки природы метеорологической цели использовались структура и интенсивность эхосигнала. В летний период величины отражательной способности менее порядка 12 дБZ рассматривались в качестве эхосигналов отсутствующих осадков; слабый дождь характеризовался величинами до порядка 30 дБZ, а сильный дождь — величинами до порядка 50 дБZ и т.д. Величины отражаемости более 57 дБZ воспринимались как град. Снег обычно не различается отдельно этими типами радиолокаторов по горизонтали. По вертикали яркая полоса (область повышенной отражаемости вследствие больших накоплений мокрого снега) отделяла снег на высоте от выпадающего ниже дождя. Радиолокаторы с



**Рисунок 7.37.** Метеограмма накопленных дождевых осадков, составленная по показаниям осадкомера (желтая линия с условными обозначениями), и оценки аккумулярованных осадков — три в C-диапазоне (C1, C2, C3) и две в S-диапазоне (S1, S2) — с использованием разнообразных методов разнесения в диапазонах для одного места размещения осадкомерных пунктов; пункт находится приблизительно в 7 км к юго-западу от центра (см. также рисунок 7.36, любезно предоставленный Судешом Буду из Министерства окружающей среды Канады).

двойной поляризацией дают характеристики цели, используя информацию об отражательной способности из ортогональных каналов, их кросс-поляризованный сигнал и изменения в фазе распространения. Применялись также данные о приземной температуре и влажности, а также исследований с использованием моделей численного прогнозирования погоды. В случае методики нечеткой логики используются независимые оценки, полученные на основе разнообразных параметров двойной поляризации, с тем чтобы классифицировать тип эхосигнала по разнообразным категориям, в том числе: помехи от земной поверхности, дождь, снег, град, биологические рассеиватели и еще большие и маленькие капли (рисунок 7.29).

Самолеты идентифицировались как изолированные точечные аномалии, а отражения сигналов от земной поверхности идентифицировались как стационарные или постоянные эхосигналы на близком расстоянии вокруг радиолокатора. Отражательные способности самолетов и эхосигналы от наземных объектов могут значительно изменяться, поскольку небольшие изменения, в зависимости от угла обзора, приводят к существенным изменениям в обратном рассеянии.

Доплеровские радиолокаторы могут идентифицировать неподвижные цели, такие как отражения сигналов от земной поверхности и аномально проходящие эхосигналы, причем даже во время происходящих метеорологических явлений. Эти наземные цели могут быть эффективно отфильтрованы в процессе обработки сигналов для получения «скорректированной (для отражений от локальных наземных предметов) отражаемости». В большинстве, если не во всех современных радиолокаторах, используется доплеровский эффект, и они обладают такой возможностью. До появления доплеровских радиолокаторов использовались разнообразные методики для удаления эхосигналов мешающих отражений от наземных объектов, включая: (i) CAPPI; (ii) карты помех; и (iii) статистическую флуктуацию статистических данных об отражаемости.

### 7.10.5 Оценка скорости ветра/составление карт ветров

Доплеровские скорости — это радиальные скорости, и комбинация подлинных значений скоростей может дать ту же самую радиальную скорость. Соответственно сами по себе радиальные скорости являются неоднозначными и требуют упрощения предположений для их интерпретации. На обычных цветных дисплеях скорости между  $\pm V_{\max}$  обычно отображаются теплыми/холодными цветами для указания обратного/встречного направления. Скорости, выходящие за пределы скорости Найквиста (неоднозначной или увеличенной), вводятся в цветовую шкалу с противоположного конца. Этот процесс может повторяться, если скорости накладываются более, чем на один интервал Найквиста.

#### 7.10.5.1 Измерения профиля ветра

Доплеровский радиолокатор может быть также использован для получения вертикальных профилей горизонтальных ветров синоптического масштаба. Когда антенна радиолокатора нацелена в горизонтальном направлении, увеличение расстояния влечет за собой увеличение высоты. Если предполагается, что ветер является относительно однородным или линейным над зоной сканирования, то его профиль по высоте может быть получен путем аппроксимации наблюдаемых данных синусоидальной кривой (именуемой индикатором «скорость-азимут» (ИСА) согласно Lhermitte and Atlas, 1961). Ветры в ячейках с нулевой радиальной скоростью являются перпендикулярными к осям луча радиолокатора. Для простой интерпретации данных ИСА, полученных от крупномасштабных систем осадков, может быть использовано цветное отображение. На типовых изображениях, полученных путем конического сканирования в обложных осадках, обнаруживается контур нулевой радиальной скорости, имеющей форму буквы S, поскольку средний ветер изменяет направление с высотой (Wood and Brown, 1986). В других случаях явно просматриваются замкнутые контуры, представляющие струйные течения. Выборку полей ветра синоптического масштаба, полученных при помощи доплеровского радиолокатора, см. на рисунке 7.12.

Если можно сделать предположение в отношении однородности, то в таком случае, применяя методику ИСА, можно также получить оценки дивергенции посредством подбора для уравнения кривой с постоянным членом. Эту методику невозможно с достаточной точностью использовать в периоды выпадения конвективных осадков в окрестностях радиолокатора, поскольку не будет соблюдаться предположение относительно однородности. С помощью доплеровских радиолокаторов были успешно получены данные ИСА профилей ветра и оценки дивергенции в оптически прозрачном пограничном слое в течение практически всех самых холодных месяцев до высот 3–5 км над уровнем земли. Представляется, что методика ИСА хорошо подходит для измерения ветров в системах осадков, связанных с внетропическими и тропическими циклонами. При использовании радиолокатора в режиме «безоблачная атмосфера» временные ряды измерений дивергенции и вычисленной вертикальной скорости являются особенно полезными при текущем прогнозировании вероятности глубокой конвекции.

#### 7.10.5.2 **Характеристики конвективного ветра**

В случае конвекции мелкомасштабные характеристики ветра обуславливаются дивергенцией, конвергенцией и ротацией, наблюдаемыми при фронтальных порывах, нисходящих потоках, мезоциклонах и т.д. Эти явления наблюдаются в виде небольших аномалий в масштабе от одного до десятков километров, которые являются частью основных потоков масштабами в сотни километров. Благодаря предположениям относительно потока воздуха, и в сочетании с концептуальными моделями и пониманием сути грозных явлений или мезомасштабных конвективных систем, цветные отображения полей радиальной скорости, полученные с одного доплеровского радиолокатора, могут помочь в интерпретации данных и диагностике суровости грозного явления в режиме реального времени (Burgess and Lemon, 1990). Lemon (1978) составил перечень параметров и процедуру диагностики для идентификации сильных гроз (см. раздел 7.10.2). Конвективные параметры ветра мешают интерпретации полей радиальной скорости, в частности, когда присутствуют мезомасштабные потоки в масштабе 40–100 км и трехмерные режимы, такие как наблюдаемые в гористой местности со сложным рельефом.

