

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R М.1849-1
(09/2015)

**Технические и эксплуатационные
аспекты наземных метеорологических
радаров**

Серия М
**Подвижные службы, служба радиоопределения,
любительская служба и относящиеся к ним
спутниковые службы**



Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2017 г.

© ITU 2017

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R М.1849-1*

**Технические и эксплуатационные аспекты
наземных метеорологических радаров**

(2009-2015)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации рассматриваются важные технические и эксплуатационные характеристики метеорологических радаров, описываются соответствующие предоставляемые продукты, выделяются их главные характеристики, обсуждается влияние помех на метеорологические радары и выводится соответствующий критерий защиты от помех. Настоящий текст ограничен наземными метеорологическими радарными и не включает радары для измерения профиля ветра, также используемые в метеорологических целях и рассматриваемые в отдельных Рекомендациях МСЭ-R.

Ключевые слова

Радар, метеорологический, защита

Сокращения/Глоссарий

CASA	Centre for collaborative adaptive sensing of the atmosphere	Центр совместного адаптивного зондирования атмосферы
GC	Ground clutter	Мешающие отражения от наземных предметов
P_d	Probability of detection	Вероятность обнаружения
PRF	Pulse repetition frequency	ЧПИ Частота повторения импульсов
PRT	Pulse repetition time	ВПИ Время повторения импульса
SAR	Synthetic aperture radar	Радар с синтезированной апертурой
VAD	Vertical azimuth display	Отображение вертикального азимута
VCP	Volume coverage pattern	Диаграмма направленности на основе области
WTC	Wind turbine clutter	Мешающие отражения от ветровых турбин

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что в некоторых полосах частот характеристики радаров, относящиеся к антенне, распространению сигнала, обнаружению цели и большой требующейся ширине полосы, являются оптимальными для осуществления своих функций;
- b) что для определения возможности внедрения новых типов систем в полосы частот, в которых работают метеорологические радары необходимы типовые технические и эксплуатационные характеристики метеорологических радаров;
- c) что для анализа совместимости метеорологических радаров и других служб, которым распределена данная полоса частот, необходимы процедуры и методики;

* Настоящая Рекомендация должна быть доведена до сведения Всемирной метеорологической организации (ВМО).

d) что технические и эксплуатационные характеристики метеорологических радаров являются специфическими по сравнению с радарными другими типами и обосновывают наличие отдельной Рекомендации МСЭ-R;

e) что метеорологические радары работают, главным образом, в полосах частот 2700–2900 МГц; 5250–5725 МГц и 9300–9500 МГц;

f) что метеорологические радары являются ключевыми станциями наблюдения, используемыми для метеорологических наблюдений и мониторинга окружающей среды;

g) что метеорологические радары играют важнейшую роль в предоставлении предупреждений о надвигающихся суровых погодных условиях, таких как наводнения, циклоны и ураганы, которые могут создать угрозу для населения и нанести ущерб стратегической экономической инфраструктуре;

h) что требуется рассмотреть применение критериев защиты для учета статистического характера критериев и других элементов методики проведения исследований совместимости (например, сканирование антенной и потери на трассе распространения). Дальнейшее развитие этих соображений в отношении статистического характера может быть отражено в будущих пересмотрах настоящей Рекомендации, в соответствующих случаях,

признавая,

a) что в п. **5.423** Регламента радиосвязи (РР) указано, что в полосе частот 2700–2900 МГц наземным радарам, предназначенным для метеорологических целей, разрешено работать на равной основе со станциями воздушной радионавигационной службы;

b) что в п. **5.452** РР указано, что наземным радарам, используемым для метеорологических целей, разрешено работать на равных основаниях со станциями морской радионавигационной службы в полосе частот 5600–5650 МГц;

c) что в п. **5.475B** РР указано, что в полосе частот 9300–9500 МГц наземные радары, используемые для метеорологических целей, имеют приоритет перед другими видами использования в радиолокационной службе,

отмечая,

a) что Рекомендация МСЭ-R М.1461 также используется в качестве руководящих указаний при анализе совместимости радаров и других служб, которым распределена данная полоса частот;

b) что критерии защиты радаров зависят от конкретных типов мешающих сигналов, таких как описанных в Приложении 1;

рекомендует

1 учитывать технические и эксплуатационные аспекты метеорологических радаров, описанные в Приложении 2, при проведении исследований совместного использования частот;

2 чтобы критерием совокупной защиты наземных метеорологических радаров было отношение I/N , составляющее –10 дБ.

Приложение 1

Технические и эксплуатационные аспекты наземных метеорологических радаров

1 Введение

Наземные метеорологические радары используются в целях оперативной метеорологии и прогнозирования погоды, исследования атмосферы, а также морской и воздушной навигации и

играют важнейшую роль в процессах незамедлительного предупреждения о метеорологической и гидрологической ситуации. Эти радары непрерывно работают в течение суток. Сети метеорологических радаров представляют собой "последнюю линию обороны" в обнаружении метеоусловий, которые могут вызвать гибель людей и утрату имущества при ливневых паводках или сильных штормах.

Теоретические основы работы и продукты, создаваемые метеорологическими радарными, заметно отличаются от других радаров. Эти отличия важно понимать при оценке совместимости метеорологических радаров и других радиослужб, которым распределена данная полоса частот. Воздействие допустимых помех на технические и эксплуатационные характеристики метеорологических радаров проявляется иным образом по сравнению с другими системами радаров.

2 Обзор

Метеорологические радары используются для зондирования состояния атмосферы в целях составления регулярных прогнозов, обнаружения сложных метеоусловий, обнаружения ветров и осадков, оценок количества осадков, обнаружения условий обледенения воздушных судов и избежания сложных метеоусловий при навигации.

Метеорологические радары передают горизонтально поляризованные импульсы, которые обеспечивают измерение горизонтального размера облачности (воды и льда, содержащихся в облачности) и осадков (снега, ледяной крупы, частиц града и дождя).

Поляриметрические радары, называемые также радарными с двойной поляризацией, передают импульсы с горизонтальной и вертикальной поляризациями. По сравнению с неполяриметрическими системами эти радары обеспечивают значительное улучшение оценки дождя, классификации осадков, качества данных и обнаружения опасных метеорологических явлений.

В МСЭ-R метеорологические радары не являются отдельной радиослужбой, а в РР относятся к радиолокационной и/или радионавигационной службе. Определение того, применяется ли радиолокационная и/или радионавигационная служба, зависит от конкретного использования радара. Наземный метеорологический радар, применяемый для исследования атмосферы или прогнозирования погоды, будет эксплуатироваться в рамках радиолокационной службы. Бортовой метеорологический радар, установленный на коммерческом воздушном судне, будет работать в радионавигационной службе. Наземный метеорологический радар может также работать в радионавигационной службе, если, например, он используется для управления воздушным движением, с тем чтобы проложить маршрут воздушного судна в обход плохих метеоусловий. В результате, метеорологические радары могут работать в различных полосах частот, распределенных радиолокационной службе и радионавигационной службе, до тех пор пока использование согласуется с определением радиослужбы. В РР в Таблице распределения частот содержатся три конкретные ссылки на метеорологические радары. Три ссылки приведены в примечаниях, связанных с полосами частот 2700–2900 МГц (п. 5.423 РР), 5600–5650 МГц (п. 5.452 РР) и 9300–9500 МГц (п. 5.475 РР).

2.1 Уравнение радара для единичной цели¹

Метеорологические радары не отслеживают точечные цели. Однако уравнение радара может быть адаптировано для использования в случае метеорологических радаров. Величина мощности сигнала, отражаемого после обзора области метеорологическим радаром, определяет, будет ли обнаружено погодное явление. Уравнение дальности действия радара выражает связь между мощностью сигнала, отраженного от цели, характеристиками конкретной цели и осуществляющим передачу радаром.

Для типовой точечной цели в уравнении радара будут иметь место следующие переменные:

P_R : мощность, принимаемая радаром;

P_T : пиковая мощность, передаваемая радаром;

¹ С информацией и выводом уравнений, приведенных в этих разделах, можно ознакомиться в YAU, M. K. and ROGERS, R. R. [1 January 1989] *A Short Course in Cloud Physics*, Chapter 11.

- A_T : область цели;
 R : расстояние от радара до цели;
 G : усиление передающей антенны.

Сочетание этих переменных создает общее уравнение радара для точечной цели:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot r^4} \cdot A_T.$$

Уравнение выше предполагает наличие изотропного излучения и изотропного рассеяния. Однако большинство целей не рассеивают изотропно падающее излучение и, следовательно, необходимо знать эффективную площадь отражения, σ , от цели:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \sigma.$$

2.2 Уравнение метеорологического радара

После получения уравнения для односточечной цели следующий шаг состоит в коррекции приведенного выше уравнения для учета целей метеорологических радаров. Капли дождя, снежинки и капли, входящие в состав облаков, – это примеры классов целей, важных для радаров и известных как распределенные цели.

Падающий импульс радара создает передаваемую область разрешения метеорологического радара путем одновременного облучения объема, который содержит метеорологические частицы. Средняя мощность, принятая от метеорологических целей, выражается уравнением ниже, где $\Sigma\sigma$ – сумма эффективных площадей отражения от всех частиц в пределах области разрешения.

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \left(\sum_n \sigma \right).$$

Поскольку область луча радара продолжает расширяться с расстоянием, этот луч охватывает все больше и больше целей. Определенная область луча радара эквивалентна:

$$V = \pi \left(\frac{r \cdot \theta}{2} \right)^2 \cdot \frac{h}{2},$$

где $h = c\tau$ – длительность импульса и θ ширина луча антенны. После объединения общего уравнение радара и выражения для области луча радара формула для средней отраженной мощности принимает вид:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \pi \left(\frac{r \cdot \theta}{2} \right)^2 \cdot \frac{h}{2} \cdot \eta,$$

где η обозначает отражательную способность радара на единичную область. Однако уравнение выше предполагает равномерность усиления антенны в пределах 3 дБ, что неверно. Если предположить, что луч имеет гауссовскую диаграмму, то эффективную область более целесообразно определять по диаграмме луча радара чем в пределах 3 дБ. При использовании гауссовской диаграммы луча формула для средней отраженной мощности принимает вид:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \theta^2 \cdot h}{1024 \pi^2 \cdot \ln(2)} \cdot \frac{\eta}{r^2}.$$

Учитывая, что единичная сферическая частица мала по сравнению с длиной волны радара, эффективная площадь отражения может быть представлена формулой $\sigma = 64 \pi^5 / \lambda^4 |K|^2 r_o^2$, где K –

комплексный коэффициент отражения и r_o – радиус сферы. Метеорологические частицы, имеющие достаточно малый размер для применения закона релейского рассеяния, известны под названием релейских рассеивающих элементов. Капли дождя и снежинки считаются релейскими рассеивающими элементами, измеряемыми с точным приближением, если длина волны радара составляет от 5 см до 10 см (общепринятые значения рабочих длин волн для метеорологических радаров). В случае длины волны, равной 3 см, приближенное отражение все еще может быть полезным, но является менее точным.

Для группы сферических капель, которые являются малыми по сравнению с длиной волны радара, формула для средней отраженной мощности изменяется на:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} 64 \frac{\pi^5}{\lambda^4} (|K|)^2 \cdot \left(\sum_n r_o^6 \right),$$

где Σ – сумма сферических радиусов для каждого метеорологического рассеивающего элемента. Если предположить $(D/2)^6$ равным r_o^6 , то средняя отраженная мощность может быть выражена исходя из диаметров капель сферических рассеивающих элементов:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \frac{\pi^5}{\lambda^2} K^2 \cdot \left(\sum_n D^6 \right).$$

Следовательно, для сферических рассеивающих элементов, которые значительно меньше длины волны радара, средняя мощность, принимаемая метеорологическим радаром, определяется характеристиками радара – дальностью действия, коэффициентом отражения рассеивающего элемента ($|K|^2$) и диаметром рассеивающего элемента (D^6).

Наконец, параметр отражательной способности Z может быть введен как $Z = \Sigma_v D^6 = \int N(D)D^6 dD$, где Σ_v – сумма по единичной области и $N(D)D^6$ – количество рассеивающих элементов на единицу области. Окончательная форма уравнения радара для метеорологических радаров, включая ранее сделанные изменения для представления гауссовской диаграммы луча, имеет вид:

$$P_R = \frac{\pi^3 c}{1024 \cdot \ln(2)} \left(\frac{P_T \cdot G^2 \theta^2 \tau}{\lambda^2} \right) \cdot \left[(|K|^2) \cdot \frac{Z}{r^2} \right].$$

3 Общие принципы действия метеорологических радаров

Метеорологические радары, в основном, выполняют измерения двух типов:

- измерения количества осадков;
- измерения скорости ветра.

Эти измерения выполняются по сеткам элементов изображения, которые позволяют представить картографию вышеупомянутых метеорологических событий.

3.1 Пример работы метеорологического радара в полосе частот 2,7–2,9 ГГц

Радар 1 в Приложении 2 (таблица 1) – это система, представляющая метеорологические радары, работающие на частотах около 2,8 ГГц. Кривая 0 dBz для этого радара пересекает уровень шума приемника (–113 дБм) на расстоянии 200 км.

3.1.1 Оценка количества осадков

В типовых радарах, работающих около 2,8 ГГц, для оценки количества осадков используются различные формулы, связывающие отражательную способность-дальность (Z-R) и отражательную способность-интенсивность дождя (Z-S). Влияние помех на рабочую дальность может изменяться в зависимости от конкретного алгоритма.

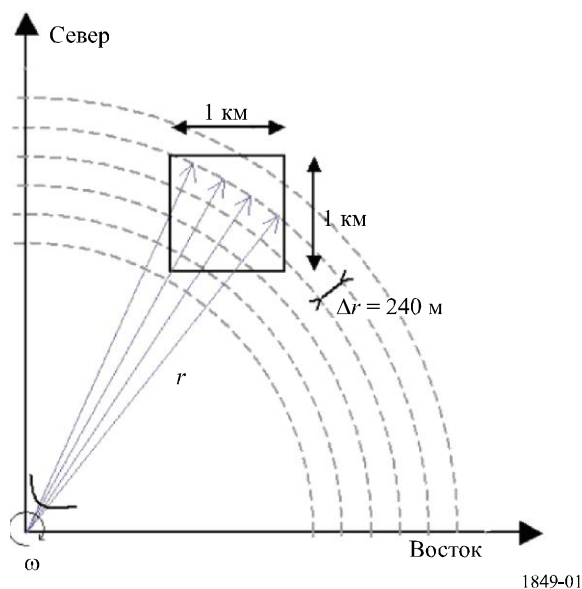
Пример работы метеорологического радара в полосе частот 5,6–5,65 ГГц

Обычно область охвата радара простирается на расстояние свыше 200 км, представляя разрешающую способность $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}$. В некоторых случаях более крупная сетка представляет разрешение по элементам изображения свыше $250 \text{ м} \times 250 \text{ м}$.

Для каждого элемента изображения измерения радара рассчитываются по всем откликам импульсов, соответствующим этому элементу изображения, т. е. для каждой пары импульсов и каждого строба дальности, а затем проектируются непосредственно на декартовую сетку (см. рисунок 1).

РИСУНОК 1

Проекция в декартовой системе пары импульсов и строба дальности

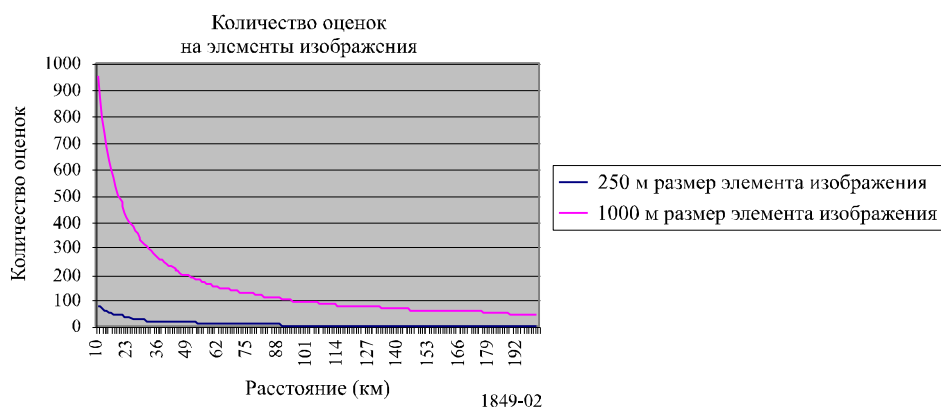


Поэтому количество оценок на элемент изображения изменяется в зависимости от расстояния. Эти количества связаны со средней ЧПИ (частота повторения импульса) и скоростью вращения антенны. В среднем, при типовой скорости вращения антенны 6 градусов в секунду средняя ЧПИ составляет 333 Гц, а разнос стробов – 240 м, это обеспечивает на расстояниях 10 и 100 км, соответственно, 1000 и 100 оценок для элемента изображения 1 км^2 .

На рисунке 2 представлен упрощенный расчет такого количества оценок в зависимости от расстояния для элементов изображения $250 \text{ м} \times 250 \text{ м}$ и $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}$, который подтверждает, что измерения радара являются более прецизионными на больших расстояниях, а также при меньших элементах изображения.

РИСУНОК 2

Оценка на элемент изображения в зависимости от расстояния



3.1.2 Принцип измерения количества осадков

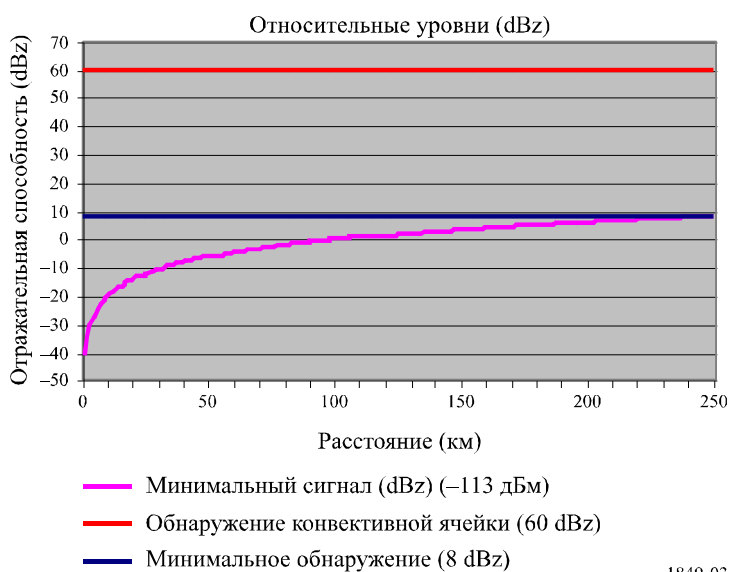
Метеорологические радары осуществляют измерения количества осадков, выражаемые в отражательной способности (dBz). Принципы этих измерений приведены ниже на основе примера конкретной конструкции радара. Радары других конструкций будут работать аналогичным образом, однако уровни сигнала будут различаться в зависимости от конструкции.

