

ISSN 0320-9601

Антенны

Выпуск 1 (42)
1999



Тел./факс: (095) 925-9241
Эл. почта: zaoiprzhr@glasnet.ru
<http://www.glasnet.ru/~zaoiprzhr/>

УДК 621.396.67

Большая радиолокационная ФАР миллиметрового диапазона волн

А. А. Толкачев, В. А. Макота, М. П. Павлова, А. М. Николаев, В. В. Денисенко, Г. К. Соловьев

Описана, по-видимому, самая большая в мире антенна ММ-диапазона волн (ММДВ) с фазированной решеткой; сканирование лучом комбинированное: электронное в узком секторе и механическое в широком: приведены технические характеристики антенны и основных составных частей; описаны особенности работы.

This paper describes apparently the greatest in the world millimeter wave (MMW) antenna with phased array. The beam steering is combined: electronic in narrow sector and mechanical in wide sector. The technical performances of antenna and their components are presented, the operating features are described.

Введение. Продвижение радиоэлектронных средств в более высокочастотные диапазоны является одной из устойчивых тенденций развития современной радиоэлектроники. Создание радиолокационных станций (РЛС) в ММ-диапазоне волн позволяет с одной стороны обеспечить высокую концентрацию энергии зондирующего сигнала в пространстве, расширить спектр излучаемых сигналов, увеличить доплеровское смещение частоты и радикально улучшить на этой базе основные технические характеристики РЛС: дальность действия по одиночному объекту, точность измерения координат, избирательность и устойчивость к помехам различных типов. С другой стороны это открывает возможности для создания более миниатюрных средств, прежде всего путем уменьшения размеров антенных систем, что также отвечает современным тенденциям развития радиоэлектронных средств [1].

Наиболее сложным и дорогим элементом современных многоканальных РЛС продолжает оставаться антенная система, включающая в себя в качестве основного элемента фазированную антенную решетку (ФАР). Это характерно для больших РЛС, у которых размер антенного полотна составляет несколько сотен или даже тысяч длин волн. В статье рассмотрены технические проблемы, которые были разрешены при создании и последующих испытаниях в составе РЛС большой ФАР ММДВ.

Основные задачи. Разработка антенной системы — одна из основных задач создания мощного радиолокатора длинноволновой части ММДВ (диапазон Ка). При этом преследовались цели:

разработать антенну с эффективностью близкой к зеркальной, но способную обеспечить обнаружение и сопровождение нескольких целей автономно или по данным внешних целеуказаний с характеристиками, принятыми для обычных РЛС СМ-диапазона волн;

изучение возможности снижения точности изготовления раскрыва и компенсации деформаций путем электрической фазировки элементов;

исследование возможных структур антенных устройств с ФАР, в том числе и для систем с широкоугольным сканированием [2];

разработка ММДВ элементов для ФАР;

отработка алгоритмов и программ управления ФАР ММДВ, методики их настройки, а также обеспечение контроля работоспособности.

Радиолокатор с рассматриваемой антенной должен обеспечить работу в ближнем Космосе по ИСЗ, космическим кораблям и другим объектам, для чего импульсный потенциал его составляет не менее 250 дБм². Поэтому антенна должна работать с мощными импульсными передатчиками [3] и иметь низкие потери сигнала от апертуры до малошумящих усилителей при работе на прием. Близкой по назначению является антенна ММДВ радиолокатора из комплекса KREMS на атолле Кваджелейн, выполненная на базе рефлектора диаметром 13,7 м [4].

Основные технические решения. В связи с тем, что зеркальные антенны не отвечают основным требованиям, сформулированным выше, был рассмотрен и принят к реализации вариант ФАР. Разумный компромисс между стоимостью антенны и ее функциональными возможностями достигнут благодаря использованию приемопередающей решетки с большим шагом расположения элементов (модулей) и узким сектором электронного сканирования и опорно-поворотного устройства (ОПУ) с широким сектором механического сканирования. Общий вид антенны приведен на рис. 1 (где 1 — опорно-поворотное устройство; 2 — аппаратура управления лучом; 3 — волноводные тракты; 4 — приемник; 5 — вторичные источники питания; 6 — контейнер; 7 — подрешетка; 8 — антенный модуль; 9 — устройство обслуживания), упрощенная структурная схема — на рис. 2.

