

Системы радиолокации и связи

УДК 621.396.67

Некоторые тенденции развития радиолокационных и связных систем

А.А. Толкачев, Е.Н. Егоров, А.В. Шишлов

Рассмотрены перспективы использования активных и пассивных фазированных антенных решеток в системах радиолокации и связи. Показано, что в системах сантиметрового диапазона все большее применение находят активные решетки, в то время как в высокочастотных системах миллиметрового диапазона волн пассивные решетки остаются вне конкуренции в обозримом будущем

Tendencies of application active as well as passive phased array antennas in radar and communication systems are considered. It is shown that active arrays are used in centimeter wave systems to an increasing extent, whereas passive arrays are still beyond comparison in powerful millimeter wave systems in foreseeable future.

Введение

Представляется, что в массе новшеств, связанных с развитием современной радиоэлектроники, идущих в целом под знаком внедрения цифровых методов синтеза и обработки сигналов, можно выделить две специфические тенденции, связанные с радиолокацией и, в какой-то мере, со связью: 1) освоение высокочастотных диапазонов волн (короткие сантиметры и миллиметры), 2) создание твердотельных активных фазированных антенных решеток (АФАР).

Первая тенденция прослеживается на протяжении всей второй половины двадцатого столетия и связана со стремлением к увеличению избирательности и точности радиолокационных систем, а также увеличению пропускной способности средств связи, при одновременном снижении массогабаритных характеристик радиоэлектронных систем и их энергопотребления.

Радиолокационные станции (РЛС) потенциально способны измерять дальность, две угловые координаты и радиальную скорость объекта; разрешающая способность и точность измерения по каждой из координат, при прочих равных условиях, обратно пропорциональны длине волны несущей частоты. Поэтому избирательность станции, которую принято определять как совокупность разрешающих способностей по каждой из координат, быстро растет с уменьшением длины волны как $\lambda^{-3} - \lambda^{-4}$, а этот параметр чрезвычайно важен, так как он определяет помехозащищенность РЛС. Растет также и точность измерения координат, в частности угловых, что особенно важно для станций, работающих на больших дальностях, для которых линейные ошибки, связанные с измерением угловых координат, много больше, чем ошибки измерения дальности. С другой стороны, в случаях, когда можно ограничиться не слишком высокими требованиями по точности измерения координат и помехозащищенности, переход к более высоким частотам позволяет уменьшить размеры антенны, относительную полосу частот излучаемых сигналов и длительность посылок.

Что касается второй тенденции, то разработка АФАР также имеет длинную историю, но появление твердотельных решеток стало возможным только в последние три десятилетия в связи с успехами в создании твердотельных СВЧ-элементов. Твердотельные АФАР позволяют радикально повысить функциональные (количество независимо сканирующих лучей) и эксплуатационные (надежность, коэффициент полезного действия, удобство обслуживания) характеристики систем и гибкость управления, достигаемую благодаря удобству их комплексирования с современными специализированными и универсальными цифровыми вычислительными устройствами.

Принципиальным отличием АФАР является то, что у них оконечные усилительные элементы на прием и передачу находятся в конструкции антенны непосредственно в апертуре и ближе к раскрытию, чем фазовращатели, в отличие от пассивных ФАР, где усилительные элементы находятся за апертурными фазовращателями. В АФАР передающие и приемные устройства распределены по антенне, в то время как в РЛС с пассивными ФАР они размещены вне антенн. На рис. 1 показаны схемы активной (а) и пассивной (б) ФАР соответственно, где 1 – излучатели, 2 – фазовращатели, 3 – делители/сумматоры, 4 – диплексеры, 5 – усилители мощности, 6 – маломощные усилители, 7 – вход передающего тракта, 8 – выход приемного тракта.