Радары, развернутые в сети одной из администраций, калибруются с целью обеспечения совпадения с уровнем шума приемника (т. е. около -113 дБм) при уровне отражательной способности 0 dBz на расстоянии 100 км. Кроме того, минимальный уровень обнаружения дождевой ячейки фиксируется на 8 dBz.

На рисунке 3 представлены относительные уровни (dBz), относящиеся к минимальному обнаружению (8 dBz), значимой конвективной ячейке (60 dBz), и уровень, эквивалентный уровню шума приемника.

РИСУНОК 3

Относительные уровни минимального обнаружения



Соотношение между мощностью и отражательной способностью задается следующей формулой:

$$P = \frac{Cz}{r^2},$$

где

- P : мощность (мВт);
- C : постоянная (около 10^{-7} или -70 дБ);
- z : отражательная способность;
- r : расстояние (км),

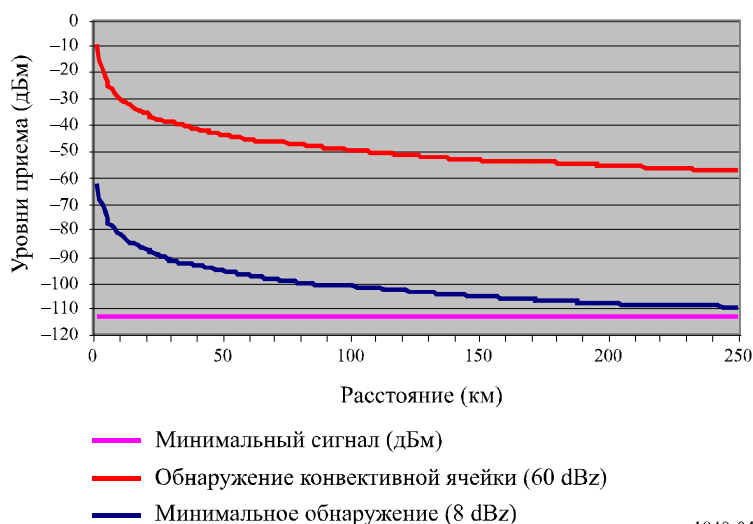
которая задает (дБ) следующую формулу:

$$\text{дБм} = \text{дВз} + C - 20 \log I.$$

Исходя из этого на рисунке 4 представлены (дБм) уровни принимаемых сигналов, соответствующие уровням отражательной способности на рисунке 3.

РИСУНОК 4

Относительные уровни (дБм), соответствующие уровням отражательной способности и расстоянию



Наконец, данные отражательной способности преобразуются в уровни интенсивности дождя с использованием следующей формулы (для обычного дождя):

$$R_{(\text{мм/ч})} = \left(\frac{z}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1,6} \right)}.$$

Следует отметить, что эта формула преобразования действительна для типовой интенсивности дождя ($a = 1,6$), однако для различных типов осадков (тропический дождь, снег, град и пр.) определены другие формулы, в которых значение a соответствующим образом скорректировано.

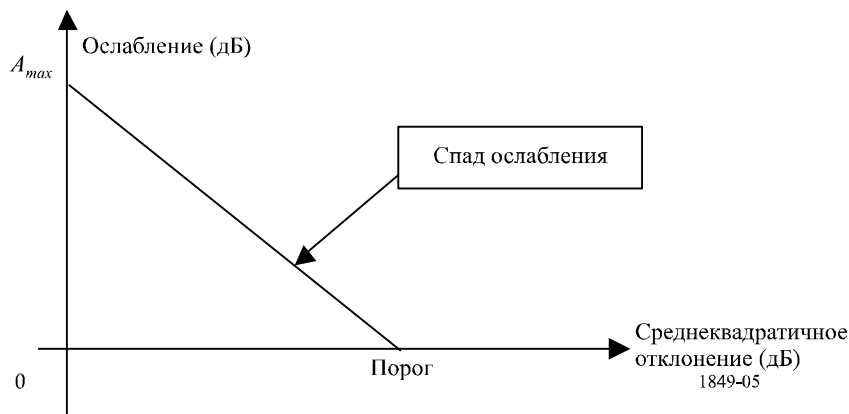
В отношении данного элемента изображения сетки радара показатели отражательной способности для каждой оценки (соответствующей отклику импульса и строку) учитываются при определении следующих элементов:

- среднее значение (дВз) по всем оценкам;
- стандартное отклонение.

Отклики от дождевых ячеек характеризуются определенной изменчивостью, которая используется для того, чтобы отличить их от помех, применяя данные стандартного отклонения.

В случае радаров, развернутых в одной из администраций, значения отражательной способности скорректированы, таким образом, с использованием следующего алгоритма:

РИСУНОК 5
Спад ослабления



Если $(\sigma \leq \text{Порог}) \Rightarrow Z_{aeef} = Z_{seef} - (\text{Порог} - \sigma) * \text{Ослабление}$

В ином случае $\Rightarrow Z_{aeef} = Z_{seef}$

σ : стандартное отклонение (дБ);

Z_{seef} : значение отражательной способности перед коррекцией;

Z_{aeef} : значение отражательной способности после коррекции.

Представленный на рисунке 5 спад ослабления задается выражением:

$$\text{Ослабление} = \frac{A_{max}}{\text{Порог}}$$

В случае эксплуатационных применений определяют значения порога и спада для обеспечения того, чтобы на метеорологических сигналах почти не сказывалось ослабление (в действительности менее 5%). В настоящее время на основе экспериментальных данных для спада задают значение 20 дБ, а для порога среднеквадратичного отклонения – в пределах диапазона 2,3–2,7 дБ. Наконец, следует отметить, что если рассчитанное ослабление превышает 25 дБ, то тогда результирующая отражательная способность устанавливается равной 0.

3.2 Принцип измерения скорости ветра

В отличие от отражательной способности (dBz), которая является мерой интенсивности сигнала, измерения скорости ветра основаны на доплеровском обнаружении, которое осуществляется по фазе и фазовой скорости сигнала и может иметь место как только уровень принимаемого сигнала превышает уровень шума (т. е. –113 дБм).

С тем чтобы не допустить обнаружения фазы, которое может быть вызвано изменением шума или неметеорологическими источниками, для некоторых радаров рассматривается порог 3 дБ относительно уровня шума (т. е. –110 дБм), при этом некоторые другие метеорологические радары могут обрабатывать сигналы при уровнях S/N вплоть до –3 дБ – –6 дБ.

Следует также отметить, что такие измерения выполняются как в условиях дождя, так и в условиях ясного неба. В условиях дождя уровни принимаемых сигналов аналогичны уровням, приведенным на рисунке 2. Нетрудно понять, что в условиях же ясного неба соответствующие уровни отражательной способности являются очень низкими, что не позволит измерять скорость ветра на расстояниях больших приблизительно 30–50 км.

Для каждой оценки (соответствующей отклику импульса и стробу) показатели фазы и отражательной способности являются вектором, а для данного элемента изображения сетки радара результирующий вектор ветра получают путем объединения всех единичных векторов.

Это означает, что фаза каждой оценки компенсируется модулем соответствующей отражательной способности и что единичная оценка, представляющая высокую отражательную способность (т. е. модуль вектора), может обеспечить измерение на элементе изображения.

Измерения скорости ветра используются для того, чтобы получить два различных набора продуктов, характеризующих ветер:

- радиальную скорость по сетке радара, аналогично отображению осадков;
- отображение вертикального азимута (VAD), для представления которого объединяют все данные (для всех высот) в радиусе нескольких километров или нескольких десятков километров с целью расчета профиля ветра в вертикальном направлении от радара.

3.3 Пример работы метеорологического радара в участках диапазона частот 8,5–10,5 ГГц

Метеорологические радары, которые работают в участках диапазона частот 8,5–10,5 ГГц (т. е. на волне длиной от 2,5 см до 4 см) могут обнаруживать более мелкие частицы. Эти метеорологические радары обычно используются для изучения образования облачности, поскольку могут обнаруживать весьма малые частицы воды и слабые осадки. Они имеют типовую дальность действия 30 км в отношении метеорологических целей 10 dBz и работают на относительно небольших уровнях мощности (например, 12 кВт).

Сети радаров, работающих в участках диапазона частот 8,5–10,5 ГГц, изучаются также как средство, используемое в дополнение к существующим системам метеорологических радаров и обнаруживающее предвестники неблагоприятных погодных явлений.

"Недостатком использования радаров, работающих в участках диапазона частот 8,5–10,5 ГГц, для обнаружения погодных явлений является определенное ослабление сигнала, которое может иметь место в дожде. Ослабление особенно сильно проявляется в случае дождя средней и высокой интенсивности, когда фактор отражательной способности превышает 40 dBz. Пока радар может принимать сигнал, обнаруживаемый после ослабления, измерения скорости могут осуществляться, а оценки коэффициента ослабления могут применяться для коррекции значений отражательной способности. Двойные поляриметрические измерения могут быть особенно эффективными для коррекции ослабления (например, см. Lim and Chandrasekar, 2005)."

Как только уровень сигнала, подвергнутого ослаблению, падает ниже уровня чувствительности радара, измерения скорости становятся невозможными. Если измерения скорости не осуществляются, то способность радара обнаруживать связанные с погодой опасности нарушается.

Необходимо будет провести дополнительные аналитические исследования и полевые измерения с целью количественной оценки воздействия локализованных помех на эти системы и определения величины уровней I/N , требуемых для защиты этих систем.

4 Сравнение метеорологических радаров

Большинство радаров используется для обнаружения и отслеживания точечных целей в пределах дальности обнаружения радара. В отличие от них метеорологические радары не предназначены для обнаружения отдельных целей. Они осуществляют измерение атмосферы в целом вокруг радара. Отражение от каждого элемента разрешения по дальности вдоль каждого радиуса обрабатывается для обеспечения полного измерения атмосферы, общеизвестного как обзор области. По этой причине термин "вероятность обнаружения" (pd) обычно не используется для получения характеристик метеорологических радаров. В действительности, отсутствие отражения сигнала также является информацией для пользователя данных, поскольку указывает на атмосферные условия ясного неба.

Термин "обзор области" указывает на то, что радар осуществляет обзор области атмосферы с целью создания полного представления об атмосферных условиях. Тогда как радары многих типов отслеживают отдельные цели для получения информации (о скорости, эффективной площади отражения и др.) из характеристик отраженных импульсов; именно характеристики отраженных

импульсов метеорологического радара предоставляют почти всю информацию. Метеорологические радары принимают и обрабатывают отраженные сигналы почти для всех элементов разрешения по дальности вдоль того или иного радиуса, если только воздух не является абсолютно чистым.

Критерии эксплуатационной оценки типовой системы метеорологических радаров включают:

- a) технические аспекты,
- b) степень эффективности предупреждения, и
- c) качество и надежность получаемых продуктов.

Технические аспекты включают такие факторы, как охват конкретных высот, пространственно-временное разрешение, чувствительность, доплеровский охват и готовность радара. Степень эффективности предупреждения может рассматриваться как объективное измерение, однако в действительности она напрямую связана с возможностью обнаружения. Качество и надежность ключевых получаемых продуктов – отражательной способности, средней радиальной скорости и ширины спектра – оказывают воздействие на способность синоптика обеспечивать предупреждения об опасной погоде и своевременные и точные прогнозы.

4.1 Особенности, касающиеся критериев защиты

В случае радаров, отслеживающих отдельные цели, $I/N = -6$ дБ, в результате чего снижение дальности обнаружения на 6% предполагается допустимым. В действительности, сигнал, принимаемый этими радаром, пропорционален $1/r^4$ (r – расстояние), таким образом, достигаемая дальность в свободном пространстве пропорциональна корню четвертой степени из результирующего отношения сигнал/шум. Отношение $I/N = -6$ дБ соответствует увеличению на 1 дБ мощности шума и является коэффициентом 1,26 при мощности. Поэтому результирующая дальность в свободном пространстве уменьшается на коэффициент $1/(1,26^{1/4})$ или 1/1,06, т. е. снижение возможности по дальности составляет около 6%.

В случае метеорологических радаров ситуация является иной в отношении протяженных целей, поскольку обычно осадки часто заполняют весь узкий луч радара. При использовании уравнения радара, выведенного в п. 2.2, наличие протяженных целей приводит к тому, что принимаемый сигнал будет пропорционален $1/r^2$, а дальность в свободном пространстве будет пропорциональна квадратному корню из результирующего отношения сигнал/шум. В таких случаях аналогичное допустимое снижение дальности на 6% в отношении метеорологических радаров требует использования коэффициента шума при мощности, равного 1,12 (вместо 1,26 для радаров других типов), что соответствует увеличению уровня шума на 0,5 дБ и приводит к отношению $I/N = -10$ дБ.

Подробный вывод и обоснование этих критериев приведены в п. 8.

4.2 Особенности в отношении схем излучения и стратегий сканирования

Для обеспечения обработки данных обзора области (обычно в пределах 15 мин.) в метеорологических радарх используются разнообразные схемы излучения при разных углах места с использованием наборов различных значений длительности импульсов, ЧПИ и скоростей вращения – так называемых "стратегий сканирования". К сожалению, типовых схем не существует, поскольку они изменяются в зависимости от ряда факторов, таких как возможности радара и среда использования радара в отношении требуемых метеорологических продуктов.

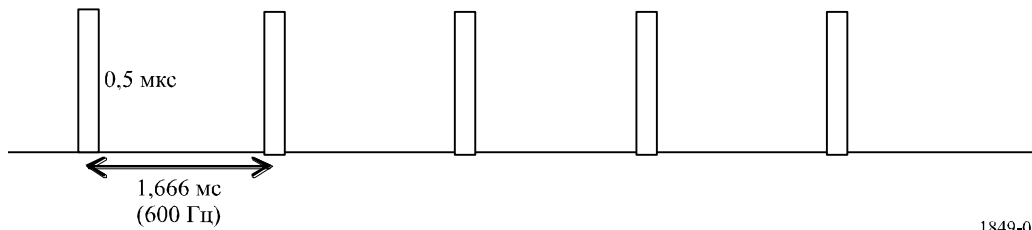
Это было подтверждено после исследования метеорологических радаров диапазона С в Европе, которое показало наличие широких диапазонов параметров различных схем излучения:

- Диапазон рабочих углов места – от 0° до 90° .
- Диапазон значений длительности импульса – от 0,5 до 2,5 мкс (для действующих радаров). Существующие радары могут иметь длительность импульса до 3,3 мкс в случае несжатых импульсов, тогда как в некоторых радарх используется сжатие импульсов, при этом длительность импульсов составляет около 40 мкс и ожидается, что в будущем она составит 100 мкс.
- Диапазон частоты повторения импульсов (ЧПИ) – от 250 до 1200 Гц (для действующих радаров). Существующие радары могут иметь ЧПИ до 2400 Гц.
- Диапазон скоростей вращения – от 1 до 6 об/мин.

- Использование в данном радаре различных схем излучения, совмещающих различные значения длительности импульсов и ЧПИ, и, в частности, использование фиксированной ЧПИ, модуляции ЧПИ или ЧПИ с перемежением (т. е. различная ЧПИ в рамках одной схемы).

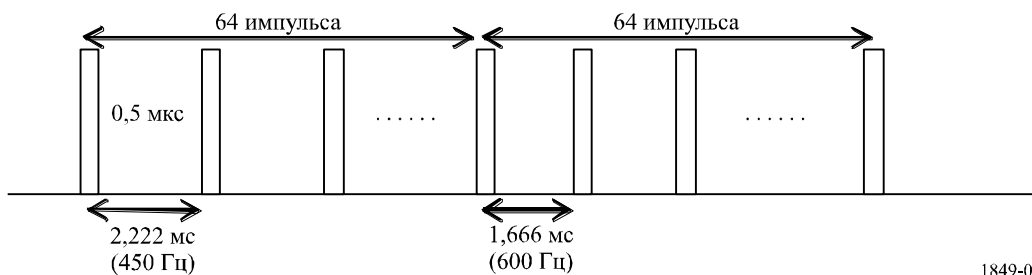
Некоторые примеры таких различных схем излучения приведены ниже:

РИСУНОК 6

Фиксированная ЧПИ

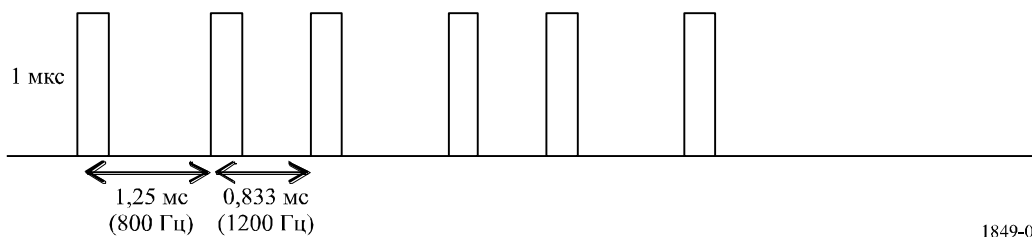
1849-06

РИСУНОК 7

Вобуляция ЧПИ

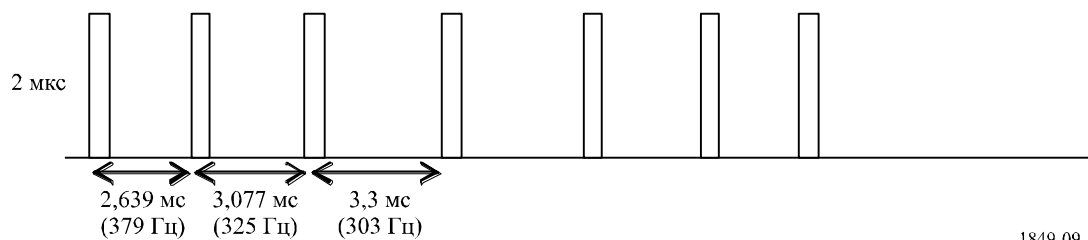
1849-07

РИСУНОК 8

ЧПИ с двойным перемежением (двойная ЧПИ)

1849-08

РИСУНОК 9

ЧПИ с тройным перемежением (тройная ЧПИ)

1849-09

Эти различные схемы излучения используются в ряде радаров при реализации их стратегии сканирования, в рамках которой для передачи применяется одна схема излучения при различных углах места и скоростях вращения.