Поскольку антенна должна работать с мощными передающими устройствами, размещенными стационарно, на передачу она выполнена по пассивной схеме с волноводной запиткой. На прием антенна активная с использованием в каждом модуле малошумящего двухкаскадного твердотельного параметрического усилителя (МШУ). Передача СВЧ-энергии на антенну и синфазная разводка сигналов по решетке на передачу и прием реализована на многомодовых волноводах. Деление СВЧ-энергии, а также формирование связи моноимпульсных диаграмм на прием производят-

ся с помощью оригинальных объемных СВЧ-устройств. Модуль антенной решетки состоит из зеркальной антенны с высоким коэффициентом использования поверхности (КИП) и приемопередающей аппаратуры, включающей в себя ферритовые фазовращатели на передачу и прием, поляризационный разделитель сигналов, устройство защиты входных цепей МШУ и элементы контроля и управления. В связи с тем, что на антенное устройство работают одновременно два передающих устройства, в составе волноводного тракта реализован фазовый дискриминатор на несущей частоте для автоматического выравнивания фаз выходных сигналов передатчиков в процессе работы. Технические характеристики антенны приведены в табл. 1.

Фазированная антенная решетка. Фазированная антенная решетка выполнена в форме восьмиугольной призмы толщиной примерно 2 м, разделенной на четыре подрешетки. Легкосъемные антенные модули расположены в квадратной сетке с шагом примерно 0,6 м. Вид ФАР со стороны апертуры показан на рис. 3. В тыльной части решетки размещена приемная диаграммообразующая матрица (ДОМ), четыре волноводных делителя мощности и другие элементы. Антенные модули соединены с ДОМ и делителями мощности волноводными трактами. Матрица представляет собой сферическую волноводную линзу с четырехрурпным моноимпульсным облучателем. Коэффициент передачи ДОМ составляет $-3,6$ дБ при пересече-