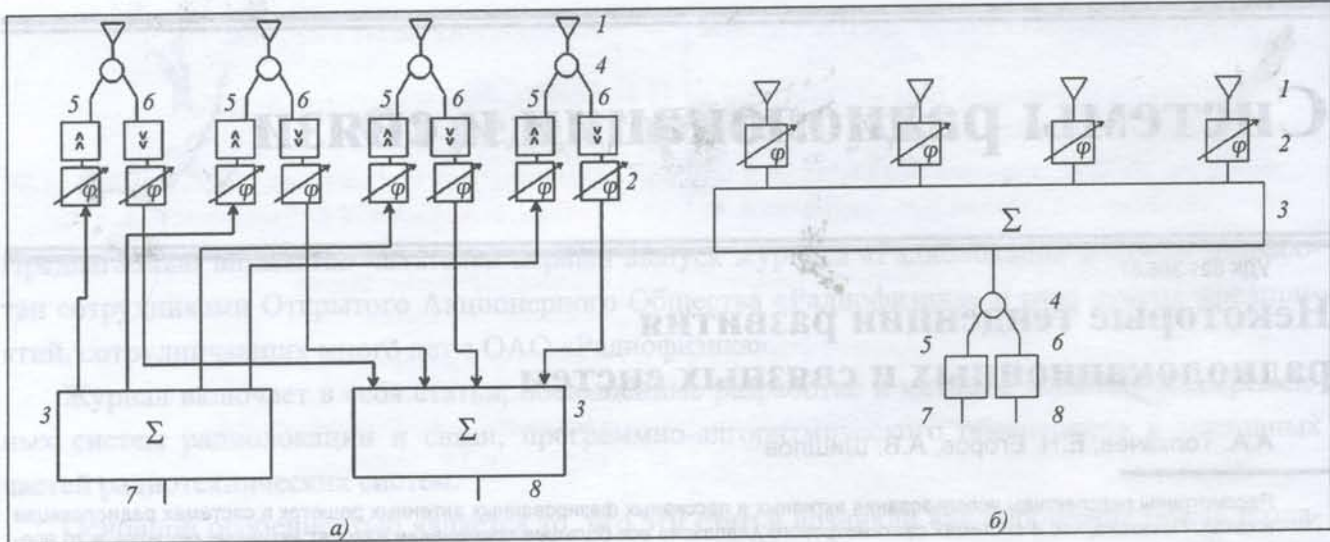


Рис. 1

Рассматриваемые тенденции находятся в известном противоречии, поскольку стоимость АФАР быстро растет с уменьшением длины волны и создание больших антенн в коротковолновой части сантиметрового диапазона оказывается очень дорогим удовольствием, а в миллиметровом – просто разорительно. Учитывая экономические трудности, которые носят длительный характер, и необходимость поддержания высокого уровня разработок в области радиоэлектронных средств, большое значение приобретает выработка экономически целесообразной доктрины сохранения и развития высоких технологий в этой области.

Энергетика систем радиолокации и связи

Рассмотрим современную многофункциональную РЛС с ФАР. Будем называть РЛС многофункциональной, если она способна выполнять как минимум две функции: автономное обнаружение объектов в заданном объеме пространства и подготовку необходимой информации для перехода на сопровождение обнаруженных объектов; сопровождение заданного числа обнаруженных объектов.

Требования к энергетическим возможностям станции при выполнении этих функций различны и по-разному зависят от длины волны. Как известно, потенциальная скорость обзора области обнаружения РЛС по углам Ω равняется [1]:

$$\Omega = \frac{1}{4\pi R^4} \frac{P_{cp} S \sigma_{эфф}}{q^2 N}, \quad (1)$$

где R – дальность действия; P_{cp} – средняя излучаемая мощность; S – эффективная поверхность приемной антенны; $\sigma_{эфф}$ – эффективная поверхность рассеивания объекта; q^2 – отношение мощности сигнала к мощности шума; N – спектральная мощность шумов. Величина Ω пропорциональна произведению средней излучаемой мощности на площадь приемной антенны и не зависит от длины волны несущей частоты. Поскольку с уменьшением длины волны растет стоимость генерируемой мощности и стоимость создания антенны, станции, предназначенные только для обнаружения, целесообразно разрабатывать на более длинных волнах (обычно в метровом или в дециметровом диапазоне волн) хотя эти станции обладают меньшей помехозащищенностью и точностью, чем средства более высокочастотных диапазонов.

Энергетика, необходимая для сопровождения объекта, связана с энергией одиночного зондирования соотношением [1]:

$$R^4 = \frac{1}{4\pi} \frac{ES\sigma_{эфф}}{q^2 N \lambda^2}. \quad (2)$$

В этом случае дальность действия зависит от длины волны как $\lambda^{-1/2}$, т.е. растет с уменьшением длины волны, за счет большей концентрации энергии в пространстве. При этом увеличивается не только дальность, но и избирательность и помехозащищенность РЛС, что делает очень желательным создание РЛС для сопровождения объектов в коротковолновой части сантиметрового или даже в длинноволновой части миллиметрового диапазонов.