Следует подчеркнуть, что в зависимости от радара связанные с этими примерными схемами значения ЧПИ и длительности импульсов изменяются в рамках диапазонов, определенных выше. Кроме того, для данной схемы значения длительности импульсов могут изменяться в зависимости от конкретного импульса.

Ниже приведен пример такой стратегии сканирования:

РИСУНОК 10

Типовая стратегия сканирования (общее время около 15 мин.):

- 1 оборот при угле места $0,8^\circ$ при конфигурации 2 (2 об./мин.) (30 с)
- 1 оборот при угле места 10° для калибровки шума (3 об./мин.) (20 с)
- 12 оборотов при углах места $37; 29; 23; 21; 19; 17; 15; 13; 11; 9,5; 8,8$ и $6,5^\circ$ при конфигурации 3 (3,167 об./мин.) (19 с/об.) (общее время: 3 мин. 47 с)
- 1 оборот при угле места $0,8^\circ$ при конфигурации 2 (2 об./мин.) (0,5 мин.)
- 2 оборота при углах места $6,5^\circ$ и $5,5^\circ$ при конфигурации 3 (3,167 об./мин.) (19 с/об.) (общее время: 38 с)
- 5 оборотов при углах места $4,5^\circ; 3,5^\circ; 2,5^\circ; 1,5^\circ$ и $0,5^\circ$ при конфигурации 3 (3 об./мин.) (20 с/об.) (общее время: 40 с)
- 4 оборота при углах места $0,5^\circ; 1,5^\circ; 2,5^\circ$ и $3,5^\circ$ при конфигурации 1 (2 об./мин.) (2 мин.)
- 1 оборот при угле места $0,8^\circ$ при конфигурации 2 (2 об./мин.) (30 с)
- 2 оборота при углах места $3,5^\circ$ и $4,5^\circ$ при конфигурации 1 (2 об./мин.) (60 с)
- 1 оборот при угле места $10,5^\circ$ при конфигурации 3 (3 об./мин.) (20 с)
- 1 оборот при угле места $1,3^\circ$ при конфигурации 2 (3 об./мин.) (20 с)
- 1 оборот при угле места $0,8^\circ$ при конфигурации 2 (2 об./мин.) (30 с)
- 1 оборот при угле места 10° для калибровки шума (3 об./мин.) (20 с)

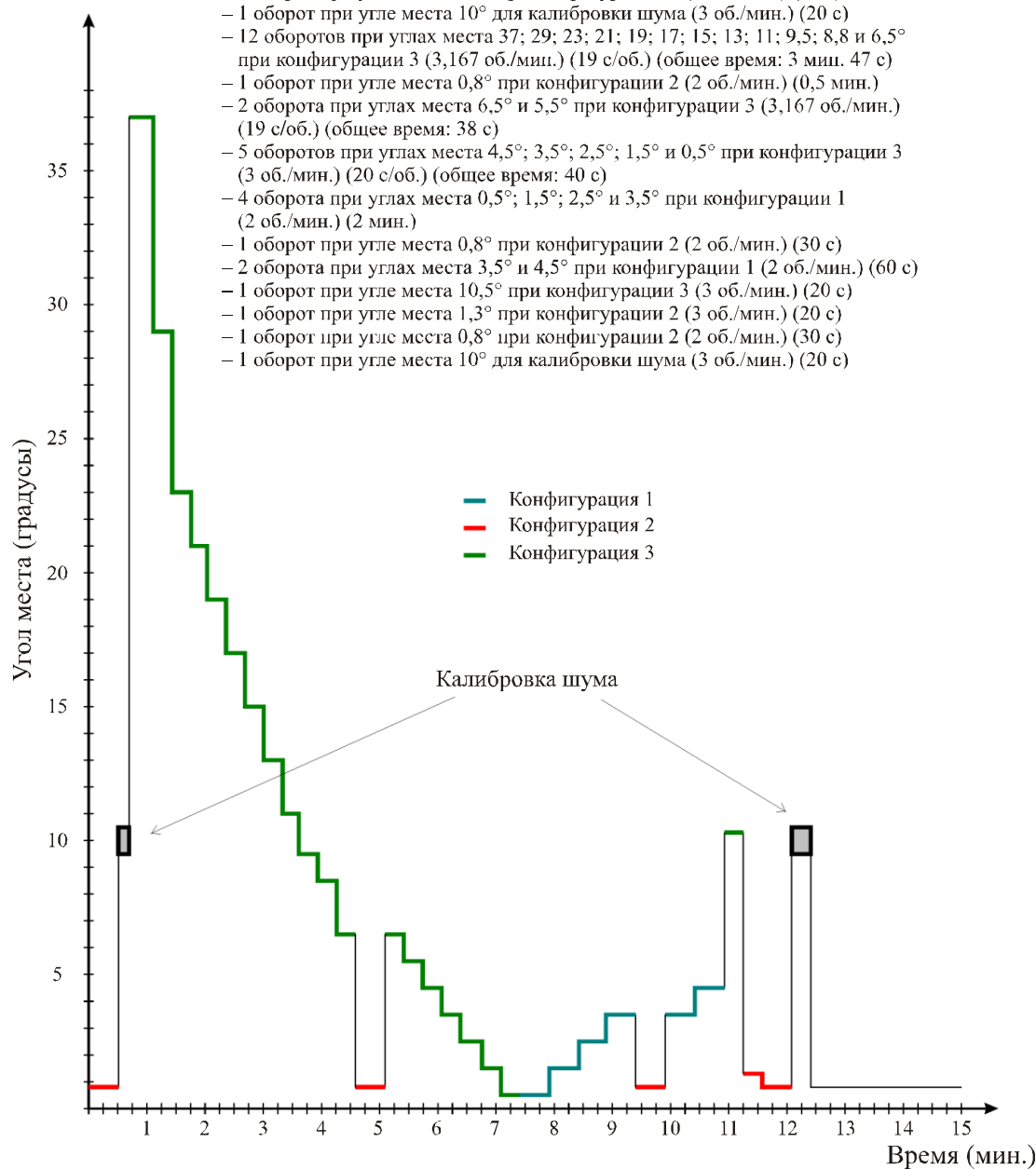
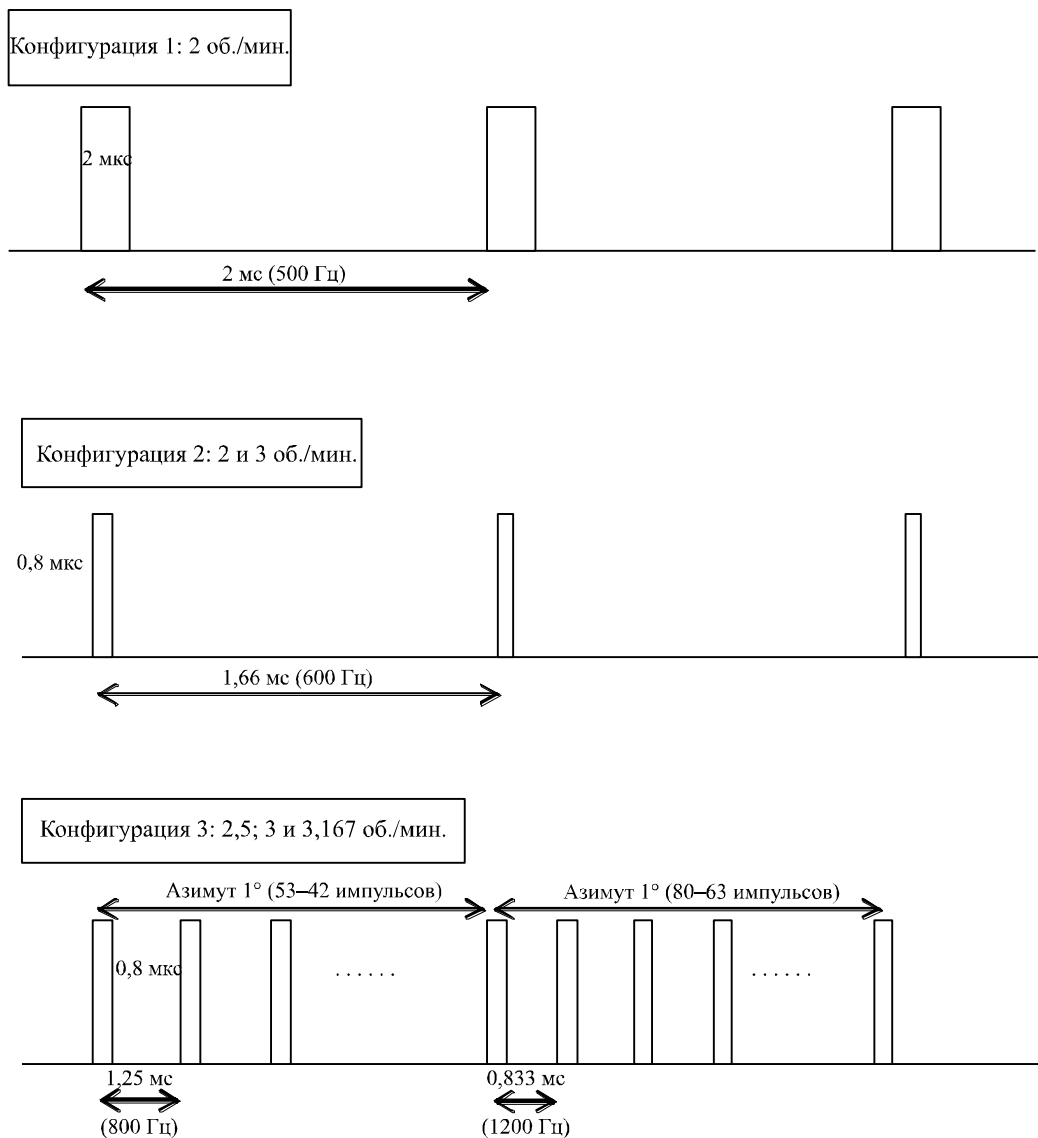


РИСУНОК 11



1849-11

4.3 Особенности, касающиеся калибровки шума

Учитывая, что отраженные сигналы, которые принимают метеорологические радары, являются слабыми, из сигнала должен быть выделен уровень шума с целью обеспечения наиболее точных измерений и получения соответствующих метеорологических продуктов.

С учетом уровня шума N и уровня полезного сигнала S (т. е. отражение метеорологического сигнала) метеорологические радары осуществляют следующий процесс:

- 1 Для каждого строба радар измеряет отраженный сигнал, соответствующий, таким образом, полезному сигналу (S) и шуму (N), т. е. $N + S$.
- 2 Для получения S радар выделяет из $N + S$ уровень шума N .
- 3 Затем, исходя из S (дБм), радар может определить все метеорологические продукты, такие как количество осадков (получаемое на основе коэффициента отражения (dBz)) или скорость ветра, путем доплеровского анализа.

В целях получения более точных метеорологических продуктов сигнал S должен быть как можно более достоверным, а это означает, что калибровка шума радара является особо важным вопросом.

Поэтому данная калибровка шума, называемая также "нуль–контроль", осуществляется на регулярной основе в ходе обычных излучений радара (путем оценки) или в конкретные периоды времени (см. приведенный выше пример стратегии сканирования), в ходе которых проводится измерение шума.

Во многих случаях это измерение шума выполняется без какого-либо излучения радара (это, в частности, могло бы повлиять на проектирование определенных радиосистем, целью которых является обнаружение сигналов радара для ослабления помех).

Во всех случаях помехи, принимаемые в ходе калибровки с целью контроля шума, будут искажать любые собираемые данные до тех пор, пока не будет выполнена очередная калибровка при отсутствии помех.

5 Эксплуатационные режимы метеорологического радара

Типовой доплеровский метеорологический радар работает в двух выбираемых пользователем режимах – режиме ясного неба и режиме осадков. Режим ясного неба должен быть выбран пользователем вручную. Режим осадков может быть выбран вручную в любое время в ходе работы или может использоваться автоматически во всех случаях, когда метеорологический радар обнаруживает осадки (исходя из предварительно определенных значений и охвата зоны отражательной способности). Как правило, в метеорологических радарх используются преимущества обоих режимов.

5.1 Режим ясного неба

Режим ясного неба обеспечивает метеорологическим радарам способность обнаруживать ранние признаки возникновения осадков.

Существуют определенные небольшие изменения скорости и плотности воздуха, которые позволяют обнаруживать возможные осадки. Для использования возможности обеспечения высокой чувствительности в радаре применяется малая скорость сканирования в сочетании с низкой частотой повторения импульсов (ЧПИ). Эта высокая чувствительность является идеальной для обнаружения едва различимых изменений атмосферных условий на больших расстояниях. Режим ясного неба особенно полезен при слабой конвективной активности или ее отсутствии в пределах дальности передачи радара и идеально подходит для обнаружения признаков возникновения гроз или других типов сложных метеоусловий.

Высокая чувствительность метеорологического радара обуславливается диаграммой обзора области в режиме ясного неба. После выбора диаграммы в режиме ясного неба антенна радара может быть длительное время направлена на заданную область пространства и принимать многочисленные отраженные сигналы, при этом позволяя работать при более низком отношении S/N . Использование импульса большой длительности и низкой ЧПИ обеспечивает мощность эхо-сигнала, приблизительно равную 8 дБ, при заданной величине отражательной способности в dBz.

5.2 Режим осадков

Режим осадков имеет совершенно другую цель, чем режим ясного неба. Скорость сканирования в режиме осадков является функцией угла места. Эта зависимость позволяет использовать наибольшее возможное количество углов места при выборочном наблюдении в пределах общего обзора радара. В режиме осадков используется преимущество нескольких диаграмм направленности на основе объема (VCP) для реализации различных типов стратегий сканирования (см. пример в п. 4.2) при выборочном наблюдении с различными углами места. Погодные явления, обычно контролируемые в режиме осадков, связывают с образованием осадков, которые влекут за собой конвективные штормы (ливни, град, сильные грозы, смерчи и др.), и широкомасштабных синоптических систем.

6 Продукты данных метеорологических радаров

Для обеспечения лучшего понимания работы метеорологических радаров в целях анализа помех и управления использованием спектра следует рассмотреть две категории продуктов данных метеорологических радаров: продукты базовых данных и продукты получаемых данных.

6.1 Продукты базовых данных обычных метеорологических радаров

Допплеровский метеорологический радар создает на основе отраженных сигналов продукты базовых данных трех категорий: базовая отражательная способность, средняя радиальная скорость и ширина спектра. Все продукты более высокого уровня создаются на основе этих трех базовых продуктов. Точность базовых продуктов часто определяют как главное требование в отношении качества при проектировании радара. Без требуемой точности на этом низком уровне не может быть достигнута точность получаемых продуктов более высокого уровня. В предыдущем исследовании МСЭ-R, касающемся метеорологических радаров, воздействие допустимых помех на данные базовых продуктов использовалось в качестве показателя критериев защиты. Например, в исследовании использовался типовой радар, который обеспечивает точность базовых данных, представленную в таблице 1, для определения значений отношения помеха/шум, при котором радар больше не соответствует требованиям, определенным при проектировании. В разделе 8.3 и Приложении 1 Отчета МСЭ-R М.2136 подробно рассматривается определение критериев защиты для метеорологических радаров.

ТАБЛИЦА 1

Требования к точности базовых данных типового метеорологического радара (2700–2900 МГц)

Продукт базовых данных	Требование к точности при проектировании
Базовая отражательная способность	< 1 дБ
Средняя радиальная скорость	< 1 м/с
Ширина спектра	>1 000 Гц

6.1.1 Базовая отражательная способность

Базовая отражательная способность используется во многих применениях метеорологических радаров, наиболее важным из которых является оценка интенсивности дождя. Базовая отражательная способность – это величина отраженных импульсов, рассчитываемая на основе линейного усреднения мощности отраженного сигнала. Любая помеха радару увеличивает мощность отраженного импульса и искажает значения отражательной способности. Измерения отражательной способности могут быть поставлены под сомнение, если искажение превышает требования к точности базовых данных.

6.1.2 Средняя радиальная скорость

Средняя радиальная скорость известна также как средняя доплеровская скорость и представляет собой взвешенную по отражательной способности среднюю скорость целей в заданной контрольной области. Средняя радиальная скорость относится к статичному моменту спектральной плотности; радиальная скорость – к базовым данным. Она обычно определяется на основе большого количества последовательных импульсов и рассчитывается из аргумента комплексной вариации одиночного сдвига фазы. Аргумент комплексной ковариации обеспечивает оценку для углового смещения вектора доплеровского сигнала от одного импульса радара к другому. Угловая скорость доплеровского вектора равна смещению, поделенному на интервал времени между импульсами. Допплеровский спектр показывает отражательную способность и взвешенное распределение скоростей в радаре в пределах области его работы. Сигнал помех, появляющийся как широкополосный шум, имеет равномерную вероятность по комплексной плоскости и, следовательно, не вносит ни систематического вращения доплеровского вектора, ни искажения оценки. Однако беспорядочность сложных сигналов плюс помехи увеличивают вариацию оценки доплеровского сигнала.

6.1.3 Ширина спектра

При проектировании метеорологического радара ширина спектра рассчитывается исходя из корреляции одиночного сдвига фазы в предположении гауссовой спектральной плотности. Она является показателем разброса скоростей в контрольной области работы радара и представляет собой

стандартное отклонение спектра скорости. Ширина спектра зависит от отражательной способности и градиентов скорости по всей длительности импульса, а также от турбулентности в пределах длительности импульса [Doviak and Zrnic, 1984]². При расчетах ширины спектра усреднение выборок не применяется. Однако используется суммирование действительных и мнимых частей последовательностей выборок, т. е. выборки, произведенные по радиусу.