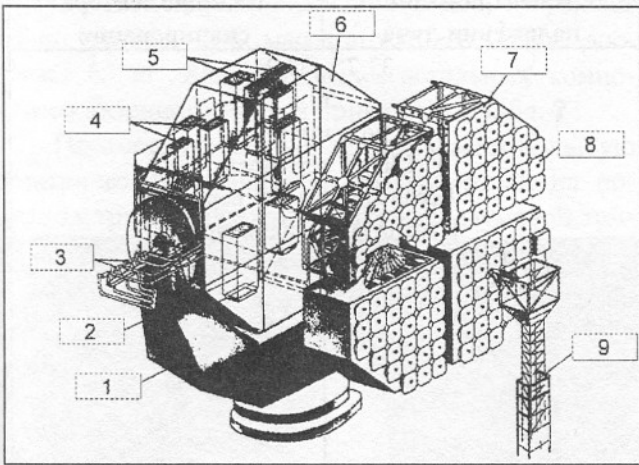


Рис. 1

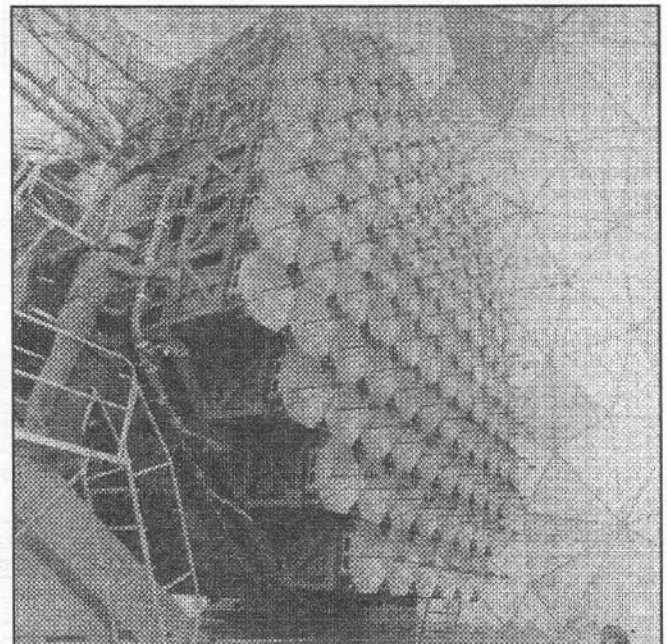
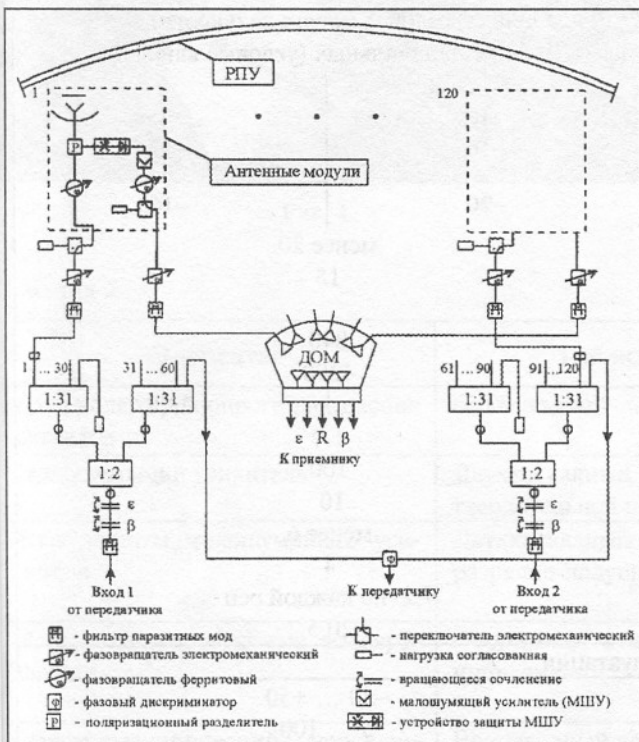


Рис. 3

нии парциальных диаграмм по уровню -3 дБ. Электронное управление лучом осуществляется строчно-столбцевым методом с суммированием фаз по строкам и столбцам в цифровом виде. Для компенсаций уходов фазы передающих и приемных каналов предусмотрена возможность введения индивидуальных поправок.

Шаг решетки велик $d = 68\lambda$, поэтому в ДН присутствуют большие интерференционные лепестки в направлениях

$$\theta_{и.б.л} = \arcsin(\sin \theta_0 \pm \lambda/d),$$

где θ_0 — угол отклонения луча от нормали.

По мере отклонения луча от нормали $\theta_0 = 0$ к краю сектора сканирования $\theta_0 = \pm 25'$ уровень интерференционного лепестка монотонно увеличивается от -10 дБ до уровня главного лепестка. При работе локатора этот эффект может проявляться в захвате цели интерференционным лепестком, защита от чего была предусмотрена в алгоритмах управления РЛС.

Таблица 1

Технические характеристики	В центральном положении луча	На краю сектора сканирования
Частотный диапазон, ГГц	33,75...34,25	
Сектор электронного сканирования, мин	50	
Сектор механического сканирования, град	±135 по азимуту 0...180 по углу места	
Поляризация	Левая круговая на передачу Правая круговая на прием	
Коэффициент эллиптичности	0,92	0,91
Ширина луча на передачу по уровню — 3 дБ, мин	3,6	4,2
Коэффициент усиления на передачу G_T , дБ:		
без учета потерь в тракте на круглом волноводе	60	56,5
с учетом потерь в тракте на круглом волноводе	56	52,5
Ширина луча на прием по уровню — 3 дБ, мин	4,4	5,0
Коэффициент усиления на прием G_R , дБ:		
на входе устройства защиты МШУ	62,5	59
на выходе ДОМ (входе приемника)	9,5	66
Диаграмма направленности на прием	Одна суммарная (канал дальности), четыре парциальных (угловые каналы)	
Максимальный уровень боковых лепестков, дБ:		
интерференционных	-10	0
прочих боковых лепестков ДН на передачу	-16	-12
прочих боковых лепестков суммарной ДН на прием	-20	-16
Погрешность установки луча, с	менее 20	
Скорость переключения луча, кГц	15	
Шумовая температура T_R , К:		
на входах устройства защиты МШУ	840	
на выходе ДОМ (входе приемника)	4200	
Отношение G_R/T_R , К	33,3	29,8
Импульсная мощность на входе, МВт	1,0	
Максимальная длительность импульсов, мкс	100	
Средняя мощность на входе, кВт	10	
Погрешность позиционирования антенны, с	менее 6	
Максимальная скорость поворота антенны, град/с	4	
Размер апертуры, м	7,2 по каждой оси	
Диаметр радиопрозрачного укрытия (РПУ), м	20,5	
Условия эксплуатации		
Температура, °С	-50 ... +50	
Относительная влажность, %	5 ... 100	
Ветер, м/с	0 ... 30	