Таким образом, соотношение затрат энергии между обнаружением и сопровождением растет с уменьшением длины волны. В реальных системах уже в диапазоне S (10 см) затраты на обеспечение сопровождения объектов,

как правило, значительно меньше, чем на обнаружение, а в более коротковолновых диапазонах X (3 см) и особенно Ka (0,8 см) они несопоставимо малы по сравнению с затратами на обнаружение. Именно в силу этих причин одно из ограничений на РЛС договора по ПРО 1972 г. предусматривает в качестве признака РЛС стратегического назначения превышение произведения средней излучаемой мощности на площадь апертуры:

$$P_{cp} S \leq 3 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2. \quad (3)$$

Попытаемся оценить ограничения, связанные с созданием многофункциональных РЛС в высокочастотных диапазонах длин волн на примере РЛС ПРО, имея в виду, что эти оценки останутся качественно верными и для других мощных многофункциональных РЛС.

Ограничения, связанные со значительным затуханием волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в тропосфере, принципиально ограничивают сферу их применения в радиолокации и связи. Наиболее благоприятной сферой их применения является околоземный космос, где отсутствует молекулярное поглощение, а влияние ионизированных образований незначительно. В условиях работы на Земле они могут быть эффективно использованы в системах с радиусом действия в несколько десятков километров (например, ПВО малой дальности в радиолокации или сотовые системы связи) или системах, работающих со значительными ($\geq 20^\circ$) углами места (например, стрельбовые комплексы ПРО).

В системах связи скорость передачи данных f определяется как [2]:

$$f = (P_a S_t) \left(\frac{S_r}{T_{эфф}} \right) \frac{1}{(E_b/N_0)} \frac{1}{k \lambda^2 d^2 L_0}, \quad (4)$$

где P_a – средняя излучаемая мощность; S_t – площадь апертуры передающей антенны; S_r – площадь апертуры приемной антенны; $T_{эфф}$ – эффективная шумовая температура приемной системы; d – расстояние между приемной и передающей антеннами; k – постоянная Больцмана; E_b/N_0 – отношение энергии одного бита принимаемого сигнала к спектральной мощности шума; L_0 – потери в линии передачи.

Из (4) следует, что величина f растет с увеличением частоты сигнала благодаря увеличению концентрации энергии в пространстве (если отвлечься от условий распространения радиоволн в атмосфере). Кроме того, f пропорциональна энергетической эффективности $P_a S_t$ передающей системы и $S_r/T_{эфф}$ – приемной системы.

Рассмотрим для примера пропускную способность канала связи с геостационарным спутником в Ки-диапазоне (12 ГГц). Примем площади передающей и приемной антенн равными 1 м^2 , мощность передатчика земной станции – 10 Вт, эффективную шумовую температуру приемной системы на спутнике – 1000 К, расстояние от земной станции до спутника – 37000 км, потери в системе – 10 дБ. Из (4) следует, что пропускная способность такой системы составляет $f \approx 10$ мегабит в секунду, т.е. достаточно велика при относительно малой (по сравнению с требуемой для РЛС) энергетической эффективности приемной и передающей систем.

Сравнение систем с активной и пассивной ФАР

Основным ограничением перехода в более высокочастотные диапазоны является стоимость создания системы с ФАР. Например, 70 – 90 % стоимости современной РЛС составляет ФАР и связанное с ней или входящее в ее состав устройство усиления зондирующих сигналов. Ограничимся для качественной оценки расчетом стоимости СВЧ-элементов для излучения двух киловатт средней мощности с одного квадратного метра апертуры ФАР пассивного и активного типов различных диапазонов волн, опираясь на некоторые усредненные экспертные оценки.

Для пассивных антенн эта стоимость складывается из стоимости апертурных элементов управления фазой (апертурных фазовращателей) и стоимости передающего устройства. В настоящее время для управления фазой в пассивных антеннах широко используются полупроводниковые и ферритовые элементы. Стоимости элементов пассивных ФАР по оценкам одного из ведущих разработчиков в этой области канд. техн. наук Ю.Б. Корчемкина приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Элементы канала	Стоимость канала ФАР с ферритовыми фазовращателями, \$ США, для длин волн λ , см			
	10	6	3	1
Фазосдвигающая секция (феррит, волновод, обмотка)	100	40	20	15
Излучатель (два диэлектрических стержня)	60	30	15	5
Арматура (рама, корпус, крышка)	40	20	10	5
Схема управления, ист. пит., спец. выч.	40	20	15	10
Конструктивные элементы	100	60	30	15
ИТОГО:				
оптимистическая (пессимистическая) оценки	340 (600)	170 (300)	85 (150)	50 (90)

