

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕДУР ОБЗОРА ПРОСТРАНСТВА НАБЛЮДЕНИЯ ПРИ СИСТЕМНОМ ПОДХОДЕ К ПОСТРОЕНИЮ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ

Введение

Анализ требований различных потребителей метеорологической радиолокационной информации к ее объему, качеству, форме и оперативности представления показывает, что оптимальный путь удовлетворения максимально возможного числа потребителей предполагает создание многофункциональной автоматизированной системы метеорологических радиолокационных наблюдений [1]. Ее главным и принципиальным преимуществом является возможность, в рамках единой системы, комплексно использовать радиолокационную информацию для мониторинга: штормового оповещения, прогнозирования погоды, метеорологического обеспечения транспортного комплекса, органов власти и управления, измерения интенсивности и количества осадков, активных воздействий на атмосферные процессы и иных задач. Обслуживание потребителей возможно лишь при безоговорочном выполнении их требований к формам, срокам, регулярности и достоверности метеорологической информации, которая позволяет им принимать решения, способствующие минимизировать ущерб от погодных условий или приносить прибыль [2]. Поскольку потребители разные, то удовлетворить все их настоящие и могущие возникнуть в будущем потребности можно, построив радиолокационную систему гидрометеорологического мониторинга так, чтобы создаваемое ею радиолокационное поле полностью покрывало пространство наблюдения, т.е. ту область атмосферы, в которой существуют все метеорологические объекты, явления и процессы [3]. Нижняя граница радиолокационного поля должна быть расположена как можно ближе к поверхности Земли, при этом поле должно быть без разрывов, сплошным, а верхняя граница безразрывного поля не должна быть больше высоты, на которой уже не существуют гидрометеорологические объекты, явления и процессы. При этом внутри поля должны обеспечиваться заданная точность и дискретность измерений [4]. Принципы построения радиолокационного поля, отвечающего отмеченным выше требованиям, известны из [5]. Необходимо организовать обзор пространства наблюдения таким образом и такими средствами, чтобы реализовать рациональное распределение энергии зондирующего излучения, предложенного в [5], с обеспечением требуемого качества радиолокационной информации. Решению этой задачи посвящены исследования, описанные в данной статье.

Актуальность

Обеспечение требуемого качества радиолокационной мониторинговой информации и непрерывное его повышение, с целью достижения потенциально возможного качества, является постоянной актуальной задачей при эксплуатации систем метеорологического радиолокационного мониторинга. Поэтому актуальным является и решение частной задачи организации обзора пространства наблюдения, позволяющего рационально распределить энергию зондирующего излучения.

Цель исследования

На основе анализа существующих процедур обзора пространства в метеорологических радиолокационных сетях разработать и предложить методику обзора и средства для обзора пространства наблюдения при системном подходе к построению метеорологической радиолокационной системы мониторинга, позволяющих реализовать рациональное распределение энергии зондирующего излучения с обеспечением требуемого качества метеорологической радиолокационной информации.

Таким образом при организации обзора пространства при радиолокационном мониторинге атмосферы надо ответить на два основных вопроса: как осуществить обзор наиболее рациональным образом и какими средствами осуществлять обзор.

1. Анализ процедур обзора пространства в существующих неавтоматизированных радиолокационных сетях

На начальном этапе развития радиолокационных наблюдений импульсными недоплеровскими метеорологическими радиолокаторами комплектовались только некоторые региональные прогностические центры, аэропорты и противогородовые службы (рис. 1, а). Первые две организации использовали их данные для составления сверхоперативных прогнозов, а последняя – для штормового оповещения, подготовки данных для воздействий и анализа результатов применения средств активных воздействий на атмосферные процессы. При таком применении радиолокаторов расстояние между ними было значительным и в единую большую техническую систему увязать их было невозможно. В систему радиолокаторов увязывались информационно [6]. Поэтому с системотехнической точки зрения каждый радиолокатор был автономен. Это вынуждало для получения максимального количества информации от таких радиолокаторов обзор пространства осуществлять во всей его зоне наблюдения, от угла места диаграммы направленности антенны 0° до ее угла места 90° (рис. 1, б).

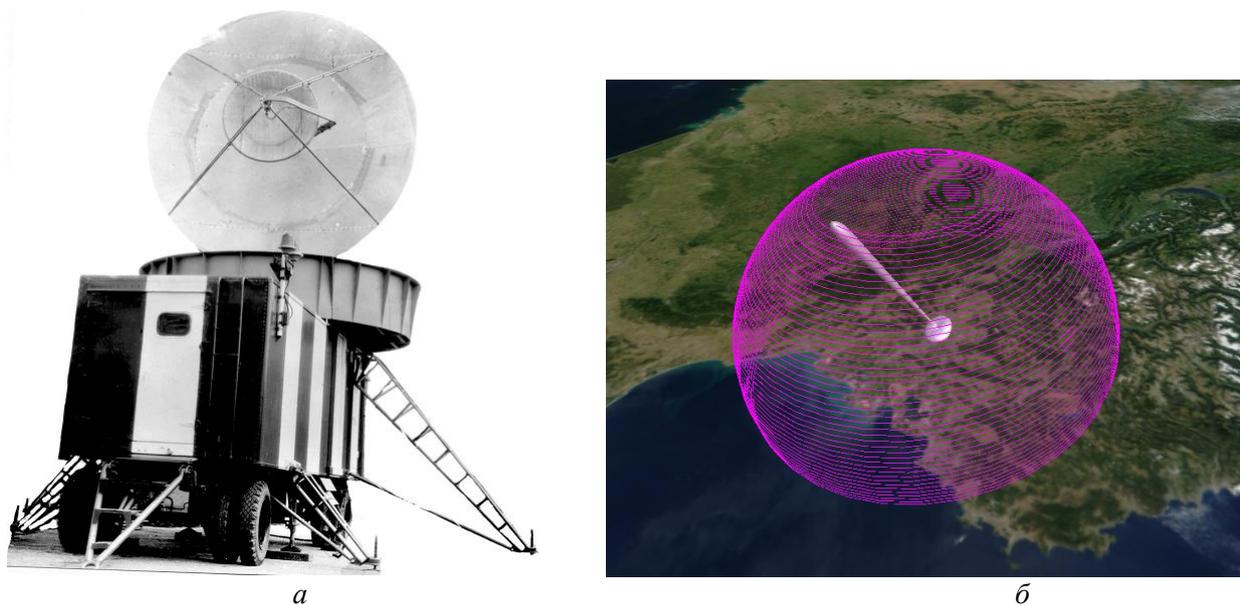


Рис. 1

Перед рассмотрением характеристик, в том числе обзорных, типичного на тот период радиолокатора, выявим минимально необходимые времена для зондирования при разных метрических дальностях действия R импульсных недоплеровских радиолокаторов (см. табл. 1). В табл. 1 $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Приведенные в табл. 1 значения потребных времен являются минимально возможными, к которым нужно стремиться при организации обзора пространства. Уменьшение этих значений приведет к пропуску радиолокационных данных о гидрометеорологической обстановке, а увеличение – ухудшает временные параметры обзора и все иные, связанные с ними, т.е. снижается качество мониторинга.