Антенный модуль состоит из излучателя и устройств фазирования и усиления. Излучатель представляет собой двухзеркальную антенну с четырехгранной апертурой размером 0,6×0,6 м со срезанными углами (рис. 4). Основной параболический рефлектор отлит из алюминиевого сплава с последующей механической обработкой. Максимальная ошибка изготовления поверхности рефлектора 0,25 мм, КИП излучателя 0,73 достигнут за счет оптимизации облучателя, формы и размеров контррефлектора [5] и применения конусных штанг в схеме его подвески. Ширина луча соответствует сектору сканирования ФАР и составляет 50° по уровню -3дБ; масса антенного модуля достигает 65 кг. Характеристики остальных компонентов антенного модуля приведены в табл. 2.

Параметрические усилители, имеют большую электрическую прочность, чем усилители на полярных транзисторах, при такой же шумовой тем-

пературе. Использованные аппаратурные решения обеспечили достаточно высокую стабильность амплитудных и фазовых характеристик этих усилителей во времени. Диаграммы направленности антенны на прием и передачу в центральном положении луча показаны на рис. 5.

Волноводные тракты. Радиолокатор включает несколько систем волноводных трактов, наиболее важными из которых являются следующие: два волноводных тракта от передатчика к подрешеткам; четыре волноводных разводки, обеспечивающие распределение передающего сигнала по подрешетке, т.е. к 30 модулям; 120 волноводных трактов одинаковой длины от антенных модулей к ДОМ; тракт длиной 2,3 км до измерительной вышки.

Первая система трактов — наиболее сложная и ответственная. Определяющих технических требований три: минимальные потери, высокая пропускаемая мощность, возможность сопряжения с выходом гироклистрона с рабочей модой TE_{02} . Каждый тракт должен включать два вращающихся сочленения, делитель 1:2, некоторые вспо-