6.2 Продукты метеорологических радаров с двойной поляризацией

6.2.1 Дифференциальная отражательная способность

Дифференциальная отражательная способность является продуктом, связанным с поляриметрическими метеорологическими радаром, и представляет собой отношение мощностей отраженных сигналов в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Помимо прочего, это приемлемый показатель формы капель. В свою очередь, форма капель представляет собой приемлемую оценку среднего размера капель.

6.2.2 Коэффициент корреляции

Коэффициент корреляции – это продукт поляриметрического метеорологического радара и представляет собой статистическую корреляцию между мощностями отраженных сигналов в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Коэффициент корреляции описывает сходные элементы в характеристиках обратного рассеяния горизонтально и вертикально поляризованных эхо-сигналов. Это приемлемый показатель для районов, где сочетаются различные типы осадков, такие как дождь и снег.

6.2.3 Коэффициент линейной деполяризации

Еще одним продуктом поляриметрического радара является коэффициент линейной деполяризации, который представляет собой коэффициент мощности отраженного сигнала в вертикальной плоскости от горизонтального импульса или мощности отраженного сигнала в горизонтальной плоскости от вертикального импульса. Это также приемлемый показатель для районов, где сочетаются различные типы осадков.

6.2.4 Специфическая дифференциальная фаза

Специфическая дифференциальная фаза – это тоже продукт поляриметрического метеорологического радара. Она представляет собой сравнение разницы отраженных фаз между горизонтальным и вертикальным импульсами. Такая разница фаз вызвана различием в количестве периодов волн (или длин волн) по всей трассе распространения для волн с горизонтальной и вертикальной поляризациями. Ее не следует путать с доплеровским сдвигом частоты, который вызывается движением облаков и частиц осадков. В отличие от дифференциальной отражательной способности, коэффициента корреляции и коэффициента линейной деполяризации, которые все зависят от отраженной мощности, специфическая дифференциальная фаза представляет собой "эффект распространения радиоволн". Это также очень хорошая оценка интенсивности дождя.

6.3 Продукты производных данных

С использованием продуктов базовых данных процессор производит для пользователя радара продукты более высокого уровня на основе производных данных. В настоящем документе не будут подробно рассматриваться продукты производных данных, поскольку они различаются для каждого конкретного радара и их количество довольно велико. Для обеспечения точности продуктов производных данных, продукты базовых данных необходимо тщательно вести.

7 Диаграмма направленности антенны и динамические свойства антенны

В метеорологических радаров обычно используются параболические зеркальные антенны, которые создают иглообразную диаграмму направленности. Стандартные диаграммы направленности МСЭ

² DOVIK, R. J. and ZRNIC, D. S. [1984] *Doppler and Weather Observations*. Academic Press, Inc. San Diego, United States of America.

для параболических антенн не применимы к антеннам, используемым для метеорологических радаров, поскольку создаваемая диаграмма направленности главного луча часто является гораздо более широкой, чем реальная иглообразная диаграмма направленности.

7.1 Движение антенны при обзоре области

Охват в горизонтальном и вертикальном направлениях, требуемый для обзора области с целью создания среза при определенном угле места, достигается путем вращения антенны в горизонтальной плоскости при постоянном угле места. Угол места антенны увеличивается на предустановленную величину после каждого среза при данном угле места. Самый малый угол места обычно находится в пределах от 0° до 1° , а самый большой угол места – от 20° до 30° , в некоторых же применениях могут использоваться углы места до 60° . Скорость вращения антенны изменяется в зависимости от метеоусловий и продукта, требуемого в данный момент времени. Скорость вращения, а также диапазон углов места, промежуточные приращения угла места и частота повторения импульсов корректируются для достижения оптимальных показателей работы. Медленное вращение антенны обеспечивает большое время подсветки для получения максимальной чувствительности.

Высокая скорость вращения антенны позволяет оператору производить обзор области за короткий период времени, если необходимо как можно быстрее охватить всю область. Вариация приращений угла места и скорости вращения может обуславливать изменение времени исследования при обзоре области от одной минуты до 15 минут. Длительные периоды времени для полного обзора области по сравнению с другими радаром, вращающимися при постоянном угле места, определяют необходимость в гораздо более длительном динамическом моделировании для получения статистически значимой выборки результатов.

7.2 Другие стратегии движения антенны

В метеорологических радаром используются также другие стратегии движения антенн в целях реализации специальных применений и исследований. Обзоры в пределах сектора используются для получения части среза при данном угле места. При обзорах областей в пределах сектора выполняется обзор области в доле азимута 360° , в пределах которого антенна осуществляет несколько срезов при углах места. В третьем режиме азимут и угол места антенны сохраняются постоянными для мониторинга конкретной точки атмосферы. Все три стратегии позволяют оператору радара сосредоточиться на конкретной части атмосферы.

7.3 Диаграммы направленности антенн

Когда это возможно, исследования совместного использования частот следует проводить с использованием реальной диаграммы направленности исследуемого радара. Однако в случаях, когда реальная диаграмма направленности антенны недоступна, для получения репрезентативных характеристик антенны был бы полезен типовой набор кривых или формул.

В настоящее время при анализе помех используются три математические модели диаграмм направленности антенн радаром, приведенные в Рекомендациях МСЭ-R F.1245, МСЭ-R М.1652 и МСЭ-R F.699. Несмотря на то, что эти рекомендации содержат типовые характеристики параболических антенн, в них переоценивается ширина луча иглообразной диаграммы направленности антенны, аналогичной обычно используемой в метеорологических радаром.

В настоящее время в МСЭ-R не существует определенных уравнений диаграмм направленности излучения антенн радаром для представления таких остронаправленных антенн. Если необходимо, то в отсутствие полученных путем измерения данных можно использовать модели обобщенных диаграмм направленности излучения антенн, приведенные в таблице 2, при анализе помех, связанных с одним или несколькими источниками помех, см. также Рекомендацию МСЭ-R М.1851. θ_3 – ширина луча по уровню половинной мощности (градусы).

ТАБЛИЦА 2

Варианты диаграмм направленности

Диапазон уровня 1-го бокового лепестка ниже пика	Возможный вариант типа распределения антенны	Диаграмма направленности $F(\mu)$	Уравнение маски после точки разрыва диаграммы, где маска отличается от теоретической диаграммы (дБ)	Точка разрыва пиковой диаграммы, в которой маска отличается от теоретической диаграммы (дБ)	Точка разрыва усредненной диаграммы, в которой маска отличается от теоретической диаграммы (дБ)	Постоянная, добавляемая к пиковой диаграмме, для ее преобразования в усредненную маску (дБ)	Нижний уровень предлагаемой маски (дБ)
От -13,2 до -19 дБ	Равномерное	$\frac{\sin(\mu)}{\mu}; \mu = (\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-8,584 \cdot \ln \left(2,876 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-5,75	-12,16	-3,72	-40
От -20 до -30 дБ	COS	$\frac{\pi}{2} \left[\frac{\cos(\mu)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 68,8 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-17,51 \cdot \ln \left(2,33 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-14,4	-20,6	-4,32	-50
От -31 до -38 дБ	COS ²	$\frac{\pi^2}{2 \cdot \mu} \left[\frac{\sin(\mu)}{\pi^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 83,2 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-26,882 \cdot \ln \left(1,962 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-22,3	-29,0	-4,6	-60
От -39 дБ или более	COS ³	$\frac{3 \cdot \pi \cdot \cos(\mu)}{8} \left[\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left(\frac{3 \cdot \pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 95 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-35,84 \cdot \ln \left(1,756 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-31,5	-37,6	-4,2	-70

8 Влияние помех и солнечного шума на метеорологические радары

Определение влияния помех на радары, используемые для обнаружения точечных целей, является достаточно простым. Испытание может быть осуществлено путем введения моделированных известных целей в радар и зрительного определения уровня помех, при котором происходит потеря целей или создание ложных целей. Визуальная проверка получаемых продуктов данных на основе осуществляемого метеорологическим радаром обзора области, отображаемого на терминале оператора, не обеспечивает четкого указания в отношении того, ухудшились ли показатели работы радара из-за помех. Например, если интерференция обусловила искажение на 1 дБ базовых данных отражательной способности, то оно необязательно будет видно на графическом отображении дождя. Однако, если помехи присутствуют на большей части обзора области, то все до единого элементы разрешения по дальности в рамках затронутой области будут искажены. Совокупным эффектом является значительная переоценка дождя в географическом регионе.

На всех метеорологических радаров во время восхода и захода солнца на экране индикатора возникают линии. Эта "солнечная" линия появляется во всех случаях, когда в ходе обзора области главный луч антенны попадает на солнце. В результате появления "солнечной" линии на экране индикатора, в частности в случае метеорологических радаров, происходит полная потеря данных по одному-двум радиусам в направлении солнца. Следует отметить, что возможность предсказания "солнечных" линий может обеспечить калибровочную поправку по азимуту в направлении ориентации радаров.

Влияние солнца является нежелательным, но предсказуемым. В случае других форм помех и шума их местоположение и интенсивность неизвестны и не могут быть предсказаны или просто учтены с помощью обработки или на основе толкования оператора.

Помехи затрагивают базовые продукты двумя путями. Во-первых, значения могут быть искажены, что ухудшает точность системы, а во-вторых, может быть затронута вариация выходных сигналов. В присутствии помех отражательная способность чувствительна к искажению, средняя радиальная скорость чувствительна к ошибкам вариации, а на ширине спектра сказываются как искажение, так и ошибки вариации. В случае ширины спектра ошибки, вызванные искажением, являются более существенными чем ошибки, обусловленные вариацией, поскольку искажение или смещение представляет собой ошибку измерения скорости, тогда как вариация – неопределенность измеренных скоростей.

8.1 Воздействие помех на режимы работы

В режиме ясного неба отношение сигнал/шум отраженных сигналов является наименьшим, и данные оказываются наиболее уязвимыми в отношении искажения, вызванного помехами. Обычно при работе в режиме ясного неба метеоролог ищет первые признаки конвекции, поскольку в результате ее развития могут появляться неблагоприятные метеоусловия и, возможно, смерчи. Для обнаружения конвекции необходимо обнаружить тонкие линии, вызываемые рассеивающими элементами, которые указывают разрывные границы, инициирующие конвекцию. Ширина этих областей конвекции часто составляет порядка одного-двух радиусов по ширине, и помехи, действующие вдоль этих радиусов, будут мешать обнаружению. Поэтому помехи, возникающие даже в течение очень коротких периодов времени, могут привести к необнаружению формирования неблагоприятных погодных условий. Если в ходе обзора области эта информация теряется на особо важном радиусе, то обнаружение будет задержано примерно на 10 мин., пока антенна, осуществляющая обзор области, не возвратится в положение обзора данной области атмосферы.

Режим осадков является более требовательным режимом в отношении связи, создания продуктов радара, обработки пользователем и отображения. В случае режима осадков почти все алгоритмы основаны на базовых данных об отражательной способности, средней скорости и ширине спектра с целью создания получаемых продуктов для использования оператором.

8.2 Воздействие помех на базовые продукты

Помехи затрагивают базовые продукты двумя различными путями. Во-первых, значения могут быть искажены, что ухудшает точность системы, а во-вторых, может быть затронута вариация выходных

сигналов. В присутствии помех отражательная способность чувствительна к искажению, средняя радиальная скорость чувствительна к ошибкам вариации, а на ширине спектра сказываются как искажение, так и ошибки вариации. В случае ширины спектра ошибки, вызванные искажением, являются более существенными чем ошибки, обусловленные вариацией, поскольку искажение или смещение представляет собой ошибку измерения скорости, тогда как вариация – неопределенность измеренных скоростей.

Отражательная способность рассчитывается на основе линейного усреднения мощности. В некоторых метеорологических радарх оценки отражательной способности формируются для элементов разрешения по дальности, которые охватывают 250 м по глубине и один радиус по ширине (приблизительно $1,0^\circ$ по азимуту). В этих системах осуществляется усреднение элементов разрешения по дальности для создания результирующей оценки отражательной способности на определенных интервалах. Это усреднение по четырем элементам может дополнительно ослабить влияние помех, создаваемых одиночному импульсу. Планируется, что в системах метеорологических радаров последующих поколений будет добавлен продукт отражательной способности "сверхвысокого разрешения", который исключит усреднение и создаст оценки отражательной способности на интервалах протяженностью 250 м. Кроме того, радиус будет уменьшен вдвое ($0,5^\circ$), при этом будет использоваться вдвое меньше выборок. В результате размер выборки будет снижен в восемь раз. Таким образом, помехи могут быть более резко выражены в продукте отражательной способности "сверхвысокого разрешения", чем в существующих оценках.

В случае доплеровских моментов проявление помех имеет нелинейный характер. Скорость рассчитывается на основе аргумента комплексной ковариации, а ширина спектра – на основе автокорреляции. Объединение сигнала с помехами не масштабируется линейно, как и в случае среднего значения отражательной способности. Эти оценки получаются в результате накопления данных измерений сигналов, включающих информацию об амплитуде и фазовом угле. Вероятно, источники помех будут иметь случайные фазы по отношению к когерентному сигналу метеорологического радара, и предсказать их вклад в точность оценки сложно.

Что касается ширины спектра, то помехи обуславливают искажение и увеличение вариации оценки ширины спектра. Искажение в оценке является более вредным, чем увеличении вариации.

Необходимо определить ошибки измерения, с тем чтобы результаты наблюдений, полученные с помощью радара, могли быть надлежащим образом приспособлены для цифрового прогнозирования погоды. Эта проблема имеет два соответствующих аспекта:

- 1) ошибки в исходных измерениях в пределах длительности каждого импульса радара, которые частично обусловлены мешающими сигналами; и
- 2) репрезентативность оценок данных радара, используемая в процессе ассимиляции.

В случае радиальных скоростей главный источник ошибок зависит от напряженности отраженного сигнала и расширения или ширины доплеровского спектра скорости. В свою очередь, ширина спектра, главным образом, зависит от градиентов отражательной способности и скорости по всей длительности импульса, а также от турбулентности в пределах длительности импульса [Doviak and Znis, 1984]. Оценка этих ошибок осложняется тем, что сами составляющие, необходимые для надежной оценки ошибок, только измеряются и поэтому имеют собственные неопределенности.

Был предложен принцип, в соответствии с которым для заданного элемента разрешения по дальности метеорологические радары усредняют многие отраженные импульсы за период подсветки радиуса. Было рекомендовано, чтобы в случае возникновения помех в течение небольшой части времени подсветки радиуса, влияние помех усреднялось с учетом отраженных импульсов, незатронутых помехами, в результате чего влияние помех снижается. Например, если радар работает при отношении помеха/шум существенно ниже -10 дБ, но это значение не соблюдается в течение короткого периода времени (небольшой процент времени подсветки радиуса), то влияние помех будет затем усреднено с учетом отраженных импульсов, незатронутых помехами. Если $I/N = -10$ дБ не соблюдается, но не из-за высокого уровня помех, то возможным результатом будет то, что искаженное значение отражательной способности может находиться в пределах проектных параметров данного радара. К сожалению, данный подход может быть эффективным, только если мешающий сигнал или сигналы являются когерентными в течение времени подсветки. Поскольку это случается нечасто, методы усреднения могут быть не самым эффективным способом ослабления влияния помех при доплеровских моментах. Однако, за исключением метеорологических радаров, в

которых используется спектральная обработка, усреднение может быть эффективным способом ослабления помех при условии, что значение I/N для средних помехи за период подсветки составляет менее -10 дБ.

Как было пояснено в п. 4.2 выше, отношение $I/N = -6$ дБ приводит к снижению возможности по дальности примерно на 12% для метеорологических радаров и на 6% – для других радаров. С другой стороны, такое снижение возможности по дальности на 6% (что также соответствует ухудшению охвата области на 11%) будет соответствовать увеличению шума примерно на 0,5 дБ для метеорологических радаров и, следовательно, соответствовать $I/N = -10$ дБ. Недавно было проведено испытание в целях подтверждения такого значения $I/N = -10$ дБ при постоянных помехах (см. Приложение 2 к Отчету МСЭ-R М.2136).

Воздействие помех на продукты поляриметрических метеорологических радаров или радаров с двойной поляризацией, такие как дифференциальная отражательная способность, коэффициент корреляции, показатель линейной деполаризации и специфическая дифференциальная фаза, требует дополнительного изучения с точки зрения математики и измерений с целью количественной оценки уровней критериев защиты, необходимых для обеспечения того, чтобы помехи не нарушали продукты поляриметрических радаров.

Следует сделать вывод, что помехи, создаваемые метеорологическим радаром, должны быть сведены к минимуму с тем, чтобы ослабить все помехи или предотвратить их. В отличие от систем связи, в которых используется резервирование и коррекция ошибок, метеорологические радары не могут восстановить потерянную информацию. Однако при рассмотрении использования характеристик радаров для исследований в МСЭ-R совместного использования частот необходимо учитывать другие факторы, которые рассматриваются в следующих разделах.

8.3 Математический вывод критериев защиты метеорологических радаров

Метеорологические радары выполняют три базовых измерения, которые вместе с информацией, которой располагает оператор, используются для получения метеорологических продуктов. Три базовыми продуктами, на основании которых получают другие продукты, являются отражательная способность области, радиальная скорость и ширина спектра.

В разделе 2 Приложения 1 к Отчету МСЭ-R М.2136 содержится подробное рассмотрение получаемых путем математического вывода критериев помех метеорологических радаров для этих трех продуктов, которые далее подтверждаются результатами испытаний, проведенных для проверки этих выводов.

Несмотря на удобство и частое использование единственного значения критерия помех, оно не может точно применяться ко всем метеорологическим радарам, работающим в одной полосе частот. Метеорологические радары проектируются с различными качественными показателями, которые оптимизированы для конкретных метеоусловий. Точность базовых продуктов и минимальное отношение сигнал/шум радара изменяются в зависимости от применения радара. Чем ниже минимальное отношение S/N , используемое радаром, тем ниже требуемые критерии защиты.

Обработка сигнала устраняет многие последствия действия шума системы радара при измерениях отражательной способности и ширины спектра. В результате некоторые системы могут обеспечивать оценки этих продуктов при уровнях сигнала, находящихся ниже уровня шума приемника. Оператор радара выбирает порог отношения сигнал/шум SNR^3 , который в некоторых системах может находиться в диапазоне от -12 дБ до 6 дБ.

