

Фазированные антенные решетки

Т.Корнеева

Перспективные программы НИОКР

Фазированные антенные решетки (ФАР) прошли долгий путь развития. Первые ФАР были созданы более 35 лет назад и с тех пор находят широкое применение в различных радиоэлектронных системах. Интерес к ним не ослабевает и сегодня. Об этом свидетельствуют не прекращающиеся поиски новых, эффективных решений, опирающихся на самые современные технологии и способных существенно расширить сферы применения ФАР.

Достижения последних десятилетий

Несомненные успехи в разработке фазированных антенных решеток (ФАР), достигнутые за последние десятилетия, обеспечили их широкое использование в различных радиоэлектронных системах. Примерами таких систем могут служить зенитно-ракетный комплекс Patriot, бортовая система дальнего обнаружения целей AEGIS, радиолокационная станция (РЛС) обнаружения артиллерийского и минометного огня TPQ-37, РЛС GPN-22 (США) и РЛС Flap Lid (Россия). Первой РЛС с фазированной антенной решеткой была станция AN/TPS-25 (США), работающая в Х-диапазоне волн (5,2–10,9 ГГц). Она и в наши дни эксплуатируется на военных и гражданских аэродромах для управления заходом летательных аппаратов на посадку. Антенна этой РЛС состоит из отражателя большого диаметра, обеспечивающего необходимый коэффициент усиления, и облучателя в виде ФАР, в состав которой входят 824 ферритовых фазовращателя. Сейчас выпускается модернизированный вариант этой станции, получивший обозначение GPN-22. В разных странах мира около 60 станций такого типа используются для управления движением военных и гражданских самолетов. Первой РЛС, в антенной решетке которой установлены твердотельные приемопередающие элементы, была станция PAVE PAWS, работающая в УВЧ-диапазоне. ФАР этой РЛС имеет два раскрытия по 1792 приемопередающих модуля с выходной мощностью 330 Вт. Каждый модуль питает дипольный излучающий элемент. Вместе с резервными неизлучающими диполями ФАР составляет около 5300, а ее внешний диаметр достигает почти 31 метра. При необходимости дополнительные элементы могут повысить чувствительность РЛС на 10 дБ. Основные параметры наиболее известных систем с ФАР приведены в табл. 1.

Система	Частотный диапазон	Число выпущенных систем	Число фазовращателей в ФАР	Общее число элементов	Фирма-изготовитель
AN/TPS-25	X	18	824	14850	Raytheon
AN/GPN-22	X	60	443	26580	Raytheon
Cobra Dane	L	1	15360	15360	Raytheon
PAVE PAWS	УВЧ	4	1792/раскрыв	14336	Raytheon
BMEWS	УВЧ	2	2560/раскрыв	12800	Raytheon
Cobra Judy	нет данных	1	12288	12288	Raytheon
Patriot	C	173	5000	865000	Raytheon
AEGIS/SPY-1	S	234	4000	936000	Lockheed-Martin
B-1	X	100	1526	152600	Grumman/Northrop
AN/TPQ-37	S	102	359	36618	Hughes
Flap Lid	X	>100	10000	>1 млн	Россия

В последнее десятилетие ФАР получили широкое распространение во многих странах мира. Например, в Швеции разработана и принята на вооружение РЛС обнаружения огневых позиций противника ARTHUR, оборудованная ФАР. Станция с передатчиком на ЛБВ работает в С-диапазоне волн (3,9–6,2 ГГц). На вооружении ВВС Швеции состоит самолетная радиолокационная система дальнего обнаружения Ericave S-диапазона волн (1,55–5,2 ГГц), оснащенная твердотельной ФАР, которая размещена по обе стороны надфюзеляжного киля и включает в себя около 200 приемопередающих модулей. Самолетная радиолокационная система дальнего обнаружения, установленная на истребителе Phalcon израильского производства, содержит четыре твердотельных ФАР. Две из них размещены на крыльях самолета и две — под фюзеляжем в носовой и хвостовой частях. Каждая ФАР включает в себя около 700 приемопередающих модулей. РЛС работает в L-диапазоне (0,39–1,55 ГГц). Твердотельной активной ФАР оборудован разработанный в Израиле радиолокатор системы обнаружения ракетных установок, действующий в L-диапазоне. Его дальность составляет несколько сотен километров. Среди последних разработок в этой области, ведущихся в странах ЕС, — многофункциональная