При указанных в табл. 1 временных параметрах обзора для неавтоматизированных импульсных недоплеровских метеорологических радиолокаторов несложно рассчитать минимально потребные частоты повторения зондирующих импульсов и скорости вращения антенны при разных метрических дальностях действия R радиолокаторов (см. табл. 2). При этом, по мере увеличения угла места диаграммы направленности антенны, скорость враще-

ния $n_{\text{ПОТРЕБ.ОБЗ}}$ должна возрастать, поскольку телесный угол конуса обзора будет уменьшаться и понадобится меньше времени для его обзора, т.е. обзор должен быть программным.

Таблица 1

Минимальное потребное время (в секундах)			Формула для расчета
для однократного зондирования в луче диаграммы направленности антенны	для R=300 км	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$T_{\text{ПОТРЕБ. ЗОНД}} = 2 \cdot R/c$
	для R=250 км	$1,667 \cdot 10^{-3}$	
	для R=100 км	$0,667 \cdot 10^{-3}$	
для однократного кругового обзора при угле места диаграммы направленности антенны $\epsilon=0^\circ$ и ширине диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости по половинной мощности $\beta_{05P}^\circ = 1^\circ$	для R=300 км	0,720	$T_{\text{ПОТРЕБ. ОБЗ}} = (360^\circ/\beta_{05P}^\circ) \cdot T_{\text{ПОТРЕБ. ЗОНД}}$
	для R=250 км	0,601	
	для R=100 км	0,241	
для однократного кругового обзора при угле места диаграммы направленности антенны $\epsilon=0^\circ$ и ширине диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости по половинной мощности $\beta_{05P}^\circ = 1,5^\circ$	для R=300 км	0,480	
	для R=250 км	0,400	
	для R=100 км	0,160	
сканирования телесного угла всей полусферы зоны наблюдения $\Omega_{\text{ЗН}} = 20626, 480625$ кв. градусов при телесном угле диаграммы направленности антенны радиолокатора $\Omega_{\text{ДНА}} = 1$ кв. градус	для R=300 км	41,253	$T_{\text{ПОТРЕБ. ЗН}} = (\Omega_{\text{ЗН}}/\Omega_{\text{ДНА}}) \cdot T_{\text{ПОТРЕБ. ЗОНД}}$
	для R=250 км	34,446	
	для R=100 км	13,820	
для сканирования телесного угла всей полусферы зоны наблюдения $\Omega_{\text{ЗН}} = 20626, 480625$ кв. градусов при телесном угле диаграммы направленности антенны радиолокатора $\Omega_{\text{ДНА}} = 1,5$ кв. градуса	для R=300 км	27,502	
	для R=250 км	22,923	
	для R=100 км	9,172	

Таблица 2

Параметр	R=300 км	R=250 км	R=100 км	Формула для расчета
потребная максимальная частота повторения зондирующих импульсов $F_{\text{ПОТРЕБ.ЗОНД}}$, Гц	500	600	1500	$F_{\text{ПОТРЕБ.ЗОНД}} = 1/T_{\text{ПОТРЕБ.ЗОНД}}$
потребная минимальная скорость вращения антенны при угле места диаграммы направленности антенны $\epsilon=0^\circ$ и ширине диаграммы направленности антенны 1° $n_{\text{ПОТРЕБ.ОБЗ}}$, об/с, [об/мин]	1,39 [83,4]	1,66 [99,6]	4,15 [249,0]	$n_{\text{ПОТРЕБ.ОБЗ}} = 1/T_{\text{ПОТРЕБ.ОБЗ}}$ $[n_{\text{ПОТРЕБ.ОБЗ}} = 60/T_{\text{ПОТРЕБ.ОБЗ}}]$
потребная минимальная скорость вращения антенны при угле места диаграммы направленности антенны $\epsilon=0^\circ$ и ширине диаграммы направленности антенны $1,5^\circ$ $n_{\text{ПОТРЕБ.ОБЗ}}$, об/с, [об/мин]	2,08 [125,0]	2,50 [150,0]	6,25 [375,0]	

В качестве примера рассмотрим характеристики радиолокатора МРЛ-5 [7] как естественного представителя последнего поколения импульсных недоплеровских радиолокаторов (на рис. 1, а он представлен без ветрозащитного укрытия), работавшего в неавтоматизированных радиолокационных сетях, проведем сравнительный анализ с потребными характеристиками обзора и сделаем выводы.

Радиолокатор МРЛ-5 двухканальный, 1-й канал работает с длиной волны 3 см, а 2-й канал с длиной волны 10 см. Импульсная мощность зондирующего излучения 1-го канала $P_{\text{имп.1}}$ может быть в пределах 160 – 300 кВт, а 2-го канала $P_{\text{имп.2}}$ – в пределах 510 – 1000 кВт. Применяются зондирующие импульсы длительностью 1 и 2 мкс. Частоты повторения зондирующих импульсов $F_{\text{ЗОНД}} = 500$ и 250 Гц. Ширина диаграммы направленности антенны в обеих плоскостях одинакова и равна $\beta_{05P} = \epsilon_{05P} = 0,45^\circ$ (1 канал); $1,5^\circ$ (1 и 2 каналы). Дальность

действия радиолокатора по грозам и ливням составляет 300 км. Описание процедур обзора, применяемых в МРЛ-5, сведены в табл. 3.

Таблица 3

Режим обзора	Описание режима	Назначение режима
Автоматический режим	Круговой обзор на любом угле места антенны со скоростью $n_{\text{обз}} = 0 - 6$ об/мин	Обнаружение очагов гроз, ливней, града
	Вертикальное сканирование по углу места от -1° до $+93^\circ$ на любом азимуте с периодом качания 24 – 80 с	Получение данных о вертикальном строении облаков, гроз, града
Программный режим	Программа 1. Автоматический круговой обзор со ступенчатым изменением угла места $\Delta\epsilon$ с шагом $0,5^\circ; 1,5^\circ; 3,0^\circ$	Получение данных об опасных метеорологических явлениях и процессах
	Программа 2. Автоматическое вертикальное сканирование со ступенчатым изменением азимута $\Delta\beta$ с шагом $0,5^\circ; 1,5^\circ; 3,0^\circ$	
Секторный режим	Сканирование по углу места и по азимуту в секторе $45^\circ \dots 48^\circ$ с периодом 12 – 40 с	
Ручной режим	Ручной доворот по азимуту и углу места	Определение границ облаков и положения градового очага для активного воздействия на него

Сравнительный анализ приведенных характеристик с потребными показывает, что частота повторения зондирующих импульсов МРЛ-5 при ее заявленной дальности обнаружения соответствует потребной. При неизменной скорости вращения антенны 6 об/мин, которая явно меньше потребной (см. табл. 2), и работе лучом $1,5^\circ$ в режиме „Программа 1” обзор всей зоны наблюдения займет 600 с (10 мин) при потребном времени 27,5 с (см. табл. 1), а при работе в режиме „Программа 2” обзор всей зоны наблюдения при минимальном периоде качания антенны займет вообще 5760 с (1,6 ч). Таким образом, с точки зрения проведения гидрометеорологического мониторинга обзор в радиолокаторе МРЛ-5 организован явно неоптимальным образом. Потребное время сканирования всей зоны наблюдения превышено в 22 раза, что снижает темп выдачи данных радиолокационного мониторинга и может привести к пропуску быстроразвивающегося опасного процесса или явления, длительность которого может составить всего единицы минут [8].