Типовой метеорологический радар, использованный в примерах, которые приведены в п. 2 Приложения 1 к Отчету МСЭ-R М.2136, обеспечивает полезные измерения вплоть до уровня SNR , равного -3 дБ. Помехи с уровнем сигнала и выше ухудшат качество базовых продуктов. Это подчеркивает необходимость установления отношения I/N , при котором обеспечивается защита целостности этих продуктов.

Учитывая требования к техническим характеристикам и точности базовых данных любого конкретного метеорологического радара, можно вывести теоретические отношения I/N , которые

³ Порог SNR – это самый низкий уровень, при котором обрабатывается отраженный сигнал.

требуются для обеспечения того, чтобы базовые продукты не были нарушены в плане искажения и вариации.

8.4 Типы возможных помех

Метеорологические радары могут испытывать действие помех различных типов:

- постоянных;
- изменяющихся во времени;
- импульсных.

На первом этапе предлагается определить воздействие постоянных помех, соответствующих критерию защиты $I/N = -10$ дБ, а затем оценить возможные критерии защиты в отношении других источников помех с целью обеспечения аналогичного уровня ухудшения показателей работы радара.

8.4.1 Воздействие постоянных помех

Критерий защиты $I/N = -10$ дБ соответствует увеличению шума или энергии на 0,5 дБ.

Если основой является принцип калибровки радаров с целью совмещения уровня шума приемника (т. е. около -113 дБм) с уровнем отражательной способности 0 dBz на расстоянии 100 км, то увеличение шума изменяет номинальные условия радара, снижая дальность его действия.

Исходя из этого, предполагая, что существующий охват типового метеорологического радара, работающего в диапазоне частот 5250–5725 МГц, составляет примерно до 200 км, в таблице 3 приведены данные потерь по дальности и охвату в зависимости от увеличения уровня помех I/N и шума.

ТАБЛИЦА 3

Потери по дальности действия и охвату

Увеличение шума (дБ)	Соответствующее отношение I/N (дБ)	Потери по дальности (км)	Потери по охвату (% относительно площади)
0,5	-10	11	11%
1	-6	22	21%
2	-2,3	42	38%
3	0	59	50%
4	1,8	75	61%
5	3,3	88	69%
6	4,7	100	75%
7	6	111	80%
8	7,3	121	84%
9	8,4	130	88%
10	9,5	137	90%

С другой стороны, постоянные помехи создают также увеличение энергии, принимаемой радаром, которое будет учитываться при расчете отражательной способности.

В соответствии с описанием, приведенном в п. 2.2, интенсивность осадков, соответствующая определенному уровню отражательной способности (дБ), задается выражением:

$$z = AR^B,$$

где

z : отражательная способность;

A : постоянная рассеивания;

B : множитель интенсивности

и

$$z = 10 \log z \text{ (dBz)},$$

где

dBz: отражательная способность (дБ).

Перегруппируя члены и решая для R , получаем следующее уравнение:

$$R_{\text{(мм/ч)}} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz}}{10}\right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1,6}\right)}.$$

Если предположить, что увеличение энергии C является постоянным, то результирующая интенсивность составит:

$$R_{\text{(мм/ч)}} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz} + C}{10}\right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1,6}\right)}.$$

Тогда увеличение интенсивности дождя в процентах является постоянной величиной, которая задается выражением:

$$p(R_{\text{мм/ч}}) = 100 \times \left(10^{\left(\frac{C}{16}\right)} - 1 \right).$$

В таблице 4 перечислены постоянные рассеяния и множители интенсивности для нескольких типов осадков⁴.

ТАБЛИЦА 4

Постоянные рассеяния и множители интенсивности для различных случаев осадков

Переменные	Дождь в атмосферном слое	Конвективный дождь	Снег	Град
Постоянная рассеяния (A)	200	500	2 000	2 000
Множитель интенсивности (B)	1,6	1,5	2	1,29

В таблице 5 приведены данные об увеличении интенсивности дождя для нескольких случаев осадков.

⁴ Постоянные для дождя в атмосферном слое, конвективного дождя, снега и града, а также множители интенсивности получены на основе измерений.

ТАБЛИЦА 5

Сводка о переоценке осадков

Увеличение шума (дБ)	Соответствующее отношение I/N (дБ)	Увеличение интенсивности дождя в атмосферном слое (%)	Увеличение интенсивности конвективного дождя (%)	Увеличение интенсивности снегопада (%)	Увеличение интенсивности выпадения града (%)
0,5	-10	7,5	8,0	5,9	9,3
1	-6	15,5	16,6	12,2	19,5
2	-2,3	33,4	35,9	25,9	42,9
3	0	54,0	58,5	41,3	70,8
4	1,8	77,8	84,8	58,5	104,2
5	3,3	105,4	115,4	77,8	144,1
6	4,7	137,1	151,2	99,5	191,8
7	6	173,8	192,9	123,9	248,8
8	7,3	216,2	241,5	151,2	317
9	8,4	265,2	298,1	181,8	398,5
10	9,5	321,7	364,2	216,2	495,9

Эти расчеты показывают, что независимо от интенсивности дождя и типов осадков процент переоценки, соответствующей заданному постоянному увеличению энергии, также является постоянным и, таким образом, им нельзя пренебречь.

Также, рассматривая расчет отражательной способности для заданного элемента изображения, основанный на среднем значении (dBz), по всем оценкам и соответствующее стандартное отклонение, стоит отметить, что постоянное увеличение энергии по всем оценкам увеличит среднее значение, но не изменит стандартное отклонение. Это означает, что оно не изменит результат обнаружения дождя радаром (т. е. измерение, соответствующее отсутствию дождевой ячейки, по-прежнему будет считаться таковым), а окажет влияние только на данные об интенсивности дождя.

Интересно также отметить, что в случае потерь в отношении охвата или переоценки интенсивности дождя защитный критерий -10 дБ представляет ухудшение в диапазоне от 7 до 11%, что, как правило, является приемлемым для всех служб радиосвязи.

В случае доплеровских измерений оценка воздействия заданных постоянных помех отличается произвольным образом и, в частности, будет зависеть от того, каким образом фаза мешающего сигнала может изменить фазу полезного сигнала.

Это последнее допущение определенно не является очевидным для определения и будет зависеть от сигнала и/или окружающей среды. Обе ситуации рассматриваются в следующих случаях.

- *Случай 1:* если фаза мешающего сигнала, обнаруженного радаром, является случайной, то это означает, что результирующий вектор будет статистически нулевым, каким бы ни был его уровень. Таким образом, теоретически он не окажет воздействия на измерения скорости ветра.
- *Случай 2:* Если обнаруженная фаза является случайной и почти постоянной, то в результате будет иметь место постоянный вектор с определенным модулем, и воздействие на измерение скорости ветра будет зависеть как от фазы, так и от модуля такого вектора.

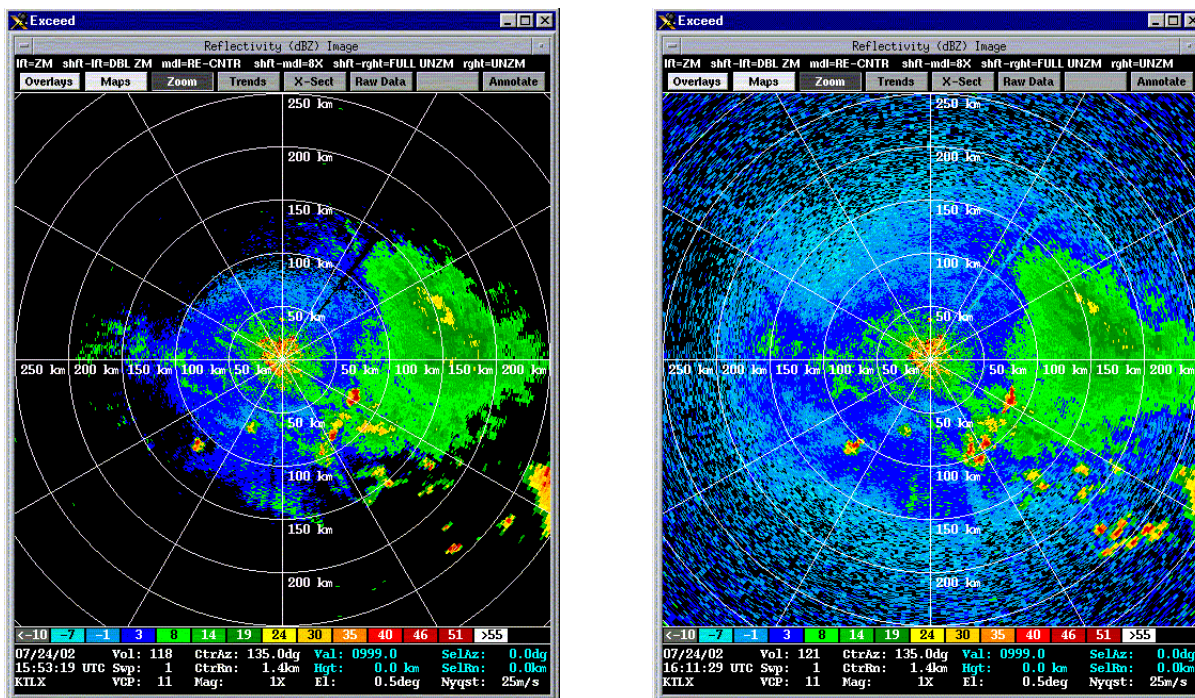
Кроме того, можно также предположить, что, когда уровень помех гораздо ниже уровня полезного сигнала, фаза полезного сигнала не меняется. Если уровень мешающего сигнала будет существенно выше, то тогда фаза, обнаруженная радаром, будет фазой мешающего сигнала и снова будут рассматриваться случаи 1 и 2 выше. Представляется, что в промежуточной ситуации, т. е. когда уровни мешающего и полезного сигналов являются сходными, довольно сложно оценить, какой из сигналов будет управляться обнаружением фазы.

8.4.2 Воздействие импульсных помех

Импульсные помехи могут оказывать значительное воздействие на данные отражательной способности, которые метеоролог использует для составления прогноза неблагоприятных погодных условий. В некоторых случаях импульсные помехи могут привести к тому, что по данным отраженных сигналов будет невозможно составить надежное изображение целей в атмосфере. Примеры этого можно увидеть на рисунке 12.

РИСУНОК 12

Изображение на экране метеорологического радара при отсутствии помех и изображение, искаженное помехами (режим осадков)

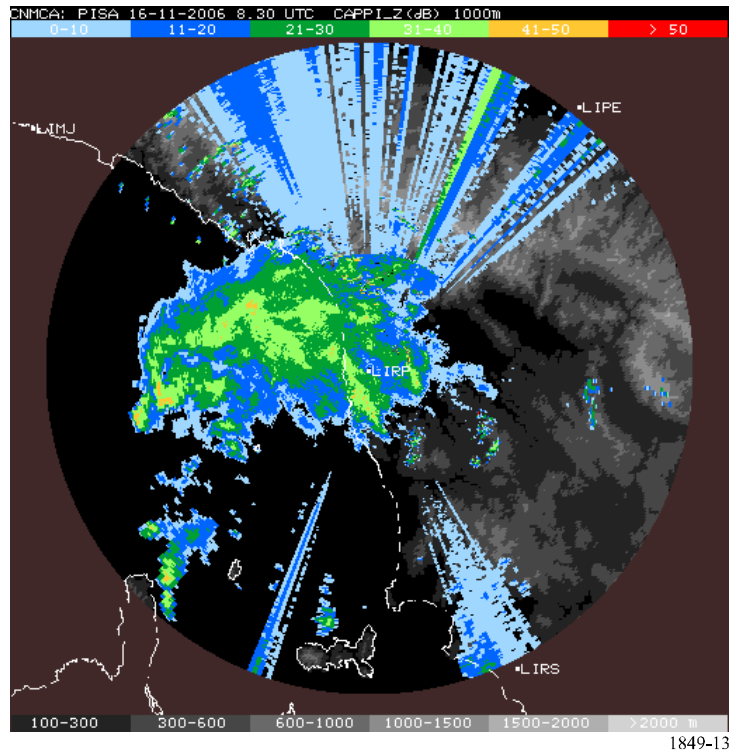


1849-12

Дополнительный пример помех, создаваемых метеорологическому радару одиночным маломощным передатчиком, находящемся в помещении, можно увидеть на рисунке 13.

РИСУНОК 13

Помехи метеорологическому радару (режим осадков)



В случае мешающего применения, передающего импульсные сигналы, и в силу принципа измерений интенсивности дождя и скорости ветра, основанного на усреднении по многим импульсам радара, представляется вероятным, что воздействие на метеорологические радары будет зависеть от отношения ЧПИ стробов метеорологических радаров (длительность импульсов) и мешающего источника.

В первом приближении предполагается, что это отношение может быть рассчитано на основе формулы, содержащейся в п. 3.2 Рекомендации МСЭ-R RS.1280 и позволяющей определить долю совпадающих импульсов двух импульсных применений, которая будет зависеть от того, связаны (случай I) или не связаны (случай II) частоты повторения полезных и мешающих сигналов целыми кратными. Доля совпадающих импульсов, f_c , может быть найдена из выражений:

$$f_c = \frac{GCF(PR F_i, PR F_g)}{PR F_g} \quad \text{для случая I,}$$

$$f_c = PR F_i(\tau_g + \tau_i) \quad \text{для случая II,}$$

где

$PR F_i$: частота мешающих импульсов, единицы: Гц или импульсов в секунду (имп./с);

$PR F_g$: частота повторения строба;

$GCF(PR F_i, PR F_g)$: наибольший множитель $PR F_i$ и $PR F_g$;

τ_i : длительность мешающего импульса, единицы: секунды;

τ_g : длительность строба.

Отметим, что если $\tau_i > \tau_g$ и ЧПИ полезных и мешающих импульсов не связаны целыми кратными (случай II), f_c приблизительно является коэффициентом заполнения мешающих импульсов.

Исходя из этого, с целью поддержания того же уровня ухудшения (около 10%) в отношении постоянной помехи, когда применяется $I/N_{constant} = -10$ дБ, предполагается, что максимальное отношение I/N , касающееся импульсных помех, может быть задано формулой:

$$I/N_{pulse} = I/N_{constant} - 10 \log(f_c).$$

В действительности, если доля совпадающих импульсов равна 0,5, означая, что одна из двух оценок радара будет "загрязнена" помехами и что уровень мешающего сигнала будет вдвое больше (+3 дБ) по сравнению с ситуацией, соответствующей $I/N = -10$ дБ, очевидно, что среднее значение, рассчитанное радаром, будет тем же.

С другой стороны, стандартное отклонение увеличится, что в некоторых случаях приведет к принятию факта неметеорологического характера за ситуацию дождя. В этом случае 10-процентное ухудшение считается приемлемым, однако это все еще требует ратифицирования и подтверждения, основанного на вычислении, а также на испытании.

Следует отметить, что приведенный выше принцип, в соответствии с которым большее значение I/N , соответствующее пиковой мощности импульсных помех, может быть допустимым для метеорологических радаров, был подтвержден недавно проведенным испытанием (см. Приложение 2 к Отчету МСЭ-Р М.2136). Даже несмотря на то, что формула выше не была полностью проверена для всех случаев, предполагается, что она представляет соответствующий подход. Однако было бы целесообразно провести дополнительный анализ для определения взаимосвязи между характеристиками затрагиваемого сигнала и сигнала помех (ЧПИ и длительность импульсов).

8.4.2.1 Альтернативный метод получения уровней I/N

Метеорологические радары обрабатывают отраженные сигналы для выполнения измерений, касающихся характера осадков и ветрового режима. Обработка включает сбор и обработку данных базовых продуктов – отражательной способности, средней радиальной скорости и ширины спектра. Упрощенно, радар усредняет выборку отраженных сигналов для получения оценок, необходимых для создания метеорологических продуктов. Функция усреднения обеспечит метеорологический радар способностью обрабатывать импульсные помехи более высоких уровней, относящиеся к помехам в виде незатухающих или шумоподобных сигналов.

Метеорологические радары обрабатывают несколько отраженных импульсов, попадающих в элемент разрешения по дальности, для формирования выборки, размер которой устанавливается пользователем. Эти несколько отраженных импульсов, формирующих элемент разрешения по дальности, усредняются для получения оценки элемента разрешения по дальности. Предлагаемые системы ССИЗ и метеорологические радары работают на существенно различающихся частотах повторения импульсов, поэтому вероятность попадания более одного мешающего импульса в один набор выборок элементов разрешения по дальности метеорологического радара является небольшой при условии малого размера выборки. Подход состоит в определении максимального уровня одиночного импульса, при котором среднее значение по размеру выборки не будет выходить за пределы качественных показателей базовых продуктов данных радара.

Определение критерия защиты требует понимания требований в отношении точности, касающихся уровня шума приемника, минимального отношения сигнал/шум, используемого для обработки, и базовых продуктов радара (отражательной способности, средней радиальной скорости и ширины спектра). Поскольку в данной полосе частот работают различные метеорологические радары, должны быть сделаны некоторые предположения. Радар, использованный при анализе, имеет минимальный уровень шума приемника -110 дБм при самой узкой ширине полосы ПЧ.

Значение минимального отношения сигнал/шум, вероятно, сложнее всего установить не для конкретного радара. Для радаров, работающих в полосе частот 2700–2900 МГц, типовыми являются отношения сигнал/шум 0–3 дБ, поскольку радары, работающие на нижней частоте, обычно эксплуатируются для обнаружения на больших расстояниях. Метеорологические радары, работающие в полосе частот 9300–9500 МГц, как правило, используются на более коротких расстояниях для обнаружения с более высоким разрешением и могут работать при больших минимальных отношениях сигнал/шум. В таблице 6 представлены требуемые для этого анализа значения точности базовых продуктов данных при $S/N = +3$ дБ и минимальном уровне шума -110 дБм.

