

### 3.2. Радиолокация в миллиметровом диапазоне волн

А.А. Толкачев, доктор технических наук,  
С.А. Топчиев, кандидат технических наук

Два-три десятилетия назад среди инженеров-разработчиков радиолокационных средств существовало мнение, что в миллиметровом диапазоне волн (ММДВ) могут разрабатываться только станции очень небольшой дальности действия (десятки или сотни метров) тактического назначения. Структура таких станций, в силу ограниченности решаемых ими задач, была достаточно проста и не вызвала особенного интереса. Такое положение дел сложилось исторически и определялось определенными ограничениями, связанными с созданием радиолокационных станций (РЛС) в этом диапазоне волн. К этим ограничениям относятся:

- значительные по сравнению с более длинноволновыми диапазонами затухания радиоволн ММДВ в тропосфере;
- сложности генерации и усиления мощных сигналов в этом диапазоне;
- высокие требования к точности изготовления антенных систем и других механических элементов;
- сложность обеспечения электронного управления лучом станции;
- определенные трудности создания входных малошумящих элементов РЛС этого диапазона.

Надо заметить, что в известной мере настороженное отношение к созданию РЛС ММДВ возникло после того, как в США в период бурного развития радиолокационной техники военного назначения в конце Второй мировой войны и сразу после нее был создан ряд станций в диапазоне длин волн 1,25 см. Эти станции оказались мало эффективными в связи с тем, что длина их волны совпала с максимумом поглощения радиоволн в парах воды. Разработки были закрыты и надолго отбили охоту разрабатывать радиолокационные средства в диапазоне длин волн короче 3 см.

В то же время использование миллиметрового диапазона для создания мощных РЛС чрезвычайно привлекательно, поскольку позволяет радикально улучшить точность измерения координат, помехозащищенность средств и возможность портретирования объектов. РЛС этого диапазона могут иметь значительно меньшие размеры антенных устройств и меньшую потребляемую среднюю мощность, чем станции традиционных диапазонов, что открывает возможности создания средств небольших размеров, в том числе и мобильных станций. Следует отметить, что антенны станции такого типа не могут в настоящее время разрабатываться на базе активных твердотельных фазированных решеток (АФАР) в силу резкого снижения основных параметров мощных твердотельных усилителей в миллиметровом диапазоне волн и очень высокой прогнозируемой стоимости полотна АФАР в этом диапазоне [1]. В качестве мощных выходных усилителей зондирующего сигнала таких РЛС сегодня могут использоваться только электровакуумные приборы.

Исследования характеристик атмосферы показали, что в миллиметровом диапазоне волн существуют «окна прозрачности», в которых затухание ра-

диоволн значительно ниже, чем в других участках диапазона. Первое окно прозрачности находится в районе частот 35 ГГц (длина волны 8,6 мм), второе — в районе 94 ГГц (длина волны 3,2 мм). С учетом достижений мировой и отечественной радиоэлектроники в создании элементной базы для РЛС ММДВ можно указать следующие области техники, где в настоящее время целесообразно применение мощных станций миллиметрового диапазона волн:

- РЛС для наблюдения ИСЗ и других объектов в близком околоземном космосе на дальностях до 2000 км при не слишком маленьких углах места (больше 20 градусов);
- многоканальные РЛС для комплексов ПВО малой дальности (20–30 км);
- твердотельные обзорные и навигационные РЛС, самолетные РЛС и РЛС, работающие в космосе.

Впервые РЛС ММДВ, способная работать в близком околоземном космосе, была, по-видимому, создана в США в 1983 году [2]. Эта станция имела два канала: длинноволновый диапазона  $K_a$  (35 ГГц) и коротковолновый диапазона W (94 ГГц) и вошла в измерительный комплекс Kregs. В качестве антенны использовалась зеркальная антенна диаметром 13,7 м, передающее устройство длинноволнового канала было разработано на базе двух мощных усилительных ламп бегущей волны (ЛБВ) фирмы CPI (VARIAN). В процессе эксплуатации станция непрерывно модернизировалась, и это позволило достичь дальности действия длинноволнового канала 2000 км, что необходимо для эффективной работы станций такого типа.