Таблица 2

Элементы канала	Стоимость канала ФАР с полупроводниковыми фазовращателями, \$ США, для длин волн λ , см			
	10	6	3	1
Фазосдвигающая секция (pin-диоды, плата, настройка)	200	180	170	160
Излучатель (две платы с полосковыми излучателями)	60	30	15	5
Арматура (рама, корпус, крышка)	40	20	10	5
Схема управления, ист. пит., спец. выч.	30	20	20	20
Конструктивные элементы	80	70	60	50
ИТОГО:				
оптимистическая (пессимистическая) оценки	340 (600)	320 (500)	275 (400)	40 (350)

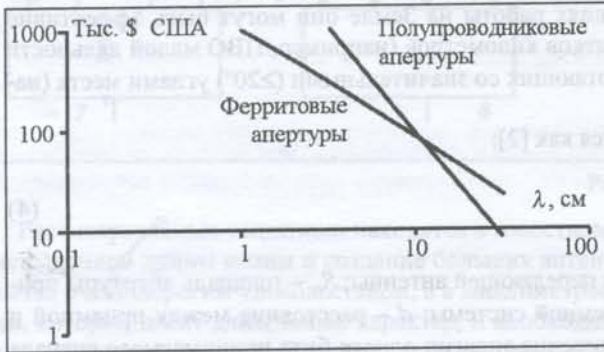


Рис. 2

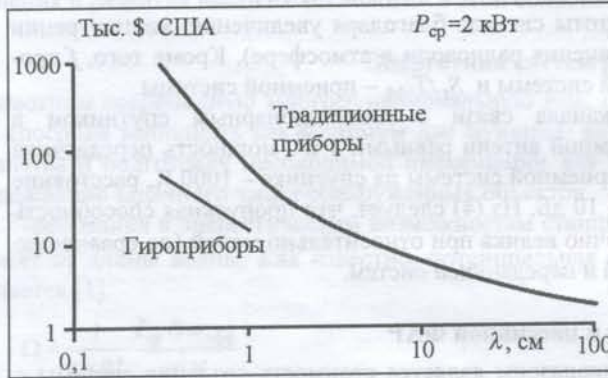


Рис. 3

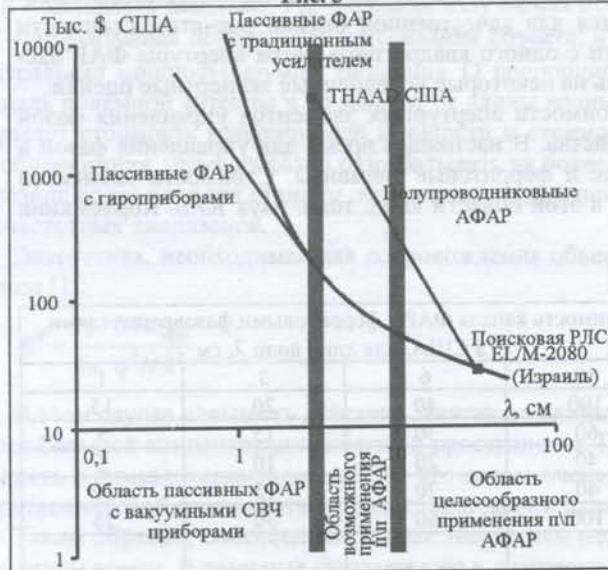


Рис. 4

Будем считать, что линейный размер излучающих элементов составляет $0,7 \lambda$, что примерно соответствует сектору электронного сканирования 90° . Стоимость одного квадратного метра апертуры в зависимости от длины волны для этого случая приведена на рис. 2.

Экспертные оценки стоимости мощных усилителей с выходными вакуумными СВЧ-приборами различных типов для РЛС с пассивными ФАР приведены на рис. 3.

Рассмотрим возможную стоимость апертуры активной ФАР. Типы полупроводниковых усилителей мощности, являющихся основным элементом, определяющим стоимость полупроводникового модуля, принципиально различны в разных частях СВЧ-диапазона волн. Однако экспертные оценки показывают, что стоимость элемента АФАР, при условии постоянства плотности мощности с единицы поверхности апертуры, слабо зависит от частоты в рассматриваемом диапазоне длин волн и составляет 1–2 тыс. \$ США [3,4].