#### 7.10.5.3 **Составление карты ветров**

С середины 1970-х годов проводились эксперименты по измерению трехмерных полей ветра с использованием систем, состоящих из нескольких доплеровских радиолокаторов. Измерения, проведенные в данном месте внутри зоны осадков, могут быть объединены с помощью соответствующего геометрического преобразования в целях получения трех компонентов ветра. Подобные оценки также возможны с помощью только двух радиолокаторов при использовании уравнения непрерывности. Кинематический анализ поля ветра описан в работе Browning and Wexler (1968). Однако для получения точной оценки скорости радиолокаторы должны находиться в относительной близости друг к другу (40–80 км), а зона цели должна находиться в пределах двух боковых лепестков перпендикулярно к базовой направленности радиолокатора. В практическом плане невозможно найти радиолокаторы, расположенные столь близко друг к другу.

#### 7.10.6 **Инициализация и модели численного прогнозирования погоды**

В ряде центров численного прогнозирования погоды для ассимиляции данных используются самые разнообразные данные и продукция радиолокаторов. Не во всех моделях используется одна и та же продукция. Осадки являются производным параметром в моделях численного прогнозирования погоды, и поэтому трудно непосредственно ассимилировать поля осадков или отражаемости. Ветры представляют собой непосредственные модельные переменные, и радиальные скорости могут быть ассимилированы с меньшими изощрениями. В число этих параметров входит ИСА профилей ветра, полученных при помощи радиолокаторов, усредненные поля осадков на поверхности суши в глобальных моделях и, в некоторых случаях, трехмерные поля

радиолокационной отражаемости и радиальной скорости для локального района или мелкомасштабных моделей в полярных координатах. Lopez (2011) продемонстрировал большое значение ассимилирования данных радиолокатора об осадках над земной поверхностью в продукции, выпускаемой в рамках проекта США «Stage IV», применительно к погоде в Европе и Азии. Эти и другие применения (отслеживание тайфунов) являются главными стимулами для инициативы в области глобального обмена данными метеорологических радиолокаторов.

#### 7.10.7 Оценка влажности

Перспективной инновацией является получение параметров влажности на основе различий в прохождении луча эхосигналов от повсеместных наземных целей (Fabry, 2004). Эта инновация является парадоксальной принципу размещения метеорологических радиолокаторов, поскольку их размещают так, чтобы минимизировать помехи от земной поверхности. Флуктуации показателя преломления вызывают изменения длины пути распространения луча, которые могут быть обнаружены в качестве изменений в фазе сигнала или сдвига Доплера. Посредством сопоставления сдвига в сухих условиях в сравнении с влажными условиями и учета неоднозначностей по дальности изменение длины пути может быть оценено и после этого, используя закон Снелла, соотнесено с показателем преломления. Показатель преломления зависит от температуры, давления и влажности, но, в первую очередь, от последнего параметра, и соответственно влажность может быть определена в непосредственной близости от радиолокатора. Несколько исследовательских радиолокаторов обладают этой способностью, и некоторые действующие системы (во Франции и СК) создают прототипы этого для оперативного использования.

#### 7.11 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКЦИЯ

Радиолокационные данные могут обрабатываться для получения разнообразной метеорологической продукции с целью поддержки множества применений. Качество этой продукции зависит от типа радиолокатора, стратегии сканирования, его характеристик обработки сигнала и соответствующей системы контроля радиолокатора и анализа/генерирования данных. Эта продукция включает сетки необработанных или производных параметров радиолокатора, вертикальные профили ветра, координаты и характеристики проанализированных грозových ячеек, их исторические траектории, прогнозы текущей погоды и т. д. Данные о полярных координатах преобразуются в двух- или трехмерные декартовы координаты с использованием методов интерполяции в сетках с разными географическими проекциями. На рисунке 7.24 показано несколько нижеперечисленных видов продукции. Перечень стандартной радиолокационной продукции представлен в таблице 7.10.

Ниже следует перечень выпускаемой продукции:

- a) индикатор кругового обзора: отображение значений радиометеорологических величин, полученных за один полный оборот антенны при заданном угле места, в полярной системе координат. Это классический радиолокационный продукт, используемый прежде всего для наблюдений за погодой. Один из наиболее основных видов продукции. Следует отметить, что такую продукцию получают при постоянном угле места, и поэтому увеличение дальности означает, что данные поступают по мере увеличения высоты. В этом формате может быть отображен любой параметр;
- b) индикатор кругового обзора постоянной высоты (CAPPI): отображение горизонтального разреза переменной на конкретной высоте, получаемого с помощью интерполяции объемных данных. Он используется для слежения за сильными штормами и их идентификации. Он также полезен для наблюдений за метеорологическими условиями на заданных эшелонах полета при обеспечении воздушного движения. Одним из обоснований для создания CAPPI является то,

что благодаря тщательному выбору высоты практически свободная от отражений локальных объектов продукция может быть получена без использования доплеровского режекторного фильтра нулевой скорости;

- с) псевдо-индикатор «дальность-высота» (RHI): визуальное отображение переменной, полученное в результате сканирования по объему, когда данные при том же самом азимуте выделяются и сопоставляются для получения информации по высоте в режиме погоды. Классически это делалось посредством физической вертикальной развертки антенны, как правило в диапазоне 0–90° при заданном азимуте. Для выбора азимута и принятия решения о том, когда проводить сканирование, требовалось вмешательство оператора. Преимуществом этого классического метода является то, что плотность информации является гораздо более высокой. Обычно могут использоваться весьма малые изменения угла места (~0,1°). Качество при использовании метода псевдо-индикатора «дальность-высота» (RHI) зависит от стратегии сканирования, однако он характеризуется значительным преимуществом универсальности. Он используется для идентификации сильных штормов, града и яркой полосы;
- d) вертикальный разрез: отображение значений метеорологических величин вдоль заданной потребителем линии сечения (не обязательно проходящей через точку установки радиолокатора). Оно получается в результате интерполяции объемных данных;
- e) максимум в вертикальном направлении: отображенные на горизонтальной плоскости максимальные значения метеорологических переменных (обычно отражаемости) над каждой точкой наблюдаемой территории. Он полезен для идентификации максимальной отражаемости во время шторма и оценки его силы или для оценки максимальных осадков, выпадение которых может ожидаться. В некоторых случаях из-за проблем, связанных с размещением радиолокатора, при котором невозможно осуществлять наблюдение на низких уровнях (гористая местность), это использовалось для оценки поверхностных осадков. В некоторых случаях в отношении данных существует пороговое значение минимальной высоты, и поэтому высокие значения отражаемости в яркой полосе не оказывают чрезмерного влияния на использование этой продукции. Одним из вариантов является ограничение высоты данных для проведения быстрого анализа вертикальной структуры шторма;