В качестве вывода можно отметить, что подобные параметры обзора МРЛ-5 позволяют проводить обзорные наблюдения только за достаточно медленными процессами и явлениями в атмосфере. Желание ускорить процесс наблюдения привело к введению в МРЛ-5 режима сканирования по азимуту и углу места через 3° , т.е. фактически через одну диаграмму направленности, что привело к пропуску половины всей информации, которую приходится восстанавливать методами интерполяции. А это ухудшает качество мониторинга. Необходимость наблюдения за быстроменяющимися опасными явлениями, процессами и штормового оповещения вынудила ввести „Секторный режим” работы, который полностью исключает радиолокатор из участия в мониторинге общей метеорологической обстановки, что резко уменьшает количество необходимой информации, т.е. эффективность работы радиолокатора снижается. Из этого следует, что при создании достаточно редкой радиолокационной сети метеорологического мониторинга радиолокатор должен обладать свойством быстрого обзора пространства, что обеспечит выполнение функции штормового оповещения и общего обзора пространства.

2. Анализ процедур обзора пространства в существующих автоматизированных радиолокационных сетях

Наиболее подходящими для проведения анализа представителями автоматизированных метеорологических сетей являются сети МАРС ДМРЛ-С (РФ) и NEXRAD (США), поскольку они построены по единому замыслу из однотипных радиолокаторов.

Радиолокационный обзор на сети ДМРЛ-С проводится синхронно по единому регламенту на всех радиолокаторах ДМРЛ-С работающих в С-диапазоне [9]. Основные характеристики доплеровского радиолокатора ДМРЛ-С, существенные для организации обзора пространства, сведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметр	Значение параметра
Рабочий диапазон частот, МГц	5600 – 5650
<i>Зона обзора</i>	
Инструментальная дальность обнаружения, км, не менее	250
Максимальная высота обнаружения, км, не менее	20
Угол места, град	-2...+91
<i>Антенна</i>	
Тип	зеркальная параболическая
Ширина диаграммы направленности в двух плоскостях по уровню 3 дБ на каждой поляризации, град	1,0
Коэффициент усиления, дБ, не менее	45
Боковые лепестки, дБ, не, более	-29
Поляризация	линейная; гориз. + вертик.
<i>Передатчик</i>	
Тип	клистронный
Импульсная мощность, кВт, не менее	15
Длительность импульса, мкс	1,0; 25; 60
Частота зондирования, Гц	300 – 1500
Тип модуляции	МОНО/НЧМ

Цикл обзора длится 10 мин и включает производство наблюдений в режиме „Отражаемость” и в режиме „Скорость”, в каждом режиме данные наблюдений записываются в т.н. „объемный файл”. Радиус зоны радиолокационного обзора в режиме „Отражаемость” составляет 250 км. Радиолокационные наблюдения в режиме „Скорость” с высокой частотой повторения зондирующих импульсов (1 кГц) обеспечивают более точное измерение доплеровских характеристик (радиальной скорости V , ширины спектра W), однако, при этом сокращается дальность зондирования с 250 до 125 км.

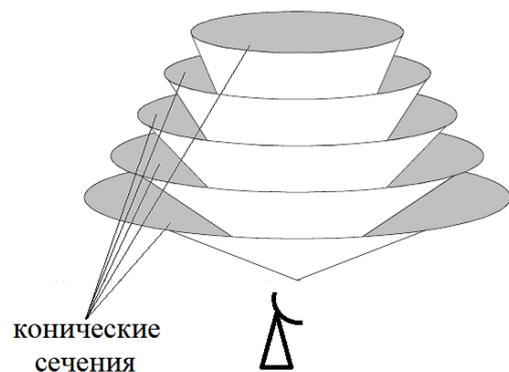


Рис. 2

В каждом обзоре радиолокатор последовательно проводит азимутальное круговое сканирование атмосферы на нескольких углах места антенны в диапазоне от 0 до 90°. В результате, в каждом режиме наблюдений радиолокационные данные записываются в выходном „объемном файле”, в котором в сферической системе координат последовательно для каждого элемента конического сечения сохраняются координаты – дальность, азимут и угол места, а также измеренные радиолокационные характеристики радиозеха, т.е. первичные данные.

Принцип радиолокационного сканирования представлен на рис. 2. Применяется комбинированная стратегия сканирования атмосферы (VCP) в диапазоне углов места антенны от 0,1 до 86°. Для увеличения количества первичных конических сечений (PPI) в VCP используются следующая методика: радиолокационное сканирование начинается с нижнего угла с низкой частотой повторения (НЧП) зондирующих импульсов на дальности до 250 км. По мере подъема антенны рабочая дистанция зондирования до верхней границы зоны обзора (20 км) сокращается и появляется возможность перейти на зондирование с высокой частотой повторения (ВЧП) на сокращенной дистанции до самого верхнего угла 86°. Информацию на этих PPI можно использовать для построения „объемных файлов” обоих режимов – „Отражаемость” и „Скорость”. Для завершения сбора данных в

доплеровском режиме необходимо в конце цикла наблюдений повторить наблюдения на низких углах сканирования с высокой частотой повторения. Подробно процедура сканирования представлена в табл. 5.

Таблица 5

Параметр	Номер обзора	Угол места	Номер обзора	Угол места	Номер обзора	Угол места	Номер обзора	Угол места	Режим	
Обзорное сканирование	1	0,1	14	9,0	18	22,0	25	7,5		
	2	0,3	15	11,2	19	28,0	26	6,0		
	3	0,7	16	14,0	20	35,5	27	4,8		
	4	1,1	17	17,5	21	45,5	28	3,8		
	5	1,5			22	58,0	29	2,9		
	6	1,9			23	72,0	30	2,2		
	7	2,3			24	86,0	31	1,6		
	8	2,8					32	1,1		
	9	3,4					33	0,7		
	10	4,0					34	0,3		
	11	5,0					35	0,1		
	12	6,0								
	13	7,5								
Фзонд	НЧП		ВЧП		ВЧП		ВЧП			
Режим	„Отражаемость”								Измерение шума	Покой
	„Скорость”									
Время операции	~8 мин							30 с		1 мин
Общее время обзора	~10 мин									

При стандартной настройке режимов сканирования за один полный обзор в „объемные файлы” типа „Inr” поступят данные 24 конических сечений (VCP 24) в диапазоне дальностей 0 – 250 км и с радиальной дискретностью 500 м, а в объемные файлы типа „Inv” поступят данные 22 конических сечений (VCP 22) в диапазоне дальностей 0 – 125 км с радиальной дискретностью 250 м.

