P

DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.5

УДК: 621.396.67

АКТИВНЫЕ ФАЗИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ – СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

А.В. Шишлов, В.В. Денисенко, Б.А. Левитан, С.А. Топчиев, А.М. Шитиков

ПАО «Радиофизика», 125363, Москва, ул. Героев Панфиловцев, 10

Статья поступила в редакцию 24 октября 2022 г

Аннотация. Современные радиосистемы с активными фазированными антенными решетками (АФАР) создаются в широком диапазоне частот от метрового диапазона радиоволн до миллиметрового диапазона. По мере развития технологий они становятся все более дешевыми, легкими и компактными как за счет применения больших интегральных микросхем, так и за счет tile (плиточной) компоновки. Удешевление достигается, в частности, благодаря применению в микросхемах подложек из кремний-германия (SiGe), используемых в компьютерных технологиях, вместо подложек на арсениде галлия (GaAs). Одна такая микросхема может иметь как радиочастотные, так и цифровые цепи. Она может быть объединена с усилителями мощности СВЧ на GaN или SiC и с малошумящими приемниками на GaAs. В стоимостном выражении число создаваемых коммерческих радиосистем с АФАР на SiGe стало уже больше, чем число создаваемых радиосистем специального назначения с АФАР на GaAs.

Ключевые слова: активные фазированные антенные решетки, цифровые антенные решетки, цифровое диаграммоформирование, оптическое диаграммоформирование.

Финансирование:

Автор для переписки: Шишлов Александр Васильевич, shishlov54@mail.ru

Введение

В работе [1] указано, что среди направлений развития, связанных с созданием современных радиосистем, идущих в целом под знаком внедрения цифровых технологий, существенными являются две тенденции: 1) освоение высокочастотных диапазонов волн (короткие сантиметры и миллиметры), 2) создание систем с твердотельными активными фазированными антенными решетками (АФАР). Обе тенденции возникли ещё в 20 веке и связаны со стремлением дальность, пропускную способность, увеличить помехозащищенность и гибкость радиосистем, обеспечить их работу на подвижных объектах при одновременном снижении массогабаритных характеристик и снижении энергопотребления. За прошедшие годы указанные усилились. Разработки современных тенденции радиосистем получили дальнейшее развитие в рамках этих тенденций.

Активной принято называть ФАР, в каждом канале которой установлен усилитель сигнала. В приемных каналах устанавливаются малошумящие усилители (МШУ), в передающих – усилители мощности (УМ). Это позволяет существенно улучшить эквивалент изотропной излучаемой мощности (ЭИИМ) и шумовую добротность по сравнению с традиционными ФАР, облегчает создание многолучевых систем. Теоретические основы АФАР хорошо разработаны и в настоящее время изложены во многих книгах и обзорных статьях, например, в [2-13].

В последние десятилетия созданы новые электронные приборы с улучшенными характеристиками как за счет использования различных материалов, так и новых технологий [13]. Также созданы и массово производятся микроволновые и цифровые интегральные схемы (ИС), содержащие в настоящее время до миллиардов элементов на одной подложке [14]. На основе таких приборов стало возможным создавать легкие и малогабаритные АФАР с заданными электрическими характеристиками.

Особенно плодотворным оказалось создание ИС на основе комплементарных структур металл-оксид-полупроводник (КМОП), с

использованием подложки из кремний-германия (SiGe), что позволяет интегрировать множество функций на одном чипе: СВЧ-элементы, аналогоцифровые и цифро-аналоговые преобразователи, цифровые цепи и т.д. [15]. Кроме того, такие ИС существенно дешевле ИС на арсениде галлия (GaAs), что позволяет уменьшить стоимость АФАР.

Уменьшение стоимости элементной базы позволило в последнее десятилетие приступить к серийному производству радиосистем с АФАР не только военного, но и коммерческого назначения, например, автомобильных радиолокаторов для обеспечения безопасности движения [15-17] и земных терминалов спутниковой связи через низкоорбитальные (Low Earth Orbit – LEO) спутники [15-16,18-22].

Наряду с появлением новой элементной базы, усовершенствовались и схемотехника АФАР. В современных АФАР всё чаще используется цифровое диаграммоформирование, обеспечивающее значительные функциональные возможности и гибкую перестройку радиосистем [23-26]. Разрабатываются системы с оптическим диаграммоформированием [27-32].

В настоящем обзоре рассмотрены современное состояние и тенденции развития АФАР. Приведены примеры радиосистем с АФАР.

1. АФАР с радиочастотным диаграммоформированием

Упрощенная схема сканирующей приемо-передающей АФАР, работающей одновременно на прием и передачу приведена на рис. 1 [3,33]. АФАР – это многоканальная антенная система, содержащая набор излучателей, возбуждаемых на передачу когерентно от одного генератора, усиливающая сигналы и излучающая их с заданным распределением в пространстве углов (диаграммой направленности – ДН). На прием АФАР принимает участок плоской волны с заданного направления и, после усиления, когерентно суммирует сигналы, принятые излучателями с этого направления. В ряде случаев АФАР выполняют только передающими или только приемными. В этом случае она содержит только передающие или только приемные цепи.

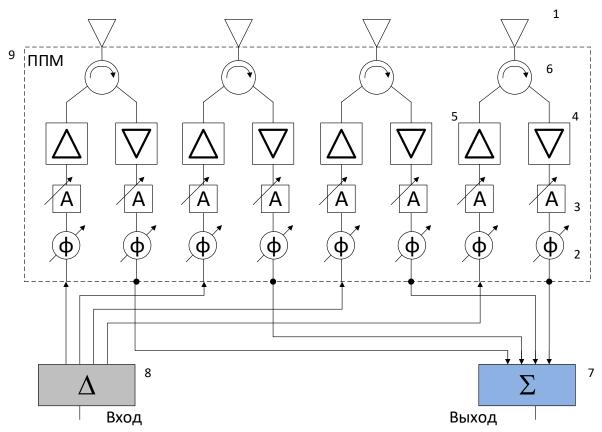


Рис 1. Схема четырехканальной приемо-передающей АФАР с аналоговым диаграммоформированием: 1 — излучатели, 2 — фазовращатели, 3 - аттенюаторы, 4 — малошумящие усилители (МШУ), 5 — усилители мощности (УМ), 6 — диплексеры, 7 — сумматор принятых сигналов, 8 — делитель передаваемых сигналов, 9 — приемо-передающий модуль АФАР (обведен пунктирной линией)

В каналах АФАР, в отличие от пассивных ФАР, установлены усилители для компенсации потерь в линиях передачи и приборах СВЧ. Это позволяет применять в АФАР компактные линии передачи, например, микрополосковые, и устройства на них. Такие линии и устройства, хотя и имеют относительно большие потери, малогабаритны и имеют малый вес.

В каналах АФАР с диаграммоформированием на радиочастоте установлены также СВЧ-устройства управления фазами и амплитудами излучаемого/принимаемого полей (фазовращатели и аттенюаторы). С их помощью можно изменять амплитудно-фазовое распределение в апертуре АФАР и, следовательно, изменять нужным образом характеристики АФАР. В частности, можно сканировать лучом, т.е. изменять угловое положение

главного лепестка ДН (см., например, [2]), формировать «нули» ДН [34] или формировать контурные ДН [35,36]).

Излучатели АФАР соединены с её усилителями и не имеют единого входа, поэтому измерить по-отдельности антенный коэффициент усиления АФАР G и её суммарную генерируемую мощность P решетки невозможно, но это и не требуется [3], поскольку напряженность поля, излучаемого антенной, определяется произведением $P \cdot G$, которое называется эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ). Приемная АФАР характеризуется параметром G/T, который называется шумовой добротностью, где T — шумовая температура приемной системы. Именно величины $P \cdot G$ и G/T, являются основными энергетическими характеристиками АФАР и входят в уравнения радиолокации и радиосвязи. Они задаются при проектировании передающих и приемных АФАР.

Обычные диплексеры не обеспечивают необходимую развязку между цепями передачи и приема, работающими в системах связи и радиолокации на разных частотах, и мощность сигналов передающих цепей АФАР, просачивающаяся в приемные цепи, недопустимо высока. В этих случаях в УМ и МШУ устанавливают фильтры, которые увеличивают развязку до приемлемых значений.

В радиосистемах с временным разделением режимов приема и передачи — как в системах радиолокации, так и в системах радиосвязи — приемные и передающие цепи каналов АФАР работают поочередно. В этом случае фильтрация сигналов не нужна, кроме того, можно использовать одни и те же аттенюаторы и фазовращатели как на прием, так и на передачу, что позволяет экономить массу, габариты и стоимость АФАР.

Одно из преимуществ АФАР – возможность формирования нескольких независимо сканирующих лучей. Применение многолучевых АФАР со многими независимыми лучами в системах спутниковой связи позволяет, во-первых, обслуживать большое количество абонентов, в том числе движущихся [37,38]; во-вторых, - снизить стоимость передачи единицы информации [39, 40].