**Таблица 7.10. Перечень типовой радиолокационной продукции**

Индикатор кругового обзора базовых параметров (низкий уровень)	Идентификация и отслеживание ячеек
Максимальная отражаемость в вертикальном направлении	Признак мезоциклона, вихревого торнадо
Высота радиоэха	Мощный нисходящий воздушный поток, микровихрь
Производная продукция по интенсивности грозы	Фронт порывов ветра, конвергенция
Интенсивность осадков над поверхностью	Текущий прогноз
Продукция по аккумуляции осадков на поверхности	Вероятность, размер градин
Продукция по бассейнам	Ограниченный регион слабого экосигнала
Классификация гидрометеоров — град, дождь, снег и т. д.	Индикатор «скорость-азимут» профилей ветра
Произвольные разрезы различных параметров	Мозаика нескольких радиолокаторов

- f) интегральное содержание влаги в вертикальном сечении: показатель интенсивности сильных штормов. Он может быть отображен в горизонтальной плоскости для любого заданного слоя атмосферы. Поскольку этот показатель подвергается сильному влиянию самых высоких значений отражаемости, он является весьма аналогичным продуктом максимальной отражаемости по своей структуре, но выражен иными единицами;
- g) высоты радиоэхо: отображение в горизонтальной плоскости значения самого высокого, поддающегося определению контура отражаемости, полученного в результате поиска в базе объемных данных. Этот индикатор является показателем мощности восходящих потоков и указывает на опасные явления погоды и град;
- h) во многих случаях продукция отражаемости преобразуется в продукцию по осадкам посредством эмпирического соотношения между  $Z$  и  $R$ . Эта продукция по осадкам агрегируется в продукцию по аккумуляции разных временных интервалов;
- i) современные компьютерные системы обладают значительными возможностями для обработки данных. Разработаны методы или алгоритмы для поиска трехмерных данных, с тем чтобы вычислять и количественно определять характеристики смежных районов высокой отражаемости, которые для аналитика связаны с опасными явлениями погоды в виде гроз (рисунок 7.24).

В дополнение к этим стандартным или базовым отображениям может быть произведена другая продукция, призванная удовлетворять особые требования различных пользователей (гидрология, прогнозирование текущей погоды или авиация):

- a) аккумуляция осадков: оценка осадков, аккумулярованных за период времени в каждой точке наблюдаемой территории;
- b) суммы осадков над водосбором: количество аккумулярованных осадков, проинтегрированное по территории;
- c) индикатор «скорость-азимут»: оценка вертикального профиля ветра над радиолокатором. Профиль рассчитывается по данным, полученным за один полный оборот антенны при фиксированном угле места;
- d) объемная обработка данных о скорости, при которой используется трехмерный массив объемных данных;
- e) отслеживание шторма: продукция, полученная с помощью сложного программного обеспечения, для определения траекторий ячеек шторма и прогноза будущих местоположений штормовых центроидов;
- f) сдвиг ветра: оценка радиального и тангенциального сдвига ветра на высоте, заданной пользователем;
- g) профиль дивергенции: оценка дивергенции по данным о радиальной скорости с учетом некоторых допущений;
- h) мезоциклон: продукт сложного программного обеспечения для распознавания ситуаций, с помощью которого определяются признаки вращения в рамках трехмерных данных о базовой скорости, находящиеся в масштабе исходной мезоциклонической циркуляции, которая часто связана с торнадо;
- i) признак торнадообразующего вихря: продукт сложного программного обеспечения для распознавания ситуаций, с помощью которого идентифицируются признаки сдвига «от лотка до ворот» в рамках трехмерных данных о базовой скорости в масштабе циркуляций торнадообразующего вихря;

- j) тип частиц: эхосигнал классифицируется по типу осадков и выводится из данных двойной поляризации.

Помимо этого, итогом обработки данных радиолокационной сети является получение мозаичного радиолокационного изображения. Вышеупомянутая продукция применяется на сетевой основе; фактически это является стандартной практикой. Соображения, касающиеся радиолокационной продукции, включают следующее: (i) проекции используются для визуализации данных; (ii) для районов с частичным дублированием охвата радиолокаторами используются разнообразные алгоритмы, основанные либо на данных ближайшего радиолокатора, максимальном значении, либо на сложной оценке качества данных. Если частичное дублирование является существенным, соседний радиолокатор может заполнить пустое пространство в «конусе молчания». При разработке сетевой радиолокационной продукции необходимо также учитывать внутрисетевую и межсетевую гомогенизацию данных. Это включает временную и пространственную гармонизацию, взаимную калибровку радиолокационных данных и проверку чувствительности радиолокатора, результатом которой может стать нарушение непрерывности в предоставлении сетевой продукции.

---

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 7.А. РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ВМО ПО РАЗМЕЩЕНИЮ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ/ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ОБЩЕГО СПЕКТРА РАДИОЧАСТОТ**

ВМО выражает озабоченность по поводу увеличивающейся нагрузки на связанные с метеорологическими радиолокаторами полосы радиочастот и подчеркивает необходимость усилий по адекватной защите и смягчению воздействий, направленных против утраты и совместного использования этого спектра. ВМО адресует свою озабоченность политикам, национальным органам, регулирующим использование радиочастот, национальным гидрологическим и метеорологическим обществам, коммерческим продавцам телекоммуникационного оборудования и метеорологическому сообществу.

Защита традиционных, связанных с метеорологическими радиолокаторами радиочастот, имеет крайне важное значение для обеспечения непрерывного функционирования и совершенствования метеорологического зондирования, мониторинга, прогнозирования и выпуска предупреждений, и в этой связи соответствует наивысшим интересам безопасности населения. Метеорологическое сообщество во все большей степени полагается на технологии дистанционного зондирования, предназначенные как для регулярных, так и экспериментальных наблюдений за погодой и климатом. Эти виды деятельности требуют глобального доступа к спектру радиочастот не только для радиолокаторов, но также и для профилометров ветра, микроволновых радиометров и телеметрических систем, а также установленных на спутниках пассивных и активных датчиков. Прогресс в обслуживании в области метеорологических предупреждений и других метеорологических предсказаний, достигнутый в последние годы, в значительной мере объясняется наличием этих технологий.

Модели предсказания погоды и локализованные оперативные прогнозы во все большей степени зависят от национальных сетей наземных доплеровских метеорологических радиолокаторов для выпуска предупреждений о таких явлениях суровой погоды, как торнадо, быстроразвивающийся бурный паводок, выходящие на сушу ураганы; для прогнозирования осадков (дождь, снег, град), для предотвращения обледенения воздушных судов и для управления воздушным движением/избегания неблагоприятной погоды. Во всем мире сети доплеровских радиолокаторов борются сейчас с возрастающими нагрузками на совместное использование частотного спектра, создаваемых нелегальными широкополосными беспроводными применениями. Согласно уже имеющемуся в Европе опыту, воздействия радиочастотных помех, создаваемых беспроводными сетями связи, могут ослеплять метеорологические радиолокаторы по конкретным направлениям или даже по значительным частям их охвата. Эта ситуация усугубляется в связи с широко распространенным и нелегальным характером этих беспроводных применений, использование которых может привести к полной потере соответствующего спектра радиочастот для метеорологических радиолокаторов.