Одной из особенностей этой РЛС было то, что за счет очень высокой концентрации энергии, ширины луча станции 760 мкрад, или  $2,6^\circ$ , удалось получить необходимую дальность действия при очень скромном значении энергии зондирующего импульса — примерно 3 Дж. Обратной стороной медали явились чрезвычайно ограниченные поисковые возможности — станция, по-видимому, могла работать только в комплексе с другой (другими) РЛС, обеспечивающей точные целеуказания по угловому положению объекта наблюдения.

Основными источниками сверхбольших мощностей в миллиметровом диапазоне длин волн являются мазеры на циклотронном резонансе (МЦР) — гиросприборы, использующие стимулирующее излучение ансамбля электронов, которые вращаются с циклотронной частотой в сильных магнитных полях и отдают свою энергию высокочастотному полю открытых сверхразмерных электродинамических систем. Гиросприборы образуют обширный класс ВЧ-приборов: генераторы, в которых электродинамическая система образована одним сверхразмерным резонатором, получившие название гиротроны; усилительные гироклистроны, в которых электродинамическая система содержит два и более резонатора, разделенных трубками дрейфа; гиро-ЛБВ, в которой электродинамическая система построена на сверхразмерном волноводе.

Один из основателей этого направления — академик А.В.Гапонов-Грехов [3]. Коллектив возглавляемого им Института прикладной физики АН в Н. Новгороде достиг выдающихся результатов в области теории и экспери-

мента по гирорезонансным приборам. С помощью гиротронов в миллиметровом диапазоне длин волн генерировалась импульсная мощность до 1 МВт, не достижимая ни на одном из других типах электронных приборов. Прогресс в разработке гиротронов в последние десятилетия впечатляющий. В диапазоне 140—170 ГГц достигнут уровень непрерывной мощности около 1 МВт с КПД свыше 50%. Эти приборы применяются в системах электронно-циклотронного нагрева плазмы в установках по управляемому термоядерному синтезу.

Для средств радиолокации требуются когерентные источники мощности с широкой полосой рабочих частот, высоким коэффициентом усиления и максимально возможным КПД. Это значительно усложняет проблему создания приборов. Первые работы в этом направлении проводились в 60—70-х годах прошлого столетия в Институте прикладной физики АН СССР. Теоретические исследования и накопленный опыт работы с экспериментальными макетами гиротронов и гироклистронов в значительной мере предопределили успешное решение создания промышленных образцов усилительных giroприборов.

Работы по созданию мощной РЛС ММДВ были начаты в СССР в конце 80-х годов прошлого века. Вначале была осознана необходимость обеспечения определенных поисковых возможностей, которые обеспечили бы работу станции в полигонных условиях не только по данным внешнего целеуказания, но и в автономном режиме. РЛС ММДВ, получившая условное название «Руза» (рис. 3.2.1), была разработана коллективом ОАО «Радиофизика» (Москва, в прошлом НИИ радиофизики) совместно с НИИ радиоприборостроения (Москва) [4].

Для решения поставленных задач была разработана малоэлементная фазированная решетка, пассивная на передачу и активная на прием (рис. 3.2.2), и передающее устройство высокой импульсной и средней мощности на базе двух усилительных цепочек вакуумных СВЧ-приборов, работающих когерентно. Все это должно было обеспечить быстрый электронный поиск в секторе около одного градуса [5].



Рис. 3.2.1. Внешний вид РЛС «Руза»

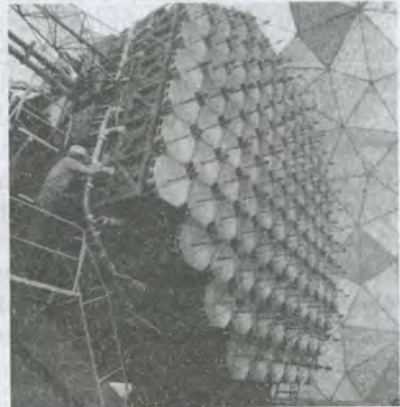


Рис. 3.2.2. Малоэлементная фазированная решетка

Для решения комплексной задачи по разработке сверхмощной широкополосной усилительной цепочки вакуумных приборов миллиметрового диапазона длин волн с приборами нового класса в выходных каскадах — гироклистрономы — была образована кооперация исполнителей в составе ГНПП «Торий» Министерства электронной промышленности (МЭП), института прикладной физики Академии наук (Н. Новгород), ГНПП «Орион» МЭП (Киев), КБ «Знамя» МЭПЖ (Полтава), НПП «Феррит» МЭП (Ленинград), СКТБ физико-технического института Украинской академии наук (Донецк).