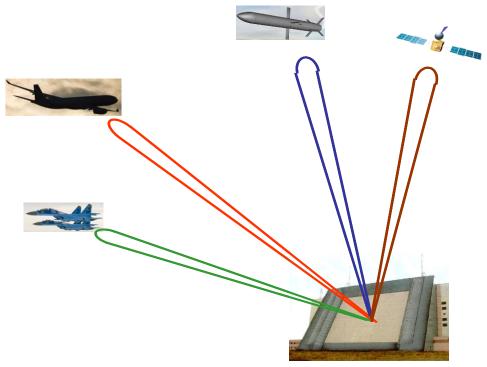


Рис. 2. РЛС с несколькими независимыми приемными лучами

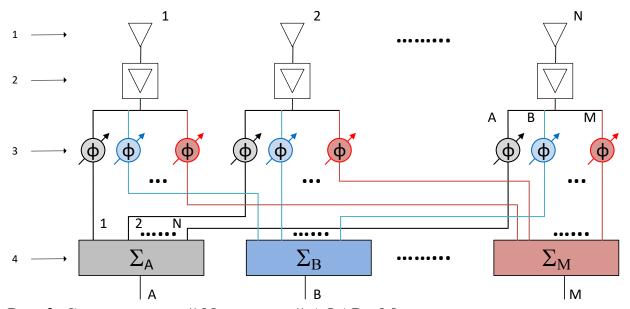


Рис. 3. Схема приемной N-канальной АФАР с M независимо сканирующими лучами [33, 39]: 1 — излучатели, 2 — МШУ, 3 — фазовращатели и аттенюаторы, 4 — сумматоры. Элементы, соответствующие разным лучам, показаны разным цветом

В радиолокации многолучевые АФАР применяются обычно при работе на прием. Это позволяет увеличить (по сравнению с однолучевыми АФАР) количество одновременно наблюдаемых объектов, а также быстро обнаруживать и сопровождать эти объекты в пространстве [40], рис. 2.

Формирование многих независимо сканирующих лучей в АФАР с диаграммоформированием на несущей частоте возможно, если в АФАР использовать независимые группы фазовращателей (рис. 3), а также несколько сумматоров. Количество таких групп фазовращателей и аттенюаторов, а также количество сумматоров равно количеству независимо сканирующих лучей [40].

В силу громоздкости аналоговой радиоаппаратуры количество лучей в многолучевых AФAР с диаграммоформированием на радиочастоте в известных системах не превышает четырех.

В АФАР применяют также квазиоптические зеркальные, зеркальнолинзовые и линзовые сумматоры/делители, которые имеют малые потери и позволяют сканировать не отдельными лучами АФАР, а связанными группами лучей. Такие устройства описаны, например, в [41-46].

2. АФАР с цифровым диаграммоформированием

Сигналы на входе/выходе антенн в современных радиосистемах — цифровые, т.к. такая форма представления сигналов удобна для обработки, в том числе, благодаря наличию дешевой цифровой элементной базы серийного производства. Если цифровые сигналы использовать не только на входе/выходе АФАР, но и в её каналах (рис. 4), то это придает радиосистеме дополнительную гибкость управления антенными характеристиками за счет управления амплитудами и фазами сигналов в каналах, которое в этом случае осуществляется в цифровом виде и не требует применения СВЧ-аттенюаторов и фазовращателей [23-26].

АФАР, в которых формирование амплитудно-фазового распределения по каналам на передачу и сложение сигналов с заданными весами в приёмных каналах осуществляется в цифровом виде, называются АФАР с цифровым диаграммоформированием. Иногда, их для краткости называют цифровыми антенными решетками [5].

Кроме того, в отличие от аналогового, цифровое деление сигнала не подразумевает уменьшения его мощности. Это существенно облегчает создание

многолучевых антенн. Ввиду компактности современных цифровых микросхем, в настоящее время удается создавать многолучевые АФАР с цифровым диаграммоформированием с десятками и сотнями лучей, а в ближайшие годы они будут иметь тысячи лучей [40], что существенно превышает количество лучей АФАР с аналоговым диаграммоформированием. Наличие многих лучей позволяет в связи обслуживать одновременно много абонентов, а в радиолокации — сопровождать много объектов, работая с ними в режиме накопления сигналов.

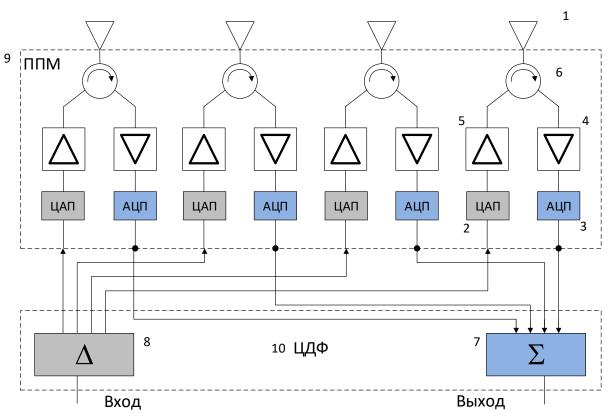


Рис. 4. Четырехэлементная приемо-передающая АФАР с цифровым диаграммоформированием: 1 — излучатель, 2 — цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), 3 — аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), 4 — малошумящий усилитель (МШУ), 5 — усилитель мощности (УМ), 6 — диплексер, 7 — приемный цифровой диаграммоформирователь, 8 — передающий цифровой диаграммоформирователь

Аппаратура цифрового диаграммоформирования выполняется с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) или специализированных больших интегральных схем (СБИС). Использование СБИС дает выигрыш в том случае, если предполагается крупносерийное изготовление АФАР, и затраты на разработку СБИС окупятся при её продажах.

При создании единичных экземпляров АФАР и при их мелкосерийном производстве, как правило, применяются ПЛИС, изготавливаемые серийно.

АФАР с цифровым диаграммоформированием в которой применены серийные цифровые микросхемы и технологии вместо микроволновых заметно дешевле, чем АФАР с аналоговым диаграммоформированием [40].

Цифровое диаграммоформирование будет все чаще применяться в перспективных радиосистемах.

Главные недостатки цифрового диаграммоформирования — высокое энергопотребление цифровой аппаратуры и большие тепловыделения, сравнимые с тепловыделениями передающих каналов АФАР. Это обусловливает необходимость применения для диаграммоформирователя системы питания, и системы охлаждения.

3. Элементы фотоники для диаграммоформирования в АФАР

Фотоникой принято называть дисциплину, которая изучает физические принципы использования света в системах передачи, приема, хранения, переработки и отображения информации [27]. К настоящему времени, фотонные устройства получили широкое распространение для передачи цифровой информации. Использование оптоволокна для передачи цифровых данных позволяет существенно повысить скорость передачи, увеличить дальность, существенно снизить уровень помех. Подобные устройства применяются и в цифровых антенных решетках для передачи данных между каналами и цифровым диаграммоформирователем. В радиодиапазоне в настоящее время достижения фотоники используются в основном для передачи сигналов в линиях «точка-точка». Есть попытки фотонных И создания диаграммоформирователей, однако они в основном не вышли из стадии исследовательских работ.

Блок-схема типовой оптоволоконной линии представлена на рис.5.

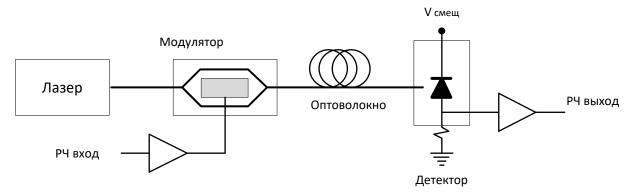


Рис. 5. Блок-схема типовой оптоволоконной линии передачи

Источником оптического излучения является лазер, излучение которого модулируется радиосигналом. Ситуация при этом аналогична переносу частоты вверх в радиосистемах, однако есть и существенные отличия. В системах фотоники в большинстве случаев радиосигналом модулируется мощность лазерного излучения, а не комплексная амплитуда, как в радиосистемах. Это позволяет, на противоположном конце линии, осуществить демодуляцию сигнала с помощью фотодиода.

Для модуляции часто используется устройство на основе интерферометра Маха-Цандера. Излучение вначале делится между двумя оптическими волноводами, при этом в одном или в обоих осуществляется управление показателем преломления. Когерентное сложение в сумматоре двух оптических сигналов осуществляется с управляемым сдвигом по фазе, что приводит к изменению мощности излучения. Существуют также системы с прямым управлением выходной мощностью лазера, однако они менее распространены.

От модулятора к фотодиоду-демодулятору сигнал передается по оптоволокну, которое может иметь значительную длину. При этом в оптический тракт могут быть включены различные устройства преобразования сигнала. [28] оптоволоконные Например, описаны фильтры, использующие искусственно вызванные изменения показателя преломления волокна. Фильтрация сигнала при этом происходит прямо в оптическом диапазоне, без перехода в радиочастотный. В оптическом диапазоне может даже быть выполнен перенос частоты модулирующего радиосигнала, как описано, например, в [29].