Ведется постоянная разработка новых радиолокационных технологий, включая адаптивные стратегии сканирования, более короткие импульсы, поляризацию, импульсную компрессию, быстрые изменения частоты и фазы. Существующие и планируемые спутниковые радиолокационные системы измеряют параметры облаков и осадков, что имеет важное значение для прогнозирования погоды, а также для исследований и оценки глобального изменения климата. В настоящее время осуществляется экспериментальное использование самых разнообразных прочих радиотехнологий космического и наземного базирования, и для них может потребоваться выделение в будущем радиочастотного спектра.

Новые коммуникационные применения делают радиочастотный спектр исключительно ценным ресурсом, и в этой связи все большая опасность возникает для частотных полос, используемых в оперативной метеорологии и научных исследованиях. ВМО и метеорологическое сообщество полагаются на уполномоченные международные

и национальные ведомства, регламентирующие использование радиочастот, поддерживают их, а также на сотрудничество с органами и секторами телекоммуникации, с тем чтобы продолжать защищать и должным образом совместно использовать эти радиочастоты. ВМО активно работает с этими ведомствами по линии Международного союза электросвязи (МСЭ) в целях создания соответствующих механизмов защиты использования спектра радиочастот в метеорологических целях. ВМО поощряет разработку четкого определения понятия «помехи» как допустимых, так и иных, а также процедуры защиты или решения в этой области в том случае, если совместное использование становится проблемой. ВМО поощряет финансирование и проведение исследований, направленных на определение последствий полной или частичной утраты одного или нескольких частотных полос, используемых ныне действующими оперативными системами наблюдений и запланированными системами. ВМО рекомендует также предоставлять результаты этих исследований группам МСЭ по радиосвязи и национальным ведомствам радиочастотного регулирования и телекоммуникационной промышленности для поощрения диалога между активными и пассивными пользователями радиочастотного спектра. Необходимо проявлять бдительность, поскольку со временем будет происходить деградация метеорологических данных, вызванная внесением помех и совместным использованием. Поощряется сотрудничество с национальными ведомствами радиочастотного регулирования, индустрией телекоммуникаций и с другими пользователями частотного спектра как для оказания поддержки жизненно важного использования радиочастотного спектра в метеорологических целях, так и для смягчения потенциальных проблем.

Наивысшим интересам всех стран соответствует защита радиочастот, существенно важных для метеорологической деятельности, которая является исключительно важной для точного прогнозирования неблагоприятной погоды. Изыскиваются и должны поддерживаться глобальные решения. ВМО активно участвует в международной деятельности по регламентированию частот по линии группы экспертов с глобальным представительством, с тем чтобы защищать действующие частотные полосы, используемые для проведения наблюдений в области метеорологии, климатологии и наблюдений за Землей, а также для получения новых полос частот, необходимых для осуществления исследований и оперативной деятельности.

Дополнительная информация имеется в руководстве под названием «Использование радиочастотного спектра в метеорологии: прогнозирование и мониторинг погоды, климата и качества воды», выпущенном совместно ВМО и МСЭ.

---

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 7.В. РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ВМО ПО ВЗАИМОСОГЛАСОВАННОМУ РАЗМЕЩЕНИЮ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

ВМО выражает беспокойство в связи с увеличивающимися воздействиями ветроэнергетических установок на функционирование метеорологических радиолокаторов и подчеркивает необходимость надлежащей консультации, а также усилий по обеспечению защиты и смягчению воздействий. ВМО адресует свое беспокойство политикам, национальным органам, регламентирующим использование радиочастот, национальным гидрологическим и метеорологическим обществам, разработчикам ветроэнергетических установок, коммерческим продавцам этого оборудования и метеорологическому сообществу.

Защита данных метеорологических радиолокаторов имеет крайне важное значение для обеспечения постоянного функционирования и совершенствования метеорологического зондирования, мониторинга, прогнозирования и выпуска предупреждений, и в связи с этим она отвечает наивысшим интересам безопасности населения. Модели предсказания погоды и локализованные оперативные прогнозы во все большей степени зависят от национальных сетей наземных доплеровских метеорологических радиолокаторов и профилометров ветра для выпуска предупреждений о явлениях суровой погоды, таких как торнадо, быстроразвивающиеся бурные паводки, выходящие на сушу ураганы, и для прогнозирования осадков (дождь, снег, град), для предотвращения обледенения воздушных судов и управления воздушным движением/избегания неблагоприятных метеорологических явлений погоды. Во всем мире сети доплеровских радиолокаторов и профилометров ветра борются с возрастающей нагрузкой, возникающей в связи с эксплуатацией ветроэнергетических установок.

Ветроэнергетические установки уже оказывали воздействие на оперативные сети метеорологических радиолокаторов, создавая смешиваемые эхосигналы от земной поверхности, которые приводят к значительной потере данных или отображают ложные осадки для гидрологических применений. Вращающиеся лопасти могут стать причиной появления скоростей, которые потенциально могут быть приняты за явления суровой погоды, такие как торнадо. Хотя метеорологические радиолокаторы были добровольно перемещены разработчиками ветроэнергетических установок, как правило юрисдикция метеорологического сообщества не распространяется на вопросы расположения ветроэнергетических установок, и оно полагается на политику «добрососедских отношений» для осуществления сотрудничества и смягчения воздействий.

Разработка новых сетей радиолокаторов, профилометров ветра и ветроэнергетических установок потребует стратегического планирования для обеспечения смягчения последствий со стороны метеорологического сообщества и сообщества ветроэнергетических установок. ВМО и метеорологическое сообщество полагаются на уполномоченные международные и национальные ведомства, регламентирующие использование радиоволн, поддерживают их, будут активно поощрять и содействовать усилиям этих ведомств по поощрению и защите использования беспрепятственного пространства в метеорологических целях. ВМО призывает национальные радиоведомства разработать критерии допустимых препятствий и предоставить инструменты для оказания помощи разработчикам ветроэнергетических установок, которые будут им помогать в выборе мест для размещения таких установок.

Расстояние между ветроэнергетическими установками и метеорологическими радиолокаторами может быть использовано для общего описания воздействия на качество данных радиолокаторов, а также использовано для обеспечения стратегии смягчения воздействий в целях совместного размещения метеорологических радиолокаторов и ветроэнергетических установок. Ниже приведены общие руководящие принципы для типовых радиолокаторов и примеры размещения на участках местности, которые могут потребовать внесения изменений в отдельных ситуациях и касаются

конкретных радиолокаторов. Более мощные радиолокаторы, такие как радиолокаторы S-диапазона (длина волны 10 см) с меньшим ослаблением, могут потребовать увеличения пределов дальности, указанных в таблице.