К середине 1980-х годов кооперацией исполнителей были успешно завершены НИОКР по разработке сверхмощной усилительной цепочки приборов миллиметрового диапазона длин волн для конкретной радиотехнической системы — экспериментальной РЛС ММДВ «Руза», в состав которой входили две ЛБВ, и впервые в мировой практике в выходных каскадах передатчика этой станции был применен новый тип сверхмощных СВЧ-приборов — широкополосные усилительные гироклистроны, получившие условное название «Стремя-1» и «Стремя-2» (рис. 3.2.3).



Рис. 3.2.3. Широкополосные гироклистроны «Стремя-1» и «Стремя-2»

Конструкция гироклистронов образована магнетронно-инжекторной пушкой, формирующей электронный поток в нарастающем магнитном поле, электродинамической системой, состоящей из двух и более сверхразмерных резонаторов, соединенных между собой пространствами дрейфа, выходным сверхразмерным волноводом, часть которого занимает коллектор, вводом и выводом энергии. Гироклистроны работают в магнитном поле, создаваемом сверхпроводящим соленоидом.

В процессе проведения работ были решены принципиальные проблемы, обеспечившие возможность создания нового класса сверхмощных источников миллиметрового диапазона — гироклистронов: разработаны электронно-оптические системы, формирующие электронные пучки с малым скоростным разбросом, оптимизированы параметры электродинамических систем, обеспечивающие широкополосные и эффективные режимы, устранены условия возникновения неустойчивости усиления на рабочих модах, оптимизированы структуры магнитного поля в области взаимодействия с целью повышения КПД.

В гироклистроне «Стремя-1» в диапазоне 34 ГГц с рабочей модой  $H_{01}$  были применены двухпотенциальная электронно-оптическая система, трехрезонаторная электродинамическая система, ввод энергии стандартным волноводом на моде  $H_{10}$ , коллектор, совмещенный с выходным цилиндриче-

ским волноводом, вывод энергии из нитрида бора на рабочей моде  $H_{01}$ . В гироклистроне была достигнута импульсная мощность свыше 100 кВт, полоса усиливаемых частот по уровню  $-3$  дБ до 450 МГц, коэффициент усиления свыше 20 дБ и КПД свыше 20%.

В выходном каскаде усилительной цепочки применен гироклистрон «Стремя-2», в котором с целью получения максимальной выходной мощности использована в качестве рабочей моды высшая мода  $H_{02}$ . Конструкция гироклистрона «Стремя-2» с рабочей модой  $H_{02}$  включала в себя двухрезонаторную электродинамическую систему, магнетронно-инжекторную пушку, ввод энергии на моде  $H_{01}$  с преобразованием ее в рабочую моду  $H_{02}$  внутри прибора, коллектор, расположенный в выходном волноводе, и вывод энергии на рабочей моде. Преобразователь рабочей моды  $H_{02}$  в транспортную моду  $H_{01}$  располагался вне прибора во внешнем тракте.

При разработке сверхмощного гироклистрона с высшей рабочей модой были найдены условия обеспечения стабильности работы на рабочих модах без самовозбуждения мешающих мод за счет устранения самовозбуждения на механизмах встречной волны и за счет устранения обратной связи между резонаторами путем размещения в трубах дрейфа и в области нарастающего магнитного поля азимутально неоднородных электродинамических систем с привнесенными потерями.

Принципиальной проблемой при разработке сверхмощного гироклистрона явилась проблема получения высокого уровня мощности в сочетании с широкой полосой усиления. Были найдены закономерности выбора собственных частот резонаторов, их добротностей и взаимного расположения, при которых обеспечивается широкая полоса группировки. Полоса усиления при этом в первом приближении обратно пропорциональна добротности выходного резонатора.