В последующем в результате обработки „объемных файлов” получается трехмерная модель облачной атмосферы в зоне радиолокационного обзора, с помощью которой строятся вторичные радиолокационные продукты, представляющие собой набор карт метеорологических характеристик облачности и осадков. Точность построенной модели и вторичных продуктов зависит от количества конических сечений, а также от радиального и азимутального разрешения радиолокационных наблюдений.

В нормативной документации [10] предусмотрено вместе с ДМРЛ-С (рис. 3) использовать в составе радиолокационной сети и встроенный метеорологический канал трассового радиолокационного комплекса 12А6 „Сопка-2” (рис. 4).

Этот радиолокатор S-диапазона, так же как и ДМРЛ-С, работает со сложным сигналом длительностью 84 мкс и технологией сжатия импульсов. Поэтому импульсная мощность зондирующего излучения составляет всего 40 кВт. Дальность действия по самолетам в качестве первичного радиолокатора составляет 360 км. Частоты повторения зондирующих импульсов 300 и 600 Гц. 12А6 также является доплеровским радиолокатором и обеспечивает получение в метеоканале трехмерных полей отражаемости и радиальной скорости гидрометеоров [11]. По утверждению разработчиков, достоинством метеорологического канала 12А6 является возможность получать трехмерную структуру облаков за 10 с. Это достигается благодаря быстрому электронному сканированию лучом шириной 1,15° 32 углов места в угломестном секторе 45° и вращению антенной фазированной решетки безредукторным способом по азимуту со скоростью 6 об/мин.



Рис. 3



Рис. 4

Такое высокое временное разрешение позволяет получить детальную информацию о таких скоротечных опасных явлениях как град, гроза, смерч, ураган, эволюции пространственного строения конвективных ячеек и структуры воздушных потоков в них, повысить точность измерения количества осадков из конвективных облаков, имеющих большую пространственно-временную изменчивость, осуществить раннее обнаружение потенциально градоопасных облаков, что не удастся на МРЛ-5 и ДМРЛ-С с циклами обзора 5 и 10 мин. Первичная информация в 12А6 представляет собой набор значений средней мощности радиоэха, средней доплеровской скорости и ширины спектра в 360 секторах азимута по 400 элементам дальности и 32 коническим сечениям.

В сети NEXRAD применяются доплеровские радиолокаторы WSR-88D (рис. 5), работающие в S-диапазоне [12]. Его основные технические характеристики:

- дальность действия в режиме измерения отражаемости составляет 460 км (хотя при такой дальности не приходится говорить об измерениях из-за крайне низкой разрешающей способности и большой геометрической тени), по всей видимости, только для высоких мощных гроз;

- дальность действия в режиме измерения доплеровской частоты – 230 км; ширина диаграммы направленности антенны – $0,93^\circ$;

- импульсная мощность зондирующего излучения – 750 кВт; длительность зондирующего импульса – 1,75 мкс и 4,5 мкс;

- дискретность данных по азимуту 1° , а по дальности 0,25 км; пределы измерения по азимуту $0^\circ - 360^\circ$, по углу места $0,5^\circ - 19,5^\circ$;

- максимальная скорость разворота антенны в любой из плоскостей 30 град/с или 5 об/мин;

- диапазон измерения доплеровских скоростей при разрешающей способности по доплеровской скорости $0,5$ м/с составляет ± 62 м/с (в обычных погодных условиях), а при разрешающей способности по доплеровской скорости $1,0$ м/с – ± 126 м/с (при ожидании тропического шторма ухудшают разрешающую способность по скорости, чтобы добиться большего диапазона однозначных измерений доплеровской скорости);

- режимы обзора пространства: а) измерение отражаемости при длительном времени обзора пространства – т.н. режим чистого воздуха VCR-31 длительностью 10 мин, б) измерение отражаемости, средней доплеровской скорости и ширины спектра при умеренном темпе обзора пространства – т.н. режим обнаружения осадков VCR-21 длительностью 6 мин, в) измерение отражаемости, средней доплеровской скорости и ширины спектра при малом времени



Рис. 5

- режимы обзора пространства: а) измерение отражаемости при длительном времени обзора пространства – т.н. режим чистого воздуха VCR-31 длительностью 10 мин, б) измерение отражаемости, средней доплеровской скорости и ширины спектра при умеренном темпе обзора пространства – т.н. режим обнаружения осадков VCR-21 длительностью 6 мин, в) измерение отражаемости, средней доплеровской скорости и ширины спектра при малом времени

- режимы обзора пространства: а) измерение отражаемости при длительном времени обзора пространства – т.н. режим чистого воздуха VCR-31 длительностью 10 мин, б) измерение отражаемости, средней доплеровской скорости и ширины спектра при умеренном темпе обзора пространства – т.н. режим обнаружения осадков VCR-21 длительностью 6 мин, в) измерение отражаемости, средней доплеровской скорости и ширины спектра при малом времени

обзора пространства – т.н. режим обнаружения опасной погоды VCR-12 длительностью 4 – 5 мин, причем во всех режимах может проводиться как азимутальное, так и угломестное сканирование пространства с указанными скоростями. Режим сканирования VCR-12 радиолокатора WSR-88D подробно представлен в табл. 6.

Таблица 6

Номер обзора	Угол места, град	$F_{\text{зонд}}$, Гц	Однозначная дальность, км	Однозначная скорость, м/с	Примечания
1	0,5	322	466		Измерение отражаемости
2	0,5	1014	148	25,4	Измерение скорости (пульсарный метод)
3	0,9	322	466		Измерение отражаемости
4	0,9	1014	148	25,4	Измерение скорости (пульсарный метод)
5	1,3	322	466		Измерение отражаемости
6	1,3	1014	148	25,4	Измерение скорости (пульсарный метод)
7	1,8	1014	148	25,4	Измерение скорости (метод чередования малой и большой частоты повторения, т.е. межимпульсных интервалов, зондирующих импульсов на каждом радиусе за время одного полного оборота на каждом угле места – вобуляция)
8	2,4	1014	148	25,4	
9	3,1	1014	148	25,4	
10	4,0	1014	148	25,4	
11	5,1	1014	148	25,4	
12	6,4	1014	148	32,1	
13	8,0	1905	137	27,4	Измерение скорости (пульсарный метод)
14	10,0	1811	127	29,6	
15	12,5	1282	117	32,1	
16	15,6	1282	117	32,1	
17	19,5	1282	117	32,1	
Скорость вращения антенны переменная – средняя скорость вращения антенны составляет 4,1 об/мин.					
Общее время сканирования составляет 4,2 мин.					

Режим работы радиолокатора и собираемая информация зависят от метеорологической ситуации. Сканирование обеспечивает получение до 20 конических сечений – РРІ – с количеством данных об отражаемости в каждом коническом сечении $360^\circ \times 460\text{км}$ или выраженное в элементах разрешения 360×1840 , и с количеством данных о радиальной скорости в каждом коническом сечении $360^\circ \times 230\text{км}$ или выраженное в элементах разрешения 360×920 .