ВМО поощряет финансирование и проведение исследований по разработке технологий для смягчения данного воздействия. Методы обработки сигналов с метеорологических радиолокаторов или использование других материалов для строительства ветроэнергетических установок могут ослаблять помехи на больших расстояниях. Помимо этого, ВМО рекомендует предоставлять результаты таких исследований производителям метеорологических радиолокаторов и ветроэнергетических установок.

Наивысшим интересом всех государств отвечает защита беспрепятственного пространства для метеорологических радиолокаторов и профилометров ветра, которые имеют существенное и крайне важное значение для точного прогнозирования неблагоприятной погоды. Изыскиваются местные, национальные и технологические решения. ВМО будет оказывать поддержку и предоставлять руководящий материал и инструменты для защиты беспрепятственного пространства для метеорологических радиолокаторов и профилометров ветра.

<i>Расстояние</i>	<i>Потенциальное воздействие</i>	<i>Руководящие указания</i>
0–5 км	Ветроэнергетическая установка может полностью или частично блокировать радиолокатор и может привести к значительной потере данных, которые не могут быть восстановлены.	Зона непосредственного воздействия: ветроэнергетическую установку не следует устанавливать в этой зоне.
5–20 км	Многочисленное отражение и множественное рассеяние могут создавать ложные эхосигналы и давать несколько параметров высот. Измерения доплеровской скорости могут быть искажены в результате вращающихся лопастей.	Зона умеренного воздействия: необходимо учитывать особенности ландшафта. Рекомендуется провести анализ и консультации. Изменение ориентации или размещения отдельных установок может уменьшить или смягчить воздействия.
20–45 км	Как правило, наблюдается при самом низком угле сканирования; в отражении будут наблюдаться эхосигналы, похожие на сигналы, отраженные от земной поверхности; доплеровские скорости могут искажаться в результате вращающихся лопастей.	Зона низкого воздействия: рекомендуется уведомление.
> 45 км	Как правило, не наблюдается в данных, но может быть заметно в связи с условиями распространения.	Зона неравномерного воздействия: рекомендуется уведомление.

## СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Ahnert, P.R., M. Hudlow, E. Johnson, D. Greene and M. Dias, 1983: Proposed on-site processing system for NEXRAD. *Preprints of the Twenty-first Conference on Radar Meteorology* (Edmonton, Canada), American Meteorological Society, Boston, 378–385.
- Anagnostou, E.N., C.A. Morales and T. Dinku, 2001: The use of TRMM precipitation radar observations in determining ground radar calibration biases. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(4):616–628.
- Aoyagi, J., 1983: A study on the MTI weather radar system for rejecting ground clutter. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 33(4):187–243.
- Aoyagi, J. and N. Kodaira, 1995: The reflection mechanism of radar rain echoes. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 246–248.
- Atlas, D., 1964: Advances in radar meteorology. In: *Advances in Geophysics* (H.E. Landsberg and J. Van Meighem, eds.). Academic Press, New York, 10:317–479.
- (ed.), 1990: *Radar in Meteorology*. American Meteorological Society, Boston.
- Atlas, D., R.C. Srivastava and R.S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 11(1):1–35.
- Battan, L.J., 1973: *Radar Observation of the Atmosphere*. University of Chicago Press, Chicago.
- Baynton, H.W., 1979: The case for Doppler radars along our hurricane affected coasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60(9):1014–1023.
- Bean, B.R. and E.J. Dutton, 1966: *Radio Meteorology*. US Government Printing Office, Washington DC.
- Bebbington, D.H.O., 1992: Degree of polarization as a radar parameter and its susceptibility to coherent propagation effects. *Preprints from URSI Commission F Symposium on Wave Propagation and Remote Sensing* (Ravenscar, United Kingdom), 431–436.
- Bellon, A. and G.L. Austin, 1978: The evaluation of two years of real-time operation of a Short-Term Precipitation Forecasting Procedure (SHARP). *Journal of Applied Meteorology*, 17(12):1778–1787.
- Berenguer, M., S. Park, D. Sempere-Torres, J. Didszun, M. Pool and M. Pfeifer, 2012: RAINSCANNER@Barcelona: an experiment to assess the hydrological value of a portable X-band radar. *Preprints, Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2012)*, Toulouse, France.
- Bringi, V.N. and V. Chandrasekar, 2001: *Polarimetric Doppler Weather Radar*, Cambridge University Press.
- Bringi, V.N. and A. Hendry, 1990: Technology of polarization diversity radars for meteorology. In: *Radar in Meteorology* (D. Atlas, ed.). American Meteorological Society, Boston, 153–190.
- Brown, R.A. and L.R. Lemon, 1976: Single Doppler radar vortex recognition: Part II – Tornadic vortex signatures. *Preprints of the Seventeenth Conference on Radar Meteorology* (Seattle, Washington), American Meteorological Society, Boston, 104–109.
- Brown, R.A., V.T. Wood, R.M. Steadham, R.R. Lee, B.A. Flickinger and D. Sirmans, 2005: New WSR-88D Volume Coverage Pattern 12: Results of field tests. *Weather and Forecasting*, 20:385–393.
- Browning, K.A. and C.G. Collier, 1982: An integrated radar-satellite nowcasting system in the United Kingdom. In: *Nowcasting* (K.A. Browning, ed.). Academic Press, London, 47–61.
- Browning, K.A., C.G. Collier, P.R. Larke, P. Menmuir, G.A. Monk and R.G. Owens, 1982: On the forecasting of frontal rain using a weather radar network. *Monthly Weather Review*, 110:534–552.
- Browning, K.A. and R. Wexler, 1968: The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, 7:105–113.
- Brunkow, D., 2001: *Sphere Calibrations, The Most Hated Experiment in Radar Meteorology*, RADCAL 2000 Workshop, AMS Short Course, Albuquerque, NM.
- Burgess, D.W., 1976: Single Doppler radar vortex recognition: Part I – Mesocyclone signatures. *Preprints of the Seventeenth Conference on Radar Meteorology* (Seattle, Washington), American Meteorological Society, Boston, 97–103.
- Burgess, D.W. and L.R. Lemon, 1990: Severe thunderstorm detection by radar. In: *Radar in Meteorology* (D. Atlas, ed.). American Meteorological Society, Boston, 619–647.
- Burrows, C.R. and S.S. Attwood, 1949: *Radio Wave Propagation*. Academic Press, New York.
- Byers, H.R., 1948: The use of radar in determining the amount of rain falling over a small area. *Transactions of the American Geophysical Union*, 187–196.
- Chandrasekar, V. and L. Baldini, 2013: *RADCAL 2013*, AMS Short Course, Fort Collins, CO.
- Chandrasekar, V., R. Meneghini and I. Zawadzki, 2003: Global and local precipitation measurements by radar. *Meteorological Monographs*, 30(52):215–215.