Разработанные образцы гироклистронов с рабочей модой  $H_{02}$  имели значения выходной мощности 500–600 кВт (максимально полученная импульсная мощность составила 750 кВт), полосы рабочих частот 120–180 МГц (максимальное значение составило 240 МГц). Коэффициент усиления при этом составлял около 20 дБ и КПД 25–30%. Конструкции гироклистронов были разработаны с учетом предъявленных требований по устойчивости к воздействию внешних механических и климатических факторов и сроку службы приборов. Этими приборами было укомплектовано передающее устройство РЛС ММДВ «Руза» и обеспечено проведение успешных испытаний самой РЛС ММДВ «Руза».

Использование приборов гиротронного типа в радиолокаторах привело к необходимости решения ряда аппаратурных проблем:

- созданию мощных высоковольтных модуляторных устройств;
- разработке сверхпроводящих магнитных систем и обеспечению их эксплуатации в условиях полигонного комплекса;
- передаче мощного сигнала на удаленную и поворотную по двум осям антенну.

Вот как были решены эти и ряд других проблем в РЛС «Руза».

Модуляторы жесткого типа с максимальным выходным напряжением до 100 кВ и высокими требованиями к амплитуде и стабильности модулирую-

шего импульса длительностью около 100 мкс были реализованы на отечественных модуляторных лампах и емкостных накопителях.

Необходимые для работы гироклистронов магнитные поля формировались с помощью сверхпроводящих соленоидов, работающих при гелиевых температурах. Охлаждение криомагнитов обеспечивалось с помощью криогенной системы замкнутого типа с криодетандерами, которая была разработана НИИ «Криогенмаш». Система включала в себя также вакуумированные трубопроводы, подводящие жидкий гелий к криостатам, устройства ожижения азота и ряд вспомогательных устройств. Это была громоздкая и сложная в эксплуатации система. Представляется, что разработки систем рефрижераторного типа, так называемых «сухих» магнитов, успешно ведущиеся в США и в Японии, позволяют создать в настоящее время значительно более миниатюрные, надежные и простые в эксплуатации криомагнитные системы [6].

Тракты высокого уровня мощности были выполнены на круглых многомодовых волноводах диаметром 80 мм с волной  $TE_{01}$ . Основные потери в этом тракте общей длиной около 40 м определялись потерями на угловых поворотах и были связаны с преобразованиями в паразитные типы волн. В основу проектирования трактов были положены следующие принципы:

- обработка элементов тракта, прежде всего угловых поворотов, на минимально возможные потери;
- спрямление трассы всюду, где это возможно;
- фильтрация паразитных типов волн сразу после их возникновения.

Были отработаны угловые повороты с потерями не более 0,2–0,25 дБ и эффективные модовые фильтры. Тракт обеспечил передачу сигнала с импульсной мощностью 400–500 кВт с потерями около 4 дБ и модуляцией коэффициента передачи при поворотах антенны 0,3–0,5 дБ.

Работы, проведенные впоследствии по совершенствованию параметров линий передач высокого уровня мощности, позволили существенно сократить величину полных потерь волны  $H_{01}$ . Этого удалось достигнуть за счет оптимизации параметров прямых участков круглых волноводов, уменьшения потерь на угловых поворотах до значений менее 1%, совершенствования параметров вращающихся соединений, конусных переходов и других элементов линии передач. Значение суммарных потерь в линии передач, аналогичной по составу элементов, использованных в РЛС «Руза», может составить, по оценкам, 25–28%.

РЛС «Руза» работала на полигоне в течение нескольких лет совместно с радиолокационными станциями сантиметрового диапазона и обеспечила проведение радиолокационных наблюдений значительного количества ИСЗ и других космических объектов. При небольших размерах антенного полотна (7,2 м) и энергии зондирующего сигнала (100 Дж) она обеспечила дальность действия до 2000 км, рекордные точности измерения угловых координат объектов (СКО 12°) и высокую возможность наблюдения объектов в условиях повышенной ионизации атмосферы, возникающей при входе в нее объектов с космическими скоростями. Таким образом, нашей стране принадлежит приоритет в создании РЛС ММДВ с передающим устройством на базе гиросприборов и с фазированной антенной решеткой.

