

АО «РАДИОФИЗИКА»: РАБОТАЮТ МИЛЛИМЕТРЫ

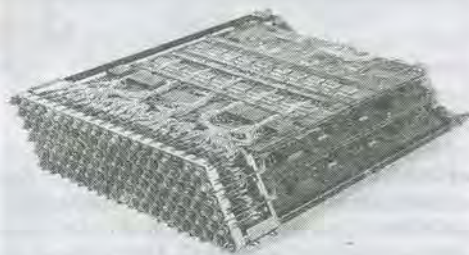
Реформирование Вооруженных Сил России выдвигает на первый план задачу разработки перспективных видов вооружения, с тем чтобы создать необходимые условия для сохранения военного потенциала страны в будущем. Особое значение в этой связи приобретает развитие технологий перспективных видов вооружений, включающих мощные информационные средства и обеспечивающих высокую эффективность, гибкость и избирательность оружия.

Одним из основных типов информационных средств были и остаются радиолокационные, возможности использования и совершенствования которых в настоящее время расширяются. О том, как данную проблему решают в АО «Радиофизика» — одном из ведущих предприятий оборонной промышленности России, и идет речь в статье.



Улучшение основных характеристик радиолокационных станций стрелбых комплексов и систем, таких, как точность, помехозащищенность, габариты и масса, существенным образом связано с переходом в более высокочастотные диапазоны волн. В нашей стране и за рубежом в 40—50-х годах в относительно короткий срок были созданы радиолокационные средства, работающие в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах волн. Дальнейшее продвижение в область миллиметровых и более коротких длин волн происходило медленно в связи с невозможностью разрешить специфические трудности.

Тем не менее развитие систем военного, а также народнохозяйственного назначения настойчиво требовало создания более точных и помехозащищенных информационных средств. Это — одна из причин развития в последнее десятилетие пассивных оптических систем, обеспечивающих высокие точности измерения угловых координат, хотя и имеющих ряд недостатков по сравнению с активными радиолокационными средствами. Другая причина, стимулировавшая развитие радиолокации в области миллиметровых длин волн (ММДВ), — возможность снижения размеров наиболее громоздкого элемента РЛС — антенны, а следовательно, и всей станции в целом. Это, в свою очередь, открывало пути к созданию мощных мобильных средств наземного, корабельного и космического базирования.



Элемент ФАР со 120 фазовращателями и ячейками управления

Высокие концентрации энергии, которые могут быть реализованы в миллиметровом диапазоне волн, позволяют создать активные радиолокационные средства с высокими дальностями действия при относительно небольших генерируемых мощностях, а способность реализации широких полос пропускания придает им уникальные возможности для обеспечения не только высокой точности измерения координат, но и определения формы объекта (так называемое радиовидение) в моноимпульсной посылке. Кроме того, энергия, излучаемая в главном луче, обеспечивает низкие уровни мощности вне узкой зоны, что определяет высокую экологическую чистоту РЛС.

Некоторые перспективы освоения наука начала 80-х годов ведущие специалисты лаборатории имени Линкольна Массачусетского технологического института применительно к задачам противоракетной обороны (ПРО) оценивали так: «Непрерыв-

ное совершенствование ракетного оружия и средств радиопротиводействия вызывает при решении задач ПРО необходимость дальнейшего повышения эффективности средств селекции боевых частей баллистических ракет (БЧ БР). Одним из путей решения данной проблемы является освоение миллиметрового диапазона волн с целью их применения в перспективных наземных РЛС ПРО. Экспериментальную оценку целесообразно дать после дооборудования РЛС «Аског» устройствами миллиметрового диапазона».

Расчеты показывают, что внедрение средств, работающих в ММДВ, особенно многоканальных, позволит существенно поднять основные тактико-технические характеристики средств противовоздушной обороны и других видов вооружений.