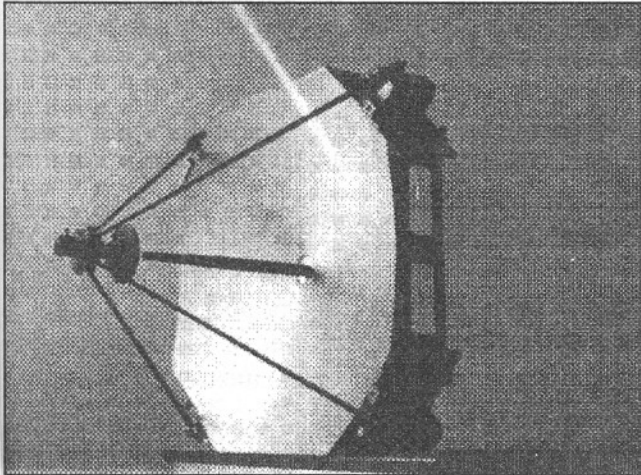


Рис. 4

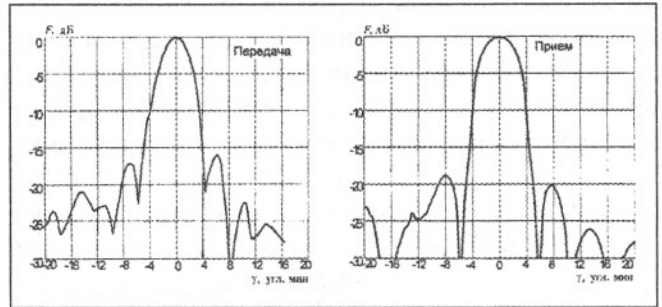


Рис. 5

Таблица 2

Элементы	Тип исполнения	Основные параметры
Блок поляризационного разделения сигналов	Волноводный	Развязка ≥ 20 дБ Эллиптичность $\geq 0,75$
Малоз шумящий усилитель	Двухкаскадный параметрический с твердотельной накачкой	Коэффициент усиления 21 дБ Шумовая температура 550 К
Блок защиты малоз шумящего усилителя	Двухкаскадный управляемый газоразрядно-полупроводниковый	Уровень просачивающейся мощности ≤ 50 мВт Потери ≤ 2 дБ
Электронно-управляемые фазовращатели	Ферритовые с продольным намагничиванием	Потери ≤ 1 дБ Дискрет установки фазы 45° Время переключения 60 мкс
Электро механический переключатель	Волноводный на два положения	Потери $\leq 0,2$ дБ Развязка ≥ 60 дБ

могательные элементы и иметь сложную трассу по конструкции вращающегося по обеим осям ОПУ. Как в наибольшей степени удовлетворяющий указанным требованиям, в качестве линии передачи был выбран круглый волновод с TE_{01} -волной. Такие волноводы имеют аномально низкие погонные потери [6], но являются многомодовыми. Электропрочность трактов с этой волной очень высокая, и они хорошо сопрягаются с гироклистроном (в данном случае на выходе гироклистронов использован преобразователь $TE_{02} \rightarrow TE_{01}$). Несмотря на имеющийся опыт применения трактов с TE_{01} -волной в системах связи и передачи на короткие расстояния мощности высокого уровня, использование их в рассматриваемом локаторе потребовало решения ряда не встречавшихся ранее задач. Вносимые потери обусловлены преобразованием волн на угловых изгибах, последние находятся близко один от другого и сильно взаимодействуют. Интерференция мод на угловых изгибах и элементах тракта приводит к сильной изрезанности амплитудно-частотной характеристики и изменению коэффициента передачи тракта при поворотах антенны. Пробои в трактах происходят на паразитных несимметричных модах при уровне мощности этих мод на несколько порядков ниже, чем мощность моды TE_{01} . В основу проектирования трактов положены три простых принципа:

спрямление трассы, где возможны использование элементов с низким уровнем преобразования мод и фильтрация паразитных мод сразу после их возникновения. Реализация этих принципов потребовала разработки угловых изгибов с потерями основной волны 0,2...0,25 дБ, эффективных модовых фильтров [7, 8], T-образного делителя 1:2 на основе полупрозрачного диэлектрического отражателя. Схема одного из трактов высокого уровня мощности показана на рис. 6. Длина тракта 40 м. Он обеспечивает устойчивую работу при импульсной мощности на входе 400...500 кВт с потерями 4 дБ и модуляцией коэффициента передачи 0,3...0,5 дБ при поворотах антенны. Фотография отдельных элементов тракта приведена на рис. 7.

Волноводные системы распределения сигналов по излучателям были выполнены с помощью делителя волны радиального типа 1:31 (один выход настроечный) и волноводов прямоугольного сечения 16×8 мм с TE_{01} -волной. Эти волноводы являются также многомодовыми. Они имеют потери примерно 0,3 дБ/м и допускают изгибы в H -плоскости без преобразования типов волн. Это позволило обеспечить необходимую равнодлинность ветвей разводки. Длина каждой ветви 2,5 м, потери достигают 1,5 дБ и могут быть снижены до 0,8...1,0 дБ при использовании более совершенных переходов и модовых фильтров [9]. Делитель мощности 1:31 показан на рис. 8. Участки тракта от излучателей к ДОМ выполнены на таком же волноводе.