ТАБЛИЦА 6

Требования к точности данных

Требования к точности базовых данных	
Оценка отражательной способности	1 дБ
Оценка скорости	1 м/с
Оценка ширины спектра	1 000 Гц

Как показано в таблице 7, для метеорологического радара, используемого в данном примере, предполагается, что максимальный предел искажения отражательной способности составляет 1 дБ, что соответствует отношению помеха/минимальный сигнал I/S , равному 0,26, или отношению мощности 1,26. Размер выборки отражательной способности будет предполагаться равным 25. Возможен размер выборки, больший 25, что позволяет дополнительно снизить влияние одиночного импульса, однако больший размер выборки также увеличивает вероятность появления второго мешающего импульса в той же выборке.

8.4.2.2 Расчет I/N для импульсного источника помех (одиночное попадание)**8.4.2.2.1 Предположения**

- Нормально восстанавливаемый сигнал минимального уровня имеет отношение сигнал/шум, равное 2 дБ.
- Искажение зависит от отношения сигнала к средней мощности помех. Поэтому оно зависит от уровня помех и количества "попаданий" в периодограмму оценки.
- Максимальный уровень помех в отношении отражательной способности определяется искажением отражательной способности.
- Искажение отражательной способности (R_b) в 1 дБ дает отношение мощности, равное 1,2589.

$$\text{Отношение мощности} = 10^{(R_b/10)} = 10^{(0,1)} = 1,25892589.$$

Вычитая отношение неискаженной мощности из отношения мощности, при которой возникает искажение в 1 дБ, получаем отношение помеха/сигнал, равное 0,2589.

$$I/S = [10^{(R_b/10)} - 10^{(R_b/10)}] = [1,2589 - 1] = 0,2589.$$

Уровень мощности помех может быть рассчитан с помощью следующей формулы:

$$I_L = (N_s) (I/S) = (16) (0,2589) = 4,144.$$

Это значение соответствует сигналу 6,17 дБ.

$$I_L \text{ (дБ)} = 10 \log (4,14) = 6,17 \text{ дБ.}$$

В случае отношения сигнал/шум, равного 3 дБ, I/N может быть рассчитано следующим образом:

$$I/N = 6,17 \text{ дБ} + 3 \text{ дБ} = 9,17 \text{ дБ.}$$

Объединяя эти показатели в функцию, которая описывает I/N по отношению к N_s , I/N и R_b , получаем максимально требуемое I/N для одиночного "попадания":

$$I/N = [10 \log [(N_s) (I/S)]] + S/N,$$

где

N_s : количество выборок в оценке;

S_{mp} : средняя мощность сигнала;

S/N : отношение сигнал/шум приемника;

I/S : отношение помеха/сигнал,

а I/S выражается как:

$$I/S = [10(R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)],$$

где

R_b : искажение отражательной способности;

N_{nf} : нормированный минимальный уровень шума.

Объединяя уравнения, получаем:

$$I/N = [10 \log [(N_s) ([10 \uparrow (R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)])]] + S/N.$$

Ниже приводится примерный расчет, основанный на вышеуказанных предположениях.

8.4.2.2.2 Примерный расчет

Предположения:

$$N_s = 16$$

$$S/N = 3 \text{ дБ}$$

$$R_b = 1 \text{ дБ}$$

$$N_{nf} = 0 \text{ дБ}^5$$

$$I/N = [10 \log [(N_s) ([10 \uparrow (R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)])]] + S/N$$

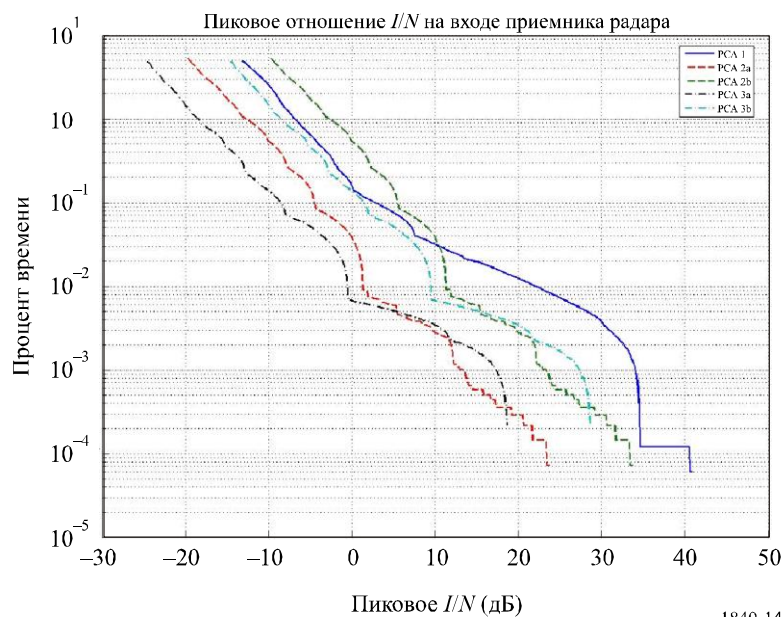
$$I/N = [10 \log [(16) ([10 \uparrow (1/10)] - [10 \uparrow (0/10)])]] + 3 = 9,17 \text{ дБ}.$$

8.4.3 Воздействие изменяющихся во времени помех

На рисунках 14 и 15 представлены возможные помехи со стороны системы РСА (радар с синтезированной апертурой) и изменяющиеся во времени помехи.

РИСУНОК 14

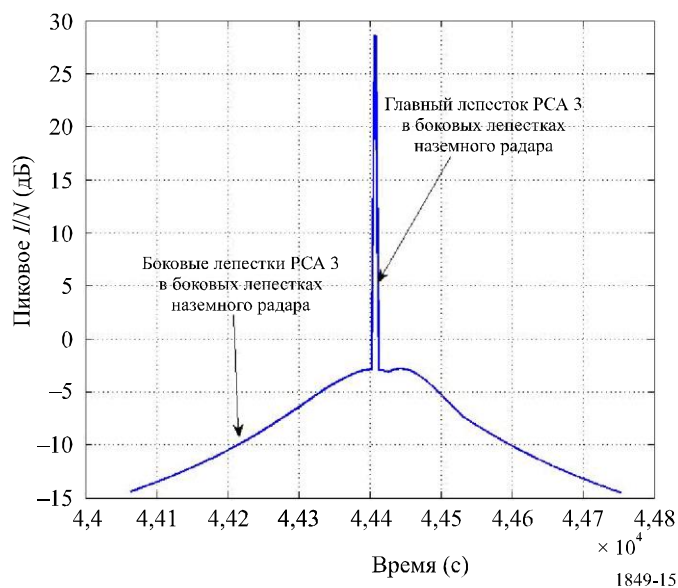
Интегральная функция распределения пикового I/N



⁵ В этом примере минимальный уровень шума приведен к уровню неискаженного сигнала и установлен равным 0 дБ.

РИСУНОК 15

Пиковое отношение I/N в зависимости от времени для одного прохода над метеорологическим радаром



На основании этих иллюстраций представляется вероятным возникновение двух ситуаций:

- a) в первой ситуации высокий уровень I/N будет создаваться на короткое время, в течение которого метеорологический радар, по-видимому, будет находиться в нерабочем состоянии – возможности измерений интенсивности дождя будут заблокированы или будет иметь место существенная переоценка интенсивности дождя;
- b) во второй ситуации в течение длительного периода времени (приблизительно 400 с) критерии помех будут превышать.

Сложно оценить воздействие помех этого типа на метеорологические радары. Однако следует предположить, что ввиду малой продолжительности интеграции элементов изображения, вероятно, будут иметь место изменяющиеся во времени помехи; в краткосрочной перспективе (т. е. при анализе по каждому элементу изображения) могло бы применяться такое же воздействие, что и при постоянных помехах (импульсных или неимпульсных), как описано в пп. 8.4.1 и 8.4.2. В зависимости от случая и для каждого элемента изображения определение воздействия изменяющихся во времени помех является непростой задачей.

Признавая необходимость дальнейшего и более подробного анализа, следует отметить, что уровень $I/N = 30$ дБ (без учета импульсного характера излучения РСА), который мог бы соответствовать ситуации 1, может создавать в данной области существенную переоценку мгновенной интенсивности дождя, которая исказит долговременные (от одного часа до нескольких дней) статистические данные о дожде, используемые в процессах оповещения об опасных гидрологических условиях. Длительность помех, составляющая примерно 400 с, соответствует 7 поворотам радара и относится к боковым лепесткам радара. В этом случае на большое количество элементов изображения (и, следовательно, на большую географическую зону) будет воздействовать несколько возникающих помех, что сделает невозможной аппроксимацию элементов изображения. Очевидно, что размер географической зоны зависит от уровня помех, которые, как предполагается, прежде всего воздействуют на край зоны покрытия радара. Даже небольшие помехи могут обусловить потери в отношении покрытия, составляющие несколько десятков процентов.

Определение воздействия изменяющихся во времени помех является непростой задачей и потребует анализа в каждом отдельном случае, учитывающего результаты динамического моделирования, на основе которого должны будут применяться критерии помех, используемые в отношении источников постоянных или импульсных помех.

8.5 Выводы в отношении критериев защиты метеорологических радаров

Даже несмотря на то, что требования к защите метеорологических радаров сильно зависят от их характеристик и спецификаций, в анализе, проведенном в п. 8 выше, и в элементах, представленных в Отчете МСЭ-R М.2136, учитываются воздействия на дальность действия радаров и точность базовых продуктов и подтверждается, что для постоянных помех отношение $I/N = -10$ дБ является соответствующим и должно использоваться для обеспечения защиты метеорологических радаров. Этот критерий согласуется с существующими Рекомендациями МСЭ-R.

Анализ и испытания, проведенные для импульсных помех, показывают, что в зависимости от характеристик передатчика и затрагиваемой системы (главным образом, ЧПИ и длительность импульса) большее отношение I/N соответствует пиковой мощности импульсных помех. До получения результатов дальнейших исследований для представления надлежащей аппроксимации может использоваться один из методов, описанный в пп. 8.4.2 или 8.4.2.1.

В настоящее время еще не выведена универсальная формула для изменяющихся во времени помех. В зависимости от того, является ли источник источником постоянных или импульсных помех и являются ли помехи кратковременными (воздействие на радиусы радара) или долговременными (весь обзор области), анализ следует выполнить для каждого отдельного случая и исходя из результатов динамических моделирований, учитывая соответствующие вышеупомянутые критерии для постоянных или импульсных помех.

9 Воздействие ветровых турбин

Погодные радары спроектированы для осуществления обзора в относительно узком диапазоне высот с целью обеспечения точного прогнозирования погоды. Ввиду чувствительности радаров ветровые турбины, развернутые в пределах прямой видимости средств метеорологических радаров, могут блокировать поступательное распространение сигналов радаров, вызывать мешающие отражения, сказывающиеся на данных отражательной способности, и создавать эхо-сигналы радара, обусловленные турбулентностью следа. Эти механизмы помех могут приводить к ложным оценкам скопления осадков, предоставляемым радаром, ложным вихревым и мезоциклическим характеристикам, ошибочному определению особенностей гроз и неправильному определению штормовых ячеек. Кроме того, механизмы помех могут приводить к ухудшению показателей работы радара и отрицательно сказываться на операциях прогнозирования и предупреждения.

9.1 Маскирование

Любой географический объект или сооружение, которые расположены между радаром и целью, будут вызывать эффект затенения или маскирования. Нельзя исключать возможность возникновения эффекта затенения за счет ветровых турбин, в зависимости от их размеров. Можно ожидать, что такие эффекты затенения будут различаться в зависимости от габаритов турбины, типа передающего радара и конфигурации (высоты, угла установки лопасти, скорости вращения и положения радара относительно турбины).

9.2 Мешающие отражения

Радар может принимать сигналы, отраженные от любой поверхности, которая способна их отражать. В конкретных географических районах или при определенных метеорологических условиях отрицательное воздействие на показатели работы радара могут оказывать нежелательные отраженные сигналы, которые могут маскировать полезные сигналы. Такие нежелательные отраженные сигналы называются мешающими отражениями. Ветровая турбина или турбины, расположенные на близком расстоянии от метеорологического радара, могут создавать синоптикам проблемы в работе.

Сигналы, вызванные мешающими отражениями от наземных предметов, демонстрируют высокую отражательную способность, почти нулевой доплеровский сдвиг и малую ширину спектра и всегда локализованы. По сравнению с постоянно возникающими мешающими отражениями от наземных предметов, помехи, создаваемые ветровыми турбинами, являются существенно более сложной проблемой. Принимаются сигналы, зеркально отраженные и от (неподвижных) опор, и от (движущихся) лопастей. Как и при мешающих отражениях от наземных предметов, сигналы, вызванные мешающими отражениями от ветровых турбин, также демонстрируют высокую отражательную способность и модулируются под воздействием вращения лопастей, которое приводит к систематическому изменению эффективной площади отражения по отношению к радару.

Допплеровский сдвиг обусловлен несколькими факторами, включая скорость вращения лопастей и ориентацию ротора по отношению к лучу радара. Допплеровская скорость будет максимальной, если ротор расположен под углом 90° к линии прямой видимости радара, и почти нулевой, если ротор повернут к радару либо передней, либо тыльной стороной. Учитывая вероятность попадания всего сооружения ветровой турбины в область разрешения радара, предполагается, что ширина спектра существенно увеличится. Это вызвано тем, что лопасти вращаются в направлении от радара и к радару. При попадании нескольких турбин в область разрешения одного радара этот эффект лишь усиливается.

9.3 Энергия обратного рассеяния, возникающего в результате турбулентных вихрей

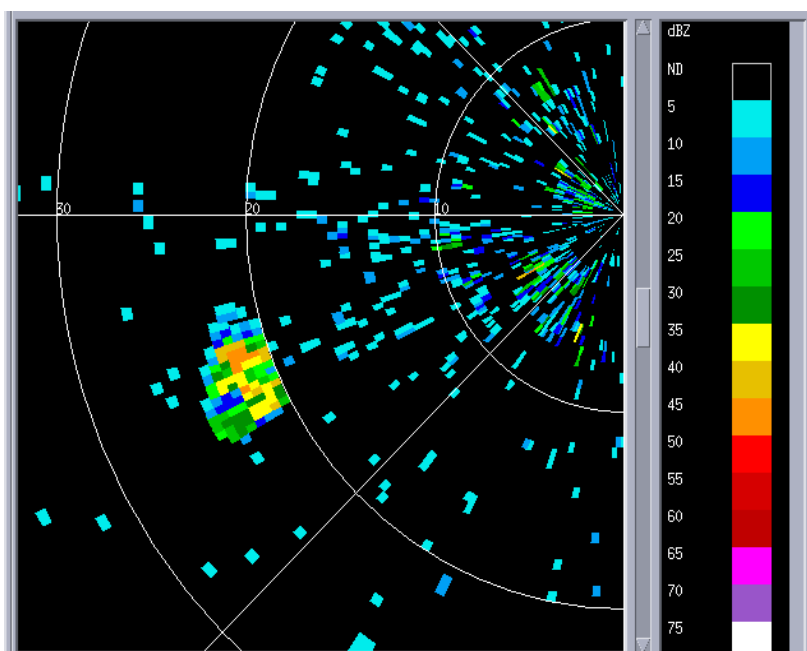
Помимо сигналов, вызванных мешающими отражениями от ветровых турбин и создаваемых за счет отражений от реальных ветровых турбин, может появляться энергия обратного рассеяния, которая возникает в результате турбулентных вихрей, являющихся следствием работы ветровых ферм. Представляется, что эти эхо-сигналы обладают теми же характеристиками, что и сигналы обратного рассеяния в условиях ясного неба в результате скачков показателя преломления по брэгговской шкале радара. Эти эхо-сигналы в турбулентном следе будут дрейфовать вместе с полем ветра и, вероятно, будут характеризовать гораздо более низкую отражательную способность по сравнению с зеркальными отражениями от турбин. Тем не менее, они могут существенно увеличивать часть зоны обзора радара, которая затронута мешающими отражениями от ветровых турбин, и, следовательно, усугубить эту проблему.

9.4 Примеры мешающих отражений от ветровых турбин

На рисунке 16 представлены изображения того, как ветровая ферма (группа ветровых турбин) появляется на устройстве отображения метеорологического радара. (На этом рисунке представлено отображение данных отражательной способности, показывающее отраженные сигналы от ветровой фермы, находящейся приблизительно в 40 км к юго-западу от метеорологического радара.)

РИСУНОК 16

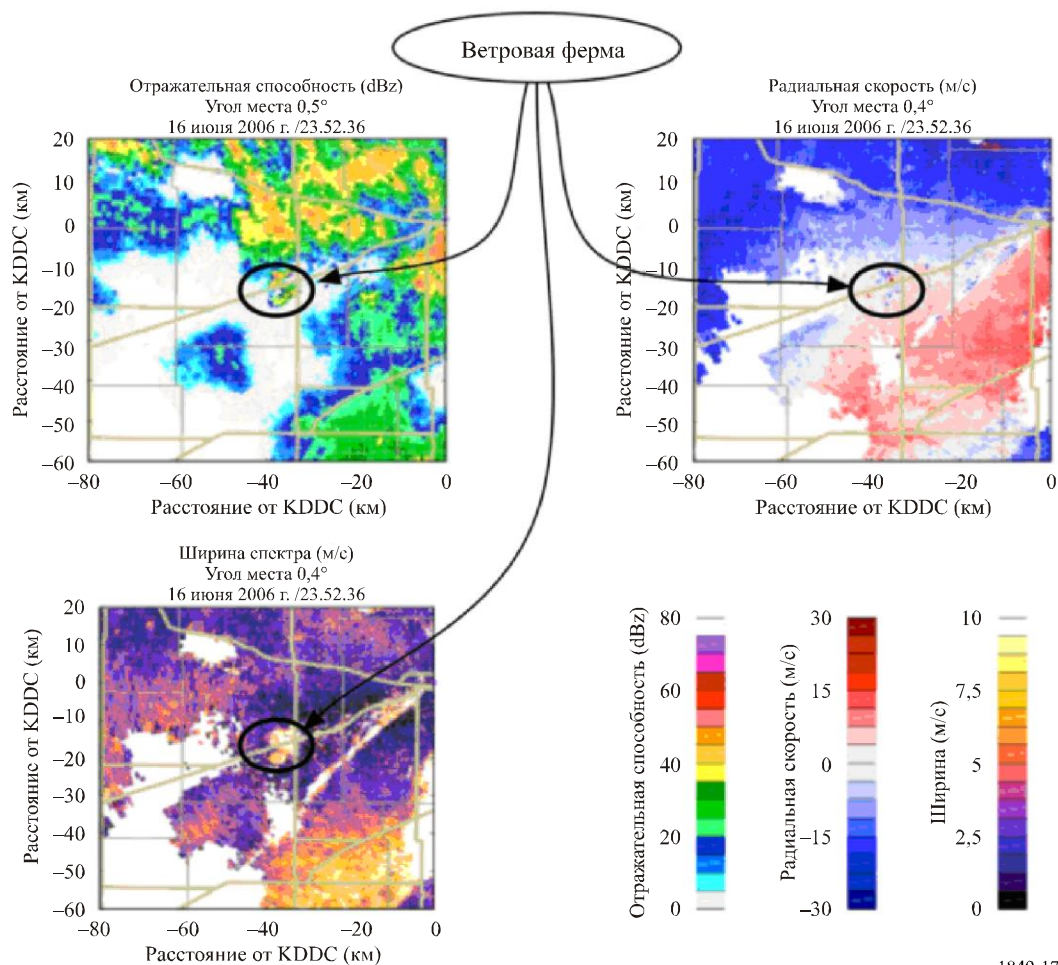
Изображение, представляемое метеорологическим радаром, которое показывает наличие ветровой фермы к юго-западу от местоположения радара



1849-16

На рисунке 17 представлены данные уровня Π в случае, когда эхо-сигналы от изолированных ливней смешаны с эхо-сигналами мешающих отражений от ветровой турбины. Сигналы, отраженные от ветровой турбины, характеризуются случайной радиальной скоростью и большой шириной спектра.