- Cluckie, I.D. and M.E. Owens, 1987: Real-time rainfall run-off models and use of weather radar information. In: *Weather Radar and Flood Forecasting* (V.K. Collinge and C. Kirby, eds.). John Wiley and Sons, New York.
- Collier, C.G., 1989: *Applications of Weather Radar Systems: A Guide to Uses of Radar Data in Meteorology and Hydrology*. John Wiley and Sons, Chichester, England.
- Commission of the European Communities, 1990: *Une revue du programme ARAMIS* (J.L. Cheze). Seminar on Cost Project 73: Weather Radar Networking (Brussels, 5–8 September 1989), 80–85.
- Crook, N.A. and J. Sun, 2002: Assimilating radar, surface, and profiler data for the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19:888–898.
- Crozier, C.L., P. Joe, J. Scott, H. Herscovitch and T. Nichols, 1991: The King City operational Doppler radar: Development, all-season applications and forecasting. *Atmosphere-Ocean*, 29:479–516.
- Crum, T.D. and R.L. Alberty, 1993: The WSR-88D and the WSR-88D Operational Support Facility. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(9):1669–1687.
- Dennis, A.S., C.A. Schock and A. Koscielski, 1970: Characteristics of hailstorms of western South Dakota. *Journal of Applied Meteorology*, 9:127–135.
- Dexter, P.E., M.L. Heron and J.F. Ward, 1982: Remote sensing of the sea-air interface using HF radars. *Australian Meteorological Magazine*, 30:31–41.
- Dixon, M. and G. Wiener, 1993: TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting – A radar-based methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10(6):785–797.
- Donaldson, R.J., Jr., 1970: Vortex signature recognition by a Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, 9:661–670.
- Doneaud, A.A., S. Ionescu-Niscov, D.L. Priegnitz and P.L. Smith, 1984: The area-time integral as an indicator for convective rain volumes. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23:555–561.
- Doneaud, A.A., J.R. Miller Jr., L.R. Johnson, T.H. Vonder Haar and P. Laybe, 1987: The area-time integral technique to estimate convective rain volumes over areas applied to satellite data: A preliminary investigation. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26:156–169.
- Doviak, R.J. and D.S. Zrnić, 1993: *Doppler Radar and Weather Observations*. Second edition, Academic Press, San Diego.
- Dupuy, P., S. Matthews, N. Gaussia, R. Scovel and A. Kergomard, 2010: Developing a European Radar Data Centre. Preprints, *Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2010)*, Sibiu, Romania.
- Eccles, P.J. and D. Atlas, 1973: A dual-wavelength radar hail detector. *Journal of Applied Meteorology*, 12:847–854.
- Eilts, M.D. and S.D. Smith, 1990: Efficient dealiasing of Doppler velocities using local environment constraints. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7:118–128.
- English, M.E., B. Kochtubajda, F.D. Barlow, A.R. Holt and R. McGuinness, 1991: Radar measurement of rainfall by differential propagation phase: A pilot experiment. *Atmosphere-Ocean*, 29:357–380.
- Fabry, F., 2004: Meteorological value of ground target measurements by radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21:560–573.
- Fabry, F., C. Augros and A. Bellon, 2013: The case of sharp velocity transitions in high vertical wind shear when measuring Doppler velocities with narrow Nyquist intervals. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30:389–394.
- Federer, B., A. Waldvogel, W. Schmid, F. Hampel, Rosini, D. Vento and P. Admirat, 1978: Grossversuch IV: Design of a randomized hail suppression experiment using the Soviet method. *Pure and Applied Geophysics*, 117:548–571.
- Frush, C., R.J. Doviak, M. Sachidananda and D.S. Zrnić, 2002: Application of the SZ phase code to mitigate range – Velocity ambiguities in weather radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19:413–430.
- Germann, U., G. Galli, M. Boscacci and M. Bolliger, 2006a: Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132:1669–1692.
- Germann, U., I. Zawadzki and B. Turner, 2006b: Predictability of precipitation from continental radar images. Part IV: Limits to prediction. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63:2092–2108.
- Gossard, E.E. and R.G. Strauch, 1983: *Radar Observations of Clear Air and Clouds*. Elsevier Scientific Publication, Amsterdam.
- Harlan, J.A. and T.M. Georges, 1994: An empirical relation between ocean-surface wind direction and the Bragg line ratio of HF radar sea echo spectra. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C4):7971–7978.
- Heiss, W.H., D.L. McGrew and D. Sirmans, 1990: NEXRAD: Next generation weather radar (WSR-88D). *Microwave Journal*, 33(1):79–98.

- Holleman, I., 2001: *Hail Detection Using Single-polarization Radar*. Scientific Report, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), WR-2001-01, De Bilt.
- Holleman, I., H.R.A. Wessels, J.R.A. Onvlee and S.J.M. Barlag, 2000: Development of a hail-detection product. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*, 25:1293–1297.
- Holt, A.R., M. Chandra and S.J. Wood, 1995: Polarisation diversity radar observations of storms at C-band. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 188–189.
- Holt, A.R., P.I. Joe, R. McGuinness and E. Torlaschi, 1993: Some examples of the use of degree of polarization in interpreting weather radar data. *Proceedings of the Twenty-sixth International Conference on Radar Meteorology*, American Meteorological Society, 748–750.
- Hubbert, J.C., M. Dixon, S.M. Ellis and G. Meymaris, 2009a: Weather radar ground clutter. Part I: Identification, modeling, and simulation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26:1165–1180.
- Hubbert, J.C., M. Dixon and S.M. Ellis, 2009b: Weather radar ground clutter. Part II: Real-time identification and filtering. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26:1181–1197.
- Joe, P., 1999: Beamheight Statistics for Low Elevation Scans. Paper, *Twenty-ninth AMS Radar Conference*, Montreal, American Meteorological Society, Boston, 922–925.
- , 2001: RADCAL 2000 Workshop, AMS Short Course, Albuquerque, NM.
- , 2010: RADMON Workshop, *Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology* (ERAD 2010), Sibiu, Romania.
- Joe, P., D. Burgess, R. Potts, T. Keenan, G. Stumpf and A. Treloar, 2004: The S2K severe weather detection algorithms and their performance. *Weather and Forecasting*, 19:43–63.
- Joe, P., S. Dance, V. Lakshmanan, D. Heizenrehder, P. James, P. Lang, T. Hengstebeck, Y. Feng, P.W. Li, H.Y. Yeung, O. Suzuki, K. Doi and J. Dai, 2012: Automated processing of Doppler radar data for severe weather forecasting. In: *Doppler Radar Observations, Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar and other Advanced Applications* (J. Bech and J.L. Chau, eds.), Intech.
- Joe, P., M. Falla, P. Van Rijn, L. Stamadianos, T. Falla, D. Magosse, L. Ing and J. Dobson, 2002: Radar data processing for severe weather in the national radar project of Canada. *Preprints, Twenty-first Conference on Severe Local Storms*, San Antonio, 12–16 August 2002, 221–224.
- Joe, P. and P.T. May, 2003: Correction of dual PRF velocity errors for operational Doppler weather radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(4):429–442.
- Joe, P., R.E. Passarelli and A.D. Siggia, 1995: Second trip unfolding by phase diversity processing. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 770–772.
- Joe, P., B. Scott, C. Doyle, G. Isaac, I. Gultepe, D. Forsyth, S. Cober, E. Campos, I. Heckman, N. Donaldson, D. Hudak, R. Rasmussen, R. Stewart, J.M. Thériault, H. Carmichael, M. Bailey and F. Boudala, 2014: The monitoring network of the Vancouver 2010 Olympics. *Pure and Applied Geophysics*, 171(1):25–58.
- Joint Doppler Operational Project (JDOP), 1979: *Final Report on the Joint Doppler Operational Project*. NOAA Technical Memorandum, ERL NSSL-86, Norman, Oklahoma, National Severe Storms Laboratory.
- Joss, J. and R.W. Lee, 1993: Scan strategy, clutter suppression calibration and vertical profile corrections. *Preprints of the Twenty-sixth Conference on Radar Meteorology* (Norman, Oklahoma), American Meteorological Society, Boston, 390–392.
- Joss, J. and A. Waldvogel, 1990: Precipitation measurement and hydrology. In: *Radar in Meteorology* (D. Atlas, ed.). American Meteorological Society, Boston, 577–606.
- Keeler, R.J., C.A. Hwang and E. Loew, 1995: Pulse compression weather radar waveforms. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 767–769.
- Keenan, T.D. and S.J. Anderson, 1987: Some examples of surface wind field analysis based on Jindalee skywave radar data. *Australian Meteorological Magazine*, 35:153–161.
- Lakshmanan, V., T. Smith, G. Stumpf and K. Hondl, 2007: The Warning Decision Support System–Integrated Information. *Weather and Forecasting*, 22:596–612.
- Leber, G.W., C.J. Merrit and J.P. Robertson, 1961: WSR-57 analysis of heavy rains. *Preprints of the Ninth Weather Radar Conference*, American Meteorological Society, Boston, 102–105.
- Lee, R., G. Della Bruna and J. Joss, 1995: Intensity of ground clutter and of echoes of anomalous propagation and its elimination. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 651–652.