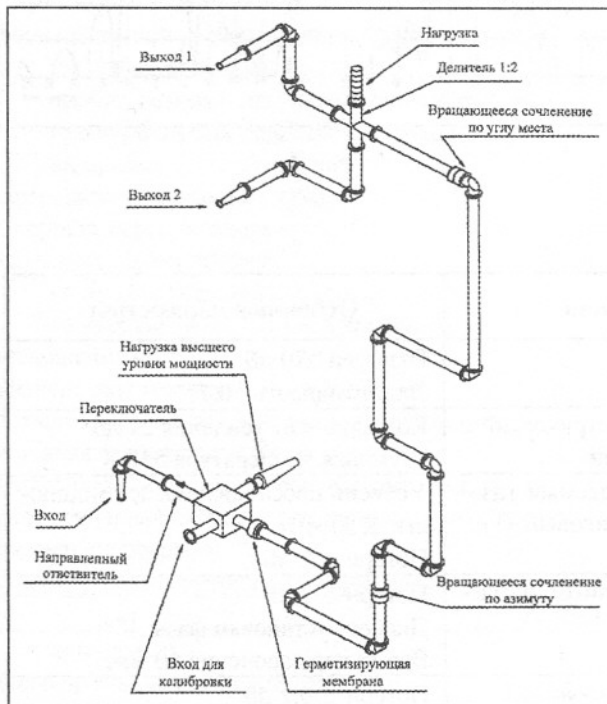


Рис. 6

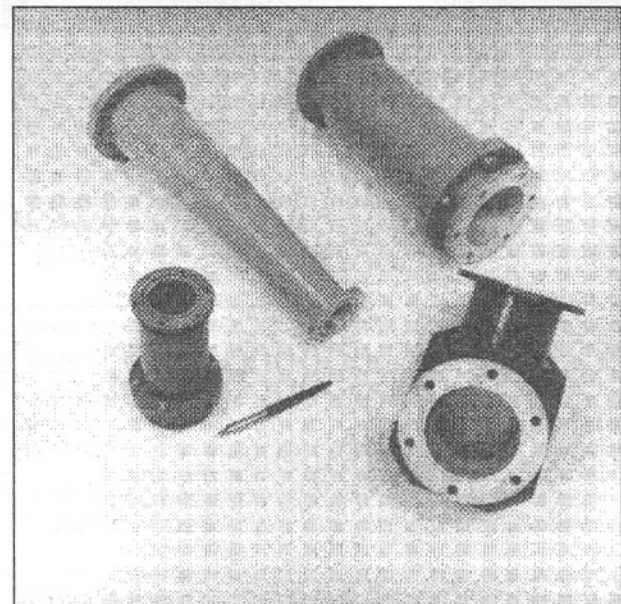


Рис. 7

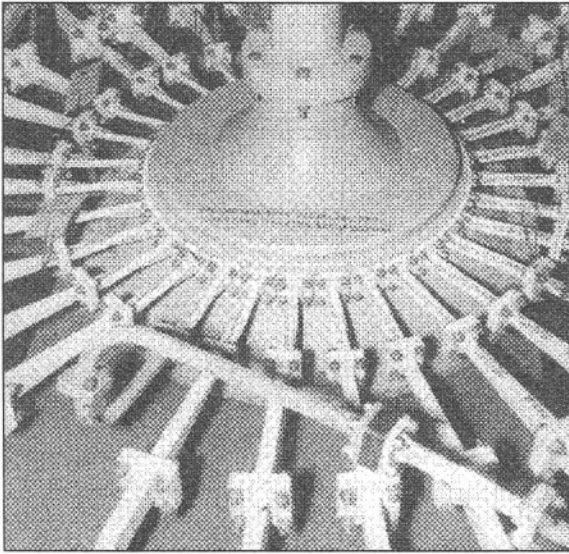


Рис. 8

Тракт к измерительной вышке выполнен на спиральном самофильтрующем волноводе диаметром 60 мм. Трасса повторяет рельеф местности и имеет два П-образных перехода над пересекающимися ее автомобильными дорогами. Тракт содержит 19 уголкового изгиба и имеет потери 20 дБ.

Конструкция антенны. Антенна состоит из трех основных частей: ОПУ, ФАР и РПУ (см. рис. 1).

Азимутально-угломестное ОПУ обеспечивает обзор верхней полусферы. На угломестной оси установлен восьмигранный силовой контейнер, на лицевой стороне которого размещена ФАР. Внутри контейнера расположены ДОМ, процессор управления лучом, аппаратура электропитания, а также высокочастотная часть приемника РЛС. Вдоль осей ОПУ размещены вращающиеся сочленения волноводных трактов круглого сечения с H_{01} -волной.