Анализ показал, что в автоматизированных радиолокационных сетях используются только доплеровские радиолокаторы. Для измерения доплеровской частоты требуется, чтобы в элементе разрешения была получена пачка отраженных от объекта импульсов. Размер пачки, в зависимости от применяемого метода измерения доплеровской частоты, меняется от двух импульсов при комплексном автоковариационном методе (иначе – пульсарном методе) и при методе вобуляции до 12 – 16 импульсов и более при спектральном методе для обеспечения требуемой точности измерения. С целью уменьшения дисперсии ошибок измерения количество импульсов в пачке может быть доведено до 50 и более. На примере WSR-88D определим размер получающейся пачки импульсов при работе в режиме VCR-12. Рабочая длина волны этого радиолокатора примерно 10 см, частоту зондирующих импульсов для простоты расчетов примем равной 1000 Гц, скорость вращения антенны полагаем 3 об/мин и угол места антенны $\varepsilon=0^\circ$. Время одного оборота антенны (360°) составит 20 с. Значит, за это время будет проведено $20 \cdot 1000 = 20000$ радиальных зондирований. При этом на ширину диаграммы направленности антенны ($0,93^\circ$) придется $20000 / (360^\circ / 0,93^\circ) = 52$ зондирования, т.е. в пачке будет 52 отсчета в выборке для оценки. В пачке осуществляется когерентное накопление сигнала для повышения отношения сигнал/шум, оценивается доплеровская скорость и ширина спектра доплеровских частот, а большое количество отсчетов уменьшает дисперсию измеренных значений. Однако необходимость накопления пачки отраженных импульсов приводит к необходимости замедления темпа обзора, и степень снижения темпа обзора пропорциональна потребному количеству импульсов в пачке. Поэтому данные табл. 1 и 2 легко могут быть пересчитаны для доплеровских радиолокаторов. В табл. 7 представлены данные (по табл. 1 и 2) при применении в радиолокаторе комплекс-

ного автоковариационного метода измерения доплеровской частоты. Для ДМРЛ-С наблюдается аналогичная картина.

Таблица 7

Параметр	Для R=300 км	Для R=250 км	Для R=100 км
$T_{\text{ПОТРЕБ.ЗОНД}}, \text{ с}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$3,334 \cdot 10^{-3}$	$1,334 \cdot 10^{-3}$
$T_{\text{ПОТРЕБ.ОБЗ}}, \text{ с}$ при $\varepsilon=0^\circ$ и $\beta_{05P} = 1^\circ$	1,440	1,202	0,482
$T_{\text{ПОТРЕБ.ОБЗ}}, \text{ с}$ при $\varepsilon=0^\circ$ и $\beta_{05P} = 1,5^\circ$	0,960	0,800	0,320
$T_{\text{ПОТРЕБ.ЗН}}, \text{ с}$ при $\Omega_{\text{ДНА}} = 1$ кв. градус	82,506	68,892	27,640
$T_{\text{ПОТРЕБ.ЗН}}, \text{ с}$ при $\Omega_{\text{ДНА}} = 1,5$ кв. градуса	55,004	45,846	18,344
$F_{\text{ПОТРЕБ.ЗОНД}}, \text{ Гц}$	500	600	1500
$n_{\text{ПОТРЕБ.ОБЗ}}, \text{ об/с, [об/мин]}$ при $\varepsilon=0^\circ$ и $\beta_{05P} = 1^\circ$	0,70 [41,7]	0,83 [49,8]	2,08 [124,5]
$n_{\text{ПОТРЕБ.ОБЗ}}, \text{ об/с, [об/мин]}$ при $\varepsilon=0^\circ$ и $\beta_{05P} = 1,5^\circ$	1,04 [62,5]	1,25 [75,0]	3,13 [187,5]

В качестве вывода можно отметить, что применение доплеровской обработки в радиолокаторе приводит к уменьшению потребного темпа обзора пространства (табл. 1, 2, 7). И даже при увеличении потребного времени на обзор пространства существующие радиолокаторы имеют на порядок большее время обзора, чем требуется, что ухудшает качество получаемой радиолокационной информации. Желание увеличить темп выдачи данных приводит конструкторов к реализации сложной схемы сканирования с изменением частот повторения зондирующих импульсов и к многорежимности радиолокаторов, что их усложняет и удорожает, и приводит к пропуску информации в обзоре, которую приходится восстанавливать за счет интерполирования и экстраполирования недостающих данных, что также ухудшает их качество. Применение электронных способов сканирования в значительной степени может улучшить временные показатели обзора пространства.

3. Обоснование процедур обзора пространства наблюдения при системном подходе к построению метеорологической радиолокационной системы мониторинга

Системный подход к построению метеорологической радиолокационной системы мониторинга позволяет не выделять одну или несколько главных задач мониторинга, а решать все возможные задачи по всей охваченной наблюдениями территории. При этом круг задач будет ограничен только потенциальными возможностями радиолокаторов, поскольку вся возможная радиолокационная информация заключена в эхо-сигналах на выходе антенной системы радиолокационной станции, а вся последующая обработка может, в идеальном случае, сохранить, но не увеличить количество радиолокационной информации [3]. Кроме того, применение системного подхода к созданию метеорологической радиолокационной системы мониторинга позволяет получить системный эффект в виде экономного расходования энергии зондирующего излучения, оптимального покрытия радиолокационным полем пространства наблюдений без ухудшения при этом показателей качества информации. При системном построении системы мониторинга исчезает понятие радиогоризонта, уменьшается влияние крупномасштабного рельефа местности, снижается воздействие осадков на возможности мониторинга. Уменьшение потребной дальности действия метеорологической радиолокационной станции улучшает пространственную разрешающую способность внутри системы и позволяет резко понизить импульсную мощность зондирующего излучения, что уменьшит опасность системы для человека, т.е. системный подход в значительной мере позволяет ослабить ограничения, присущие радиолокационному методу получения метеорологической информации.

Чтобы реализовать указанные преимущества, необходимо соответствующим образом провести обзор пространства наблюдения.

Из отмеченного следует, что потребная нижняя граница радиолокационного поля достигается при дальности действия радиолокатора 100 км [13]. Кроме того, достоверное измерение осадков производится в радиусе до 100 км, а за пределами 100 км измеренная отражае-

мость Z_1 может трактоваться как осадки или как облачность, т.е. неоднозначно [9]. Поэтому нет необходимости делать дальность видимости радиолокатора более 100 км. Достигнутая в современных радиолокаторах ширина диаграммы направленности антенн в 1° также обеспечивает потребные разрешающую способность и точность измерений. Дальнейшее уменьшение ширины диаграммы направленности антенн приводит к увеличению габаритных размеров антенн с последующими техническими и финансовыми трудностями. При достаточном энергетическом потенциале радиолокатора можно достичь отношения сигнал/шум, превышающего 10 дБ, при котором измерения переходят в разряд регулярных, а не статистических. В этом случае нет необходимости осуществлять длительное накопление пачки принимаемых импульсов для уменьшения дисперсии ошибки измерения. Поэтому вполне естественной будет пачка из 15 – 16 импульсов, которая позволит применить для измерения доплеровской частоты самый затратный по времени накопления данных спектральный метод. Во избежание необходимости применять методы восстановления информации сканирование предусматривается осуществлять без пропусков.

Оценим средства обзора пространства радиолокатором с характеристиками, описанными в предыдущем абзаце.

