

Цифровые антенные решетки: аспекты развития

В статье рассмотрены основные аспекты применения цифровых антенных решеток в радиолокационной технике.

Особенностью нынешнего этапа развития информационных систем армий экономически развитых государств является повсеместное внедрение новых стандартов цифровой обработки сигналов, позволяющих существенно повысить эффективность специальной техники и вооружений. В частности, применительно к телекоммуникационным и радиолокационным средствам, речь пойдет об использовании новейших достижений технологии цифрового диаграммообразования (ЦДО) [1, 2]. В бывшем СССР одним из наиболее последовательных приверженцев этого направления была киевская научная школа, возглавляемая профессором Варюхиным В.А. Данным научным коллективом (Военная академия ПВО Сухопутных войск имени Василевского А.М.) на протяжении 60-х - 90-х годов были созданы теоретические основы многоканального анализа со сверхразрешением сигналов, всесторонне апробирован ряд макетов РЛС с цифровыми антенными решетками (ЦАР) (фото 1), проведены успешные полигонные испытания опытных образцов уникальных РЛС (фото 2).

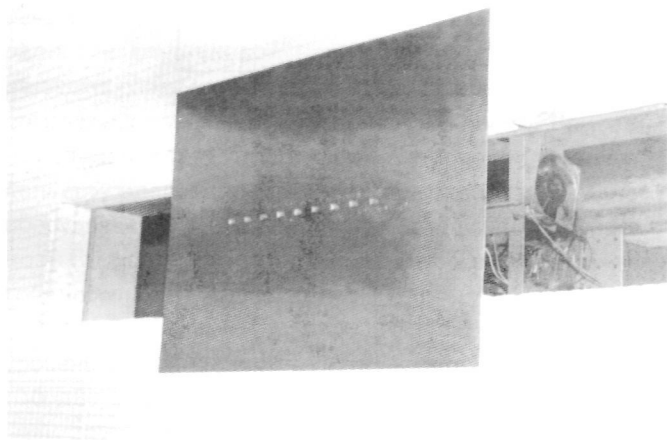


Фото 1

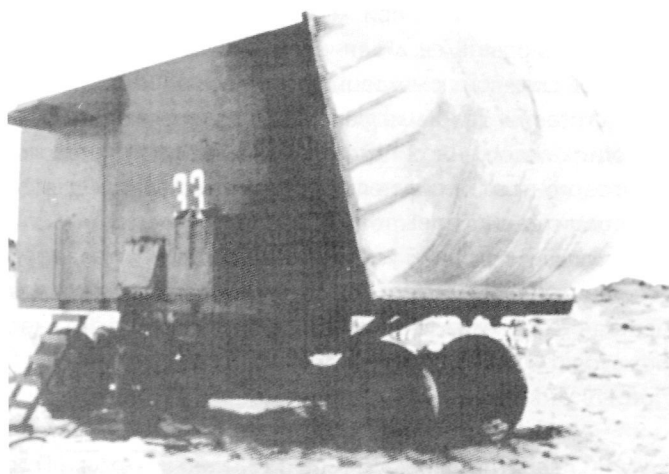


Фото 2

Во многом усилиями указанной научной школы удалось снять ореол экзотичности с ЦДО и существенно расширить круг специалистов, убежденных в перспективности технологии ЦАР для нужд радиолокации. Как следствие, к началу 90-х годов в СССР существовал весьма представительный ряд научных школ, совокупные достижения которых по многим теоретическим и практическим вопросам опережали аналогичные разработки за рубежом. Примером тому могут служить РЛС Нижегородского НИИРТ 55Ж6У и 1Л119, в которых впервые для серийных мобильных систем ПВО было реализовано цифровое диаграммообразование в метровом диапазоне волн. Однако отставание в развитии элементной базы, обусловленное разрывом экономических связей после развала СССР и отсутствием должного финансирования новых разработок, на сегодняшний день привело к утере странами СНГ многих из завоеванных ранее приоритетов.

Ситуация же за рубежом в вопросах внедрения РЛС с ЦАР отчетливо характеризуется существенным расширением сфер их применения в радиолокации путем реализации

ЦДО в дециметровом и сантиметровом диапазонах волн, перехода от решения оперативно-стратегических задач к тактическим приложениям на фоне значительного удешевления серийных образцов и роста их функциональных возможностей. При таких темпах внедрения данного вида техники следует ожидать ее появления и на вооружении специальных мобильных подразделений ряда зарубежных стран уже в ближайшем десятилетии. Поводом для такого оптимизма могут служить известные варианты применения ЦАР в РЛС малой дальности, на рассмотрении которых имеет смысл остановиться подробнее.