Фазированная антенная решетка состоит из четырех подрешеток, содержащих по 30 антенных модулей с волноводными разводками. Масса каждой подрешетки 4 т. Схемотехнические решения по сквозной фазировке каналов ФАР позволили снизить требования на точность изготовления металлоконструкций, в частности, увеличить допуск на неплоскостность силового контейнера и каркаса подрешеток до 2 мм. Допустимая суммарная разность длин волноводных каналов 3λ . Смена антенных модулей осуществляется со стороны раскрыва с использованием быстроразворачиваемого подъемного устройства.

Необходимые климатические условия при эксплуатации антенны были обеспечены за счет каркасно-мембранного РПУ диаметром 20,5 м. В РПУ

применены двойные полупрозрачные для света мембраны из композиционного пленочного материала толщиной 0,2 мм. Потери сигнала в укрытии не более 0,8 дБ. Температурный режим в подкупольном пространстве поддерживается системой кондиционирования.

Поддержание работоспособности. Описанная антенна представляет собой сложный аппаратный комплекс. Необходимость непрерывного обеспечения когерентности и синфазности апертуры при использовании в антенных модулях параметрических усилителей, ферритовых фазовращателей и других нестабильных элементов в условиях сезонных и суточных перепадов температуры и влажности, а также механических воздействий потребовала разработки механизма поддержания работоспособности ФАР. Этот механизм включает в себя: автоматический непрерывный контроль (АНК), который проводится постоянно во время работы РЛС; контроль технического состояния (КТС), который проводится в перерывах между работой; а также быструю замену неисправных антенных модулей.

Автоматический непрерывный контроль реализуется с помощью встроенной в антенну аппаратуры контроля и непрерывно формирует сигналы исправности или неисправности элементов.

При КТС проводится диагностика антенных модулей, а также измерение основных технических характеристик антенны (диаграмм направленности и коэффициентов усиления) на прием и передачу. Схема КТС приведена на рис. 9 (где 1 — измерительная вышка, 2 — волноводные тракты, 3 — апертура решетки, 4 — антенный модуль, 5 — ДОМ, 6 — приемник, 7 — волноводные делители 2:124, 8 — процессор управления лучом, 9 — приводы, 10 — вращающиеся сочленения, 11 — волноводные переключатели, 12 — аппаратура

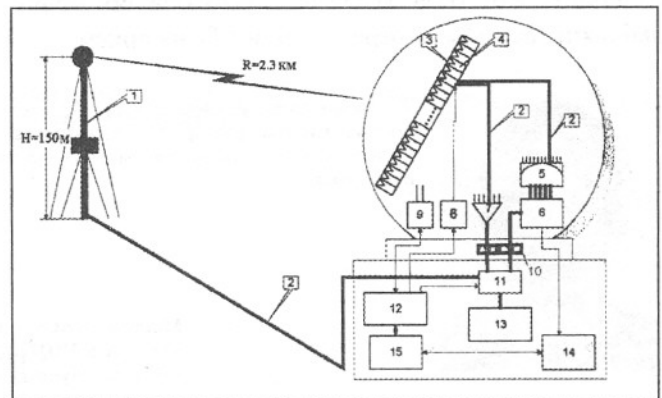


Рис. 9

управления, 13 — задающий генератор, 14 — видеотракт, 15 — центральный компьютер).

Контроль технического состояния реализуется с использованием части штатной аппаратуры РЛС, вычислительных средств, специального программного обеспечения и измерительной зеркальной антенны, расположенной на вышке на расстоянии 2,3 км от антенны РЛС. Сигналы для передачи измерительной антенной и принятые сигналы, передаются соответственно к вышке и обратно по специальному волноводному тракту. Антенна РЛС в процессе КТС неподвижна, а ее геометрическая ось при этом ориентирована на измерительную антенну на вышке. Измерения ДН производятся при электронном качании луча. Антенна находится в ближней зоне ФАР, поэтому при измерениях осуществляется фокусировка ФАР на вышку при автоматическом введении индивидуальных фазовых сдвигов в каждом модуле. Для диагностики антенных модулей при КТС измеряется амплитудно-фазовое распределение поля в апертуре посредством автоматического отключения всех элементов ФАР, за исключением испытуемого, с помощью волноводных переключателей. При этом, измеряются фазовые поправки для каждого модуля, определяются неисправные модули, а также рассчитываются дисперсии амплитудного и фазового распределений. После измерений проводится автоматическое фазирование антенны введением поправок в коды управления фазовращателями. Цикл работ по фазированию антенны занимает примерно по 20 мин на прием и передачу. Как показала практика, для поддержания фазового распределения антенны поканальное фазирование необходимо проводить еженедельно.