Обзор может проводиться с применением ставших классическими в радиометеорологии антенн с параболическими отражателями или с применением фазированных антенных решеток (ФАР). Антенны могут быть как однолучевыми, так и многолучевыми. Следует отметить, что применение многолучевых систем предусматривает параллельный прием сигналов и для этого требуется излучать зондирующие импульсы либо в каждом луче, что потребует увеличения числа передающих устройств, либо отдельным слабонаправленным излучателем с большой единичной мощностью [14]. Все это усложнит и удорожит радиолокатор, особенно с ФАР, поскольку для него понадобится сложная диаграммообразующая схема (ДОС). Наличие ДОС потребует увеличения мощности передающего устройства из-за увеличения потерь.

Таким образом, учитывая, что и у зеркальных антенн, и у ФАР есть свои достоинства и недостатки, рассмотрим организацию обзора обоими типами антенных систем. Рассмотрим



Рис. 6

организацию обзора пространства наблюдения с применением четырехлучевой зеркальной антенны по типу ПОРЛ-17 [15] (рис. 6). Среди ФАР рассмотрим организацию обзора с помощью антенны, осуществляющей механическое вращение в азимутальной плоскости и быстрое угломестное сканирование луча диаграммы направленности аналогично 12А6 (рис. 7), а также антенны, осуществляющей электронное сканирование по азимуту и углу места (рис. 8). Проанализируем два варианта построения радиолокационной системы мониторинга: а) при размещении радиолокаторов в вершинах наложенной на местность треугольной сетки с незначительным перекрытием зон наблюдения соседних радиолокаторов [16], что соответствует или очень близко к существующим радиолокационным сетям – назовем этот вариант построения прореженной радиолокационной сетью; б) при размещении радиолокаторов в вершинах наложенной на местность шестиугольной сетки на расстоянии дальности действия радиолокаторов – назовем этот вариант построения плотной или устойчивой радиолокационной сетью, в которой сформированное радиолокационное поле будет устойчивым по отношению к внешним воздействиям и к техническому состоянию радиолокаторов [17].

организацию обзора пространства наблюдения с применением четырехлучевой зеркальной антенны по типу ПОРЛ-17 [15] (рис. 6). Среди ФАР рассмотрим организацию обзора с помощью антенны, осуществляющей механическое вращение в азимутальной плоскости и быстрое угломестное сканирование луча диаграммы направленности аналогично 12А6 (рис. 7), а также антенны, осуществляющей электронное сканирование по азимуту и углу места (рис. 8). Проанализируем два варианта построения радиолокационной системы мониторинга: а) при размещении радиолокаторов в вершинах наложенной на местность треугольной сетки с незначительным перекрытием зон наблюдения соседних радиолокаторов [16], что соответствует или очень близко к существующим радиолокационным сетям – назовем этот вариант построения прореженной радиолокационной сетью; б) при размещении радиолокаторов в вершинах наложенной на местность шестиугольной сетки на расстоянии дальности действия радиолокаторов – назовем этот вариант построения плотной или устойчивой радиолокационной сетью, в которой сформированное радиолокационное поле будет устойчивым по отношению к внешним воздействиям и к техническому состоянию радиолокаторов [17].



Рис. 7

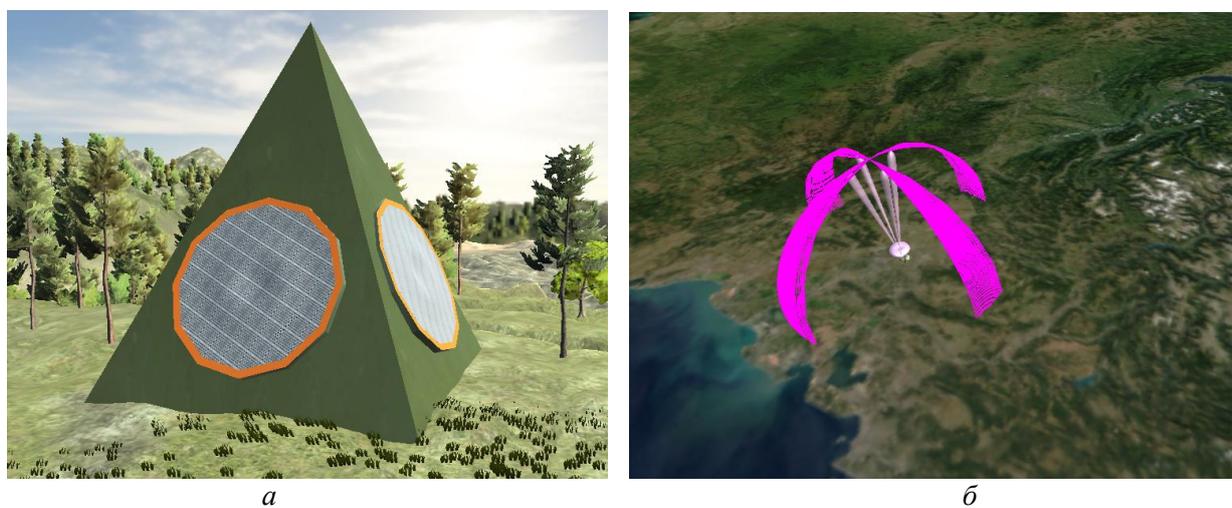


Рис. 8

В обоих случаях при одинаковой дальности действия радиолокаторов будут обеспечены требования к покрытию радиолокационным полем пространства наблюдения, к пространственной разрешающей способности и точности измерения. Отличие будет во временных параметрах обзора, поскольку сканировать придется существенно отличающиеся по размерам зоны наблюдения. Для варианта прореженной сети это будет все полушарие, а для варианта плотной сети это будет часть полушария, образованного круговым вращением двух радиусов, одного под углом места 0° , а другого под углом места 27° , ограниченного внешним сферическим поясом [5]. То есть максимальный угол места диаграмм направленности радиолокаторов не будет превышать 27° , в этом случае обеспечивается достижение верхней границы безразрывного радиолокационного поля. Для обоих вариантов построения следует оценить степень приближения временных параметров обзора к оптимальным, рассчитанным на основе соображений, по которым построены табл. 1 и 2.

С учетом изложенного были проведены расчеты и определены временные характеристики обзора для прореженной и плотной (устойчивой) радиолокационных сетей.

В табл. 8 представлены результаты для прореженной радиолокационной сети для всех четырех указанных вариантов беспровального сканирования при условии однозначного определения дальности до метеорологических объектов на расстоянии до 100 км. Ширина диаграммы направленности антенны полагалась равной 1° , измерения полагались регулярными. При этом расчеты проведены при использовании для измерения доплеровской частоты самого затратного по времени накопления данных спектрального метода. Этот метод выбран по-

тому, что при его использовании все-таки формируется некоторая пачка принятых отраженных импульсов, что позволяет обрабатывать данные при снижении отношения сигнал/шум. Применение пульсарного метода измерения даст иные результаты, о которых будет сказано ниже.