- Lemon, L.R., 1978: *New Severe Thunderstorm Radar Identification Techniques and Warning Criteria: A Preliminary Report*. NOAA Technical Memorandum, NWS NSSFC-1, Kansas City, National Severe Storms Forecast Center.
- , 1998: The radar “three-body scatter spike”: An operational large-hail signature. *Weather and Forecasting*, 13:327–340.
- Lemon, L.R., D.W. Burgess and R.A. Brown, 1978: Tornadic storm airflow and morphology derived from single-Doppler radar measurements. *Monthly Weather Review*, 106:48–61.
- Leone, D.A., R.M. Endlich, J. Petriceks, R.T.H. Collis and J.R. Porter, 1989: Meteorological considerations used in planning the NEXRAD network. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 70:4–13.
- Lhermitte, R. and D. Atlas, 1961: Precipitation motion by pulse Doppler radar. *Preprints of the Ninth Weather Radar Conference*, American Meteorological Society, Boston, 218–233.
- Lopez, P., 2011: Direct 4D-Var assimilation of NCEP stage IV radar and gauge precipitation data at ECMWF. *Monthly Weather Review*, 139:2098–2116.
- Makihara, Y., 2000: Algorithms for precipitation nowcasting focused on detailed analysis using radar and raingauge data. *Technical Report of the Meteorological Research Institute*, Japan Meteorological Agency, 39:63–111.
- Markowski, P.M., 2002: Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review. *Monthly Weather Review*, 130:852–876.
- Marshall, J.S. and E.H. Ballantyne, 1978: Weather Surveillance Radar. *Journal of Applied Meteorology*, 14(7):1317–1338.
- Marshall, J.S. and K.L.S. Gunn, 1952: Measurement of snow parameters by radar. *Journal of Meteorology*, 9:322–327.
- Marshall, J.S. and W.M. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 5:165–166.
- McLaughlin, D., D. Pepyne, B. Philips, J. Kurose, M. Zink, D. Westbrook, E. Lyons, E. Knapp, A. Hopf, A. Defonzo, R. Contreras, T. Djaferis, E. Insanic, S. Frasier, V. Chandrasekar, F. Junyent, N. Bharadwaj, Y. Wang, Y. Liu, B. Dolan, K. Droegemeier, J. Brotzge, M. Xue, K. Kloesel, K. Brewster, F. Carr, S. Cruz-Pol, K. Hondl and P. Kollias, 2009: Short-wavelength technology and the potential for distributed networks of small radar systems. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(12):1797–1817.
- Meischner, P. (ed.), 2003: *Weather Radar: Principles and Advanced Applications*, Springer, Berlin.
- Melnikov, V., D.S. Zrnić, R.J. Doviak and J.K. Carter, 2002: Status of the dual polarization upgrade on the NOAA’s research and development WSR-88D. *Preprints of the Eighteenth International Conference on Interactive Information Processing Systems* (Orlando, Florida), American Meteorological Society, Boston, 124–126.
- Michelson, D., R. Gill, M. Peura and J. Szturc, 2010: Community-based weather radar networking with BALTRAD. *Preprints, Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2010)*, Sibiu, Romania.
- Michelson, D.B., P.I. Joe, D. Lockett, S. Goldstraw, L. Bai, A. Becker, K.P. Georgakakos, S. Foreman, E. Fucile, R. Giraud, N. Gaussiat, T. Hohmann, A. Kamilliddin, M. Kitchen, E. Kyte, J.F. Mahfouf, S. Matthews, J.M. de Rezende, O. Sireci, M.A. de Barros Teixeira and E. Wattlelot, 2013: WMO initiative for the global exchange of radar data. Manuscript, *Thirty-sixth AMS Radar Meteorology Conference*, Breckenridge, CO, American Meteorological Society.
- Michelson, M., W.W. Schrader and J.G. Wilson, 1990: Terminal Doppler weather radar. *Microwave Journal*, 33(2):139–148.
- Mie, G., 1908: Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik*, 25:377–445.
- Mueller, C.K. and R.E. Carbone, 1987: Dynamics of a thunderstorm outflow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44:1879–1898.
- Mueller, E.A., S.A. Rutledge, V.N. Bringi, D. Brunkow, P.C. Kennedy, K. Pattison, R. Bowie and V. Chandrasekar, 1995: CSU-CHILL radar upgrades. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 703–706.
- Neff, E.L., 1977: How much rain does a rain gauge gage? *Journal of Hydrology*, 35:213–220.
- Passarelli, R.E., Jr., P. Romanik, S.G. Geotis and A.D. Siggia, 1981: Ground clutter rejection in the frequency domain. *Preprints of the Twentieth Conference on Radar Meteorology* (Boston, Massachusetts), American Meteorological Society, Boston, 295–300.
- Probert-Jones, J.R., 1962: The radar equation in meteorology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 88:485–495.
- Ray, P.S., C.L. Ziegler, W. Bumgarner and R.J. Serafin, 1980: Single- and multiple-Doppler radar observations of tornadic storms. *Monthly Weather Review*, 108:1607–1625.