Рассмотрим особенности технологии ЦДО (digital beam-forming) и ее преимущества. РЛС на базе ЦАР - это высокоинформативные приемные системы, способные воспринять всю информацию, содержащуюся в структуре пространственно-временных электромагнитных полей на раскрытие антенной решетки, и при минимальном уровне потерь трансформировать ее в данные о наличии и параметрах объектов сложной помехово-целевой обстановки [2].

Достигается такой эффект благодаря включению на выходе каждого антенного элемента решетки аналого-цифрового преобразователя (АЦП), естественно, с учетом предварительного выполнения, при необходимости, согласующих операций усиления, преобразования частоты и аналоговой фильтрации. Схематически вариант структуры приемного сегмента ЦАР показан на рис. 1.

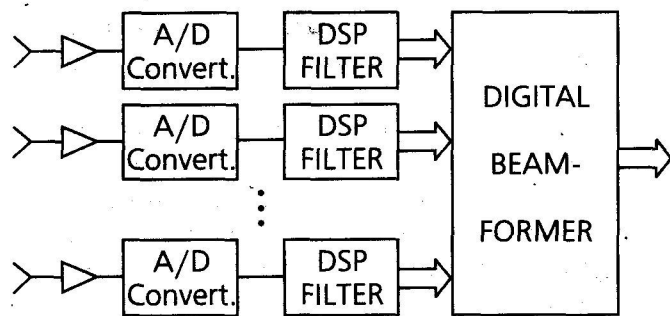


Рис. 1. Приемный сегмент РЛС с ЦАР

Именно спецификой размещения АЦП схемотехника цифрового диаграммообразования заметно отличается от традиционных фазированных решеток (ФАР).

Основной особенностью перспективных схемных решений метрового и дециметрового диапазонов волн является оцифровка сигналов непосредственно на несущей частоте. При этом исключаются операции преобразования частоты, детектирования сигналов с выделением их огибающей, что сокращает энергетические потери.

повышает чувствительность приемной системы и упрощает аппаратную реализацию. Тактовый сигнал на все аналого-цифровые преобразователи должен распределяться от общего генератора тактовых импульсов с таким расчетом, чтобы АЦП всех приемных каналов срабатывали одновременно. Далее полученная информация о мгновенном амплитудно-фазовом распределении электромагнитного поля на раскрытие антенной системы в виде отсчетов АЦП либо их частичных сумм сбрасывается в буферное запоминающее устройство. Последующее диаграммообразование осуществляется программным способом с помощью цифровых сигнальных процессоров (DSP) либо программируемых матриц логических элементов (FPGA), выполняющих синфазное взвешенное суммирование напряжений всех первичных приемных каналов для интересующих угловых направлений.

При цифровом формировании зондирующего луча картина изменяется на противоположную: синтезированный с помощью DSP или FPGA массив цифровых напряжений зондирующего сигнала поступает на цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), с выходов которых после усиления мощности, фильтрации и переноса по частоте аналоговые сигналы подаются на запитку соответствующих антенных излучателей.

Рассмотренный принцип цифрового диаграммообразования является достаточно общим, и в конкретных устройствах может претерпевать определенные вариации, обусловленные возможностями элементной базы, опытом разработчиков и их теоретической подготовкой, объемами финансирования того или иного проекта.

В частности, в последнее время многие зарубежные фирмы интенсивно изучают возможности реализации приема-передающих каналов ЦАР по технологии программно реконфигурируемых радиомодулей (Software Radio), типовая схема которых представлена на рис. 2.

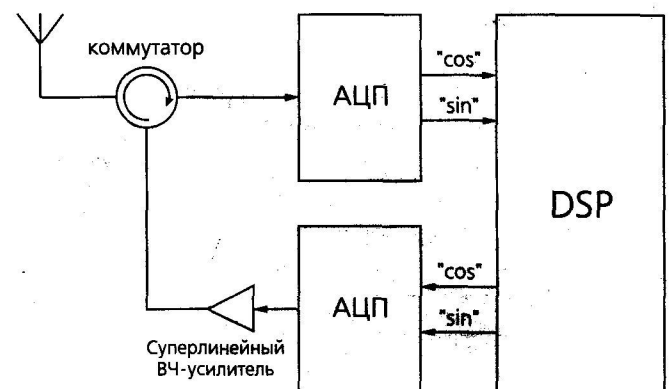


Рис. 2.