Оптическая линия передачи имеет перед радиочастотной явное преимущество по ширине рабочей полосы. Оптическое волокно также имеет перед коаксиальным кабелем существенные преимущества по массе и габаритам, по уровню развязки между соседними каналами и устойчивости к наводкам. Для АФАР большого размера очень важно то, что фазовые характеристики собственно оптического волокна существенно устойчивее к изменениям температуры, чем аналогичные характеристики коаксиального кабеля. Коэффициент передачи такой линии сравнительно слабо зависит от длины.

К недостаткам оптической линии можно отнести то, что коэффициент ее передачи обычно меньше, чем у короткого участка коаксиального кабеля. Потери пары электрооптического и оптико-электрического преобразования могут составлять до 30 дБ [29], так, что преимущество над коаксиальным кабелем может достигаться при длинах линии порядка 100 м или более. Коэффициент шума оптической линии передачи может превосходить 6 дБ [29]. Это довольно существенные недостатки, хотя в настоящее время и ведутся работы по их преодолению [30].

Ниже представлен ряд примеров возможных технических решений по использованию элементов фотоники при диаграммоформировании в AФAP.

В простейшем случае, принятый сигнал каждого канала после МШУ может сразу быть переведен в оптический диапазон и передан для обработки в диаграммоформирователь, расположенный на достаточном расстоянии. При использовании традиционных радиочастотых линий передачи часто возникают проблемы, связанные со значительным объемом аппаратуры (фазовращатели, аттенюаторы, устройства управления, перенос частоты), которую необходимо разместить в элементарной ячейке, соответствующей одному каналу. В данном случае, необходимость вписать аппаратуру в малую площадь снимается (рис.6). При использовании уплотнения, несколько сигналов каналов могут передаваться по одному волокну, что позволяет снизить количество связей.

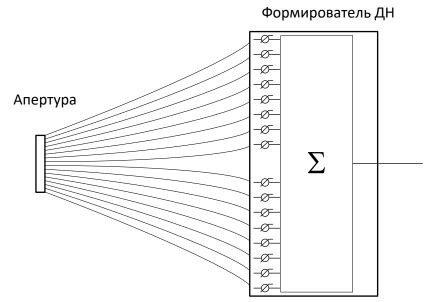


Рис. 6. Передача радиосигнала по оптическим волокнам к удаленному диаграммоформирователю

Описанный подход позволяет решить ряд типовых проблем, возникающих при проектировании АФАР. Однако, диаграммоформирователь при этом фактически построен на традиционных принципах. В частности, используются фазовращатели, фазовый сдвиг которых не зависит от частоты, что приводит к такому известному явлению, как изменению положения луча с частотой. Для использования преимуществ оптических линий передачи по ширине полосы следует перейти к использованию линий задержки. Технически возможно организовать в каждом канале набор переключаемых линий задержки разной длины, однако это обеспечит только установку луча в дискретный набор направлений. Однако, возможно и плавное управление направлением луча на основе оптического диаграммоформирователя, описанного в [31] (рис.7).

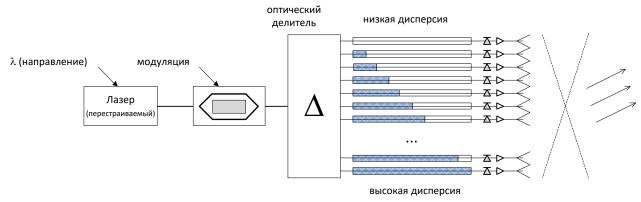


Рис . 7. Использование дисперсионной призмы для управления задержками в каналах AФAР

На рисунке каждый из каналов диаграммоформирователя содержит два участка оптоволокна, с низкой и высокой дисперсией (зависимостью скорости распространения от оптической частоты). Длины участков подобраны так, что для центральной длины волны лазера задержки одинаковы для всех каналов, и формируется луч в направлении, перпендикулярном апертуре. Управляя длиной волны лазера, онжом увеличивать ИЛИ уменьшать задержку В высокодисперсионной части оптоволокна, линейному ЧТО приводит распределению задержки по апертуре и плавному изменению направления луча. Длина высокодисперсионного участка волокна изменяется линейно, поэтому подобное устройство часто называется дисперсионной оптоволоконной призмой.

Развитие технологий позволяет создавать устройства интегральной фотоники, то есть, набор фотонных устройств, интегрированных в один кристалл и объединенных общим назначением. В частности, в [32] описан оптический восьмиканальный диаграммоформирователь ≪на кристалле». Авторы использовали линии на основе кольцевых резонаторов с плавно управляемой групповой задержкой, что позволило осуществить плавное сканирование лучом. В диаграммоформирователе осуществляется когерентное суммирование сигналов в оптическом диапазоне, что позволяет добиться максимальной мощности оптического сигнала. Однако, компенсация уходов оптической фазы от температуры и вибрации представляет серьезную проблему. В [32] утверждается, что она решена для лабораторного прототипа.

В целом, можно сказать, что использование фотоники в устройствах диаграммоформирования ФАР открывает перед разработчиками дополнительные перспективы. Вместе с тем, на сегодняшнем уровне развития технологий преимущество может быть получено в ограниченном наборе случаев. С развитием технологий ситуация может измениться, но на сегодняшний момент функционирующих образцов АФАР с использованием существует фотоники мало сравнению, например, цифровым ПО диаграммоформированием.

4. Конструкции АФАР

Аппаратура каналов АФАР, как правило, конструктивно выполняется в виде модулей. Существуют как одноканальные, так и многоканальные модули (рис. 8, см., например, [47,48]). Создание многоканальных модулей позволяет экономить на аппаратуре питания каналов, аппаратуре управления каналами, а также на материале корпусов модулей.

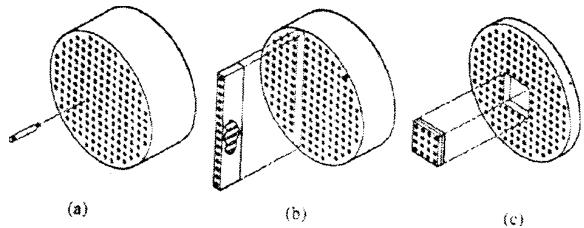


Рис. 8. Компоновка АФАР [48]: (a) – одноканальные модули, (b) – многоканальные модули brick (кирпичного) типа, (c) – многоканальные модули tile (плиточного) типа

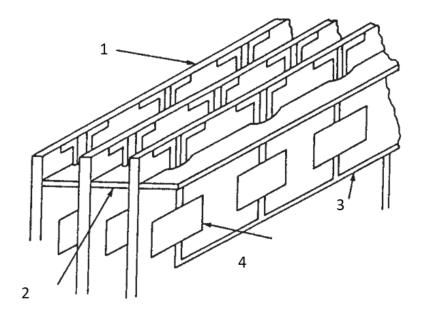


Рис. 9. Компоновка модулей АФАР brick (кирпичного) типа [11,47]: 1 — диэлектрическая подложка, 2 — металлический экран, 3 — радиочастотный делитель/сумматор, 4 — электронные приборы (усилители, фазовращатели и т.д.)

Модули называют brick (кирпичного) типа, если их аппаратура расположена на платах, ортогональных плоскости апертуры АФАР (рис. 9). В этом случае поперечные размеры каналов модулей не должны превосходить периода решетки, зато продольные размеры модулей могут быть значительными и ограничены только конструктивными соображениями, что позволяло в прошлом и позволяет в настоящее время применять относительно крупногабаритную дискретную элементную базу.



Рис.10a. Четырехканальный модуль brick- типа S- диапазона [51]



Рис. 10б. Восьмиканальный приемо-передающий модуль brick- типа X-диапазона [51]

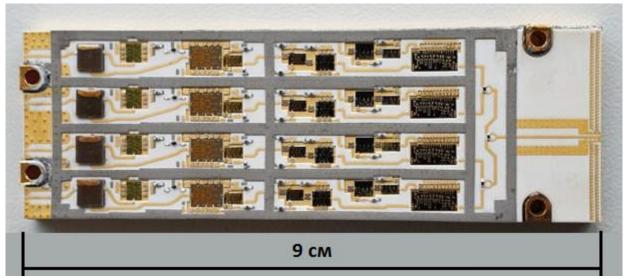


Рис. 10в .Четырехканальное интегрально-функциональное устройство (ИФУ) для приемо-передающего модуля brick- типа Ка- диапазона [51]

Примеры модулей brick-типа показаны на рис. 10а,б [51]. Некоторые часто повторяющиеся фрагменты, называемые интегральными функциональными устройствами (ИФУ, рис. 10в), изготавливаются отдельно и используются при сборке модулей [51].

В модулях tile (плиточного) типа [47,48], аппаратура расположена на платах, параллельных апертуре антенны (рис. 8с, рис. 11). В этом случае поперечные размеры каналов модулей ограничены необходимым периодом решетки, а глубина определяется толщиной платы с размещенной на ней аппаратурой каналов модулей АФАР и излучателями.