РЛС с ФАР, предназначенная для установки на корабле. РЛС на передатчике с ЛБВ работает в С-диапазоне волн. Дальность обнаружения целей достигает 180 км. Антенная решетка вращается по азимуту со скоростью 60 об/мин. В угломестной плоскости производится фазовое управление лучом. В создании этой РЛС принимают участие фирмы Alenia (Италия) и Marconi (Великобритания). Специальными фирмами Thomson-CSF разработана корабельная РЛС обнаружения воздушных целей Agabel. Станция работает в Х-диапазоне и имеет дальность действия около 70 км. ФАР станции вращается по азимуту со скоростью 60 об/мин.

Технология МММС — новые перспективы

ФАР в радиолокационных станциях. Широкие перспективы для создания активных фазированных решеток открыла технология МММС (монокристаллические интегральные схемы СВЧ-диапазона), которая позволяет значительно снизить стоимость производства твердотельных приемопередающих модулей. Арсенидгаллиевая основа этой технологии разработана в рамках программы DARPA. В табл. 2 приведены характеристики двух РЛС, в которых использованы приемопередающие модули, изготовленные по МММС-технологии. Первая станция — наземная РЛС обнаружения воздушных целей, летящих на большой высоте, ТНААД (ранее имевшая обозначение GBR). Для оснащения трех выпущенных станций ТНААД было изготовлено свыше 60 тыс. модулей МММС. При отлаженном производстве стоимость одного модуля составила менее 1000 долл. В дальнейшем планируется наладить серийное производ-

во таких РЛС. Вторая станция с активной ФАР, элементы которой выполнены по ММІС-технологии, — противобатарейная РЛС COBRA для обнаружения артиллерийского и минометного огня. На сегодня выпущены и приняты на вооружение три станции типа COBRA.

Большие возможности открывает технология ММІС при изготовлении ФАР для самолетных РЛС. МО США планирует оснастить активными фазированными антенными решетками бортовые РЛС 424 истребителей F-22. ФАР будет включать в себя примерно 2 тыс. элементов и приемопередающих модулей, выполненных по технологии ММІС. Этой программой предусмотрен выпуск около 1 млн. модулей. Правительство Японии намерено установить активные ФАР на истребителе FSX. Европейский консорциум немецких, французских и английских фирм ведет разработку активной ФАР с

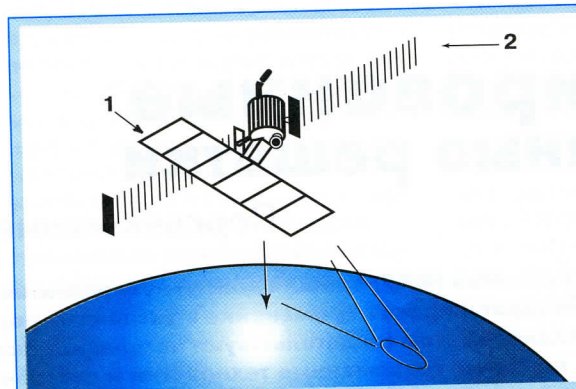


Рис. 1. РЛС космического базирования SBR с активной ФАР на модулях ММІС

1 — ФАР со сканированием в двух плоскостях; 2 — солнечная батарея

РЛС SBR предназначалась для контроля воздушного пространства над континентальной и морской территориями США, а также предупреждения о возможном ракетном нападении вероятного противника. Специально для этой станции был

разработан ММІС-приемопередающий модуль L-диапазона массой всего 28 г, который стал основой модуля системы Iridium. РЛС не была введена в действие из-за высокой стоимости, а также в связи с прекращением поли-

абонентов, то для ее реализации потребуются не менее 100 млрд. модулей.