Исследования возможностей использования техники миллиметрового диапазона волн в интересах создания мощных РЛС с фазированной антенной решеткой (ФАР) оборонного назначения в нашей стране начались в конце 70-х годов. Работа велась и была выполнена рядом предприятий во главе с НИИ радиофизики Минрадиопрома, позднее — АО «Радиофизика».

При создании РЛС проведены исследования рациональных системотехнических решений, принципов и архитектуры построения аппаратуры и программно-алгоритмического обеспечения. Разработаны основные компоненты, необходимые для создания аппаратуры мощных многоканальных РЛС миллиметрового диапазона волн. Одна из важнейших предпосылок, позволивших выполнить эту работу в относительно короткий срок, — корректный научный прогноз тенденций и возможностей разви-

тия СВЧ-электроники. Вскоре создали экспериментальную РЛС этого диапазона «Руза». По ряду основных параметров она превосходила большую американскую экспериментальную РЛС ММДВ, развернутую на атолле Кваджелейн.

На РЛС «Руза» провели исследования по распространению радиоволн ММДВ в атмосфере, а также комплекс экспериментальных работ, связанных с обнаружением и сопровождением различных объектов многоканальной РЛС с фазированной антенной решеткой.

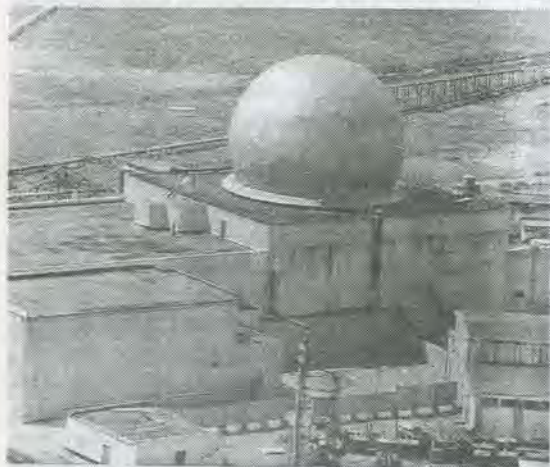
В процессе исследований мы ввели понятие «метеорологическая надежность», объясняющее вероятность того, что в течение года РЛС будет способна обеспечить заданные технические характеристики во время наблюдения объектов при определенном угле места (предполагается, что излучение и прием сигналов ведется в одной и той же точке).

Для расчета метеорологической надежности определили ослабление излучения за счет всех основных компонентов тропосферы (газа, облаков, дождя, грозы и других гидрометеоров). Наибольший интерес у нас вызвали области, где происходит минимум поглощений волн (окна прозрачности), вблизи 35, 94, 120 ГГц. Именно в этих участках частотного диапазона, как показали исследования, обеспечиваются наиболее благоприятные условия работы радиолокационных средств.

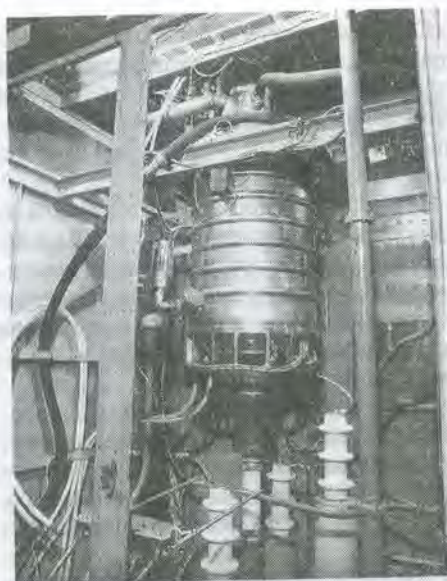
Изучив погодную статистику для умеренного климата, мы провели необходимые расчеты для диапазона 35 ГГц. Дело в том, что эффекты, связанные с распространением радиоволн (рефракция, групповое запаздывание сигнала, изменение поляризации волн), здесь не отличаются от традиционных. Кроме того, при наблюдении за ИСЗ и измерении их угловых координат и дальности мы не зарегистрировали сколько-нибудь серьезных погрешностей, присущих РЛС сантиметрового диапазона.