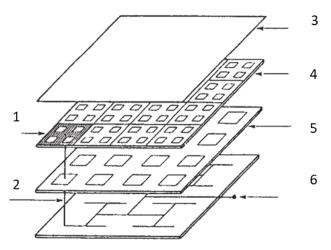


Рис. 11. Компоновка модулей типа tile (плитка) [11,47]: 1 — активная подрешетка (заштрихованная область), 2 — радиочастотный возбудитель подрешетки, 3 — укрытие, 4 — апертура решетки с активными подрешетками, 5 — плата питания и управления фазовращателями

Существуют различные модификации, сочетающие рассмотренные компоновки АФАР, см., например, [49,50].

В модулях tile типа устройства каналов АФАР должны быть размещены в пределах периода решетки. Для этого их выполняют, как правило, в виде интегральных схем. На рис. 12а,б показаны экспериментальные модули tile-типа Ка- и X- диапазонов [52,53].

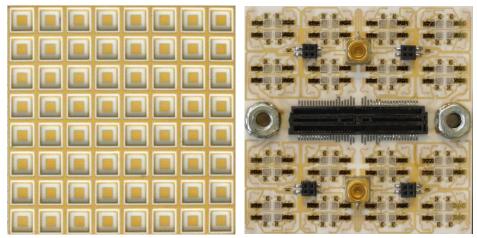


Рис. 12а. Модуль (64 канальная подрешетка) tile-типа Ка-диапазона: лицевая и обратная стороны. Многослойная подложка выполнена из низкотемпературной керамики (LTCC). Патрубки на тыльной стороне подрешетки служат для ввода и вывода охлаждающей жидкости, проходящей через внутреннюю полость подрешетки [52]

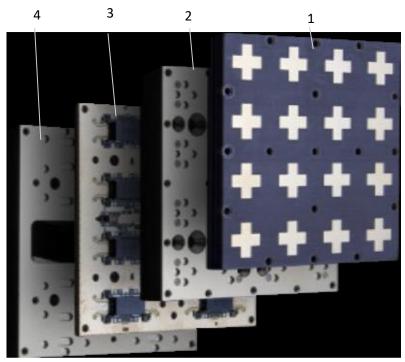


Рис. 12б. 16-канальная подрешетка tile типа [53]: 1 – плата излучателей, 2 – переходная плата возбудителей, 3 – плата с ИС активных каналов, 4 – плата СВЧ-делителя, цепей питания и управления

5. Теплоотвод в АФАР

При проектировании АФАР важно обеспечить заданные тепловые режимы радиоэлектронных приборов, в том числе, для обеспечения их надежности. Действительно, наработка до отказа радиоэлектронных приборов уменьшается примерно вдвое при повышении рабочей температуры на 10 градусов [3,33]. Обычно, не рекомендуется превышать температуру приборов 80°С.



Рис. 13. Модуль AФAР с радиатором на корпусе для воздушного охлаждения [54]

В зависимости от мощности тепловыделений, в АФАР применяют воздушные или жидкостные системы охлаждения [54]. Если тепловыделения малы, достаточно естественного охлаждения за счет конвекции воздуха, возможно, с применением тепловых радиаторов, рис. 13. Если естественной конвекции воздуха не хватает для поддержания заданной температуры, то используют принудительное воздушное охлаждение с помощью вентиляторов, рис. 14.



Рис. 14. Плата модуля brick-типа с принудительным воздушным охлаждением [54]

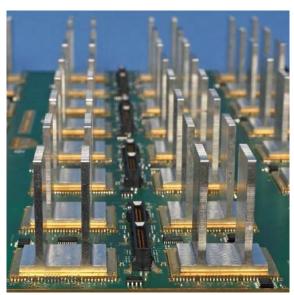


Рис. 15. АФАР tile-типа с жидкостным охлаждением [54]. Трубы с жидким хладоагентом прямоугольного сечения (на фото не показаны) прижаты к алюминиевым радиаторам. За счет тепловых контактов между радиаторами и стенками труб тепло от ИС передается к охлаждающей жидкости

При больших тепловыделениях применяют жидкостное охлаждение. Существуют системы охлаждения, в которых трубы с охлаждающей жидкостью проходят снаружи корпусов тепловыделяющих блоков и прижаты к их металлическим радиаторам [54], рис. 15. Также, существуют системы охлаждения, в которых трубы с охлаждающей жидкостью вмонтированы в стенки корпусов аппаратуры, рис. 16.

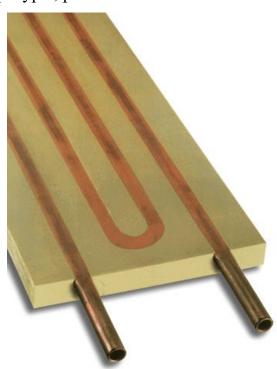


Рис. 16. Пластина с вмонтированной трубкой для охлаждающей жидкости [54]

6. Примеры радиосистем с АФАР

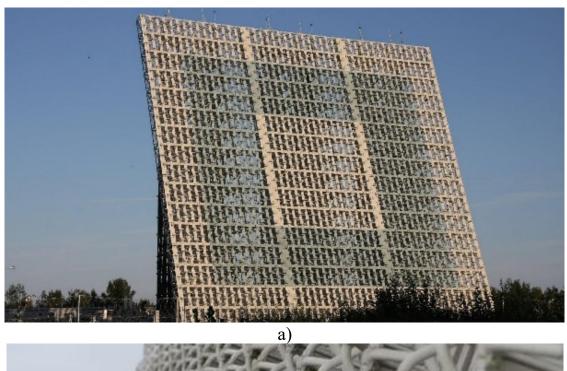
Ниже, на рис. 17-30 показаны фотографии некоторых радиосистем с АФАР.

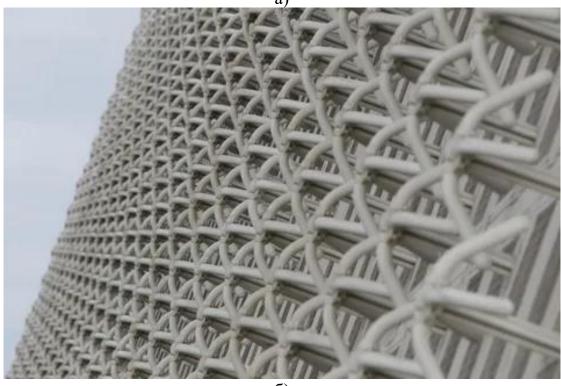


a)

6)

Рис. 17. Приемная АФАР Р-диапазона с цифровым диаграммоформированием РЛС наблюдения за космическим пространством [51]: а) — общий вид, б) — активные приемные излучатели АФАР. РЛС работает в непрерывном режиме и обеспечивает обнаружение и сопровождение объектов в секторе $\pm 45^{\circ}$ — по азимуту и 5° — 85° — по углу места на расстояниях свыше 9000 км, «ПАО Радиофизика», Россия

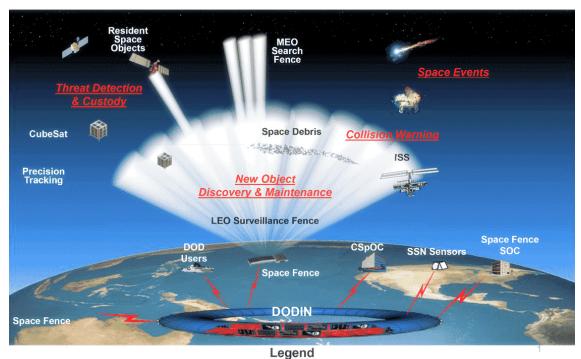




б)
Рис. 18. АФАР метрового диапазона РЛС «Воронеж-М» для наблюдения за космическим пространством [55]: а) – общий вид РЛС, б) – турникетные излучатели АФАР. РТИ им. академика А. Л. Минца, Россия



a)



CSpOC - Combined Space Operations Center

DOD - Department of Defense

DODIN - Department of Defense Information Network SOC - Space Fence Operation Center ISS - International Space Station

LEO - Low Earth Orbit

MEO - Medium Earth Orbit

SSN - Space Surveillance Network

б)

Рис. 19. РЛС для наблюдения за космическим пространством «Space Fence Radar» [56]. АФАР РЛС имеют цифровое диаграммоформирование; а) – общий вид РЛС, б) – система лучей АФАР. Объекты обнаруживаются при пролете через «барьер» лучей РЛС. Lockheed Martin, США



a)

6)

Рис. 20. Система ТНААD (Terminal High Altitude Area Defense) [57]: а) – общий вид РЛС, б) - АФАР Х-диапазона со сменными модулями brick-типа. Raytheon Company, США