НИОКР в области фазированных антенных решеток

ФАР для управления лазерными и оптическими лучами. Разработка антенной решетки, производящей электронное сканирование оптических и лазерных лучей, велась с середины 60-х годов. Несмотря на многие трудности и даже сомнения в принципиальной возможности ее реализации, такая решетка была создана. Ее конструкция представляет собой N столбцов и N строк жидкокристаллических фазовращателей, кото-

рые соответственно разнесены с интервалом в половину световой волны. Фазовращатели выполнены на двух жидкокристаллических пластинах, на одной стороне которых нанесен прозрачный проводящий слой заземления, а на другой методом фотолитографии сформированы соответственно N вертикальных и N горизонтальных полосок из прозрачного проводящего материала. Приложив напряжение между какой-либо проводя-

элементами, выполненными по технологии ММІС, для многофункциональной бортовой РЛС AMSAR. Шведские специалисты также разрабатывают активную ФАР с применением ММІС-технологии. Все упомянутые станции работают в X-диапазоне волн.

ФАР в спутниковых системах связи. Активные ФАР, собранные на модулях ММІС, находят применение и в спутниковых системах персональной телефонной связи. (Основные данные о модулях ММІС в спутниковых системах связи, находящихся на сегодня в процессе создания, приведены в табл. 3.) Так, на каждом из 66 спутников системы Iridium установлены три антенны, направленные на Землю для панорамного обзора. Антенна представляет собой активную ФАР L-диапазона, которая содержит примерно 100 приемопередающих модулей и коммутируемых излучающих элементов, выполненных по технологии ММІС. Общее число модулей ММІС в составе Iridium достигает почти 20 тыс. Кстати, проект Iridium — наглядный пример конверсии военных технологий. Так, технология создания космических антенн L-диапазона заимствована из программы создания РЛС космического базирования SBR, над которой работали специалисты ВВС и ВМС США (рис. 1). Первоначально

тики холодной войны. Расходы на замену SBR системой Iridium составят 3,5 млрд. долл., включая стоимость запуска спутников, наземных станций и программного обеспечения.

Антенные решетки на модулях ММІС находят применение и в высокопроизводительных (со скоростью передачи данных 1 Мбит/с) цифровых коммуникационных системах, предназначенных для связи между компьютерами и для проведения видеоконференций. Пример такой системы — низкоорбитальная спутниковая система Teledesic, в состав которой предположительно войдет 840 спутников. Одна из возможных конфигураций системы Teledesic предполагает установку на одном спутнике 60 передающих ФАР с частотой 20 ГГц и 60 приемных решеток с частотой 30 ГГц. Каждая решетка будет включать в себя примерно 400 приемопередающих модулей и излучающих элементов, изготовленных по технологии ММІС. Разработчики — фирмы Microsoft и McCaw Cellular Communications — планируют использовать в сис-

Таблица 2

РЛС военного применения с ФАР, выполненными по технологии ММІС		
Показатели	РЛС THAAD (GBR)	РЛС COBRA
Частотный диапазон	X	C
Число выпущенных станций	3	3
Число приемопередающих модулей	25344	2700
Общее число изготовленных модулей	63360	8100
Фирма-изготовитель	Raytheon	Lockheed-Martin, Siemens, Thomson-CSF, Thorn-EMI

Таблица 3

ФАР на ММІС в спутниковых системах персональной связи				
Система	Частота, ГГц	Число спутников в системе	Число модулей	
			на одну антенну	на всю систему
Iridium	1,6	66	>100	>19800
Globalstar		48		
передатчик	2,5		91	4368
приемник	1,6		61	2928



Рис. 2. ФАР системы персональной связи, размещенная на голове пользователя

шей полоской и заземляющим слоем, можно изменять значение диэлектрической постоянной жидкокристаллического фазовращателя, что, в свою очередь, изменяет скорость распространения проходящего через него лазерного или оптического сигнала.

Пластина со столбцами фазовращателей производит сканирование луча в азимутальной плоскости, а пластина со строками — в угломестной. Фазовый градиент формируется путем ступенчатого изменения напряжения, подаваемого на жидкокристаллические столбцы и строки. Благодаря матричному управлению вместо традиционного поэлементного число фазовращателей и элементов управления снижено с N^2 до $2N$.

Сегнетоэлектрическая антенная решетка. Специалисты научно-исследовательской лаборатории ВМС США разработали недорогую фазированную антенную решетку СВЧ-диапазона с аналогичным матричным методом управления лучом, но вместо жидкокристаллических фазовращателей использовали сегнетоэлектрические. Диэлектрические постоянные столбцов и строк фазовращателей зависят от приложенного напряжения. При ступенчатом изменении напряжения формируется фазовый градиент, необходимый для управления лучом по азимуту и углу места.