в основу схемотехнического замысла Software Radio положена точно согласованная интеграция процессора цифровой обработки сигналов (DSP или FPGA), АЦП и ЦАП, подключенных через общий коммутатор к антенному элементу. При этом для обеспечения требуемого качества излучаемых сигналов используется суперлинейный усилитель мощности, гарантирующий идеальный переход от модулированных радиочастотных колебаний по выходу ЦАП к высокомоощным сигналам с достаточным для их излучения уровнем мощности и низкой эмиссией таковой в соседние каналы. Процессор цифровой обработки сигналов (DSP или FPGA), реализует в программном виде гибко перестраиваемые схемы модуляции-демодуляции, протоколы обработки сигналов в режиме приема и передачи данных, другие функции.

При высоком темпе дискретизации отсчетов сигналов и больших количествах каналов концепция программной реконфигурации существенно снижает требования к производительности диаграммообразующего модуля. Подобное построение приема-передающих каналов ЦАР позволяет также избежать аппаратной зависимости процедур обработки сигналов и упрощает их адаптацию под нужды того или иного стандарта функционирования. На основе технологии цифрового диаграммообразования может быть получена максимальная унификация узлов и блоков аппаратуры, простота реконфигурации и модификации радиолокационных систем, сводящаяся зачастую лишь к замене их программного обеспечения. Более того, при выполнении приема-передающих модулей ЦАР на основе программно-реконфигурируемой архитектуры, впервые можно рассчитывать на возможность воплощения в жизнь принципа интегрированной апертуры, то есть объединения антенных систем и высокочастотных блоков всех типов бортовых радиотехнических средств в единую структуру с минимизацией аппаратуры и побочных радиоизлучений.

В отношении специального вооружения и техники речь идет о монолитной интеграции систем радиолокации, радио- и спутниковой навигации, радиотехнической разведки, радиосвязи, радиопротиводействия (постановки помех) и определения госпринадлежности. При этом обеспечивается оптимизация ресурсно-функциональной адаптации архитектуры радиоэлектронного оборудования под определенные задачи, существенно возрастает эффективность бортового радиоэлектронного комплекса в целом. Например, переход к использованию ЦАР для нужд GPS позволяет довести уровень подавления множественных помех до 90-100 дБ, в то время как существующие средства GPS-навигации теряют работоспособность при воздействии помехового источника мощностью 0,25 Вт уже с дальности 4 км [3].

Способность ЦАР к многосигнальному приему в широком, телесном угле в сочетании с возможностью сверхрелеевого разрешения сигналов позволяет осуществить мультистандартное функционирование ЦАР в каждом луче диаграммы направленности с решением, например, радиолокационных задач на фоне связанных или навигационных, в том числе в условиях интенсивного радиопротиводействия. Этому способствует цифровое формирование в программно реконфигурируемых каналах высокоидентичных частотных фильтров на выходах приемных устройств, что служит предпосылкой глубокой компенсации широкополосных помеховых сигналов. В совокупности с наращиванием динамического диапазона при накоплении отсчетов напряжений в процессе пространственно-временной обработки создаются условия для реализации недостижимой ранее помехозащищенности РЛС.

Немаловажным достоинством ЦАР является также сокращение времени формирования радиолокационных изображений за счет одновременного многолучевого приема сигналов во всем рабочем секторе. При этом облучение пространства может выполняться расфокусированным сигналом передатчика с «засветкой» широкого телесного угла, а упомянутая выше реализация сверхрелеево разрешающей способности по направлениям прихода сигналов, их доплеровской частоте и времени задержки способствует достижению требуемой детализации панорамных срезов пространственной обстановки.

Полнота реализации перечисленных и ряда других преимуществ ЦАР во многом зависит от качественных параметров используемой элементной базы.