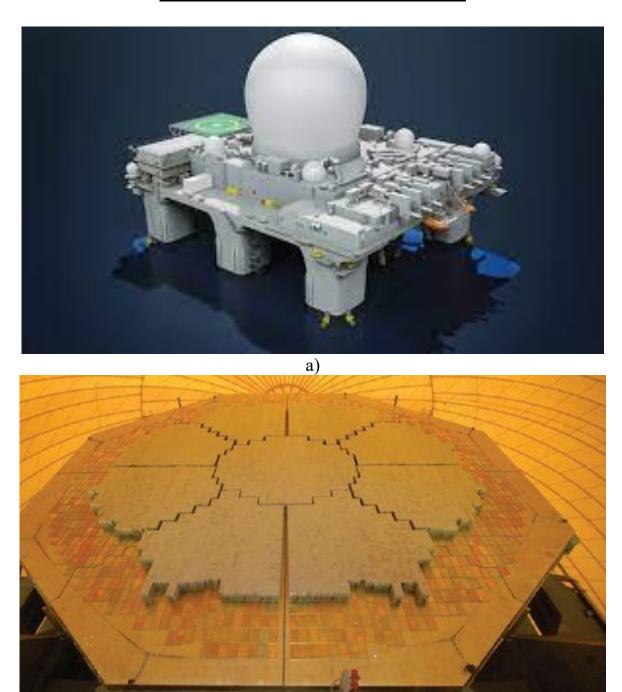


Рис. 21 Морская РЛС X-диапазона SBX (Sea Based Radar) [58]: а) — общий вид, б) — АФАР с излучателями в виде крупноапертурных рупоров; эквидистантные подрешетки рупоров расположены неэквидистантно для подавления интерференционных максимумов ДН. Raytheon Company, США

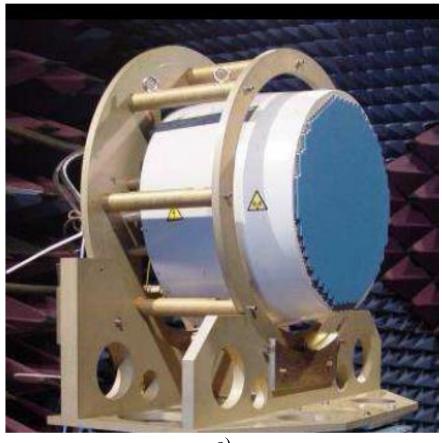
б)



б) Рис. 22. Авиационные АФАР [59,60]:

а) – РЛС X-диапазона с АФАР «Жук-АЭ» на самолете, б) – общий вид РЛС с АФАР разработки НИИП для ПАК ФА (Авторство: Allocer. Собственная работа, СС BY-SA 3.0,

https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8093536)



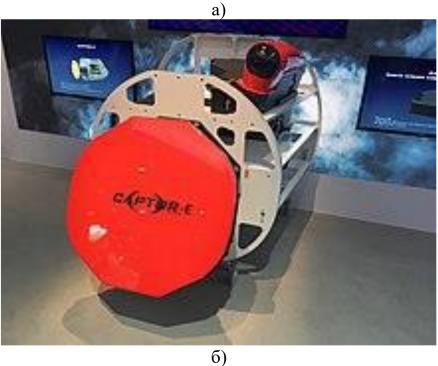
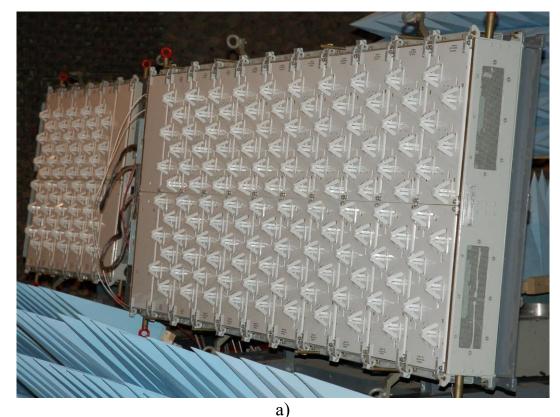


Рис. 23. а) — демонстратор технологий РЛС AMSAR (Airborne Multirole Solid State Active Array Radar) на испытаниях в безэховой камере. Selex, Thales and Airbus, б) — разработанная на его основе самолетная РЛС X-диапазона CAPTOR с АФАР для европейского истребителя Eurofighter Typhoon [61]



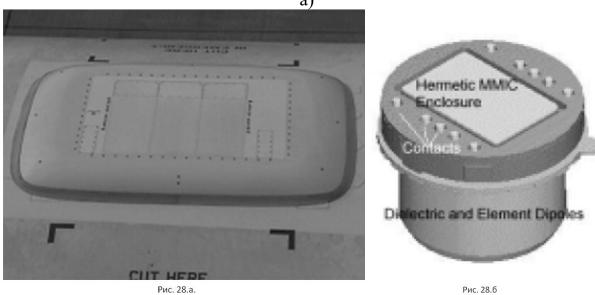


Рис. 24. АФАР самолетной станции спутниковой связи: а) – приемная и передающая АФАР L-диапазона [51], разработчик ПАО Радиофизика, Россия, б) – приемная АФАР Ки-диапазона и её модуль. АФАР установлена на фюзеляже самолета «Boeing» [62], Connexion by Boeing.

б)

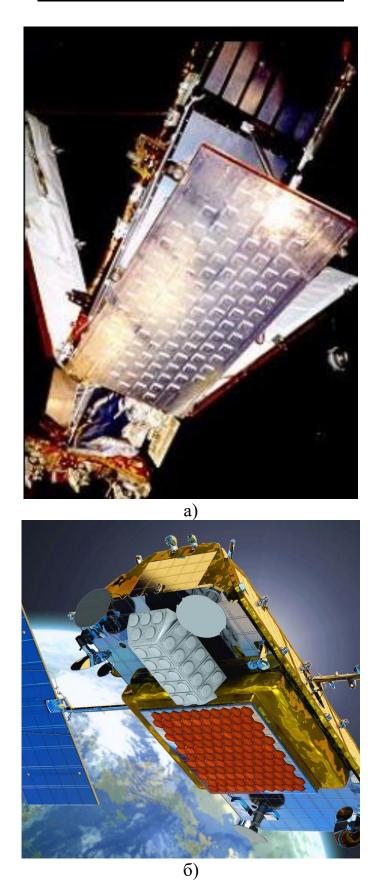
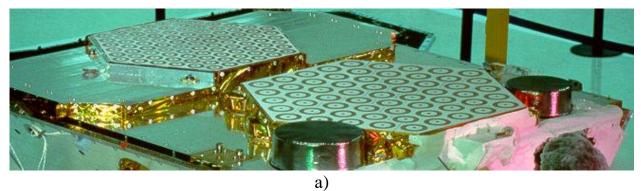


Рис. 25. Приемо-передающая АФАР L- диапазона: а) — спутник «Iridium» с тремя приемо-передающими АФАР, Raytheon Company, Motorola, Inc., б) спутник «Iridium NEXT» с одной приемо-передающей АФАР (в нижней части фотографии), Tales Alenia Space, [63, 64]



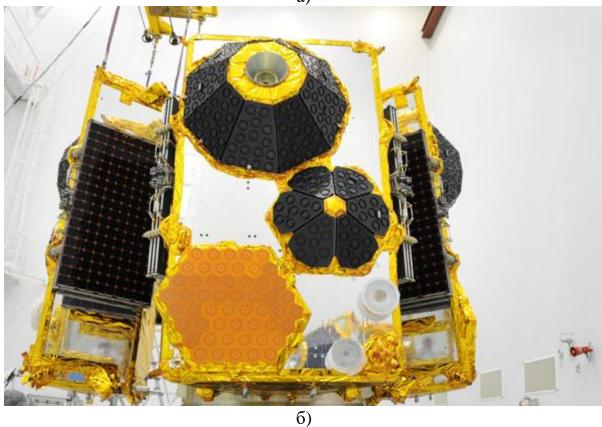
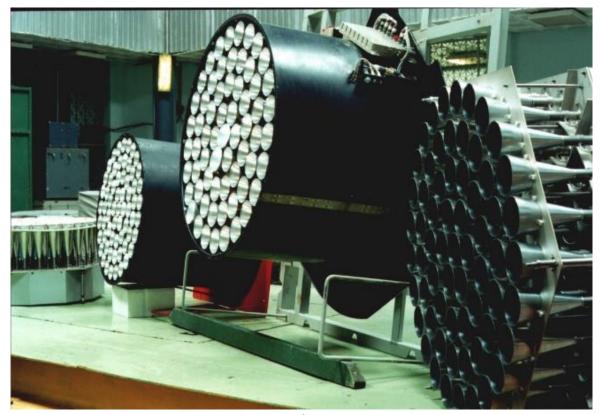
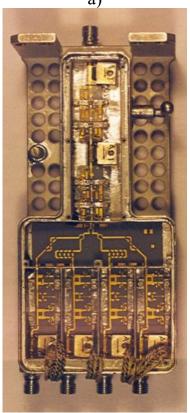


Рис. 26. Передающие АФАР S-диапазона и приёмная АФАР L-диапазона спутника связи [63,65]: а) — спутник «GlobalStar-1», Loral Space and Qualcomm, Inc., б) — спутник «GlobalStar-2», Tales Alenia Space



a)



(6)

Рис. 27. АФАР Ки-диапазона спутника «Купон» [66-68]: а) – АФАР с четырьмя независимо сканирующими лучами, б) – модуль АФАР, Спурт, Ижевский радиозавод