Конструктивно сегнетоэлектрическая антенная решетка состоит из двух линз. Первая линза, состоящая из столбцов сегнетоэлектрических фазовращателей, производит сканирование луча по азимуту. Вторая, повернутая относительно первой на 90° и состоящая из строк фазовращателей, сканирует луч по углу места. (Базовая конфигурация таких линз показана на рис. 3.) Для правильной работы сегнетоэлектрических линз необходимо, чтобы электрическое поле было линейно поляризовано и его вектор перпендикулярен проводящим пластинам. Таким образом, для линзы, сканирующей луч в азимутальном направлении, требуется сигнал с линейной горизонтальной поляризацией, а для линзы, сканирующей луч в угломестном направлении, — с линейной вертикальной. Поворот плоскости поляризации на 90° осуществляет среда, размещенная между двумя сегнетоэлектрическими линзами.

Плазменная антенна с электронным сканированием. Специалисты научно-исследовательской лаборатории ВМС США работают также над созданием принципиально новой антенной системы, в которой электронное управление лучами осуществляется с помощью плазменного отражателя. Иссле-

дования показывают, что плазма при достаточной плотности обладает способностью отражать электромагнитную энергию. Причем чем выше частота облучения, тем большую плотность должна иметь плазма.

Концепция построения плазменной антенны показана на рис. 4. Плазменный слой создается в вакуумной камере при газовом разряде между анодной пластиной и линейным катодом, который представляет собой линейку элементов определенного адреса на двухкоординатной сетке катода. Изменяя положение линейного катода, можно вращать плазменный слой и тем самым сканировать отраженный луч по азимуту. Сканирование луча по углу места производят изменением наклона плазменного отражателя путем регулирования магнитного поля катушек Гельмгольца. Последние размещены вокруг отражателя так, чтобы не блокировать СВЧ-сигнал. Положением линейного катода и значением магнитной индукции управляет компьютер. Согласно расчетам, точность установки луча в заданном направлении составляет $1-2^\circ$,

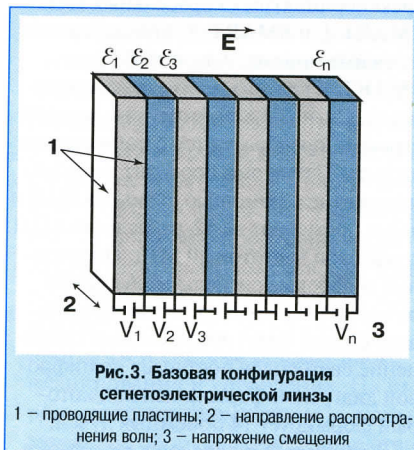


Рис. 3. Базовая конфигурация сегнетоэлектрической линзы
1 — проводящие пластины; 2 — направление распространения волн; 3 — напряжение смещения

чего, по мнению разработчиков, вполне достаточно. Время переориентации луча — около 10 мкс, однако предварительные испытания показывают, что оно может быть еще меньше.

Для образования плазменного слоя в камере достаточно поддерживать вакуум примерно 13 Па. Магнитная индукция должна составлять около 0,02 Тл, ток — порядка 2 А и напряжение — 20 кВ. В 1996 году был сформирован плазменный отражатель размерами $60 \times 60 \times 1$ см. Уровень боковых лепестков при этом составил примерно -20 дБ. В 1997 году планировалось создать отражатель диаметром около двух метров.

В числе достоинств плазменных антенн — возможность быстрой и точной установки луча, что позволяет одновременно выполнять операции поиска и сопровождения групповых целей, а

также формировать разные диаграммы направленности. Кроме того, такие антенны обладают широкой полосой частот, в результате чего один и тот же плазменный отражатель можно использовать с разными облучателями. Созданная плазменная антенна имеет диапазон от 5 до 20 ГГц, который в дальнейшем предполагается расширить до 50 ГГц. В отличие от обычных отражательных антенн, которые существенно повышают эффективную площадь рассеяния локатора при облучении его средствами радиоразведки вероятного противника, этот параметр в плазменной антенне невелик. Разработчики утверждают, что тепловое излучение антенны также невелико, поскольку тепловая энергия сосредоточена внутри плазмы и не излучается наружу. Предполагается, что плазменная антенна может найти применение в бортовых и корабельных локаторах и системах радиопротиводействия.