В ИПФ РАН (Н. Новгород), в настоящее время ведутся работы по созданию сверхширокополосных гироприборов, в том числе гиро-ЛБВ, с рабочей полосой частот до 10% в качестве выходных приборов для радиолокационных станций ММДВ будущего. Создание станций с шириной полосы зондирующего сигнала в несколько гигагерц позволит коренным образом улучшить основные параметры РЛС [7,8]. Аналогичные разработки интенсивно ведутся также в США.

В 2002 году американские специалисты опубликовали сообщение [9] о разработке высокомошной когерентной РЛС миллиметрового диапазона длин волн ( $W$ -диапазон, 94 ГГц) с импульсной мощностью 100 кВт и средней мощностью 10 кВт. Разработчик станции, получившей название WARLOK, — американская фирма Naval Research Laboratory (NRL). В выходном каскаде передатчика использован широкополосный (до 700 МГц) гироклистрон с рабочей модой  $H_{01}$  и коэффициентом усиления до 33 дБ. По сообщению, станция предназначена для изучения физики атмосферы, скученности облаков, прямого и обратного рассеяния при прохождении через атмосферу.

В 2005 году появилось сообщение [10] о начале разработки новой РЛС миллиметрового (94 ГГц) диапазона Haystack Ultra Wideband Satellite Imaging Radar (HUSIR). В передатчике этой станции планируется разместить гиро-ЛБВ и 16 гиротрионов на выходе, разработку которых ведет американская фирма CPI. Назначение станции: слежение с высокой разрешающей способностью за спутниками и другими космическими объектами вплоть до получения портрета целей.

Другим направлением, где могут эффективно использоваться РЛС ММДВ, являются информационные средства комплексов ПВО малой дальности. ОАО «Радиофизика» была разработана РЛС с широкоугольной фазированной решеткой для таких комплексов, позволяющая не только обнаруживать и сопровождать несколько воздушных целей, но и производить захват и сопровождение зенитных управляемых ракет (ЗУР) по сигналам ответчика, а также передачу команд на борт ЗУР. Такая многофункциональность информационного средства позволяет существенно сократить объем аппаратуры комплекса и увеличить его гибкость и тактические возможности. Структуры и программно-алгоритмическое обеспечение многофункциональных средств были отработаны при создании многофункциональных средств стратегического назначения и привнесены в область тактического оружия (рис. 3.2.4).

В качестве выходного прибора передающего устройства была использована специально разработанная для этой цели ЛБВ современного уровня с выходной мощностью (3 кВт) и низкой скважностью. Фазированная решетка отражательного типа с сектором электронного сканирования 90 градусов была разработана на базе аппаратного задела для средств стратегического назначения. Приемное устройство, вычислительный комплекс и другие средства были заново разработаны на современной элементной базе. Были созданы два экспериментальных образца РЛС, они были отработаны на стенде предприятия в безэховой камере (рис. 3.2.5) и в полигонных условиях. Однако опытные образцы РЛС так и не были созданы и ожидают своего заказчика. Не вызывает сомнения, что создание РЛС миллиметрового диапазона в указанных выше областях позволит не только коренным образом

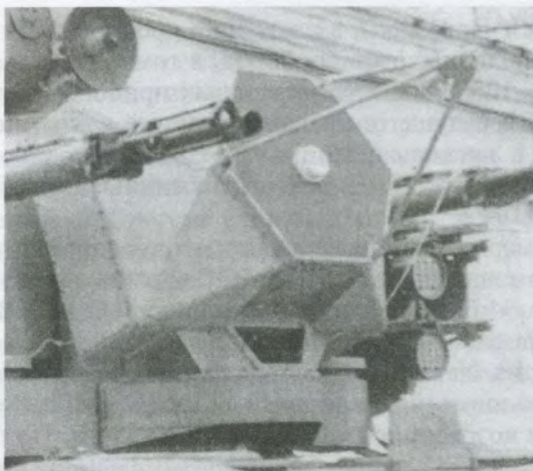


Рис. 3.2.4. РЛС ММДВ ближнего действия с ФАР

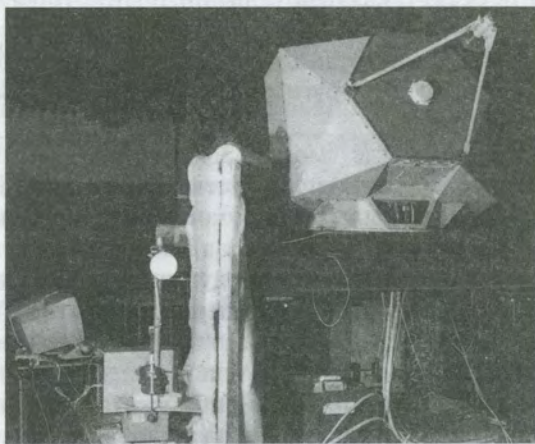


Рис. 3.2.5. Экспериментальный образец РЛС в безэховой камере

улучшить основные технические характеристики средств, но и сделает их более мобильными и дешевыми.