Понимая роль данного ключевого фактора, многие зарубежные фирмы ориентируются на создание собственных комплектующих. Примером этому может служить шведская программа «Радар на одном чипе» (Radar on a Chip, ROAC) [4], исследования в рамках которой являются частью более обширного проекта Smart Sensors, финансируемого шведским фондом стратегических исследований (Swedish Foundation for Strategic Research), с привлечением в качестве исполнителей Linkoping University, FOA, ACREO и фирм Ericsson, Saab, CelsiusTech Systems. Основная суть ROAC сводится к отработке двухчиповой концепции приемного канала ЦАР (рис. 3) для радиотехнических систем X-диапазона (8-12 ГГц). При этом первый из двух чипов, выполненный по монолитной арсенид-галлиевой MMIC-технологии, обеспечивает аналоговую обработку сигналов с понижением их несущей, а второй - CMOS-кристалл - аналого-цифровое преобразование (ADC), цифровое формирование квадратурных составляющих (I/Q-spiit) и их фильтрацию (DDC, EQU).

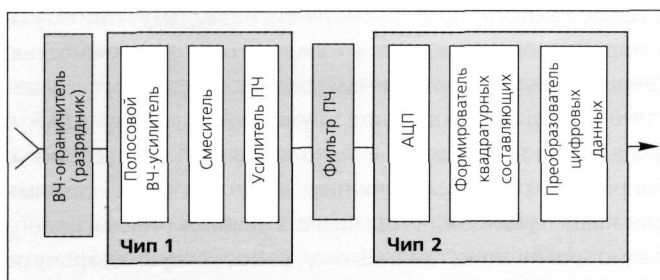


Рис. 3. Приемный аналого-цифровой модуль ROAC

Благодаря реализации АЦП в CMOS-версии проблема согласования в приемном модуле решается единожды, на этапе перехода от аналогового представления сигналов к цифровому, тогда как выполнение АЦП на основе GaAs потребовало бы согласования не только выхода аналогового тракта со входом АЦП, но и выхода АЦП - со входом CMOS-процессорного сегмента.

Другим направлением в развитии элементной базы ЦДО является создание специализированных модулей многоканальной обработки сигналов. Номенклатура доступных на мировом рынке устройств такого рода достаточно разнообразна [5] и может быть классифицирована по типу интерфейса, используемого для выщачи результатов обработки на диаграммообразующий модуль (PCI, CompactPCI, VME, FPD и т. д.), в зависимости от вида интегральной схемы спецвычислителя (DSP или FPGA), по конструктивному признаку (монолитная или субмодульно-модульная).

С точки зрения удобства совместимости с программным обеспечением компьютеров линии Intel PC, предпочтительным выбором являются решения в классе интерфейсов PCI и CompactPCI, хотя в приложениях, критичных к условиям эксплуатации, как правило, PCI-концепция не получает развития и выбор происходит в пользу CompactPCI-модулей или VME-устройств, несмотря на их дороговизну.

Использование FPGA в отличие от DSP-схемотехники позволяет жестко синхронизировать пошаговое выполнение алгоритмов ЦОС в многоканальных системах благодаря отказу от использования аппаратных прерываний. Во многом по этой причине FPGA-направление в обработке сигналов существенно потеснило рынок процессорных систем и заняло рекордные позиции по достигнутому показателям. Например, компания Nallatech Ltd. (Великобритания) 9 августа 2001 года разместила на своем Интернет-сайте информацию о создании CompactPCI-модуля Venadic в конструктиве 6U, содержащего двадцать 14-разрядных АЦП AD6644, имеющих тактовую частоту до 65 МГц и граничную полосу анало-

говых входных сигналов более 250 МГц (фото 3). Функциональная схема «рекордсмена» приведена на рис. 4. Данный модуль относится к классу монолитных FPGA-устройств и в случае оцифровки квадратурных составляющих аналоговых сигналов позволяет сформировать цифровой отклик 10-канальной ЦАР, взяв на себя, при необходимости, функции цифрового формирования лучей.