Более того, радиоволны миллиметрового диапазона оказались намного устойчивее к воздействию повышенной ионизации атмосферы, возникающей, к примеру, вследствие высотных или наземных ядерных взрывов, а также других факторов. Практически не влияют на РЛС ММДВ пылевые облака, неизбежно возникающие на поле боя.

Важная проблема создания мощных РЛС ММДВ — наличие комплекса



РЛС миллиметрового диапазона волн «Руза»



Гироклистрон «Стремя-2» в криостате

СВЧ-приборов, способных обеспечить генерацию и усиление сигналов и их эхо, управление фазой в апертуре ФАР, а также выполнение вспомогательных функций.

Следующая проблема, с которой мы столкнулись во время исследований, — усиление зондирующих сигналов. Сложность ее решения заключалась в том, что у нас не было полной ясности, можно ли вообще обеспечить необходимые мощности с помощью одного или группы усилителей при довольно высоких требованиях к каждому прибору.

Сейчас, по прошествии пятнадцати лет, мы можем уверенно ответить на многие вопросы. А вот тогда... Тогда среди специалистов у нас в стране и за рубежом доминировала такая точка зрения: основные успехи в усилении сигналов в высокочастотных диапазонах волн могут быть достигнуты лишь с применением развивающихся твердотельных приборов на полевых транзисторах при использовании материалов с высокой подвижностью зарядов типа арсенида галлия и фосфида индия. Однако практика показала, что наибольшие результаты в этой области как за рубежом, так и в нашей стране достигнуты путем совершенствования электровакуумных приборов традиционных типов (ЛБВ, клистроны), а также гироприборов.

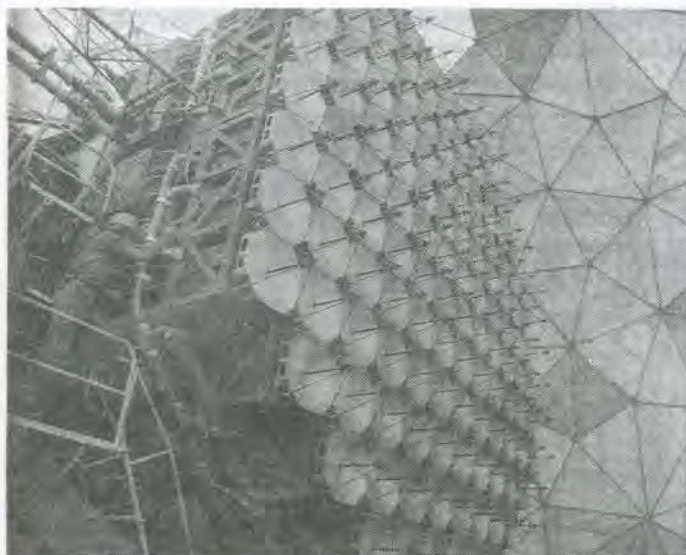
Теоретическая возможность создания гироприборов, использующих механизм взаимодействия полевых винтовых электронных пучков с незамедленными «быстрыми» волнами была обоснована в работах

академика А. Гапонова-Грехова и его учеников в середине шестидесятых годов. Доказано, что использование вынужденного излучения электронов на частоте циклотронного резонанса позволяет разрешить основное противоречие между длиной волны генерируемых колебаний и размерами электродинамических систем прибора, открывает широкие перспективы для получения высоких энергетических параметров. Однако на пути практической реализации усилителей ММДВ, использующих этот механизм взаимодействия, необходимо было решить комплекс проблем, связанных с обеспечением совокупности технических и эксплуатационных параметров когерентных РЛС.