С учетом стоимости конструктивных элементов ~25% от стоимости модулей можно оценить стоимость изготовления 1 м^2 апертуры АФАР при средней мощности 2 кВт/м^2 в зависимости от длины волны (рис. 4).

На этом же рисунке приведена для сравнения стоимость изготовления пассивной ФАР с различными типами усилительных приборов с учетом экспертной оценки стоимости усиления мощности выходными вакуумными СВЧ-приборами различных типов (см. рис. 3).

Следует заметить, что стоимость любой радиосистемы состоит из двух частей: начальной стоимости разработки и изготовления; стоимости эксплуатации. Как показывает опыт, эксплуатационные расходы на радиосистемы с пассивными ФАР превышают расходы на их создание. В системах же с АФАР эксплуатационные расходы составляют 10–25% от стоимости создания системы. Это объясняется в значительной степени низкой надежностью вакуумных усилителей мощности с высоковольтным питанием: как правило, время наработки на отказ вакуумных усилителей мощности существенно меньше назначенного ресурса РЛС, поэтому их приходится заменять много раз за время эксплуатации РЛС.

Что касается передающей твердотельной АФАР, она представляет собой систему из большого числа высоконадежных источников, излучающих СВЧ-энергию и работающих параллельно. При выходе из строя M каналов из N ($M \ll N$) энергетическая эффективность АФАР деградирует по закону:

$$\frac{(P_a S)_{N-M}}{(P_a S)_N} \approx 1 - \frac{2M}{N} \quad (5)$$

Это означает, что выход из строя 10% модулей приводит к деградации энергетической эффективности примерно на 1 дБ. В приемной АФАР выход из строя 10% модулей приводит к деградации энергетической эффективности примерно на 5%.

Статистика эксплуатации радиосистем с АФАР подтверждает высокую надежность приемных и передающих модулей. Как следует из публикаций, среднее время наработки на отказ приемных модулей составляет не менее 200 000 ч, а передающих модулей – не менее 100 000 ч [3]. Аналогичные показатели достигнуты и в наших разработках. При столь высокой надежности модулей энергетическая эффективность АФАР деградирует на 1 дБ за время около 10 000 ч. Конечно же, такие показатели достижимы лишь при правильном проектировании антенны, включая систему теплоотвода, защиту от механических повреждений и воздействий окружающей среды.

Экономическая целесообразность – не единственный аргумент в пользу применения АФАР. В ряде случаев использование АФАР является единственно возможным решением при создании радиосистемы. Например, результаты разработки РЛС APG-77 X-диапазона для истребителя F-22 показали, что как активная, так и пассивная ФАР могли обеспечить близкие функциональные характеристики и стоимостные показатели. Но система с пассивной ФАР имела бы примерно вдвое больший объем и массу, а энергопотребление РЛС с пассивной ФАР превосходило бы возможности системы электропитания самолета [5].

С другой стороны, как следует из рис. 4, в миллиметровом диапазоне волн АФАР для высокопотенциальных РЛС имеют чрезмерно высокую стоимость, а стоимость систем с пассивными ФАР и вакуумными приборами, в частности с гироскопами, пакетированными с постоянными магнитами [6], вполне приемлема, т.е. применение пассивных ФАР является единственно возможным способом создания РЛС.

Примеры РЛС с фазированными антенными решетками

Примером многофункциональной РЛС с твердотельной АФАР диапазона L может служить разработанная в Израиле РЛС EL/M-2080 [7]. Хотя в печати практически отсутствуют сведения о технических характеристиках этой РЛС, по косвенным соображениям можно предположить, что площадь антенны этой РЛС составляет около 25 м², а количество твердотельных гибридных модулей с мощными биполярными транзисторами – около 600. Можно ожидать, что средняя мощность каждого модуля лежит в пределах 30...60 Вт, тогда $P_{cp}S = 4,5 \cdot 10^5 \dots 10^6$, т.е. укладывается в требования договора по ПРО 1972 г. Стоимость изготовления твердотельных модулей этой станции, вероятно, составляет около 1 млн. \$ США. Известно, что в настоящее время изготовлено несколько образцов таких РЛС [7].