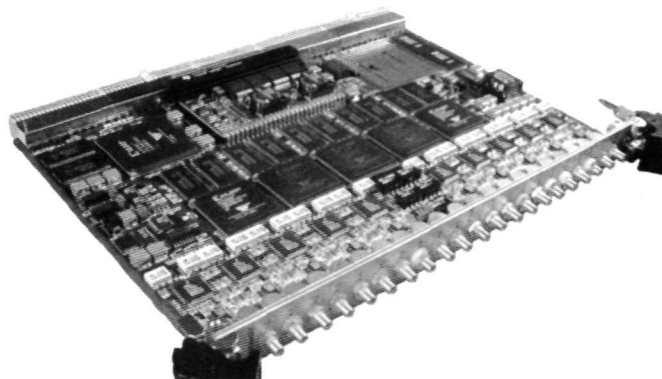


Фото 3

Указанные модули могут использоваться для установки в многослотовые шасси (Backplane) с CompactPCI-интерфейсом. Предельный вариант таких конструктивов рассчитан на 21-слотовую компоновку, что при использовании одного хост-процессорного модуля позволяет обработать квадратурные отклики 400 каналов ЦАР. Однако, низкая пропускная способность стандартной CompactPCI-шины вряд ли позволит обеспечить функционирование систем с такой конфигурацией без перерывов в поступлении информации.

Завершая рассмотрение основных схемотехнических подходов к реализации ЦАР, следует отметить, что наиболее узкое место современных технологий - это все еще недостаточное быстродействие АЦП и ЦАП, низкая пропускная способность интерфейсов межмодульных соединений. Темпы же роста производительности FPGA и DSP существенно опережают возможности средств ввода-вывода цифровых данных.

Прогресс в решении этих проблем неизбежно расширит не только сферы применения ЦАР, но и функциональные возможности радиотехнических систем, созданных на их основе. Пока же наибольшее распространение в тактическом звене получают серийные РЛС со сравнительно малым количеством элементов и преимущественно с цифровым диаграммообразованием в одной угловой плоскости [1]. Характерным примером реализации новых тактических требований к радиолокационной технике является РЛС Giraffe AMB (Agile Multi Beam)