Характерным представителем этого семейства является гироклистрон «Стремя-2», разработанный НИИ «Титан» совместно с Институтом прикладной физики АН СССР и используемый в выходном каскаде передатчика радиолокатора «Руза». Прибор обеспечивает выходную импульсную мощность до 400 кВт при полосе частот 100 МГц и коэффициенте усиления 18 дБ. Магнитная система прибора — сверхпроводящая, криогенная. В случае, когда не требуется большая мощность, в одном приборе могут быть использованы изделия традиционных типов (ЛБВ, клистроны). В диапазоне 35 ГГц аппараты этих типов перекрывают диапазон импульсных мощностей от 1 ватта до нескольких десятков киловатт. При мощностях менее 1 ватта могут быть использованы твердотельные генераторные и усилительные приборы.

Несмотря на значительные успехи в области генерирования и усиления энергии, создание высокоэнергетических станций и реализация при этом потенциальных возможностей миллиметрового диапазона волн (малая энергоемкость, небольшой вес и объем аппаратуры) требуют использования малошумящих усилителей с параметрами и конструктивным обликом, позволяющими размещать их в составе приемопередающих антенных модулей ФАР.

Существуют два семейства малошумящих усилителей, которые могут быть использованы в РЛС ММДВ, — на полевых транзисторах и параметрические. Современные параметрические усилители обеспечивают примерно такие же шумовые характеристики, как их собратья на полевых транзисторах. Однако они выгодно отличаются большей электрической прочностью, что очень важно для приборов, работающих во входных цепях РЛС. В то же время распрос-



Крупномодульная полноповоротная ФАР РЛС миллиметрового диапазона волн «Руза»

траненные представления о невозможности использования этих усилителей в системах, где требуется когерентность, не совсем точны. При принятии соответствующих аппаратурных и систематических решений эти усилители обеспечивают достаточную стабильность фазовых и амплитудных характеристик во времени. В радиолокаторе «Руза», к примеру, использовано несколько сотен параметрических усилителей отечественного производства, размещенных непосредственно в полоте антенны. Они обеспечивают устойчивую работу системы без энергетических потерь. В случае же необходимости широкополосного входа (более 300—400 МГц), как показали исследования, следует использовать усилители на полевых транзисторах. Широкая полоса частот и высокая стабильность фазовых характеристик позволяют использовать приборы этого типа в перспективных информационных средах.

Важным вопросом является защита входных цепей приемного устройства от мощных зондирующих сигналов передающего устройства, а также возможного разрушающего воздействия внешних сигналов. В нашей стране создан ряд устройств защиты для РЛС ММДВ на базе газоразрядных приборов и управляемых аттенуаторов. Некоторые из них прошли проверку в составе РЛС «Руза» и обеспечили эффективную защиту приемного устройства при импульсной мощности передатчика до 800 кВт. Заслуживают особого внимания так называемые «автономные» устрой-

ства, сочетающие в себе входной каскад на искусственно ионизированном промежутке и газоразрядный каскад. Такие устройства обеспечивают защиту не только от собственного передатчика РЛС, но и от внешних источников электромагнитного излучения. Существуют и другие аппаратные решения в этой области.

Для управления фазой в раскрыве антенны могут быть использованы фазовращатели различных типов. Наиболее продвинуты в разработке и освоении — ферритовые, проходного и отражательного типов с продольным намагничива-

нием. Они позволяют формировать раскрывы двумерных и одномерных ФАР с отклонением луча до 40—45 градусов (средние потери — около 1 дБ) и приемлемую энергию переключения. С нашей точки зрения, для обеспечения больших секторов сканирования наиболее интересен фазовращатель ~~проходного~~ отражательного типа, который, хотя и с несколько худшими характеристиками, чем проходной, все же позволяет радикально увеличить угол отклонения луча при использовании простых конструктивно-технологических решений.