- Rinehart, R.E., 2004: *Radar for Meteorologists*. 4th Edition, Rinehart Publishing.
- Ruggiero, F.H. and R.J. Donaldson, Jr., 1987: Wind field derivatives: A new diagnostic tool for analysis of hurricanes by a single Doppler radar. *Preprints of the Seventeenth Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology* (Miami, Florida), American Meteorological Society, Boston, 178–181.
- Sauvageot, H., 1982: *Radarmétéorologie*. Eyrolles, Paris.
- , 1994: Rainfall measurement by radar: A review. *Atmospheric Research*, 35:27–54.
- Seed, A.W., 2003: A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. *Journal of Applied Meteorology*, 42(3):381–388.
- Seliga, T.A. and V.N. Bringi, 1976: Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, 15:69–76.
- Seltmann, J.E.E., T. Hohmann, M. Frech and P. Tracksdorf, 2013: DWD's new operational scan strategy. *Thirty-sixth AMS Radar Meteorology Conference*, 16–20 September 2013, Breckenridge, CO, poster 329.
- Shearman, E.D.R., 1983: Radio science and oceanography. *Radio Science*, 18(3):299–320.
- Sireci, O., P. Joe, S. Eminoglu and K. Akylidiz, 2010: A comprehensive worldwide web-based weather radar database. Preprints, *Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2010)*, Sibiu, Romania.
- Skolnik, M.I. (ed.), 1970: *Radar Handbook*. McGraw-Hill, New York.
- (ed.), 1990: *Radar Handbook*. Second edition, McGraw-Hill, New York.
- Smith, P.L., 1990: Precipitation measurement and hydrology: Panel report. In: *Radar in Meteorology* (D. Atlas, ed.). American Meteorological Society, Boston, 607–618.
- , 1995: Dwell time considerations for weather radars. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 760–762.
- Smull, B.S. and R.A. Houze Jr., 1987: Rear inflow in squall lines with trailing stratiform precipitation. *Monthly Weather Review*, 115(12):2869–2889.
- Strauch, R.G., 1981: Comparison of meteorological Doppler radars with magnetron and klystron transmitters. *Preprints of the Twentieth Conference on Radar Meteorology* (Boston, Massachusetts), American Meteorological Society, Boston, 211–214.
- Sun, J., M. Xue, J.W. Wilson, I. Zawadzki, S.P. Ballard, J. Onvlee-Hooimeyer, P. Joe, D. Barker, P.W. Li, B. Golding, M. Xu and J. Pinto, 2013: [Use of NWP for nowcasting convective precipitation: Recent progress and challenges](#). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95:409–426.. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95:409–426.
- Tapping, K., 2001: Antenna Calibration using 10.7cm Solar Flux, RADCAL 2000, AMS Short Course, Albuquerque, NM.
- Treloar, A., 1998: Vertically integrated radar reflectivity as an indicator of hail size in the greater Sydney region of Australia. *Preprints of the Nineteenth Conference on Severe Local Storms*, Minneapolis, MN, American Meteorological Society, 48–51.
- Turner, B.J., I. Zawadzki and U. Germann, 2004: Predictability of precipitation from continental radar images. Part III: Operational nowcasting implementation (MAPLE). *Journal of Applied Meteorology*, 43:231–248.
- Ulbrich, C.W. and D. Atlas, 1984: Assessment of the contribution of differential polarization to improve rainfall measurements. *Radio Science*, 19(1):49–57.
- Weber, M.E., J.Y.N. Cho, J.S. Herd, J.M. Flavin, W.E. Benner and G.S. Torok, 2007: The next-generation multimission U.S. surveillance radar network. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(11):1739–1751.
- Wiener, N., 1964: *Time Series*. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts.
- Wilson, J.W. and E.A. Brandes, 1979: Radar measurement of rainfall – A summary. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60(9):1048–1058.
- Wilson, J.W., N.A. Crook, C.K. Mueller, J. Sun and M. Dixon, 1998: Nowcasting thunderstorms: A status report. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10):2079–2099.
- Wilson, J.W. and W.E. Schreiber, 1986: Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines. *Monthly Weather Review*, 114:2516–2536.
- Wilson, J.W., T.M. Weckwerth, J. Vivekanandan, R.M. Wakimoto, R.W. Russell, 1994: Origin of echoes and accuracy of derived winds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(5):1184–1206.
- Witt, A., M. Eilts, G. Stumpf, J. Johnson, D. Mitchell and K. Thomas, 1998: An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, 13:286–303.
- Wolff, D.B. and B.L. Kelley, 2009: [NASA's Radar Software Library \(RSL\) and RSL in IDL](#). Paper, *Thirty-fourth AMS Radar Conference*, Breckenridge, CO.
- Wood, V.T. and R.A. Brown, 1986: Single Doppler velocity signature interpretation of nondivergent environmental winds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 3:114–128.

- World Meteorological Organization, 1985: *Use of Radar in Meteorology* (G.A. Clift). Technical Note No. 181 (WMO-No. 625). Geneva.
- , 2012: Operational use of dual-polarisation: lessons learned at Météo France after 8 years of experience at all wavelengths (S/C/X) (P. Tabary). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2012)*. Instruments and Observing Methods Report No. 109. Geneva.
- Wurman, J., M. Randall and C. Burghart, 1995: Real-time vector winds from a bistatic Doppler radar network. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 725–728.
- Wurman, J., J.M. Straka and E.N. Rasmussen, 1996: Fine-scale Doppler radar observations of tornadoes. *Science*, 272:1774–1777.
- Xue, M., K. Kloesel, K. Brewster, F. Carr, S. Cruz-Pol, K. Hondl and P. Kollias, 2009: Short-wavelength technology and the potential for distributed networks of small radar systems. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(12):1797–1817.
- Yamauchi, H., A. Adachi, O. Suzuki and T. Kobayashi, 2013: Precipitation estimate of a heavy rain event using a C-band solid-state polarimetric radar. *Preprints, Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2012)*, Toulouse, France.
- Zhang, J., K. Howard and J.J. Gourley, 2005: Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: Examples of convective storms and stratiform rain echoes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22:30–42.
- Zrnić, D.S. and S. Hamidi, 1981: *Considerations for the Design of Ground Clutter Cancelers for Weather Radar*. Report DOT/FAA/RD-81/72, NTIS.
- Zrnić, D.S. and A.V. Ryzhkov, 1995: Advantages of rain measurements using specific differential phase. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 35–37.
- Zrnić, D.S., A. Ryzhkov, J. Straka, Y. Liu and J. Vivekanandan, 2001: Testing a procedure for automatic classification of hydrometeor types. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18:892–913.
- Zrnić, D.S., G. Zhang, V. Melnikov and J. Andric, 2010: Three-body scattering and hail size. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49:687–700.
-