По результатам АНК и КТС периодически заменяют вышедшие из строя антенные модули. Замену производят тогда, когда число отказавших модулей достигает 5 % на передачу или 5 % на прием.

Антенна при этом должна быть в отключенном состоянии. Для обслуживания апертуры было разработано специальное подъемное устройство, позволяющее производить замену модуля в течение 20 мин. В течение месяца выходят из строя, как правило, несколько модулей. Обслуживание антенны осуществляется бригадой из пяти человек.

Литература

1. Толкачев А. А., Соловьев Г. К., Вейцель В. В. Перспектива создания мощных многоканальных радиолокаторов миллиметрового диапазона для систем оборонного назначения. — Армейский сборник, 1998, № 9.
2. Tolkahev, A. A., Denisenko, V. V., Shishlov, A. V., and Shubov, A. G., High Gain Antenna Systems for Millimeter Wave Radars with Combined Electronical and Mechanical Beam Steering, IEEE Int. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Boston, Massachusetts, 15-18 October 1996, pp. 266-271.
3. Gaponov-Grekhov, A. V. and Granatstein, V. L., Applications of High-Power Microwaves, Boston; London: Artech House, 1994.
4. Abouzahra, M. D. and Aven, R. K., The 100-kW Millimeter-Wave Radar at Kwajalein Atoll, IEEE Antennas and Propagation Magazine, April 1994, vol. 36, No 2, pp. 7-19.
5. Виленко И. Л., Шишлов А. В. Модернизация антенны Кассегрена для увеличения коэффициента усиления. — Сб. трудов XXVI научно-технической конференции по теории и технике антенн. — М., 1991, т. 22, с. 107-109.
6. Волноводы дальней связи / Под. ред. Н. П. Керженцева. — М., 1972.
7. Гольберг Б. Х., Мордасов А. В., Третьяков Л. В. Затухание моды TE_{01} в уголкового изгибах сверхразмерного круглого волновода. Тезисы 1-й всесоюзной конференции "Устройства и методы прикладной электродинамики". — Одесса, 1988, с. 77.
8. Denisenko, V. V., Tretjakov, L. V., and Cherednik, A. V., TE_{01} Circular Waveguide Transmission Lines of Complex Path, 9th Microwave Conference "Mikon-91", Rydzynia-Poland, May 20-24, 1991, vol. 1, pp. 267-271.
9. Gol'berg, B. Kh. and Pashinov, Yu. V., Multimode Rectangular Waveguide for in Phase Power Distribution in MM Wave Band Phased Array Antennas, Proceedings of the XXVIII Moscow International Conference on Antenna Theory and Technology, 22-24 September 1998, Moscow Russia, JSC "Radiophysika", pp. 504-506.

Поступила 29 декабря 1998 г.



Толкачев Алексей Алексеевич (1931 г. р.) — доктор техн. наук, генеральный конструктор АО «Радиофизика». Область научных интересов: радиоэлектронные и радиолокационные системы.

Макота Василий Андреевич (1943 г. р.) — канд. техн. наук, нач. отдела НИИ радиоприборостроения. Область научных интересов: фазированные антенные решетки и зеркально-линзовые антенны.





Павлова Мария Петровна (1940 г. р.) — вед. инженер НИИ радиоприборостроения.
Область научных интересов: фазированные антенные решетки и зеркальные антенны.



Николаев Анатолий Моисеевич (1945 г. р.) — вед. инженер НИИ радиоприборостроения.
Область научных интересов: фазированные антенные решетки и зеркальные антенны.



Денисенко Владимир Викторович (1954 г. р.) — канд. физ.-мат. наук, нач. отделения антенно-фидерных устройств АО «Радиофизика».
Область научных интересов: антенны и фидерные устройства СВЧ.



Соловьев Георгий Константинович (1944 г. р.) — нач. сектора АО «Радиофизика».
Область научных интересов: радиолокационные измерения.