В процессе создания РЛС «Руза» возникла и была разрешена проблема передачи СВЧ-импульсной мощности уровня 0,5 МВт с малыми потерями от стационарно размещенных мощных передающих устройств на аналогичное антенное устройство с общей длиной тракта около 80 м. Для сравнения: за рубежом аналогичные проблемы разрешаются с помощью открытых квазиоптических систем, что значительно дороже и малоэффективнее. Для РЛС «Руза» создали многомодовый тракт на круглом волноводе диаметром 80 мм с основным типом волны H_{01} . Разработали комплект волноводных элементов, необходимые метрологические стенды. Что касается прямоугольных трактов низкого уровня мощности и их элементов, то они давно освоены и серийно выпускаются как в нашей стране, так и за рубежом. Аналогичным образом обстоит дело с другими СВЧ-элементами: смесителями, циркуляторами, вентиляторами и др.

**Сравнительные технические характеристики
экспериментальных РЛС ММДВ «Руза», РЛС США и типичной
РЛС ПРО сантиметрового диапазона волн**

Средства	Характеристики				
	Диаметр антенны, м	Коэффициент усиления антенны	Импульсная мощность, МВт	Точность измерения угловых координат, рад	Разрешающая способность по угловым координатам, рад
РЛС «Руза»	7,6	10^6	0,8	$6 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
РЛС США	13,7	10^7	0,06	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$0,76 \cdot 10^{-3}$
Типичная РЛС ПРО СМДВ	12—20	$10^4—10^5$	30—120	$5 \cdot 10^{-4}—10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}—10^{-2}$

Стоимость и сложность разработки и изготовления современных РЛС в значительной степени определяется сложностью антенной системы. Поэтому важнейшим условием освоения РЛС ММДВ с минимальными затратами в кратчайший срок является создание интегральных унифицированных антенных элементов, которые бы позволили применять их в ряде РЛС различного назначения. С этой целью разработан и освоен приемопередающий антенный блок, позволяющий формировать антенные системы различных размеров и конфигураций.

Антенный блок представляет собой гексагональную решетку отражательного типа, содержащую около 3600 волноводно-ферритовых элементов, и обеспечивает угол отклонения луча ± 25 градусов. Элементы решетки образуют равномерные диаграммы в секторе электронного сканирования, подавляющие главные дифракционные лепестки. Эта решетка имеет апертуру с диаметром окружности 0,64 м, которая эффективно облучается облучателем, состоящим из рупора, контррефлектора специальной конфигурации и перфорированного металлического кожуха. В настоящее время разработаны аналогичные антенные блоки с углом отклонения луча $\pm 40—45$ градусов.

Экспериментальные работы, проведенные на РЛС «Руза», показали возможность создания больших многоканальных РЛС с ФАР, способных обнаруживать и сопровождать ИСЗ и другие космические объекты с высокой точностью.

Кроме того, подтверждена возможность формирования сверхузких лучей в ФАР и

обработки сигналов со сложными видами модуляции без заметных дополнительных потерь на пространственную и временную некогерентность. По реальным целям исследованы достижимые точности измерения координат и ряд других характеристик. Результаты этих и других работ представляют собой надежную, экспериментально проверенную теоретическую и аппаратную базу для быстрого создания опытных образцов информационных средств с техническими характеристиками, не достижимыми в традиционно используемых диапазонах волн.

Как уже было отмечено, аналогичные работы в последние двадцать лет широко ведутся во всем мире, особенно в США, где также была создана и испытана РЛС ММДВ, но с зеркальной антенной. Сравнительные характеристики этих средств приведены в таблице.

Научные, технические и технологические успехи, достигнутые Россией в области создания РЛС с ФАР в ММДВ, открывают широкие возможности для совершенствования средств и систем оборонного назначения. Они позволяют не только поднять на новый технический уровень оборонное оружие России, но и в силу малой освоенности ММДВ в мире быть высококонкурентным товаром на внешнем рынке.

**Алексей ТОЛКАЧЕВ,
генеральный конструктор
АО «Радиофизика»,
доктор технических наук;**

Георгий **Алексей СОЛОВЬЕВ,
Владимир ВЕЙЦЕЛЬ**