Другим интересным примером является уникальная по количеству модулей многофункциональная РЛС системы X-диапазона «ТНААД» [8]. Площадь антенны этой РЛС равняется 9,2 м², число твердотельных модулей 25344, шаг решетки 0,6 λ. Средняя мощность модулей неизвестна, однако можно предположить, что она лежит в пределах 1...10 Вт. Тогда $P_a S = 2,5 \cdot 10^5 \dots 2,5 \cdot 10^6$, а стоимость изготовления каждого твердотельного модуля составляет около 1000 \$ США, т.е. общая стоимость модулей для одной системы не менее 25 млн. \$ США [8,9].

Таким образом, эти станции, имея примерно одинаковые поисковые возможности, отличаются по цене изготовления примерно на 1,5 порядка. Эта разница является платой за более высокую точность и помехозащищенность РЛС системы «ТНААД».

В настоящее время нет мощных РЛС с твердотельными АФАР миллиметрового диапазона, поэтому РЛС «Руза» (рис. 5), созданная в ОАО «Радиофизика» совместно с предприятиями кооперации в 1989 г., является наиболее ярким примером возможностей РЛС с пассивной ФАР [10,11]. Она работает в диапазоне 35 ГГц и построена по пассивной схеме на передачу и активной – на прием. Антенна содержит 120 крупногабаритных излучателей с ферритовыми фазовращателями. Площадь апертуры составляет около 40 кв.м. Передатчик РЛС работает на двух гироскопах. Средняя мощность излучения составляет 50 кВт, т.е. $P_a S \approx 2 \cdot 10^6$ Вт м². Вследствие большого шага ФАР имеет малый сектор сканирования луча (около 1°). Фазированная антенная решетка установлена на поворотном устройстве, обеспечивающем перенацеливание луча во всей верхней полусфере.

Для аналогичной РЛС с широким сектором электронного сканирования в ОАО «Радиофизика» была разработана также пассивная ФАР с плотным расположением элементов в апертуре [12]. Она выполнена по отражательной схеме на основе ферритовых фазовращателей (рис. 6), содержит

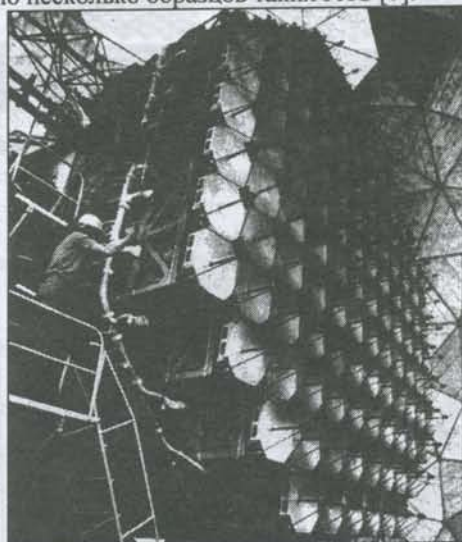


Рис. 5

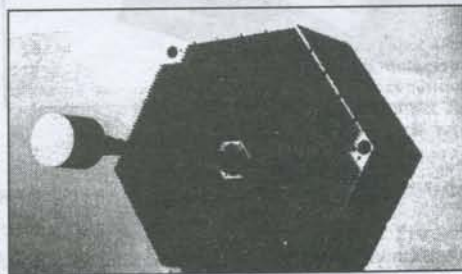


Рис. 6

около 3600 фазовращателей, расположенных в узлах гексагональной сетки с шагом $1,1 \lambda$. Сектор электрического сканирования луча составляет $\pm 25^\circ$. Излучатели в виде диэлектрических стержней формируют секторную ДН, обеспечивающую подавление интерференционных лепестков ДН. Апертура ФАР имеет шестиугольную форму с диаметром вписанной окружности 0,64 м. Квазиоптический возбуждатель формирует эффективное освещение элементов ФАР. В сочетании с передатчиком на основе ЛБВ с выходной мощностью 2 кВт система имеет эффективность $P_a S_{эфф} \approx 5 \cdot 10^2 \text{ Вт м}^2$.

Описанная ФАР с передатчиком может быть использована не только как самостоятельная система, но и как подрешетка большой «полуактивной» ФАР с гексагональной структурой. Например, антенна, содержащая 100 таких подрешеток, комплексированных с усилителями мощности на ЛБВ, могла бы иметь эффективность $P_a S_{эфф} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ Вт м}^2$.