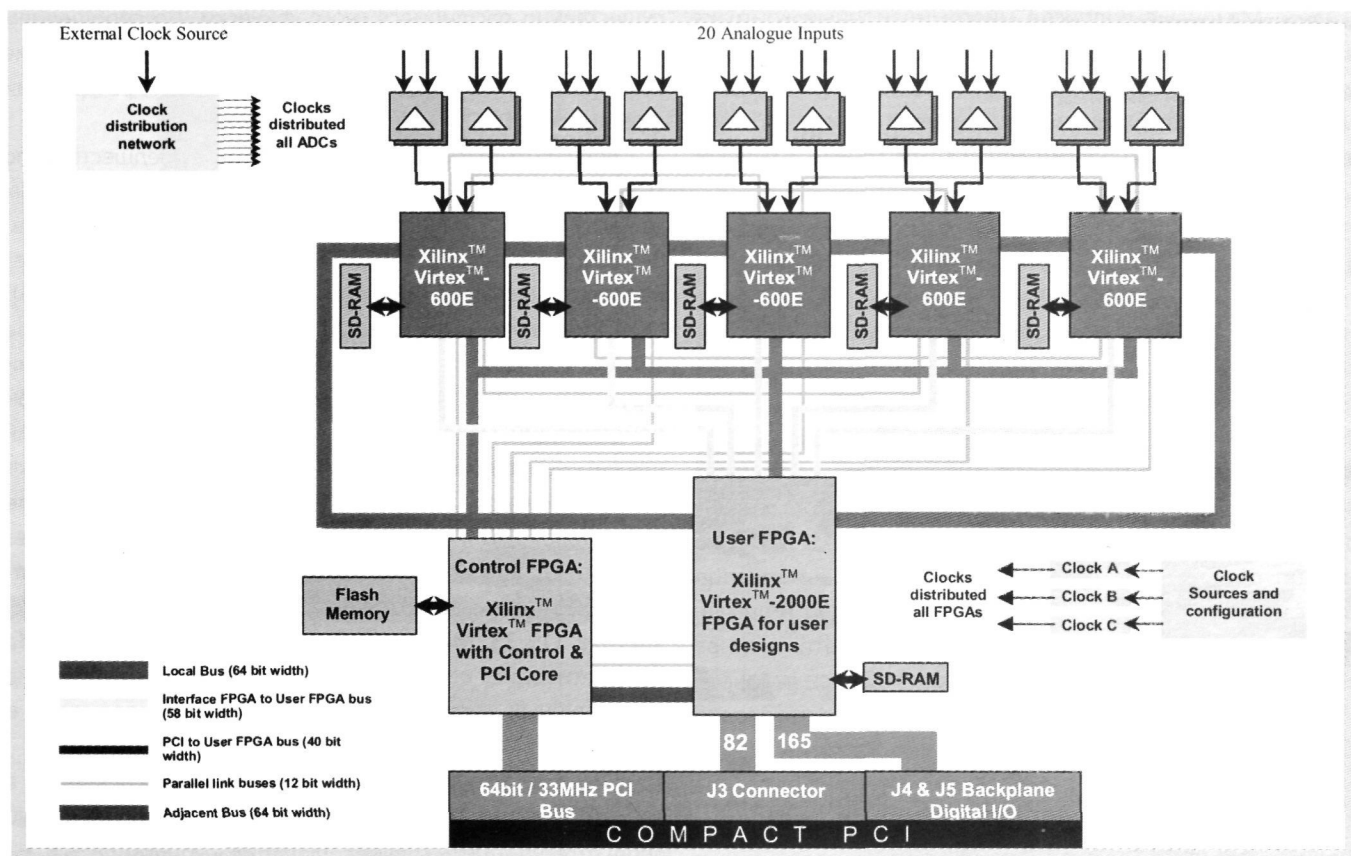


Рис. 4

шведской фирмы Ericsson Microwave Systems AB.

Разработка опытного образца радара Giraffe AMB была завершена в 1997 г. в рамках контракта стоимостью 80 миллионов долларов и первоначально ее задачей было создание опытного образца трехкоординатной обзорной РЛС С(С)-диапазона для нужд новой шведской роботизированной зенитно-ракетной системы RBS 23 BAMSE. Внешний вид Giraffe AMB приведен на фото 4.

Аппаратура Giraffe AMB вместе с рабочими местами для трех операторов размещается в одном 10-тонном контейнере длиной 6 м на автомобильном шасси. Время боевого развертывания составляет 10 минут, высота максимального подъема антенны 13 метров. Мощность автономного энергоагрегата РЛС 25-30 кВт.

Зона обзора пространства простирается по дальности от 30 до 100 км и до 20 км по высоте. При этом на передачу формируется один широкий луч, а на прием - веер цифровых лучей в угломестной плоскости. Такой подход позволил не только улучшить высотные характеристики зоны обзора (до 70° по углу места), но и обеспечить при вращении антенны темп обновления информации по целям 1 раз в секунду.

Наряду с сухопутной версией разработан также морской вариант данной РЛС (фото 5). В январе 1998 г.



Фото 4

Ericsson Microwave подписал многомиллионный контракт на поставку шведскому оборонному ведомству пяти морских РЛС Sea Giraffe AMB, предназначенных для установки на новых шведских корветах класса «Visby», выполненных по технологии «стелс». Sea Giraffe - первый

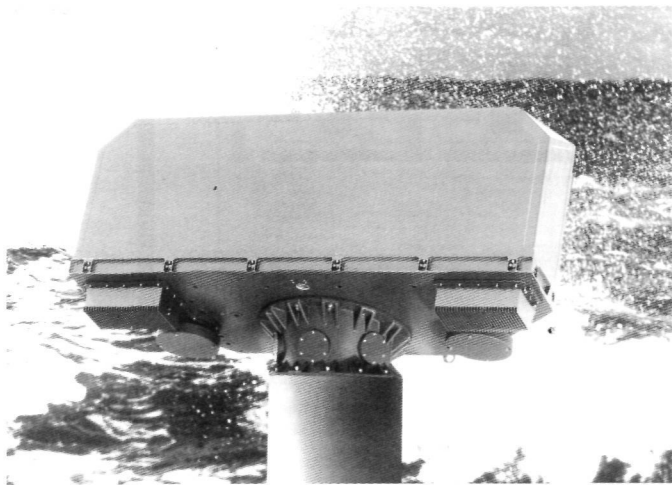


Фото 5

радар с ЦАР, адаптированный для размещения под малозаметным обтекателем (фото 6). Помимо функций обзора воздушного пространства Sea Giraffe позволяет вести наблюдение за прибрежной зоной и надводными целями, максимальное количество одновременно сопровождаемых трасс - 150. В последнее время спрос на эти РЛС