Наряду с созданием мощных РЛС ММДВ в последние годы большое внимание уделяется внедрению миллиметровых технологий в радиолокационные датчики различного назначения малого и сверхмалого действия. Наиболее распространенными РЛС ММДВ малого класса в настоящее время являются: навигационные, разведывательные, радиолокационные головки самонаведения, автомобильные РЛС. В подавляющем большинстве эти устройства размещаются на мобильных носителях либо на необслуживаемых стационарных постах. Как правило, к ним предъявляются жесткие массогабаритные требования, а небольшие дальности обнаружения сочетаются с предельными требованиями по угловому, радиальному и скоростному разрешению. Эти осо-



бенности наряду с необходимостью массового производства определило ряд инновационных технологий, применяемых при их проектировании:

- применение твердотельных технологий приемо-передающих устройств обеспечивает использование низковольтных источников питания, возможность работы с малой скважностью и уменьшение массы и габаритов усилителя мощности при заданной средней мощности излучения. Достижимая мощность передающих твердотельных устройств в  $K_a$ -диапазоне волн на основе современных арсенидгаллиевых НЕМТ-технологий 15—20 Вт в ближайшее время может быть превышена в 2—5 раз при переходе на GaN и SiC;
- применение цифровых устройств формирования и обработки когерентных широкополосных сигналов с внутримпульсной модуляцией. В сочетании с твердотельными передающими устройствами это обеспечивает необходимое отношение сигнал/шум за счет компрессии сигналов большой длительности или когерентных последовательностей сигналов, возможность адаптивного изменения параметров сигналов, а также значительное уменьшение массы и габаритов устройств формирования и обработки;
- короткое время обновления информации при секторном обзоре в широком диапазоне углов может быть обеспечено только при помощи электронного сканирования. Кроме отработанной технологии ФАР на основе ферритовых фазовращателей для РЛС ММДВ малого класса, привлекательны технологии ФАР с р-і-п-диодными и сегнетоэлектрическими фазовращателями, а также антенны с частотным сканированием. Значительно более низкие антенные характеристики последних по сравнению с ферритовыми ФАР компенсируются, с одной стороны, компактностью аппаратуры, а с другой, — быстрым временем (1—10 нс по сравнению с 50—100 мкс для ферритовых фазовращателей) переключения;
- получение высококонтрастных радиолокационных изображений при использовании специальных алгоритмов обработки когерентных сигналов: полного или ступенчатого гетеродинирования ЛЧМ-сигналов для обеспечения высокого разрешения по дальности; прямой и инверсной синтезированной апертур (САР и ИСАР) или доплеровского облучение луча (ДОЛ) для высокого разрешения по углам.

Информационные возможности РЛС ММДВ малого класса долгое время сдерживались недостаточным развитием средств цифровой обработки сигналов (ЦОС). Вычислительные комплексы с открытой архитектурой, успешно применяемые в мощных РЛС ММДВ, оказались слишком дороги и громоздки для РЛС малого класса. Решением этой проблемы стало создание одноплатных сверхминиатюрных спецвычислителей, выполняющих одновременно функции управления аппаратурой РЛС, формирования и обработки радиолокационных сигналов. Это стало возможным при появлении программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) с объемом эквивалентных вентилях 1 млн. и более и сигнальных процессоров, имеющих производительность более 1 млрд. теоретических операций в секунду. Разработанный в ОАО «Радиофизика» одноплатный радар-процессор для одноканальной РЛС

[11] имеет размеры  $50 \times 100$  мм, а для моноимпульсной РЛС —  $180 \times 220$  мм и обеспечивает полное функциональное управление аппаратурой РЛС, формирование и обработку сигналов с полосой до 20 МГц. Одноканальный радар-процессор был применен в цифровом приеме-передающем блоке твердотельной когерентной обзорной РЛС  $K_a$ -диапазона волн «Арго». Общий объем аппаратуры блока составил 7,5 л. В основу проектирования блока были положены следующие принципы:

- синхронизация вычислительного процесса, управление аппаратурой и формирование гетеродинов производится от одного высокостабильного термостатированного опорного генератора;
- внутри блока исключены все волноводные соединения;
- герметичный корпус блока выполняет функции теплоотвода для внутренней аппаратуры.