Таблица 8

Прореженная радиолокационная сеть				
Тип антенны, вариант сканирования	Зеркальная, механическое вращение по азимуту одного луча с медленным подъемом его по углу места (рис. 1)	Зеркальная, механическое вращение по азимуту четырех лучей с медленным подъемом их по углу места (рис. 6)	ФАР, механическое вращение по азимуту одного луча с быстрым электронным сканированием его по углу места (рис. 7)	ФАР, быстрое электронное сканирование одного луча по азимуту и по углу места (рис. 8)
Минимальное потребное время (в секундах)	I	II	III	IV
	потребное значение параметра ----- реализуемое значение параметра			
необходимое для однократного зондирования в луче диаграммы направленности антенны, $T_{\text{ПОТРЕБ. ЗОНД}}$	$0,667 \cdot 10^{-3}$			
	$0,667 \cdot 10^{-3}$	$0,667 \cdot 10^{-3}$	$0,667 \cdot 10^{-3}$	$0,667 \cdot 10^{-3}$
необходимое для многократного зондирования в луче диаграммы направленности антенны для накопления 15-ти импульсов пачки, $T_{\text{ПОТРЕБ. ПАЧ}}$	$10 \cdot 10^{-3}$			
	$10 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$
необходимое для однократного кругового обзора при угле места диаграммы направленности антенны $\varepsilon=0^\circ$, $T_{\text{ПОТРЕБ. ОБЗ}}$	3,6			0,9
	3,6	3,6	3,6	0,9
необходимое для сканирования телесного угла всей полусферы зоны наблюдения $\Omega_{\text{ЗН ПР}} = 20626, 480625$ кв. градусов, $T_{\text{ПОТРЕБ. ЗН ПР}}$, [мин]	206 [3,43]			51,5 [0,86]
	324 [5,4]	81 [1,35]	324 [5,4]	18 [0,3]
потребная максимальная частота повторения зондирующих импульсов, $F_{\text{ПОТРЕБ. ЗОНД}}$, Гц	1500			
	1500	1500	1500	1500
потребная минимальная скорость вращения антенны при угле места диаграммы направленности антенны $\varepsilon=0^\circ$, $n_{\text{ПОТРЕБ. ОБЗ}}$, об/с, [об/мин]	0,28 [16,7]			-
	0,28 [16,7]	0,28 [16,7]	0,28 [16,7]	-

В табл. 9 представлены результаты для плотной (устойчивой) радиолокационной сети для всех четырех указанных вариантов беспровального сканирования пространства при всех условиях, соблюденных для табл. 8.

Проанализируем полученные результаты.

Для обоих типов сетей и для всех четырех вариантов сканирования пространства время однократного сканирования в луче диаграммы направленности антенны будет одинаковым ввиду применения во всех случаях радиолокационного метода зондирования. Это время автоматически задает частоту повторения зондирующих импульсов. Одинаковым будет и время накопления пачки отраженных сигналов. Оба эти параметра легко реализуемы. Для случая прореженной радиолокационной сети время, необходимое для однократного кругового обзора при нулевом угле места диаграммы направленности антенны, обуславливает потребную минимальную скорость вращения антенны. При увеличении угла места антенны

уменьшается величина обзореваемого телесного угла, поэтому и так немалую для механических антенных систем скорость вращения в 16,7 об/мин надо увеличивать, чтобы сохранить параметры пачки импульсов.

Таблица 9

Плотная или устойчивая радиолокационная сеть				
Тип антенны, вариант сканирования	Зеркальная, механическое вращение по азимуту одного луча с медленным подъемом его по углу места (рис. 1)	Зеркальная, механическое вращение по азимуту четырех лучей с медленным подъемом их по углу места (рис. 6)	ФАР, механическое вращение по азимуту одного луча с быстрым электронным сканированием его по углу места (рис. 7)	ФАР, быстрое электронное сканирование одного луча по азимуту и по углу места (рис. 8)
Минимальное потребное время (в секундах)	I	II	III	IV
	потребное значение параметра ----- реализуемое значение параметра			
необходимое для однократного зондирования в луче диаграммы направленности антенны, $T_{\text{ПОТРЕБ. ЗОНД}}$	$0,667 \cdot 10^{-3}$			
	$0,667 \cdot 10^{-3}$	$0,667 \cdot 10^{-3}$	$0,667 \cdot 10^{-3}$	$0,667 \cdot 10^{-3}$
необходимое для многократного зондирования в луче диаграммы направленности антенны для накопления 15-ти импульсов пачки, $T_{\text{ПОТРЕБ. ПАЧ}}$	$10 \cdot 10^{-3}$			
	$10 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$
необходимое для однократного кругового обзора при угле места диаграммы направленности антенны $\varepsilon=0^\circ$, $T_{\text{ПОТРЕБ. ОБЗ}}$	3,6			0,9
	3,6	3,6	3,6	0,9
необходимое для сканирования телесного угла части полушария, образованного круговым вращением двух радиусов, одного под углом места 0° , а другого под углом места 27° , ограниченного внешним сферическим поясом, $\Omega_{\text{ЗН ПЛ}} = 9282$ кв. градусов, $T_{\text{ПОТРЕБ. ЗН ПЛ}}$, [мин]	93 [1,55]			23,2 [0,39]
	97 [1,62]	24 [0,4]	97 [1,62]	18 [0,3]
потребная максимальная частота повторения зондирующих импульсов, $F_{\text{ПОТРЕБ. ЗОНД}}$, Гц	1500			
	1500	1500	1500	1500
потребная минимальная скорость вращения антенны при угле места диаграммы направленности антенны $\varepsilon=0^\circ$, $n_{\text{ПОТРЕБ. ОБЗ}}$, об/с, [об/мин]	0,28 [16,7]			-
	0,28 [16,7]	0,28 [16,7]	0,28 [16,7]	-

Процесс увеличения скорости вращения в зависимости от угла места антенны представлен на рис. 9. Для удобства отображения график построен до угла 80° , поскольку увеличение угла до 90° обусловит увеличение скорости до 2000 об/мин, что неудобно отображать в представленном масштабе. Подобные скорости вращения антенных систем при существующих их массогабаритных характеристиках мало реальны, поскольку потребуются сложные меры безопасности, балансировка вращающихся масс при изменении их угла места и прочие мероприятия, усложняющие и удорожающие антенные системы.