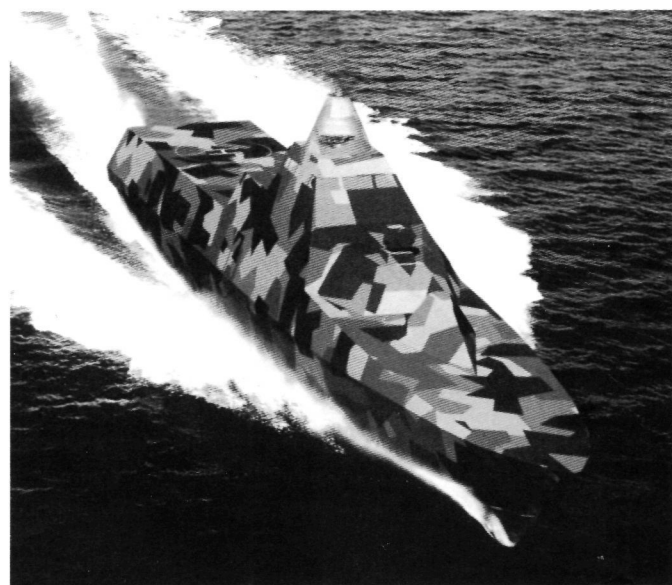


Фото 6

существенно расширился географически. По сообщениям прессы, Sea Giraffe будет поставлен на вооружение ВМС Польши, а сухопутный вариант - для подразделений французских ПВО.

Следует отметить, что созданию Giraffe предшествовало многолетнее участие EMW в разработке демонстрационных макетов РЛС с ЦАР. Один из последних таких проектов, широко освещавшихся в научных кругах, получил наименование AIMT (Antennintegrerad microvågsteknik) [6]. Он выполнялся по заказу шведского оборонного агентства (FOA) в кооперации с другими научно-исследовательскими структурами с 1992 по 1998 гг. В рамках проекта был создан действующий макет 12-канальной РЛС с линейной ЦАР для рабочей полосы частоты 2,8-3,3 ГГц. Антенная решетка была сформирована из 12-ти вертикальных массивов излучателей, по 4 диполя в каждом, размещенных через половину длины волны. Оцифровка сигналов осуществлялась с помощью 12-разрядного АЦП на промежуточной частоте (19,35 МГц) через 3/4 ее периода (частота дискретизации составила 25,8 МГц). Формирование квадратурных составляющих сигналов производилось в цифровом виде.

Учитывая положительные результаты, полученные в ходе AIMT-проекта, можно предположить, что основные аппаратно-алгоритмические решения, обработанные на том этапе, вошли и в основу РЛС Giraffe AMB. В этой связи следует отметить, что, в соответствии с рекомендациями AIMT, цифровое диаграммообразование по классическому методу дискретного преобразования Фурье либо Бартлетта рассматривалось как аппарат первичного, грубого обнаружения целей, по результатам которого в узких пространственных секторах было рекомендовано использовать методы сверхразрешения. Среди таковых предпочтение отдавалось процедурам Кейпона и MUSIC [7]. Указанные методы сверхразрешения призваны осуществлять точную угловую пеленгацию целей, разрешить групповые объекты и режектировать сигналы помеховых источников. Подобная стратегия обработки, вполне вероятно, может быть реализована и в РЛС Giraffe AMB.

Еще одним примером успешного использования ЦДО в РЛС малой дальности действия (до 20 км) стала тактическая РЛС с ЦАР CLOSE LPi, разработанная другой шведской фирмой CelsiusTech Systems (фото 7). В ЦАР CLOSE LPi реализовано 8-канальное ЦДО по углу места, которое позволило задействовать в обработку сигналов эффективные алгоритмы сверхрелеевого разрешения целей [8]. При этом средняя излучаемая мощность твердотельного передатчика составляет всего 30 Вт. Рабочий диапазон частот 2,9-3,3 ГГц. Среднеквадратическая ошибка измерения угловых координат по типовым аэродинамическим целям не превышает 1 градуса.