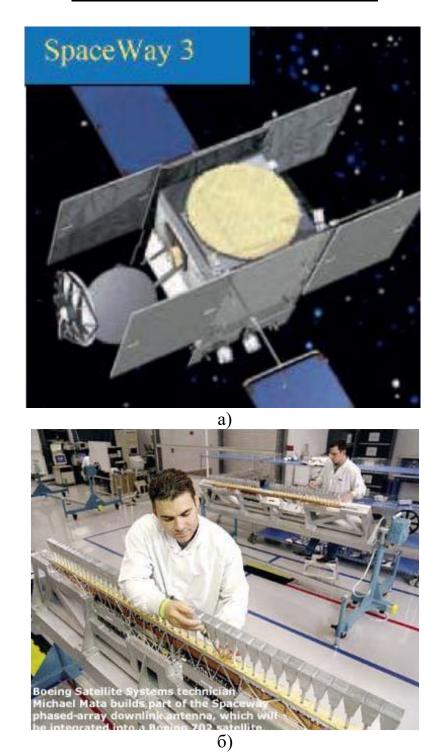
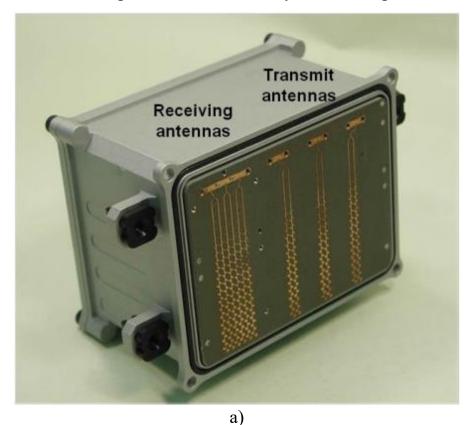


Рис. 28. Спутник SpaceWay 3 с передающей многолучевой AФAP с цифровым диаграммоформированием [69]: а) — спутник с передающей AФAP и приемной многолучевой зеркальной антенной, б) — сборка линеек AФAP, Boeing Satellite Development Center

По сведениям от представителей фирмы Хьюз, эксплуатация спутника показала, что цифровое диаграммоформирование в сочетании с обработкой сигнала на борту весьма энергозатратно и отнимает значительную долю

энергетики спутника. По этой причине стоимость передачи единицы информации выше, чем при использовании спутников с зеркальными МЛА.



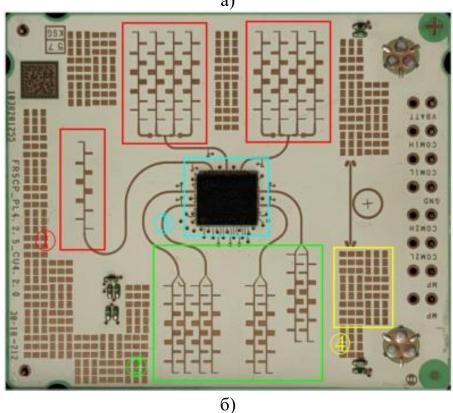


Рис. 29. Автомобильный радар [70]: а) радар Toyota Labs с приемной и передающей антеннами на печатной плате (укрытие снято); б) печатная плата Bosch с приемной и передающей АФАР и с микросхемой



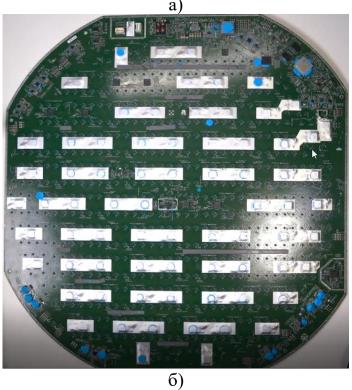


Рис. 30. Пользовательский терминал системы связи Starlink (компания Space X) [71,22]: а) общий вид терминала с $A\Phi AP$, б) обратная сторона печатной платы $A\Phi AP$ с HC

7. Направления развития технологий АФАР

В [13] Эли Брукнер, известный специалист из США по радиолокации, пишет: «Когда я начал работать в 50-х годах, я думал, что в радиолокации сделать ничего нового уже невозможно. В это время Радиационная лаборатория Массачусетского технологического института только что опубликовала серию из 28 книг, посвященных особо секретным работам по радиолокации времен Второй мировой войны. Казалось, эти книги содержали исчерпывающее освещение различных вопросов. Нужно только изучить их, и делать нового ничего не надо. – Как я ошибался! – С тех пор произошло много удивительных новых событий. Сейчас все движется еще быстрее. Мы живем в захватывающие времена. Радары с фазированными антенными решетками, в последние годы, привели к прорывам, которые были немыслимы всего несколько лет назад».

Эти же слова можно отнести и к радиосистемам с АФАР. Эволюция АФАР в период с 1995 года по 2012 год демонстрируется на рис. 31. Она характеризуется переходом от АФАР с модулями brick к АФАР панельного типа tile [72].



Рис. 31. Эволюция АФАР с 1995 по 2012 год [72]: от АФАР с модулями brickтипа до конформных АФАР tile на гибких подложках

АФАР Развитие технологий В значительной степени связано совершенствованием элементной базы. Характеристики современных транзисторов с использованием различных материалов показаны на рис. 32 [13]. Транзисторы на GaAs стоят сравнительно дорого, но они имеют низкую шумовую температуру (менее 80 К на частотах до К-диапазона) и выходную мощность до 15–20 Вт. Транзисторы на нитриде галлия GaN имеют выходную мощность десятки и даже сотни ватт на частотах сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Транзисторы на карбиде кремния SiC обеспечивают выходную мощность более 1 кВт на частотах дециметрового диапазона.

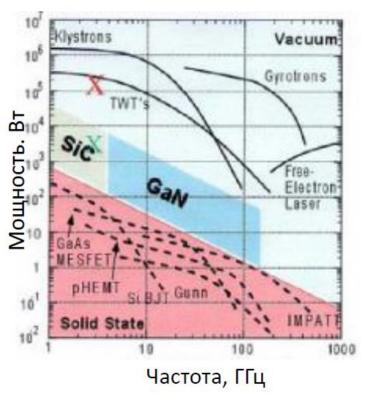


Рис. 32. Современные твердотельные и вакуумные электронные приборы (состояние на 2007 год) [13]

Прогресс в развитии радиосистем связан также с разработкой и созданием ИС. Так, в 80-е годы 20-го века были разработаны ИС СВЧ на подложках из арсенида галлия (GaAs) — называемые ММІС (Monolithic Microwave Integrated Circuit) в англоязычной литературе. Были созданы АФАР с использованием ИС на высоких частотах, включая частоты миллиметрового диапазона [13].

В последние десятилетия, созданы ИС на кремний-германиевых (SiGe) подложках [13,15,16]. По сравнению с ИС на GaAs, микросхемы на SiGe имеют меньшую выходную мощность, а приемные ИС имеют большую шумовую температуру, однако их характеристики вполне достаточны для решения ряда коммерческих задач радиолокации и связи, например, для создания систем связи с низколетящими спутниками и для автомобильных РЛС [15,16]. Существенным преимуществом таких ИС является их относительная дешевизна, что позволяет осуществлять массовый выпуск АФАР для коммерческого применения. В результате, за счет большого количества продаж, в 2020 году суммарная стоимость коммерческих систем радиолокации и связи на элементной базе с использованием SiGe превысила стоимость военных систем на GaAs [15,16].

В требуется высокий системах, где потенциал комбинированные микросхемы, в которых объединены достоинства SiGe (относительно малая стоимость) И GaAs (высокие энергетические характеристики) [15,16]. АФАР с микросхемами на GaAs могут использоваться в качестве облучателей в гибридных зеркальных антеннах с высокими значениями коэффициента усиления и небольшими секторами сканирования [15,16,73-78]. В системах с двумерным сканированием используются двумерные решетки [73-75,78], в системах с одномерным сканированием достаточно использовать одномерные решетки [76,77] с меньшим числом элементов АФАР.

Конечно, невозможно предвидеть появление революционных изобретений, которые изменили бы кардинально облик радиосистем с АФАР и направления их совершенствования. При эволюционном же развитии, по нашему мнению, весьма вероятны следующие направления развития:

- повышение функциональных возможностей радиосистем, таких как пропускная способность, дальность, разрешение, быстродействие и т.п., в первую очередь за счет цифрового диаграммоформирования;
- улучшение эксплуатационных характеристик: создание компактных (тонких и лёгких) АФАР, создание конформных АФАР;
 - уменьшение энергопотребления;

- снижение стоимости.

Указанные направления развития могут быть достигнуты с помощью следующих средств:

- Увеличение мощности твердотельных приборов, снижение шумовой температуры, расширение полосы;
 - применение приборов и конструкций на новых материалах;
 - цифровое и оптическое диаграммоформирование;
- создание модулей и другой аппаратуры AФAP в виде СВЧ и цифровых ИС.
- применение коммерческих продуктов (SiGe ИС, ПЛИС, фотонных устройств, новых компьютеров и т.д.)