Активная ФАР для систем связи

Несколько иначе, чем в радиолокации, обстоит дело с созданием связанных систем. Необходимо отметить, что в связи также сильно выражена тенденция к переходу в коротковолновые диапазоны волн, поскольку, в соответствии с (4), это дает серьезные преимущества в пропускной способности систем, а также позволяет снизить энергозатраты на передачу информации, уменьшить габаритные размеры и повысить помехозащищенность систем. Наиболее характерными представляются бортовые спутниковые связанные устройства, которые обычно обслуживают абонентов в зоне значительно меньшей, чем в радиолокационных средствах, а также станции мобильных систем связи на транспортных средствах. Как было указано выше, требования к энергетике в системах связи вообще значительно меньше, чем в радиолокации. Это позволяет использовать очень маленькие антенны с количеством элементов в несколько сотен или даже десятков единиц. В настоящее время АФАР широко применяются в системах спутниковой связи сантиметрового и дециметрового диапазонов и начинают использоваться в миллиметровом диапазоне.

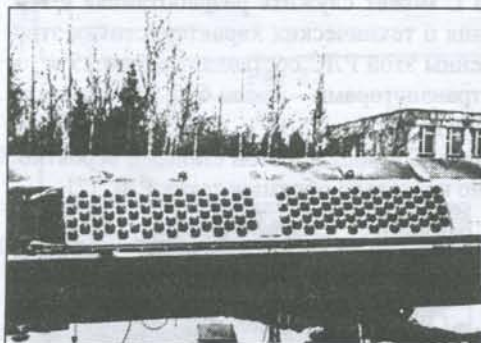


Рис. 7

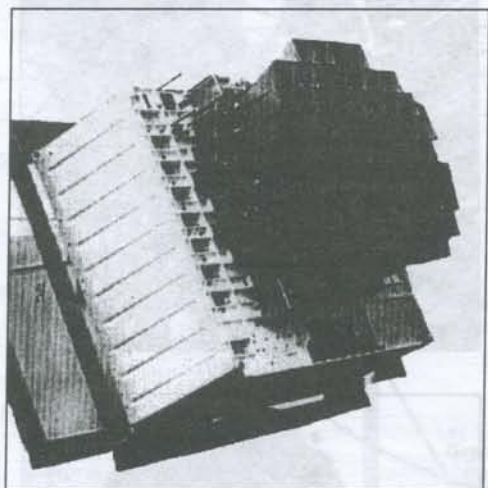


Рис. 8

Насколько нам известно, первая АФАР для мобильной системы спутниковой связи через спутник «Молния» была разработана в СССР в 1970 г. [13]. В самолетной станции этой системы была применена АФАР L-диапазона, содержащая 64 элемента и формирующая один луч, сканирующий в секторе до 80° от нормали (рис. 7). Энергетическая эффективность передающей АФАР составляет $P_a S_{эфф} \approx 10^2 \text{ Вт м}^2$.

Другая АФАР, разработанная для геостационарного спутника связи «Купон» [14] и работающая в Ku-диапазоне, показана на рис. 8. Она содержит 64 излучателя, расположенные в узлах гексагональной сетки с шагом 3λ , и обеспечивает электрическое сканирование в секторе, достаточном для покрытия Земли с геостационарной орбиты (конус с углом 18° при вершине). Антенна формирует четыре независимых луча изменяемой контурной формы. Максимальное значение $P_a S_{эфф}$ передающей АФАР составляет около 10 Вт м^2 .

Компанией «Boeing» были разработаны АФАР для мобильной системы спутниковой связи миллиметрового диапазона [15, 16]. Передающая АФАР диапазона 44 ГГц содержит 91 элемент. Герметичные активные модули с монолитными интегральными схемами СВЧ размещены в узлах гексагональной сетки с шагом около $0,6 \lambda$, что позволяет обеспечить электрическое сканирование луча в секторе до 70° от нормали к апертуре. В каналах столь малых размеров удается разместить достаточно мощные усилители ($P_{вых} = 0,6 \text{ Вт}$). Однако ввиду небольших размеров антенны, параметр системы $P_a S_{эфф} \approx 10^{-1} \text{ Вт м}^2$, т.е. довольно мал.