РИСУНОК 17

Воздействие помех со стороны ветровой фермы на данные уровня II

1849-17

Не имея предварительной информации, было бы исключительно трудно отличить мешающие отражения, вызванные ветровыми турбинами, от гроз. Поскольку лопасти вращаются в направлении от радара и к радару, можно ожидать почти нулевую среднюю доплеровскую скорость. Как показано на рисунке 17, большие значения ширины спектра, безусловно, будут снижать точность оценок доплеровской скорости за счет небольших отклонений от нуля.

9.5 Воздействие мешающих отражений от ветровых турбин на работу и точность прогнозирования метеорологического радара

Были проведены исследования на местах, которые продемонстрировали воздействие мешающих отражений от ветровых турбин на метеорологические радары. Эти исследования показали, что фермы ветровых турбин могут оказывать существенное влияние на метеорологические радары и сами по себе могут ухудшать точность прогнозирования неблагоприятных метеоусловий.

Результаты анализа ясно показали, что мешающие отражения, создаваемые ветровыми турбинами, присутствуют при больших азимутах (несколько десятков градусов) относительно направления на ветровую турбину, даже на довольно больших расстояниях. Следовательно, воздействием ветровых турбин на прием метеорологическим радаром отраженных сигналов нельзя пренебрегать.

Из анализа также следует, что воздействие одной одиночной ветровой турбины на работу метеорологического радара в доплеровском режиме является весьма значительным, в частности на расстоянии менее 10 км, в пределах которого все данные радара содержат ошибки по всем азимутам.

Для защиты метеорологических радаров от вредных помех, создаваемых ветровыми фермами, требуется применять ряд методов ослабления влияния мешающих отражений от ветровых турбин.

Прежде чем делать какие-либо окончательные выводы относительно методов обработки, применяемых для ослабления влияния мешающих отражений от ветровых турбин, следует провести дополнительное изучение этого влияния, с тем чтобы понять всю глубину данного явления и его воздействие на метеорологические радары. После того, как это сделано, возможно, потребуется разработать методы ослабления влияния мешающих отражений от ветровых турбин, учитывая ожидаемый рост количества систем на основе ветрогенераторов.

До того как будут получены результаты проводимых исследований, которые касаются ослабления влияния создаваемых ветровыми турбинами помех метеорологическим радарам, оперативное решение, направленное на недопущение или ограничение воздействия ветровых ферм, состоит в том, чтобы обеспечить необходимое расстояние разнеса между двумя системами. Например, в ряде европейских стран в настоящее время рассматриваются следующие рекомендации:

- a) ни одна ветровая турбина не должна развертываться на расстоянии от антенны радара меньше, чем:
 - 5 км для радаров, работающих в диапазоне частот 5250–5725 МГц;
 - 10 км для радаров, работающих в полосе частот 2700–2900 МГц;
- b) проекты ветровых парков должны быть изучены на предмет воздействия, если речь идет о расстоянии меньше, чем:
 - 20 км для радаров, работающих в диапазоне частот 5250–5725 МГц;
 - 30 км для радаров, работающих в полосе частот 2700–2900 МГц.

10 Предыдущие испытания систем метеорологических радаров

Предыдущее испытание метеорологического радара было проведено с целью определения критериев защиты радара. Процедура и методика анализа данных подробно описаны в Приложении 1 к Отчету МСЭ-R М.2136. Испытание включало подачу сигнала помех известного уровня в приемник. Радар осуществлял частичный (1 или 2 поворота антенны) или полный обзор области в отсутствие помех. Затем радар возвращался в исходное состояние для осуществления того же частичного или полного обзора области, при этом в приемный тракт подавался сигнал помех с использованием РЧ сумматора. Данные базовых продуктов для случаев частичного или полного обзора области при отсутствии и наличии помех были сохранены на диске. Чередующиеся частичные или полные обзоры области в случаях отсутствия и наличия помех выполнялись при уровнях сигнала помех, на которых обеспечивались отношения помеха/шум I/N , составляющие от +6 дБ до –15 дБ.

Затем данные были проанализированы путем сравнения элементов разрешения по дальности вдоль каждого радиуса в отсутствие и при наличии помех. На основе данных, выстроенных в обратном порядке, можно определить уровень I/N , при котором помехи вызывают ухудшение точности базовых продуктов ниже допустимых пределов.

Испытание дало представление о его возможных усовершенствованиях. Испытание, описанное в Приложении 1 к Отчету МСЭ-R М.2136, было выполнено с использованием радара, осуществляющего сбор данных об атмосфере. Предполагалось, что атмосферные условия значительно не изменяются в течение 3–5 минут, требуемых для осуществления частичных или полных обзоров области при отсутствии и наличии помех. Анализ данных выявил, что это предположение не всегда является правильным.

Важно отметить, что при широком диапазоне метеорологических радаров чувствительность к помехам может быть различной, поскольку допустимый уровень помех каждого отдельного радара зависит от требований к минимальному рассматриваемому отношению сигнал/шум, искажению оценок и характеристике вариации.

Более позднее испытание помех (для одного типа метеорологического радара, работающего в диапазоне частот 5250–5725 МГц) было проведено для определения чувствительности к помехам, соответствующей различным сигналам помех (постоянные, незатухающие колебания или ЧМ и импульсные), и подтвердило представленный в п. 8 выше анализ, а также ранее проведенное испытание метеорологических радаров, работающих в полосе частот 2700–2900 МГц. Краткое изложение этих результатов испытания содержится в Приложении 2 к Отчету МСЭ-R М.2136.

11 Будущие испытания

Методы будущих испытаний должны быть направлены на изучение использования системы обнаружения и восстановления сигналов при приеме, преобразовании в цифровую форму и сохранении на диске сигналов радаров IF, I и Q. Сигналы, полученные в результате одного обзора области при отсутствии помех, могут быть приняты и преобразованы в цифровую форму.

При использовании генератора(ов) сигналов произвольной формы и генератора РЧ сигнала принимаемый сигнал радара, преобразованный в цифровую форму, может быть восстановлен и подан в приемник радара столько раз, сколько необходимо для проведения испытания, моделирующего отраженные от атмосферы сигналы. Такой подход может обеспечить идентичные условия проведения испытаний в случаях частичных или полных обзоров области при отсутствии и наличии помех.

Может понадобиться провести испытание при наличии импульсных и/или изменяющихся во времени помех с целью оценки и подтверждения подверженности метеорологических радаров воздействию помех данного типа. Это испытание должно быть проведено в отношении неполяриметрических (с горизонтальной поляризацией) и поляриметрических (с горизонтальной и вертикальной поляризациями) метеорологических радаров.

12 Модели распространения

В предыдущих разделах рассмотрена необходимость сведения к минимуму уровня допустимых помех, принимаемых метеорологическими радарными. Однако признается также, что при проведении исследований совместного использования частот должны быть учтены модели распространения, и что более усовершенствованные модели распространения, такие как приведенные в Рекомендациях МСЭ-R P.452 и P.526, обеспечивают более точные результаты этих исследований. В отношении этих усовершенствованных моделей распространения требуется использовать значение превышения, отличающееся от 0,0%. Необходимо провести дополнительное исследование для лучшего определения возможности использования этих усовершенствованных моделей распространения и того, как следует правильно применять результат в исследованиях совместного использования частот.

13 Будущие тенденции

Различные администрации проводят значительные обновления аппаратного обеспечения систем метеорологических радаров. Очередным усовершенствованием будет поляриметрический радар, который добавляет вертикальную поляризацию к используемым в настоящее время волнам радара горизонтальной поляризации.

В процессе разработки находятся также дополнительные методы дальнейшего улучшения показателей работы метеорологических радаров. Основными среди них являются различные алгоритмы для устранения неоднозначностей в отношении дальности/скорости, повышения скорости сбора данных, снижения влияния артефактов, уменьшения мешающих отражений и эффективной обработки сигналов для предоставления как можно более точных метеорологических оценок. Другие области включают совместное использование метеорологических радаров и радаров для измерения профиля ветра. Скромные усилия прилагаются для исследования молний и связанных с ними опасностей для определения того, возможно ли прогнозирование их появления и исчезновения.

Исследователи вскоре начнут адаптировать технологию фазированных антенных решеток радаров к использованию в приложениях наблюдения за погодой. Фазированная антенная решетка заменит механически управляемые параболические антенны электронно управляемой антенной решеткой. Эта замена обеспечит возможность использования более гибких стратегий сканирования и более оперативных обновлений изменяющихся метеоусловий. Первые испытания систем радаров с фазированными антенными решетками оказались многообещающими. Технология фазированных антенных решеток расширит фундаментальное понимание развития штормовых условий, в свою очередь позволит получить более совершенные компьютерные модели, более точные прогнозы и ранние предупреждения. Кроме того, эта технология может существенно увеличить среднее время между предупреждением о смерче и его начале, которое сегодня составляет 13 минут. Выходная мощность передатчика или требования к спектру в случае фазированных антенных решеток будут теми же, что и для существующих антенных систем. Наиболее рентабельно осуществлять усовершенствования систем путем усовершенствований подсистем приема и обработки сигнала. Хотя в ближайшие десять лет внедрение фазированных антенных решеток не предполагается, существует возможность, что при переходе к этой технологии (если она будет внедрена) действующие передатчики не будут использоваться, а будут заменены распределенными передающими/приемными модулями в фазированной решетке.

Существует возможность развертывания систем метеорологических радаров диапазона X на базе CASA (Центр совместного адаптивного зондирования атмосферы) в части радиочастотного спектра от 8000 МГц до 12 000 МГц. В сентябре 2003 года Национальный научный фонд организовал новый научно-технический исследовательский центр совместного адаптивного зондирования атмосферы (CASA) с целью разработки небольших недорогих радаров для зондирования с высоким разрешением нижних слоев атмосферы. Имеется существенный недостаток выборки в отношении метеоусловий в нижних слоях тропосферы, что препятствует предоставлению прогнозов и началу моделирования в районе, где развиваются штормы. Радары CASA с высокой пространственной плотностью позволят обнаруживать модели погоды, возникающие в районе нижних слоев атмосферы, которые часто расположены ниже существующего уровня рабочего покрытия доплеровского радара (т. е. нижние три километра). Радары CASA будут размещаться на мачтах систем сотовой телефонной связи или с использованием другой существующей инфраструктуры с большими возможностями в отношении передачи данных. В отличие от существующей сети предварительно запрограммированных радаров совместные радары CASA будут поддерживать связь друг с другом и адаптировать свои стратегии зондирования в зависимости от возникающих погодных условий и изменяющихся потребностей конечных пользователей. Данные этих радаров могут быть включены в численные модели прогнозов погоды для загрузки более полных исходных данных.

Необходимо отслеживать эти будущие тенденции, которые по мере развития технологий будут оказывать воздействие на любые будущие стратегии ослабления помех и определения критериев защиты.

14 Резюме

Наземные метеорологические радары, по сравнению с другими радарными, работают и обрабатывают сигналы иным образом, а создаваемые ими продукты значительно отличаются от продуктов радаров других типов. Эти различия могут влиять на то, как следует проводить анализ помех и как должны оцениваться результаты анализа.

Наземные метеорологические радары являются специфическими, в них используются другие стратегии движения антенны для осуществления обзора области атмосферы вокруг этого радара при оценке полного представления атмосферных условий. Для сравнения, большинство радаров других типов отслеживает отдельные цели и обрабатывают только отраженные сигналы, относящиеся к элементам разрешения по дальности, которые связаны с целями. В метеорологических радарных обрабатываются все элементы разрешения по дальности по всем радиусам.

Приложение 2

Характеристики метеорологических радаров

1 Метеорологические радары, работающие в полосе частот 2700–2900 МГц

Технические характеристики типовых метеорологических радаров, работающих в полосе частот 2700–2900 МГц представлены в таблице 1. Однако радар 1 может функционировать на частотах до 3000 МГц. Эти основные системы метеорологических радаров, которые используются в работе по планированию полетов. Во всем мире они часто располагаются по соседству с аэропортами и предоставляют точные оценки метеоусловий, которые используются в целях управления выполнением полетов. Эти радары работают круглосуточно.

В радаре 1 применяется технология доплеровского радара для наблюдения за присутствием опасных метеорологических элементов, таких как смерчи, ураганы и сильные грозы, и расчета скорости и направления их движения. Радар 1 обеспечивает также количественные оценки осадков в области, которые играют важную роль в гидрологических прогнозах. Предоставляемые этим радаром возможности определения неблагоприятных метеоусловий и направления движения способствуют повышению точности и своевременности услуг предупреждения. Радар 1 отличается возможностью раннего обнаружения наносящих урон ветров и оценки количества атмосферных осадков, используемых при прогнозировании гидрологического режима рек и паводков.

Рек. МСЭ-R М.1849-1

Радар 1 используется в объединенной сети, охватывающей Соединенные Штаты Америки, Гуам, Пуэрто-Рико, Японию, Южную Корею, Китай и Португалию. Полоса частот 2700–2900 МГц обеспечивает превосходные метеорологические характеристики и характеристики распространения в отношении возможностей прогнозирования погоды и предупреждения. Планируемые усовершенствования радара должны увеличить срок его службы до 2040 года. По данным Всемирной метеорологической организации (ВМО), более 320 метеорологических радаров работает в этой полосе частот не менее чем в 52 странах мира.

Радар 2 – это недоплеровский радар, который используется во многих странах.

Радары 3 и 4 – в одном радаре объединены применения метеорологического обеспечения авиации и метеорологические применения.

ТАБЛИЦА 7

Характеристики	Единицы	Радар 1*	Радар 2*	Радар 3	Радар 4
Диапазон настройки	МГц	2700–3000	2700–2900	2 700–3 000 ⁽²⁾	2 700–3 000 ⁽²⁾
Модуляция		P0N		P0N, Q3N	P0N, Q3N
Мощность сигнала передачи, подаваемого в антенну	кВт	500	400 или 556	40	160
Длительность импульсов	мкс	1,6 (короткий импульс) 4,7 (длинный импульс)	1,0 (короткий импульс) 4,0 (длинный импульс)	1,0 (короткий импульс) 60,0 (длинный импульс)	1,0 (короткий импульс) ≤ 250,0 (длинный импульс)
Время нарастания/спада импульса	мкс	0,12		0,2 (SP), 3 (длинный импульс)	0,2 (SP), 3 (длинный импульс)
Частота повторения импульсов или число импульсов в секунду	Гц или имп./с	318–1 304 (короткий импульс) 318–452 (длинный импульс)	539 (короткий импульс) 162 (длинный импульс)	320–6 100 (короткий импульс) 320–1 300 (длинный импульс) Примечание(3)	320–4 300 (короткий импульс) 320–1 500 (длинный импульс) Примечание(3)
Коэффициент заполнения (%)	%	Максимально 0,21		0,2 ⁽⁴⁾ –0,6 (короткий импульс) ≤ 12,0 ⁽⁵⁾ (длинный импульс)	0,2 ⁽⁴⁾ –0,4 (короткий импульс) ≤ 12,0 ⁽⁵⁾ (длинный импульс)
Ширина полосы импульса с ЛЧМ	МГц	Неприменимо	Неприменимо	3	3
Ширина фазово-кодированного под-импульса		Неприменимо	Неприменимо	Неприменимо	Неприменимо
Коэффициент сжатия		Неприменимо	Неприменимо	180	≤ 750
Ширина полосы РЧ излучения: –40 дБ –20 дБ –6 дБ –3 дБ	МГц	4,6 0,6		10,4 (короткий импульс)/6,2 (длинный импульс) 1,3 (короткий импульс)/2,0 (длинный импульс)	10,4 (короткий импульс)/6,2 (длинный импульс) 1,3 (короткий импульс)/2,0 (длинный импульс)
Выходное устройство		Клистрон	Коаксиальный магнетрон	Полупроводниковое	Полупроводниковое

ТАБЛИЦА 7 (продолжение)