Отражательная решетка на 100-мм полупроводниковых пластинах. Успехи технологии ММС позволяют создавать антенные решетки, интегрированные на полупроводниковых пластинах диаметром 100 мм. Так, специалисты французской фирмы Thomson-CSF ведут разработку антенны для противоракетного комплекса, которая состоит из двух таких пластин. На одной пластине сформированы дипольные элементы и одноразрядные фазовращатели на *pin*-диодах, на второй — управляющие схемы. Пластины соединены между собой с помощью бугорковых контактов. Антенна, включающая около 3 тыс. элементов, формирует луч шириной 2° , который может осуществлять сканирование в секторе углов 45° . Рабочая частота антенны — 94 ГГц.

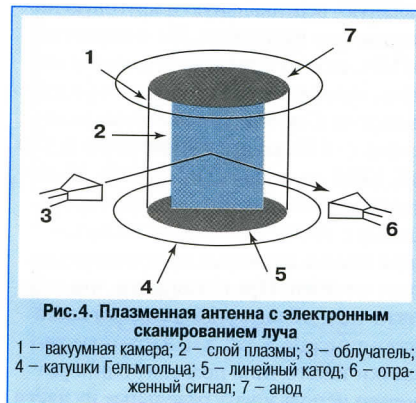


Рис. 4. Плазменная антенна с электронным сканированием луча
1 — вакуумная камера; 2 — слой плазмы; 3 — облучатель; 4 — катушки Гельмгольца; 5 — линейный катод; 6 — отраженный сигнал; 7 — анод

Антенна RADANT. Фирма Thomson-CSF при создании антенны RADANT, предназначенной для установки на многоцелевом боевом летательном аппарате, использовала метод сканирования лучей, аналогичный разработанному для сегнетоэлектрической решетки. В антенне RADANT сегнетоэлектрики

заменены диодами, которые размещены между проводящими полосками один за другим в направлении распространения волны. Регулируя число включенных в этом направлении диодов, можно формировать фазовый градиент и изменять угловое положение луча. Антенна содержит две диодные линзы. Линза с вертикально ориентированными полосками управляет лучом по углу места, а с горизонтально ориентированными — по азимуту. В отличие от сегнетоэлектрических линз между ними нет необходимости помещать пластину, изменяющую поляризацию волны. Хотя в антенне используется большое число диодов, ее стоимость благодаря их низкой цене невелика.

Широкополосные антенные решетки с разделением апертуры. Перспективы развития ФАР связывают с увеличением их рабочей полосы. Как полагают специалисты, одна широкополосная ФАР сможет одновременно выполнять несколько функций и работать с несколькими радиоэлектронными средствами. Специалисты Центра вооружения авиации ВМС США совместно с фирмой Texas Instruments в рамках программы создания усовершенствованной ФАР с разделением апертуры ASAP ведут разработку бортовой ФАР для истребителя-бомбардировщика. Диапазон ее частот будет постоянно охватывать полосу от С- до Ку-диапазона (3,9–17,25 ГГц). В этой полосе будут совместно работать бортовой локатор, пассивные средства радиоэлектронной поддержки, постановщик активных помех и средства связи. Для получения такой широкой полосы в антенной решетке применены щелевые трапециевидные излучатели, которые к тому же обеспечивают горизонтальную, вертикальную и круговую поляризацию радиоволн. По технологии МММС создан приемопередающий модуль, который может работать в полосе частот от С до Ку. Его выходная мощность 2–4 Вт, коэффициент шума 6,5–9 дБ, КПД по мощности 5,5–10%. Изготовлен опытный образец антенной решетки с 10х10 элементами, включающий восемь активных приемопередающих модулей. Предполагается, что габариты полной антенной решетки составят примерно 3,5х7,5 м. Антенные решетки такого типа позволят одновременно использовать отдельные их части для различных бортовых систем — локатора, средств радиоэлектронной поддержки, постановщика активных помех и средств связи. Размер и расположение участков решетки, используемых для каждой функции, могут изменяться в процессе работы и при необходимости накладываться друг на друга.