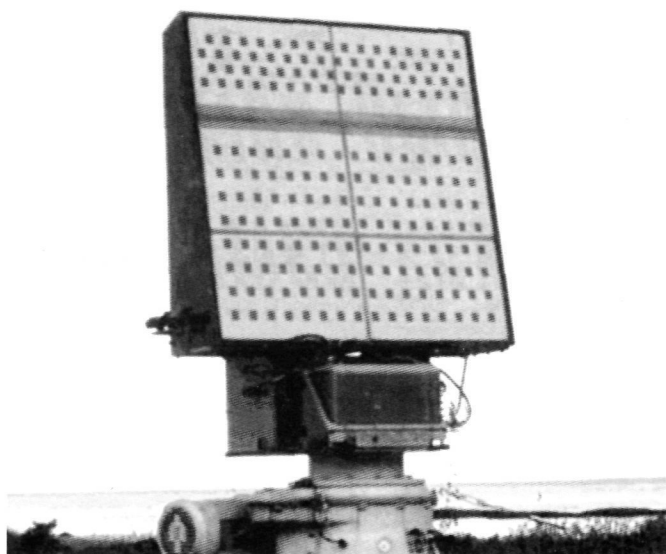


Фото 7. РЛС CLOSE LPI.

Весь рабочий сектор по углу места (от 0° до 30°) «засвечивается», подобно Giraffe AMB, одним широким зондирующим лучом, что позволяет, по мнению разработчиков, не только повысить оперативность обзора пространства, но и снизить спектральную плотность излучаемой мощности в интересах живучести РЛС в условиях применения противорадарных ракет.

20-ти километровая зона действия по дальности разбита на 230 стробов, глубина подавления пассивных помех заявлена в 30 дБ, что довольно неплохо для РЛС с вращающейся антенной системой (скорость вращения антенной решетки - 30 или 60 об/мин.). Наряду с сухопутным исполнением, предусмотрен корабельный вариант РЛС, который может использоваться в качестве обзорно-прицельного радара как всепогодная альтернатива оптико-электронным средствам. При этом максимальное количество сопровождаемых трасс воздушных и надводных целей равно 50. ЦАР в совокупности с приемо-передающими модулями имеет габариты всего лишь 1,1x0,5x1,2 м при весе 80 кг, блок обработки сигналов размером 0,6x0,4x0,4 м весит 25 кг.

Учитывая преимущества ЦАР, германские специалисты в свое время предлагали реализовать на этой основе также РЛС западноевропейской системы тактической ПРО MEADS [9]. Продвижением данной идеологии построения РЛС в проекте MEADS занимались фирмы Siemens и DASA. По мнению их специалистов, переход к использованию ЦДО явится крупнейшим технологическим достижением, способным окупить финансовые затраты благодаря существенному приросту эффективности функционирования

радиолокационного вооружения, особенно в условиях сложной помеховой обстановки.

Перечень рассмотренных вариантов реализации ЦАР является далеко не полным и непрерывно расширяется. Интенсивность финансирования соответствующих НИОКР и их многообразие подтверждают тезис о превращении ЦДО в основную технологию РЛС.

В заключение остается отметить, что изложенные в серии работ автора и других исследователей пути повышения точности угловой пеленгации, методов доплеровской селекции, а также снижения инструментальных погрешностей в дальномерных процедурах свидетельствуют о значительных резервах, существующих в РЛС с ЦАР для улучшения качества измерения параметров сигналов. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что эпоха развития ЦАР в радиолокации будет иметь достаточно протяженный исторический срок, значительно превышающий период использования возможностей фазированных антенных решеток. С этим необходимо считаться, планируя направления научных исследований в интересах разработки специального вооружения и техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слюсар В. И. Идеология построения мультистандартных базовых станций перспективных систем связи // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. — 2001 — Т. 44. — № 4-С 3-12.
2. Слюсар В. И. Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации. // Электроника: НТВ. — 2001. — № 3. — С. 42-46.
3. NavWar- The New Electronic Warfare. Division of Command and Control Warfare Technology Annual Report 1998. - FOA-R-99-01089-503,504,616 - SE - April, 1999.
4. <http://www.ifm.liu.se/Elecdev/RadarOnChip/>.
5. Слюсар В.И. Модульные решения в схемотехнике цифрового диаграммообразования. // Электроника: НТВ. - в печати.
6. FOA. Division of Sensor Technology. - Annual Report- 1997. http://www.foa.se/pdf/3an_97.pdf.
7. FOA. Division of Sensor Technology. — Annual Report — 1999 http://www.foa.se/pdf/3an_99.pdf.
8. CLOSE LPI Radar - CelsiusTech Electronics AB. - Sweden. - <http://www.celsius-tech.se/electronics/sensors/CLOSE/close.htm>.
9. Wolfgang Eriewein and Wolf Krueger MEADS: Experiences and Possible Contributions by German Industry. — Bonn: WEHRTECHNIK, Jun. 1995. - P. 19-21.