Заключение

3a последние более чем полвека радиосистемы активными фазированными антенными решетками претерпели революционные изменения и имеют характеристики, которые превышают самые смелые ожидания. Технологии последних лет, в особенности, цифровое диаграммоформирование, позволяют рассчитывать, что радиосистемы с активными фазированными получат дальнейшее антенными решетками развитие как В части функциональных, так И В части эксплуатационных И стоимостных характеристик.

Литература

- 1. Толкачев А.А., Егоров Е.Н., Шишлов А.В. Некоторые тенденции развития радиолокационных и связных систем. *Радиотехника*. 2006. №4. С.45-50.
- 2. Вендик О.Г. *Антенны с немеханическим движением луча*. Москва, Советское радио. 1965.

- 3. Егоров Е.Н. Основы микроэлектроники СВЧ.—Учебное пособие по курсам «Антенно-фидерные устройства» и «Радиотехнические устройства и системы». Москва, МИЭТ. 1983.
- 4. Под ред. Воскресенского Д.И., Канащенкова А.И. *Активные фазированные антенные решетки*. Москва, Радиотехника. 2009. 488 с.
- 5. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А. *Бортовые цифровые* антенные решетки и их элементы. Москва, Радиотехника. 2013. 208 с.
- 6. Гостюхин В.Л., Трусов В.Н., Гостюхин А.В. *Активные фазированные антенные решетки*. Москва, Радиотехника. 2011. 304 с.
- 7. Под ред. Верба В.С., Курочкин А.П. *Антенно-фидерные и оптоэлектронные устройства*. Москва, изд. Концерн Вега. 2013. 352 с.
- 8. Инденбом М.В. *Антенные решетки подвижных обзорных РЛС. Теория,* расчет, конструкции. Москва, Радиотехника. 2015. 416 с.
- 9. Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С., *Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи*. Москва, изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. 197 с.
- 10. Скобелев С.П. *Фазированные антенные решетки с секторными парциальными диаграммами направленности*. Москва, ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература". 2010. 320 с.
- 11. Mailloux R.J *Phased Array Antenna Handbook. Second edition*. Boston-London, Artech House. 2005. 394 p.
- 12. Brookner E. (Editor). *Practical Phased Array Antenna Systems*. Boston-London, Artech House. 1991. 320 p.
- 13. Brookner E. Phased-Array and Radar Breakthroughs. *Proceedings of 2007 IEEE Radar Conference*. Waltham, USA. 2007. P.37-42. https://doi.org/10.1109/RADAR.2007.374187
- 14. Википедия: Закон Мура. [web] *Wikipedia*. Date of access: 29.10.2022. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Moore's_law

- 15. Rebeiz G.M. Advances in SiGe BiCMOS Technology with Chip-Scale Phased Array Applications. *Proceedings of 2013 Phased Array Symposium*. Boston. 2013 P.1-90.
- 16. Rebeiz G.M. SiGe and CMOS for Advanced Phased Array Communication and Radar Systems. *Proceedings of 2016 Phased Array Symposium*. Boston. 2016. P.1-107.
- 17. Marker Reports: Automotive RADAR Market [web] *MarketsAndMarkets* Date of access: 29.10.2022. URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/automotive-radar-market-75536718.html
- 18. Gültepe G., Kanar T., Zihir S., and Rebeiz G.M. A 1024-Element Ku-Band SATCOM Phased-Array Transmitter With 45-dBW Single-Polarization EIRP. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2021. V.69. №9. P.4157-4168. https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3075678
- 19. Gültepe G., Kanar T., Zihir S., and Rebeiz G.M. 1024-Element Ku-Band SATCOM Dual-Polarized Receiver with >10-dB/K G/T and Embedded Transmit Rejection Filter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2021. V.69. №7. P.3484-3495. https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3073321
- 20. Денисенко В.В., Козлов В.Н., Колесников Р.А., Корчемкин Ю.Б., Кривошеев Ю.В., Левитан Б.А., Шитиков А.М., Шишлов А.В., Янукьян З.А., Uhm M.S., Yun S.H. Принципы создания активной фазированной антенной решетки для терминалов спутниковой связи на основе многослойной печатной платы. *Радиотехника*. 2021. Т.85. №10. С.42-52.
- 21. Анпилогов В., Пехтерев С., Шишлов А. Антенная решетка и абонентский терминал Starlink. *Технологии и средства связи*. 2021. №S1. C.69-76.
- 22. Анпилогов В., Пехтерев С., Шишлов А. Анализ терминалов, планируемых для применения в системах Starlink и OneWeb. *Технологии и средства связи*. *Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание, 2022»*. 2022. С.30-37.
- 23. Под ред. Б.А. Левитана. *Технологии радиолокации* κ 55-летию ПАО «Радиофизика» 2-е издание. Москва, изд. Вече. 2015. 672 с.

- 24. Delos P. Digital Beamforming Accelerates the Evolution to Next-Generation Radar. *Microwave Journal*. 2017. V.60. №1. P.58-70.
- 25. Fulton C., Yeary M., Thompson D., Lake J., and Mitchell A. Digital Phased Arrays: Challenges and Opportunities. *Proceedings of the IEEE*. 2016. V.104. №3. P.487-503. https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2501804
- 26. Ku B.J., Ahn D.-S., Lee S.-P., Shishlov A.V., Reutov A.S., Ganin S.A., and Shubov A.G. Radiation Pattern of Multibeam Array Antenna with Digital Beamforming for Stratospheric Communication System: Statistical Simulation. *ETRI Journal*. 2002. V.24. №3. P.197-204. https://doi.org/10.4218/etrij.02.0102.0303
- 27. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. *Волноводная фотоника*. Санкт Петербург, изд. ИТМО. 2008. 143 с.
- 28. Васильев С.А. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применения. *Квантовая электроника*. 2005. Т.35. №12. С.1085-1103. https://doi.org/10.1070/QE2005v035n12ABEH013041
- 29. Urick V.J., Williams K.J., McKinney J.D. *Fundamentals of microwave photonics*. John Wiley & Sons. 2015. 496 p.
- 30. Белкин М.Е., Сигов А.С. Новое направление фотоники сверхвысокочастотная оптоэлектроника. *Радиотехника и электроника*. 2009. Т.54. №8. С.901-914.
- 31. Edman R.D. et al., Fiber-optic prism true time-delay antenna feed. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1993. V.5. №11. P.1347-1349. https://doi.org/10.1109/68.250065
- 32. Meijerink A. et al. Novel Ring Resonator-Based Integrated Photonic Beamformer for Broadband Phased Array Receive Antennas. *Journal of Lightwave Technology*. 2010. V.28. №1. P.3-18. https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2029705
- 33. Шишлов А.В. *Теория и техника активных фазированных антенных решеток*. Москва, МФТИ. 2013.
- 34. Applebaum S.P. Adaptive Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1976. V.24. №5. P.585-598. https://doi.org/10.1109/TAP.1976.1141417

- 35. Шишлов А.В., Кривошеев Ю.В., Мельничук В.И. Свойства контурных диаграмм направленности фазированных антенных решеток. *Антенны*. 2016. Т.8. №228. С.44-58.
- 36. Shishlov A.V., Krivosheev Yu.V, Melnichuk V.I. Principal Features of Contour Beam Phased Array Antennas. *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*. Waltham-Boston. 2016. P.1-8. https://doi.org/10.1109/ARRAY.2016.7832635
- 37. Борисов С.Н., Денисенко В.В., Левитан Б.А., Шишлов А.В. Антенны для широкополосной спутниковой связи на движущемся транспорте. Аналитический обзор. *Радиотехника*. 2015. №10. С.17-32.
- 38. Jeon S.I., Choi J.I., Yim Ch.S., Lee S.P., Shishlov A.V. Vehicular active antenna system with combined electronical and mechanical beam steering for reception from DBS in Ku-band. *Proceedings of 28-th Moscow International Conference on Antenna Theory and Technology*. Moscow. 1998. P.72-77.
- 39. Анпилогов В.Р., Шишлов А.В., Эйдус А.Г. Многолучевые антенные системы HTS. *Технологии и средства связи*. 2013. Т.6-2. №99. С.54-67.
- 40. Шишлов А.В., Левитан Б.А., Топчиев С.А., Анпилогов В. Р., Денисенко В.В. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи. *Журнал радиоэлектроники*. 2018. №7. С.1-40.
- 41. Rotman W., Turner R. Wide-angle microwave lens for line source applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1963. V.11. №6. P.623-632. https://doi.org/10.1109/TAP.1963.1138114
- 42. Шубов А.Г., Денисенко В.В., Майоров А.В., Шалякин А.И., Шишлов А.В. Опыт разработки линз Ротмана для различных частотных диапазонов. *Антенны*. 2001. Т.6. №52. С.23-28.
- 43. Венецкий А.С., Калошин В.А., Нгуен К.Т., Фролова Е.В. Синтез и исследование сверхширокополосной планарной трехзеркальной системы. Журнал радиоэлектроники. 2018. №1 С.5-5.