Предназначенная для работы в заполярье РЛС «Арго» (рис. 3.2.6) имеет антенный пост с герметичным жестким радиопрозрачным укрытием, выдерживающий ветровые нагрузки до 50 м/с, и систему антиобледенения. Антенное устройство типа «сыр» (одномерный параболоид, ограниченный двумя плоскостями), являющееся наиболее технологичным и простым в производстве, обеспечивает формирование ножеобразной ДН  $0,3^\circ \times 10^\circ$  с удовлетворительными уровнем боковых лепестков и коэффициентом усиления. Скорость вращения антенного устройства выбрана в интервале от 4 до 40 с/оборот и обеспечивает, с одной стороны, возможность быстрого обновления информации, а с другой, — большую дальность обнаружения и высокое разрешение по радиальной скорости. Твердотельный передатчик с кондуктивным охлаждением имеет импульсную мощность 5 Вт при скважности 5. Зондирующие сигналы представляют собой когерентную последовательность коротких импульсов без частотного наполнения и нелинейно частотно-модулированных импульсов, обеспечивающих разрешение 7,5 м на всем диапазоне рабочих дальностей от 30 м до 15 км, а также доплеровское разрешение 2 м/с в режиме быстрого и 0,2 м/с в режиме медленного вращения.



Рис. 3.2.6. РЛС «Арго»

Испытания РЛС «Арго» на полигоне «Большая Волга» показали, что по дальности обнаружения она не уступает заявленным величинам обзорных РЛС ММДВ «Балтика», «Атлантика» с 10-кВт магнетронными передатчиками. В отличие от некогерентных аналогов РЛС «Арго» позволяет независимо наблюдать подстилающую поверхность и движущиеся объекты. По качеству радиолокационного изображения карта местности, полученная РЛС «Арго», может сравниться с космическими съемками. На рис. 3.2.7 представлены радиолокационная карта и космический снимок Иваньковского водохранилища в г.Дубна. Коэффициент подавления подстилающей поверхности 50 дБ позволяет выделять малоразмерные цели на фоне местников с большими ЭПР. На рис. 3.2.8 представлен радиопортрет движущегося малоразмерного катера и волн, расходящихся от него. Возможность наблюдения неподвижных малоразмерных объектов была продемонстрирована при наблюдении рыбаков на Иваньковском водохранилище.