Характеристики	Единицы	Радар 1*	Радар 2*	Радар 3	Радар 4
Тип диаграммы направленности антенны (иглообразная, веерообразная, квадратично-косеканская)		Иглообразная	Иглообразная	Иглообразный луч, покрытие до 70 000 футов	Иглообразный луч, покрытие до 100 000 футов
Тип антенны (отражатель, фазированная решетка, щелевая решетка и др.)		Параболический отражатель	Параболический отражатель	Фазированная решетка, 4 зеркала (на каждое зеркало фазированная решетка диаметром 4 метра)	Фазированная решетка, 4 зеркала (на каждое зеркало фазированная решетка диаметром 8 метров)
Поляризация антенны		Линейная: вертикальная и горизонтальная	Линейная: горизонтальная	Линейная горизонтальная и вертикальная; круговая	Линейная горизонтальная и вертикальная; круговая
Усиление в главном луче антенны	дБи	45,7	38,0	41	46
Ширина луча по углу места антенны	градусы	0,92	2,0	1,6–2,7	0,9–1,5
Ширина луча по азимуту антенны	градусы	0,92	2,0	1,6–2,7	0,9–1,4
Скорость обзора антенны по горизонтали	градусы/с	18	18 и полностью ручное вращение	Неприменимо	Неприменимо
Тип обзора антенны по горизонтали (непрерывный, произвольный, 360°, в секторе и др.)		360° и сектор	360° и сектор	Нерегулярный для обеспечения покрытия 360°	Нерегулярный для обеспечения покрытия 360
Скорость обзора антенны по вертикали	градусы/с	14 шагов за 5 минут		Неприменимо	Неприменимо
Тип обзора антенны по вертикали (непрерывный, произвольный, 360°, в секторе и др.)	градусы	Фиксированные шаги: 0,5–20	От –2,0 до +60	Нерегулярный для обеспечения покрытия требуемого пространства	Нерегулярный для обеспечения покрытия требуемого пространства
Уровни боковых лепестков (БЛ) антенны (первые и дальние БЛ)	дБ	20	+15 (оценка)	17 на передачу, 25 на прием	17 на передачу, 25 на прием
Высота антенны	м	30	30	Непостоянная	Непостоянная
Ширина полосы ПЧ приемника	МГц	0,63 на уровне -3 дБм	0,25 на уровне -3 дБ (длинный импульс) 0,5 на уровне -3 дБ (короткий импульс)	1,2 на уровне -6 дБ (короткий импульс) 1,8 на уровне -6 дБ (длинный импульс)	1,2 на уровне -6 дБм (короткий импульс) 1,6 на уровне -6 дБм (длинный импульс)
Коэффициент шума приемника	дБ	2,1	9,0	< 6	< 6
Минимальный различимый сигнал	дБм дБм/МГц	-115	-110	-110	-110
Точка сжатия динамического диапазона усиления на 1 дБ на входе приемника	дБм	-17	-32	10	10
Уровень насыщения на частоте настройки приемника	дБм	-10		Неприменимо	Неприменимо

ТАБЛИЦА 7 (окончание)

Характеристики	Единицы	Радар 1*	Радар 2*	Радар 3	Радар 4
Ширина РЧ полосы приемника по уровню 3 дБ	МГц	1,6	0,5 (длинный импульс) 1,5 (короткий импульс)	200	300
Уровни насыщения и время восстановления по РЧ и ПЧ приемника	дБм мкс	-10, 1		13 < 0,5	13 < 0,5
Ширина полосы фильтрации доплеровских частот	Гц	95 ⁽¹⁾ (оценка)			
Параметры подавления помех					
Географическое распределение		По всему миру			
Доля времени при использовании	%	100			

(1) Фильтрация доплеровских частот и удаление импульса насыщения.

(2) Диапазон настройки 2,7–2,9 ГГц при выполнении функции воздушной радионавигации.

(3) Очень высокие значения PRF используются только при высоких углах места.

(4) Коэффициент заполнения для коротких импульсов составляет 0,2% при сканировании по самому низкому углу места (горизонт).

(5) Для того чтобы коэффициент заполнения не превышал 12%, ширина импульса и частота следования импульсов должны быть согласованы.

2 Метеорологические радары, работающие в диапазоне частот 5250–5725 МГц

Метеорологические радары на воздушных судах и наземные метеорологические радары работают в пределах полосы частот 5250–5850 МГц. Технические характеристики наземных радаров представлены в таблице 8.

Можно также отметить, что в этой полосе частот некоторые метеорологические службы эксплуатируют специфические невращающиеся радары для отслеживания и установления местоположения радиозондов, которые не оснащены функцией радионавигации. Эти радары отличаются от метеорологических радаров, главным образом, тем что в них используется импульс меньшей продолжительности (до 0,2 мкс), а после захвата радиозонда они следят за его траекторией до завершения запуска. Эти радары не рассматриваются в настоящей Рекомендации.

Кроме того, метеорологические радары на воздушных судах используются для исследования и разведки ураганов. Воздушное судно многократно проникает в "глаз бури" на высотах от 20 000 футов (6096 м) и до 1500 футов (457 м). Воздушное судно собирает данные полетного исследования, имеющие особо важное значение в отношении компьютерных моделей, прогнозирующих интенсивность ураганов и их выход на сушу. Другое воздушное судно проникает в ураганы на больших высотах, где меньше турбулентция (30 000–45 000 футов или 9144–13 716 м), для определения положения глаза урагана. Эти радары не рассматриваются в настоящей Рекомендации.

Следует отметить, что наземные метеорологические радары теоретически могут работать во всем диапазоне частот 5250–5850 МГц, но, как правило, их работа ограничивается диапазоном частот 5430–5725 МГц. Большинство этих радаров работают в пределах полосы частот 5600–5650 МГц.

ТАБЛИЦА 8

Характеристики	Единицы	Радар 1*	Радар 2*	Радар 3*	Радар 4*	Радар 5*
Диапазон настройки	МГц	5 300–5 700	5 600–5 650	5 600–5 650	5 300–5 700	5 600–5 650
Мощность сигнала передачи, подаваемого в антенну	кВт пик. Вт средн.	250 125	250 1 500	250	250	250
Длительность импульсов	мкс	2,0	0,05–18	1,1	0,8–2,0	3,0
Время нарастания/спада импульса	мкс	0,2	0,005	0,11	0,08	0,3
Частота повторения импульсов	имп./с	50, 250 и 1 200	0–4 000	2 000	250–1 180	259
Выходное устройство		Коаксиальный магнетрон	Клистрон	Клистрон	Настраиваемый магнетрон	Коаксиальный магнетрон
Тип диаграммы направленности антенны (иглообразная, веерообразная, квадратично-косеканская)		Коническая	Иглообразная	Иглообразная	Иглообразная	Иглообразная
Тип антенны (отражатель, фазированная решетка, щелевая решетка и др.)		Цельнометаллическая параболическая	Параболическая	Параболическая	Параболическая	Цельная параболическая
Поляризация антенны		Вертикальная	Горизонтальная	Горизонтальная	Горизонтальная	Горизонтальная
Усиление в главном луче антенны	дБи	39	44	50	40	40
Ширина луча по углу места антенны	градусы	4,8	0,95	< 0,55	< 1,0	1,65
Ширина луча по азимуту антенны	градусы	0,65	0,95	< 0,55	< 1,0	1,65
Скорость обзора антенны по горизонтали	градусы/с	0,65	0–36 (0–6 имп./с)	21–24	30–48	30–48
Тип обзора антенны по горизонтали (непрерывный, произвольный, 360°, в секторе и др.)	градусы	360	360	Непрерывный 360° Сектор	360	360
Скорость обзора антенны по вертикали	градусы/с	Неприменимо	Неприменимо	15	15	15
Тип обзора антенны по вертикали (непрерывный, произвольный, 360°, в секторе и др.)	градусы	Неприменимо	Неприменимо	Пошаговый, 0,5–60	Пошаговый, от –2 до +60	От –1 до +60
Уровни боковых лепестков (БЛ) антенны (первые и дальние БЛ)	дБм	–26	–35	–27	–25	–25
Высота антенны	м	30	10	30	30	30
Ширина полосы ПЧ приемника	МГц	0,5	20	0,91	0,6	От 0,25 до 0,5
Коэффициент шума приемника	дБ	7	4	2,3	3	3

Рек. МСЭ-R М.1849-1

ТАБЛИЦА 8 (продолжение)

Характеристики	Единицы	Радар 6*	Радар 7*	Радар 8*	Радар 9	Радар 10
Минимальный различимый сигнал	дБм	-110	-97	-109	От -109 до -112	-114
Диапазон настройки	МГц	5 600-5 650	5 600-5 650	5 250-5 725	5 600-5 650	5 600-5 650
Модуляция		Обычная	С возможностью использования эффекта Допплера	С возможностью использования эффекта Допплера	С возможностью использования эффекта Допплера	С возможностью использования эффекта Допплера (включая калибровку шума без излучения)
Мощность сигнала передачи, подаваемого в антенну	кВт пик. Вт средн.	250 150	250 150	2,25	250	250
Длительность импульсов	мкс	0,8-5	0,8-5	0,1	0,8-2, 5 и 10	От 0,5 до 3,3
Время нарастания/спада импульса	мкс	0,2-2	0,2-2	0,005		
Частота повторения импульсов	имп./с	250-1 200	50-1 200	100 000	50-1 200 фиксированная и вобуляция	250-1 200 фиксированная, с перемежением и вобуляция
Выходное устройство		Коаксиальный магнетрон или клистрон	Коаксиальный магнетрон	Коаксиальный магнетрон	Коаксиальный магнетрон	Коаксиальный магнетрон
Тип диаграммы направленности антенны (иглообразная, веерообразная, квадратично-косеканская)		Иглообразная	Иглообразная	Иглообразная	Иглообразная	Иглообразная
Тип антенны (отражатель, фазированная решетка, щелевая решетка и др.)		Цельная параболическая	Цельная параболическая	Цельная параболическая	Цельная параболическая	Цельная параболическая
Поляризация антенны		Горизонтальная и/или вертикальная	Горизонтальная или вертикальная	Горизонтальная или вертикальная	Горизонтальная	Горизонтальная и вертикальная
Усиление в главном луче антенны	дБи	40-50	40-50	35-45	44-48	45
Ширина луча по углу места антенны	градусы	0,5-2	0,5-2	2,4-12	0,65-1	0,9
Ширина луча по азимуту антенны	градусы	0,5-2	0,5-2	1,5-12	0,65-1	0,9
Скорость обзора антенны по горизонтали	градусы/с имп./с	6-18 1-3	6-18 1-3	1,2	3-36 0,5-6	6-36 1-6)
Тип обзора антенны по горизонтали (непрерывный, произвольный, 360°, в секторе и др.)	градусы	360	360	360	360	360
Скорость обзора антенны по вертикали	градусы/с	1-10	1-14	Неприменимо		

ТАБЛИЦА 8 (продолжение)

Характеристики	Единицы	Радар 6*	Радар 7*	Радар 8*	Радар 9	Радар 10
Тип обзора антенны по вертикали (непрерывный, произвольный, 360°, в секторе и др.)	градусы	От -1 до +90	От -5 до +90	Неприменимо	От -2 до +90	От -2 до +90
Уровни боковых лепестков (БЛ) антенны (первые и дальние БЛ)	дБ	От -25 до -35	От -25 до -35	-20	От -25 до -45	От -25 до -45
Высота антенны	м	6-30	6-30	10	6-30	7-30
Ширина полосы ПЧ приемника по уровню 3 дБ	МГц	От 0,7 до 4	От 0,1 до 3,0	10	От 0,1 до 1,25	От 0,3 до 2
Коэффициент шума приемника	дБ	3,5-8	1,5-8	3	3	3
Минимальный различимый сигнал	дБм	От -113 до -120	От -113 до -120	От -113 до -118	От -30 до -54 на расстоянии 1 км	От -107 до -115

ТАБЛИЦА 8 (продолжение)

Характеристики	Единицы	Радар 11	Радар 12	Радар 13
Диапазон настройки	МГц	5 250-5 350	5 330-5 370	5 250-5 370
Модуляция		Обычная	С возможностью использования эффекта Допплера	С возможностью использования эффекта Допплера
Мощность сигнала передачи, подаваемого в антенну	кВт пик.	250	250	200
Длительность импульсов	мкс	2,5-2,8	1 и 2,5	1
Время нарастания/спада импульса	мкс	0,1-0,8	0,1-0,9	0,2-0,5
Частота повторения импульсов	имп./с	260	260-1 500	400-2 000
Выходное устройство		Коаксиальный магнетрон	Клистрон	Клистрон
Тип диаграммы направленности антенны (иглообразная, веерообразная, квадратично-косеканская)		Иглообразная	Иглообразная	Иглообразная
Тип антенны (отражатель, фазированная решетка, щелевая решетка и др.)		Параболическая	Параболическая	Параболическая
Поляризация антенны		Горизонтальная	Горизонтальная	Горизонтальная
Усиление в главном луче антенны	дБи	41-45	42-45	48-50
Ширина луча по углу места антенны	градусы	1-1,5	1-1,2	0,58-0,65
Ширина луча по азимуту антенны	градусы	1-1,5	1-1,2	0,6-0,65
Скорость обзора антенны по горизонтали	градусы/с	24	6-36	12/24
Тип обзора антенны по горизонтали (непрерывный, произвольный, 360°, в секторе и др.)	градусы	360	360	360
Скорость обзора антенны по вертикали	градусы/с	от -2 до +45 в пределах 15 с	от -2 до +45 в пределах 15 с	от -2 до +90 в пределах 10 с

Рек. МСЭ-Р М.1849-1

ТАБЛИЦА 8 (продолжение)

Характеристики	Единицы	Радар 11	Радар 12	Радар 13
Тип обзора антенны по вертикали (непрерывный, произвольный, 360°, в секторе и др.)	градусы	От -2 до +45	От -2 до +45	От -2 до +90
Уровни боковых лепестков (БЛ) антенны (первые и дальние БЛ)	дБм	От -25 до -33	От -26 до -35	От -28 до -34
Высота антенны	м	От 18 до 53	От 10 до 60	От 33 до 44
Ширина ПЧ полосы приемника по уровню 3 дБ	МГц	От 1,2 до 1,6	От 0,4 до 1,4	От 1,0 до 1,4
Коэффициент шума приемника	дБм	1,2–5	1,9–3	1–2
Минимальный различимый сигнал	дБм	От -108 до -114	От -110 до -114	От -110 до -112

ТАБЛИЦА 8 (окончание)

Характеристики	Единицы	Радар 14
Диапазон настройки	МГц	5 430–5 470
Модуляция		С возможностью использования эффекта Допплера
Мощность сигнала передачи, подаваемого в антенну	кВт пик.	250
Длительность импульсов	мкс	0,5
Время нарастания/спада импульса	мкс	0,25–0,30
Частота повторения импульсов	имп./с	600–1 500
Выходное устройство		Коаксиальный магнетрон
Тип диаграммы направленности антенны (иглообразная, веерообразная, квадратично-косеканская и т. д.)		Иглообразная
Тип антенны (отражатель, фазированная решетка, щелевая решетка и др.)		Цельная параболическая
Поляризация антенны		Горизонтальная и вертикальная
Усиление в главном луче антенны	дБи	45
Ширина луча по углу места антенны	градусы	1
Ширина луча по азимуту антенны	градусы	1
Скорость обзора антенны по горизонтали	градусы/с	18–48
Тип обзора антенны по горизонтали (непрерывный, произвольный, 360°, в секторе и др.)	градусы	360
Скорость обзора антенны по вертикали	градусы/с	20 шагов за 5 минут
Тип обзора антенны по вертикали (непрерывный, произвольный, 360°, в секторе и др.)	градусы	От -0,2 до +40
Уровни боковых лепестков (БЛ) антенны (первые и дальние БЛ)	дБм	-28
Высота антенны	м	5–45
Ширина ПЧ полосы приемника по уровню 3 дБ	МГц	2,0
Коэффициент шума приемника	дБм	1,8
Минимальный различимый сигнал	дБм	-110

3 Метеорологические радары в полосе частот 9300–9500 МГц

Следует отметить, что наземные метеорологические радары теоретически могут работать во всем диапазоне частот 8500–10500 МГц, но, как правило, их работа ограничивается полосой частот 9300–9500 МГц. Технические характеристики этих радаров приведены в таблице 9.

ТАБЛИЦА 9

Характеристики	Единицы	Радар 1	Радар 2	Радар 3
Диапазон настройки	МГц	9 300–9 375	9 200–9 500	9 375
Модуляция		Импульсная	Импульсная	Импульсная
Мощность сигнала передачи, подаваемого в антенну	кВт пик.	50	250	35 (на каждый тип поляризации)
Длительность импульсов	мкс	0,1; 0,25 и 1,0	0,5; 1,0; 0,8 и 2,0	1 и 2
Частота повторения импульсов	имп./с	От 1 000 до 2 000	От 1 500 до 250	500
Максимальный коэффициент заполнения	%	0,002	Не указывается	Не указывается
Время нарастания/спада импульса	мкс	0,05	Не указывается	Не указывается
Выходное устройство		Клистрон или магнетрон	Магнетрон	Магнетрон
Тип диаграммы направленности антенны		Иглообразный луч	Иглообразный луч	Иглообразный луч
Тип антенны		Параболический отражатель с облучателем Кассегрена	Параболический отражатель	Параболический отражатель г
Поляризация антенны		Линейная (двойная поляризация)	Линейная	Линейная (двойная поляризация)
Усиление в главном луче антенны	дБи	46	45	40
Ширина луча по углу места антенны градусы	градусы	0,9	< 1,0	1,5
Ширина луча по азимуту антенны градусы	градусы	0,9	< 1,0	1,5
Скорость обзора антенны по горизонтали	градусы/с	От 0 до 20	От 0 до 36	6
Тип обзора антенны по горизонтали (непрерывный, произвольный, 360°, в секторе и др.)	градусы	Область, область сектора, стационарный и отслеживающий	Область	Область
Скорость обзора антенны по вертикали	градусы/с	От 0 до 20	Не указывается	От 0 до 90
Тип обзора антенны по вертикали	градусы	Шаги к следующему углу места после поворота по горизонтали или изменение угла места при постоянном азимуте	Шаги к следующему углу места после поворота по горизонтали	Не указывается
Уровни боковых лепестков (БЛ) антенны (первые и дальние БЛ)	дБи	26	16	10 (1-й БЛ) 0 (дальний БЛ)
Высота антенны	м	4	От 2 до 30	От 5 до 15
Ширина ПЧ полосы приемника по уровню 3 дБ	МГц	10, 4 или 1	Не указывается	Не указывается
Коэффициент шума приемника	дБм	-110	-114	-113
Потеря приема	дБм	Не указывается	Не указывается	Не указывается
Ширина полосы импульса с ЛЧМ		Неприменимо	Неприменимо	Неприменимо
Ширина полосы РЧ излучения: 3 дБ -20 дБ	МГц	Не указывается От 6 до 60 – в зависимости от ширины импульса	Не указывается Не указывается	1 6