Для случая прореженной радиолокационной сети с однолучевым медленным сканированием по углу места (варианты сканирования I и III) минимальное потребное время, необходимое для сканирования телесного угла всей полусферы зоны наблюдения, реализовать не

получится по той причине, что приходится сканировать в телесном угле полусферы все 20626,480625 кв. градусов без потребного увеличения скорости вращения антенны, а без

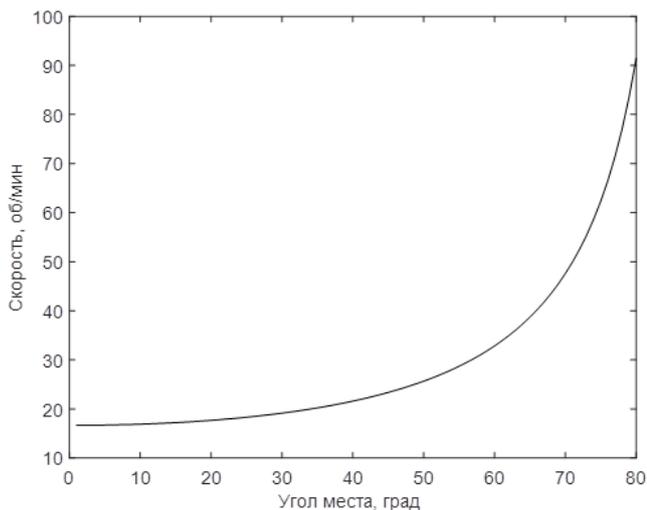


Рис. 9

Для случая плотной или устойчивой радиолокационной сети время, необходимое для однократного кругового обзора при нулевом угле места диаграммы направленности антенны, также обуславливает потребную минимальную скорость вращения антенны. Но сканировать в этом случае нужно уже не всю полусферу, а только ее часть, а именно 9282 кв. градусов. Но даже для этого случая варианты сканирования I и III не обеспечивают реализацию потребного времени сканирования зоны наблюдения, а варианты сканирования II и IV обеспечивают реализацию потребного времени сканирования зоны наблюдения. Однако, как и для рассмотренного выше варианта построения сети, при применении I, II и III способов сканирования время обзора невозможно сделать менее 93 с, или 1,55 мин. А вариант сканирования IV при всех вариантах построения сети позволяет уложиться с обзором зоны наблюдения в 18 с.

Следует отметить, что применение пульпарного метода измерения доплеровской частоты при достаточно большом отношении сигнал/шум изменит параметры сканирования. Время накопления пачки составит $1,334 \cdot 10^{-3}$ с, и тогда минимальное потребное время, необходимое для однократного кругового обзора при нулевом угле места диаграммы направленности антенны, составит 0,48 с, что задаст минимальную скорость вращения антенны в 125 об/мин. Потребное время сканирования полусферы составит 28 с. Из табл. 8 и 9 понятно, что такие параметры обзора могут быть обеспечены только сканированием по варианту IV, поскольку применение механических систем вращения при таких требованиях к скорости вращения антенны затруднено.

Выводы

При построении системы мониторинга, как на основе системного подхода, так и без его применения, наилучшее качество обзора пространства обеспечит применение фазированных антенных решеток с быстрым электронным сканированием, причем при автономной работе радиолокатора только этот способ обзора обеспечит требуемое качество данных. При снижении требований потребителя радиолокационной информации к времени полного обзора пространства до 2 – 3 мин становится возможным проводить обзор пространства с применением фазированных антенных решеток с механическим сканированием по азимуту и многолучевых зеркальных антенн. При снижении заказчиком требований к времени полного обзора и допущению провалов в обзоре допустимо применение всех описанных вариантов обзора.

Заключение

На основе проведенных исследований представляется целесообразным провести работу по анализу выдаваемого информационного потока от метеорологического радиолокатора и, в

увеличения скорости вращения эквивалентное количество сканируемых кв. градусов возрастает до 32400. Применение вариантов сканирования II (многолучевое сканирование) и IV (ФАР с электронным сканированием) позволяет реализовать потребное значение параметра. Для случая прореженной радиолокационной сети надо помнить, что при применении I, II и III способов сканирования время обзора невозможно сделать менее 206 с, или 3,43 мин. А для быстроразвивающихся опасных процессов вертикального развития это может оказаться очень много и при необходимости активного воздействия на него время может быть упущено.

дальнейшем, – по обоснованию тактико-технических требований к метеорологическому радиолокатору, на основе которого можно строить радиолокационную систему гидрометеорологического мониторинга атмосферы.

Список литературы:

1. Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации: Монография ГГО им. А.И. Воейкова ; под ред. Г.Г. Шукина. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1991. 373 с.
2. Базлова Т.А., Бочарников Н.В., Брылев Г.Б. [и др.] Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети : монография ИРАМ ; под редакцией Г.Б. Брылева. С.-Петербург : Гидрометиздат, 2002. 332 с.
3. Perelygin V.V. Implementation of systematic approach in the creation of radar systems of meteorological monitoring // Telecommunications and radio engineering. 2018. Vol. 77. № 3. P. 199–209. Doi: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i3.20.
4. Перельгин Б.В., Лужбин А.М. Построение сплошного радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга на основе геометрического подхода // Радиотехника. 2017. № 191. С. 173–180.
5. Перельгин Б.В. Рациональное распределение энергии зондирующего излучения в пространстве наблюдения системы гидрометеорологического мониторинга // Радиотехника. 2018. № 194. С. 12–18.
6. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2 и МРЛ-5: Руководящий документ РД 52.04.320-91. С.-Петербург : Гидрометеоиздат, 1993. 358 с.
7. Метеорологический радиолокатор МРЛ-5. Техническое описание 1 230 032 ТО. Москва : ЛЭМЗ, 1983. 26 с.
8. Поморцева А.А., Калинин Н.А. Аналитический обзор современного состояния исследований шквалов: условия возникновения, методы диагноза и прогноза // Географический вестник = Geographical bulletin. 2016. № 3(38). С. 90–104. Doi 10.17072/2079-7877-2016-3-90-104
9. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. Вторая редакция. Режим доступа: <http://www.meteorad.ru/static/VMU-DMRL-180503.pdf> Дата доступа: 01.03.2019. Нормативный документ.
10. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Баркова М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик : Печатный двор, 2014. 508 с.
11. Ефремов В.С., Вылегжанин И.С., Соловьев А.Е., Оприков Е.М., Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Тезадов С.М. Метеорологический канал трехкоординатного трассового радиолокационного комплекса двойного назначения „Сопка-2” // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля природной среды. Труды II Всерос. конф. Т. I. С.-Петербург, 24–26 апреля 2012 года. С.-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. С. 381–386.
12. Weather Radar Technology Beyond NEXRAD (2002). Chapter: APPENDIX A: Front Matter NEXRAD WSR-88D System Characteristics. Режим доступа: <https://www.nap.edu/read/10394/chapter/11> Дата доступа: 05.03.2019.
13. Perelygin, B.V. Reasonable deployment of radar field for environmental monitoring system // Telecommunications and radio engineering. 2016. Vol. 75. № 9. P. 823–833. Doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i9.70.
14. Шишлов А.В., Левитан Б.А., Топчиев С.А., Анпилогов В.Р., Денисенко В.В. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/6/text.pdf> Дата доступа: 13.03.2019.
15. Литвинов В.В., Клименко В.И., Зюкин В.Ф. Об использовании основных ресурсов в отечественных обзорных радиолокаторах S и L диапазонов волн // Прикладная радиоэлектроника. 2010. Т. 9. № 4. С. 497–506.
16. Перельгин Б.В. Способ создания радиолокационной сети для гидрометеорологического мониторинга атмосферы // Радиотехника. 2019. № 196. С. 38–45.
17. Перельгин Б.В. Обеспечение устойчивости радиолокационного поля при построении системы гидрометеорологического мониторинга // Радиотехника. 2018. № 192. С. 21–27.

*Одесский государственный
экологический университет*

Поступила в редколлегию 23.05.2019