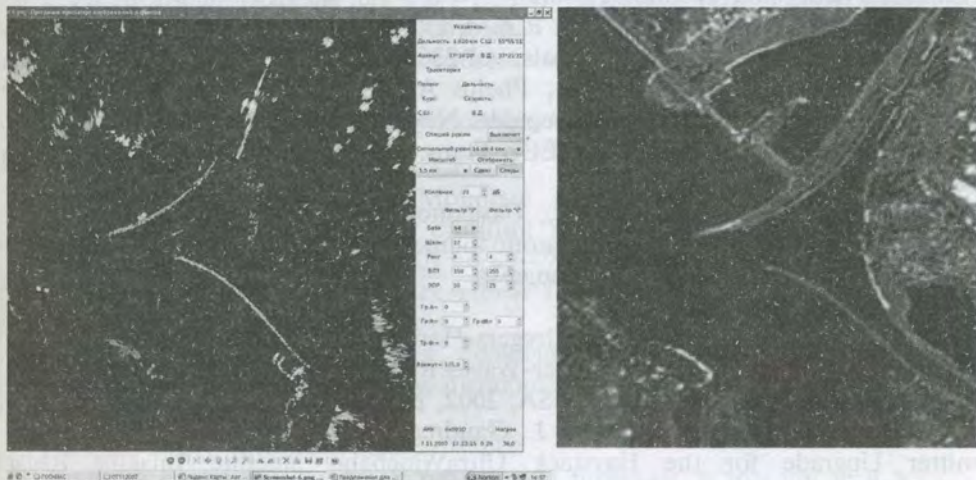


Рис. 3.2.7. Карта и космический снимок Иваньковского водохранилища

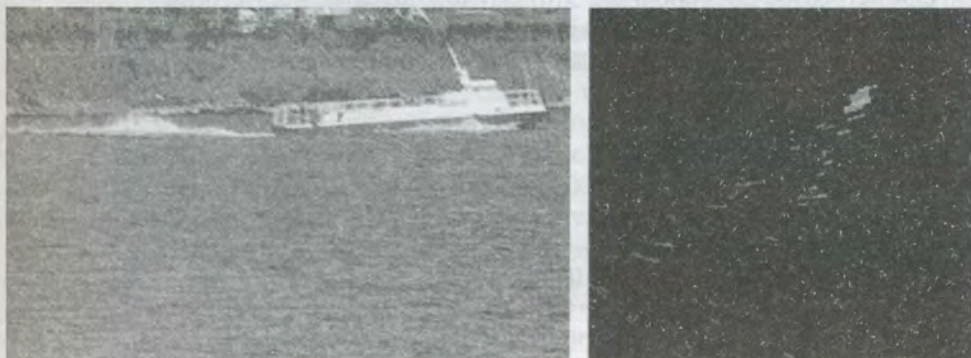


Рис. 3.2.8. Радиопортрет катера и волн

### Литература

1. Толкачев А.А., Егоров Е.Н., Шишлов А.В. Некоторые тенденции развития радиолокационных и связанных систем. — Радиотехника, 2006, № 4.
2. Abuzahara M.D., Avent R.K., The 100-kW Millimeter-Wave Radar at the Kwajalein Atoll. — IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1994, vol. 36, № 2, April.
3. Толкачев А.А., Левитан Б.А., Мясников В.А., Соколов Е.В., Денисов Г.Г. Гироприборы в мощной радиолокации миллиметрового диапазона волн. — Радиотехника, 2007, № 4.
4. Tolkachev A.A., Levitan B.A., Solovjev G.K. et al. A Megawatt Power Millimeter-Wave Phased-Array Radar. — IEEE AES Systems Magazine, 2000, vol. 15, № 7, July.
5. Tolkachev A.A., Makota V.A., Pavlova M.P. et al. A Large-Aperture Radar Phased Array Antenna of  $K_a$  Band, The 28 Moscow International Conference on Antenna Theory and Technology, 1998.
6. Good J.A., Mitchell R., Hall R.A. A 15T Criogen Free Magnet. — Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol 226, p. 2065—2066, May 2001.
7. Denisov G.G., Bratman V.L., Phelps A.D.R., and Samsonov S.V. Gyro-TWT with a Helical Operating Waveguide: New Possibilities to Enhance Efficiency and Frequency Bandwidth. — IEEE Trans. on Plasma Science, 1998, vol. 26, № 3, pp. 508—518.
8. Братман В.Л., Денисов Г.Г., Самсонов С.В., Кросс А.У., Фелпс А.Д., Хе В. Высокоэффективные широкополосные гиро-ЛБВ и гиро-ЛОВ со спирально-гофрированными волноводами. — Известия вузов. Радиофизика. Т. 50. № 2, С. 104. 2007.
9. Danly B.G., Cheung J., Gregers-Hansen V., Linde G. and Ngo M. WARLOC. A High Power Millimeter-Waves Radar. 27 Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves San-Diego CA USA, 2002, p. 233—234.
10. Kempkes M. A., Hawkey T. J., Gaudreau M., Philips R.A., W-Band Transmitter Upgrade for the Haystack UltraWideband Satellite Imaging Radar (HUSIR). 6 Int. Vacuum Electronics Conf. IVEC Noordwijk Netherlands, 2005, p. 207—210.
11. Ампилов О.В., Никитин М.В., Пяткин А.К., Толкачев А.А., Топчиев С.А. Некоторые проблемы аппаратной реализации устройств цифровой первичной обработки радиолокационных сигналов на современной элементной базе. — Радиотехника, 2006, № 4.