Антенные решетки с цифровым формированием диаграммы направленности. Метод цифрового формирования диаграммы направленности (ДН) антенной решетки давно привлекает внимание специалистов, поскольку обеспечивает адаптивное управление формой ДН, в частности формирование провалов (“нулей”) ДН в направлении источников радиопомех. До недавнего времени метод применялся только в станциях с невысокой частотой обновления данных, в частности в сонарных системах и загоризонтных РЛС НЧ-диапазона. Например, он используется для формирования приемной ДН в стационарной загоризонтной РЛС фирмы General Electric и в передислоцируемой загоризонтной РЛС фирмы Raytheon.

Несмотря на сложные проблемы, связанные с применением метода в РЛС СВЧ-диапазона, где частота обновления данных значительно выше, определенные успехи достигнуты и в этом направлении. Так, датская фирма Signaal применила цифровое формирование ДН в антенных системах своих трехкоординатных корабельных РЛС SMART-L и SMART-S, правда, только в режиме приема. Антенна РЛС SMART-L состоит из 24 строк излучателей. Сигналы, принимаемые каждой строкой, преобразуются с понижением частоты. Затем они проходят импульсное сжатие с помощью схемы на ПАВ и далее поступают на 12-разрядный АЦП с тактовой частотой 20 МГц. Полученные цифровые сигналы модулируют оптическую несущую, и результирующий сигнал через вращающееся соединение световодов поступает на цифровой диаграммоформирователь, который формирует 14 приемных лучей.

Значительных успехов в разработке методов цифрового формирования ДН добились специалисты Ромской исследовательской лаборатории, выполняющие заказ DARPA. Для проведения исследований была создана антенная решетка С-диапазона, состоящая из 32 столбцов излучателей. Лучи формируются с помощью быстродействующего цифрового формирователя ДН. В его состав входят четыре процессора, которые обрабатывают сигналы по 64 каналам и формируют 4, 8, 16 или 32 независимых луча. Процессоры имеют системную архитектуру и обеспечивают выполнение операций умножения и сложения с высокой скоростью. Производительность одного процессора — $5 \cdot 10^9$ комплексных операций в секунду.

В лаборатории изучается применение методов цифрового диаграммоформирования для коррекции ДН эле-

ментов антенной решетки, а также формы ДН всей решетки в случае выхода из строя ее отдельных элементов. Специалисты лаборатории создали также устройство цифрового формирования на базе нейронной вычислительной сети. Экспериментальная проверка нейросетевого цифрового формирователя ДН проводилась на специально созданной 8-элементной решетке Х-диапазона. Исследования показали, что применение нейросетевых вычислителей обеспечивает адаптацию алгоритма вычисления к параметрам решетки, снимает необходимость встроенного контроля и калибровки параметров антенны.

На фирме Roke Manor Research сконструирована экспериментальная 13-элементная антенная решетка, в которой цифровое формирование происходит как в режиме приема, так и в режиме передачи. Формирование в режиме передачи позволяет ориентировать “нули” ДН в направлении возможной угрозы противорадиолокационных ракет либо высокого уровня помех.

Шведские специалисты предложили новый метод цифрового формирования ДН с стробированием сигнала промежуточной частоты. Метод испытан на экспериментальной решетке, работающей в диапазоне 2,8–3,3 ГГц. Для выполнения операции цифрового формирования сигнал промежуточной частоты 19,35 МГц стробировался с частотой 25,8 МГц. Исследования показали, что такое формирование ДН компенсирует амплитудные и фазовые вариации между элементами, возникающие при работе в широком угловом секторе и в широкой полосе частот. Так, изменение коэффициента усиления в угловом секторе, происходящее из-за взаимного влияния элементов решетки, было снижено с ± 1 до $\pm 0,1$ дБ, а изменение того же параметра в полосе частот 5 МГц — с 0,5 до 0,05 дБ.

Применение антенных решеток с цифровым формированием ДН не ограничивается стационарными станциями. Недавно были проведены летные испытания бортовой РЛС L-диапазона с цифровым диаграммоформирователем, в состав которого входит адаптивный процессор пространственно-временной обработки сигналов STAP. ФАР, состоящая из 11 столбцов излучателей, размещалась вдоль фюзеляжа самолета. Станция обеспечивает подавление помех от 52 до 69 дБ.

Microwave Journal, 1996, v.39, №2, p.113–124;

1997, v.40, №5, p.228–232; №6, p.84–92;

Aviation Week & Space Technology, 1996, v.144,

№ 24, p.50,51