- 44. Калошин В.А., Ви У.Н. Синтез зеркально-линзовой бифокальной цилиндрической системы с минимальными аберрациями. *Радиотехника и электроника*. 2022. Т.67. №3. С.249-258.
- 45. Калошин В.А., Ви У.Н. Синтез бифокальных диэлектрических линз. *Журнал радиоэлектроники*. 2022. №2.
- 46. Калошин В.А., Ви У.Н. Широкоугольные многолучевые антенны на основе бифокальных систем. *Журнал радиоэлектроники*. 2022. №3. С.27.
- 47. Mailloux, R.J., Phased Array Architecture. *IEEE Proceedings*. 1992. V.80. №1. P.163-172.
- 48. Sanzgiri S., Bostrom D. Pottenger W., Lee R.-Q. A Hybrid Tile Approach for Ka Band Subarray Modules. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1995. V.43. №9. P.953-959. https://doi.org/10.1109/8.410212
- 49. Geise A., Jacob A.F., Flex-rigid architecture for active millimeter-wave antenna arrays. 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest Boston. 2009. https://doi.org/10.1109/MWSYM.2009.5165820
- 50. Moon J.-Y., Yun S.-W., Ahn Ch.-S., Kim S.-J., New Tile Structure for Microwave Modules Using Solderless Vertical Interconnections. *Microwave Journal*. 2012. V.55. №10. P.1-7.
- 51. Под ред. Шишлова А.В. *Радиофизика 60 лет.* 2020. Москва, ПАО Радиофизика. 144 с.
- 52. Holzwarth S., Jacob A.F., Dreher A., Hunscher C., Fischer H., Stark A., Rohrdantz B., Geise A., Kuhlmann K., Gieron R., Litschke O., Lohmann D., Simon W., Buchner P., Heckler M.V.T., Greda L.A. Active Antenna Arrays at Ka-Band: Status and Outlook of the SANTANA Project. *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*. Barcelona. 2010. P.1-5.
- 53. Ortiz J. A., Salazar J.L., D'1az J., Sim S., Aboserwal N., Chun J., and Jeon L. Ultracompact universal polarization X-band unit Cell for High-Performance Active Phased Array Radar. *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*. Waltham-Boston. 2016. P.5.

https://doi.org/10.1109/ARRAY.2016.7832592

- 54. Bar-Cohen A., Albrecht J., Altman D., Maurer J. Thermal Management of Active Electronically Scanned Arrays. 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston, USA. 2013. P.150.
- 55. Воронеж (радиолокационная станция). [web] *Wikipedia*. Date of access: 29.10.2022. URL: Воронеж (радиолокационная станция)
- 56. Haimerl J.A., Hudson B., Fonder G.P., Lee D.K. Overview of the Large Digital Arrays of the Space Fence Radar. 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham, MA, USA 2016. P.4. https://doi.org/10.1109/ARRAY.2016.7832538
- 57. Sarcione M., Mulcahey J., Schmidt D., Chang K., Russell M., Enzmann R., Rawlinson P., Gluzak W., Howard R. and Mitchell M., The Design, Development and Testing of the THAAD (Theater High Altitude Area Defense) Solid State Phased Array (formerly Ground Based Radar). *Proceedings of International Symposium on Phased Array Systems and Technology*. Boston. 1996. P.260-265. https://doi.org/10.1109/PAST.1996.566096
- 58. Wikipedia. Sea Based X-band Radar [web]. *Wikipedia*. Date of access: 29.10.2022. Url: https://en.wikipedia.org/wiki/Sea-based_X-band_Radar
- 59. КРЭТ на MAKC-2013 представил более 70 не имеющих аналогов за рубежом разработок. [web] *Технополис завтра*. Date of access: 29.10.2022. URL: https://kramtp.info/novosti/interesnoe/full/29626
- 60. Под ред. Синани А.М., Кауфмана Г.В. *Антенны и радары с электронным* управлением лучом. Москва, Радиотехника. 2016. 234 с.
- 61. Milin J.-L., Moore S., Bürger W., Triboulloy P.-Y., Royden M., Gerster J. AMSAR
 A France-UK-Germany success story in active-array radar. 2010 IEEE
 International Symposium on Phased Array Systems and Technology. 2010. P.11 18. https://doi.org/10.1109/ARRAY.2010.5613398
- 62. Monk D, Adler O. Calibration and Rf Test of Connexion by Boeing Airborne Phased Arrays. *Proceedings 2003 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology*. P.405-410. https://doi.org/10.1109/PAST.2003.1257016

- 63. Lafond J.C., Vourch E., Delepaux F., Lepeltier P., Bosshard P., Dubos F., Feat C., Labourdette C., Navarre G., Bassaler J.M. Thales Alenia Space Multiple Beam Antennas for Telecommunication Satellites. *The 8th European Conference on Antennas and Propagation.* (EuCAP 2014). 2014. P.186-190. https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6901723
- 64. Rohwer A.B., Desrosiers D.H., Bach W., Estavillo H., Makridakis P., Hrusovsky R. Iridium Main Mission Antennas A Phased Array Success Story and Mission Update. 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. 2010. P.504-511. https://doi.org/10.1109/ARRAY.2010.5613319
- 65. Croq F., Vourch E., Reynaud M., Lejay B., Benoist Ch., Couarraze A., Soudet M., Caratit P., Vicentinit J., Mannocchi G. The Globalstar 2 Antenna Sub-System. *3rd European Conference on Antennas and Propagation*. 2009. P.598-602.
- 66. Egorov E.N., Epshtein A.L., Guskov G.Ya., Levitan B.A., Sbitnev G.V., Shishlov A.V. New Technologies in Multibeam and Scanning Antennas for Communication Systems. *Proceedings of APSCC'94 Workshop*. Seoul, Korea. 1994. P.211-221.
- 67. Егоров Е.Н., Сбитнев Г.В., Чистюхин В.В. Очерки развития техники твердотельных активных фазированных решеток в зеленоградской школе СВЧ микроэлектроники. *Радиотехника* 2010. №4. С.6-13.
- 68. Ефимов А.Г., Каменев А.Г., Корнеев С.А., Чистюхин В.В. Принципы проектирования бортовых многолучевых приемных АФАР систем спутниковой связи. *Известия высших учебных заведений*. Электроника. 2020. Т.25. №1. С.73-78.
- 69. Fang R.J.F. Broadband IP Transmission over SPACEWAY® Satellite with On-Board Processing and Switching. *Proceedings of IEEE Globecom Conference*. 2011. P.1-5. https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2011.6133770
- 70. Waldschmidt C., HASCH J., Menzel W. Automotive Radar—From First Efforts to Future Systems. *IEEE Journal of Microwaves*. 2021. V.1. №1. P.135-148. https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3033616

- 71. Анпилогов В., Денисенко В., Зимин И., Кривошеев Ю., Чекушкин Ю., Шишлов А. Проблемы создания антенн с электрическим сканированием луча для абонентских терминалов спутниковых систем связи в Ки- и Кадиапазонах. *Первая миля*. 2019. Т.3. №80. С.16-27.
- 72. Sarcione M., and Puzella A. Technology Trends for Future Low Cost Phased Arrays. 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Anaheim. 2010. P.688-690 https://doi.org/10.1109/MWSYM.2010.5515448
- 73. Виленко И.Л., Кривошеев Ю.В., Шишлов А.В., Гибридные зеркальные антенны с облучающими активными фазированными решетками. *Антенны*. 2011. Т.10. №173. С.1-22.
- 74. Shishlov A.V., Vilenko I.L., Krivosheev Yu. V., Active Array Fed Reflector Antennas. Practical Relations and Efficiency. *Proceedings of the 6-th European Conference on Antennas and Propagation*. Prague. March 2012. P.5. https://doi.org/10.1109/EuCAP.2012.6206228
- 75. Shishlov A.V., Vilenko I.L., Krivosheev Y.V. Asymptotic theory, design and efficiency of array-fed reflector antennas. 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston. 2013. P.320-327. https://doi.org/10.1109/ARRAY.2013.6731848
- 76. Reutov A.S., Shishlov A.V. Focuser-Based Hybrid Antennas For One-Dimensional Beam Steering. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology*. Dana Point, California. 2000. P.411-414. https://doi.org/10.1109/PAST.2000.858986
- 77. Jung Y.-B., Eom S.-Y., Jeon S.-I., Kim Ch.J., Shishlov A.V. Novel Hybrid Antenna Design Having A Shaped Reflector for Mobile Satellite Communication Applications. *Antennas and Propagation Society International Symposium. (APS-URSI)*. 2010. P.1-4. https://doi.org/10.1109/APS.2010.5561055
- 78. Jung Y.-B., Shishlov A.V., Park S.-O. Cassegrain Antenna With Hybrid Beam Steering Scheme for Mobile Satellite Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2009. V.57. №5. P.1367-1372 https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2016706

Для цитирования:

Шишлов А.В., Денисенко В.В., Левитан Б.А., Топчиев С.А., Шитиков А.М. Активные фазированные антенные решетки — состояние и тенденции развития. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023 №1 https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.5