Наиболее впечатляющим примером возможностей современной технологии являются АФАР К/Ка-диапазонов, разрабатываемые в Японии компаниями CRL и MELCO для экспериментального спутника связи «Gigabit» [17]. Как передающая, так и приемная АФАР содержат по 2800 элементов. Размер передающей АФАР (частота 18 ГГц) составляет 2,4 м, а приемной (28 ГГц) – 1,6 м. Предполагается, что выходная мощность передающей АФАР составит 400 Вт, а коэффициент шума приемной АФАР – не более 3,5 дБ.

В качестве излучателей использованы пирамидальные рупоры, расположенные с шагом $2,2 \lambda$, что позволяет сканировать в секторе до $\pm 10^\circ$, покрывающем Землю с геостационарной орбиты. Энергетическая эффективность передающей АФАР составляет $P_a S_{эфф} \approx 2 \cdot 10^3 \text{ Вт м}^2$, что является весьма высоким показателем в этом диапазоне.

- По-видимому АФАР на основе монолитных интегральных микросхем приведут к существенным достижениям в области систем спутниковой связи К/Ка-диапазонов [9]. Необходимо отметить, что использование АФАР миллиметрового диапазона, также как и в связных системах, может оказаться целесообразным в малых РЛС, например, для средств ближнего боя, контроля автомобильного движения, и т.п.

Активные фазированные решетки находят все более широкое применение в системах локации и связи различного назначения на частотах от дециметровых волн до коротковолновой части сантиметрового диапазона. В миллиметровом диапазоне волн пока можно создавать лишь системы с малыми АФАР.

Что касается мощных РЛС в миллиметровом диапазоне, использование пассивных ФАР является единственно возможным подходом для их создания в обозримом будущем.

Авторы выражают благодарность Ю.Б. Корчемкину за представленные материалы, В.В. Денисенко, В.Н. Козлову, М.И. Петелину – за полезные дискуссии.

Литература

1. Skolnik, M.I. Radar Handbook, McGRAW-HILL, 1970.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – Вильямс, 2004.
3. Fourikis Nicolas. Phased Array-Based Systems and Applications. – John Wiley & Sons, Inc., 1996.
4. Eliot D. Cohen. Trends in the Development of MMICs and Packages for Active Electronically Scanned Arrays. – IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Boston, 1996.
5. Malas, J. A. F-22 Radar Development. NAECON-97.
6. Gaponov-Grekhov, A.V., Granatshtein, V.L. Application of High-Power Microwaves. – Boston-London, Artech House, 1994.
7. Dryer, S. et al. ELM/ 2080 ATBM Early Warning and Fire Control Radar System. – IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 1996.
8. Sarcone, M. et al. The Design, Development and Testing of the THAAD Solid State Phased Array. – IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston, 1996.
9. Brookner, E. Phased Array for the New Millennium. 2000. – IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology, 2000.
10. Tolkachev, A.A. et al. A Megawatt Power Millimeter-Wave Phased-Array Radar. – IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2000, ISSN 0885-8985, v. 15, no. 7.
11. Tolkachev, A.A., et al. Large Aperture Radar Phased Array Antenna of Ka-band. – Proceedings of the XVIII Moscow International Conference on Antenna Theory and Technology, Moscow, 1998.
12. Tolkachev, A.A., et al. High Gain Antenna Systems for Millimeter Wave Radars with Combined Electrical and Mechanical Beam Steering. – IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Boston, 1996.
13. Yegorov, E.N., Epshtein, A.L., Guskov, G.Ya. et al. New Technologies in Multibeam and Scanning Antennas for Communication Systems. – Proceedings of the APSCC'94 Workshop, Seoul, Korea, 1994.
14. Yegorov, E.N., Likhtenvald, V.V., Sbitnev, G.V. The System of Active Phased Array Antennas for Satellite Relay "Kupon". – Proceedings of the XVIII Moscow International Conference on Antenna Theory and Technology, Moscow, 1998.
15. Fitzsimmons, G.W., Lamberty, B.J., Harvey, D.T. et al. A Connectorless Module for an EHF Phased Array Antenna. – Microwave Journal, 1994, v. 37, no. 1.
16. Riemer, D.E. Packaging Design of Wide-Angle Phased-Array Antenna for Frequencies Above 20 GHz. – IEEE Trans., 1995, v. AP-43, no. 9.
17. Sakura, T., Aruga, H., Kitao, S. et al. Development of Ka-band Multibeam Active Phased Array Antenna for Gigabit Satellite. – Proceedings of the Fifth Ka-band Utilization Conference, Taormina, Italy, 1999.

Поступила 13 декабря 2005 г.