

МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ

А. В. Шишлов^{1,2}, Б. А. Левитан^{1,2,3}, С.А. Топчиев¹, В. Р. Анпилогов⁴, В. В. Денисенко^{1,3}

¹ ПАО «Радиофизики», 125363, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10

² Московский физико-технический институт (141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

³ Московский авиационный институт (125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4

⁴ ЗАО «ВИСАТ-ТЕЛ» (123182, Москва, ул. Щукинская, д.6, корп.3

Статья поступила в редакцию 2 июля 2018 г., после доработки – 20 июля 2018 г.

Аннотация. В обзоре изложены современное состояние и тенденции развития многолучевых антенн (МЛА) для систем радиолокации, связи, радиомониторинга и других радиосистем. Рассмотрены принципы построения, особенности и области применения различных видов МЛА, приведены примеры МЛА в виде наборов однолучевых антенн, МЛА на основе зеркальных и линзовых антенн, антенных решеток (АР), а также активных фазированных антенных решеток (АФАР) и гибридных зеркальных антенн (ГЗА).

Ключевые слова: многолучевая антенна (МЛА), зеркальная многолучевая антенна, линзовая многолучевая антенна, многолучевая активная фазированная антенная решетка, многолучевая гибридная зеркальная антенна.

Abstract. In this survey the state-of-the-art and trends of multibeam antenna (MBA) for radar and communication systems are considered. Architectures, principal features and applications of various MBAs are introduced and accompanied by practical examples. MBAs as assemblies of single-beam antennas are widely used in base stations of cellular communication. Though the antenna assemblies are bulky, their beams can be individually directed and optimized. Reflector MBAs have high directivity and are simple. Key points of reflector MBAs are limited field of view and low overlapping level of neighbor beams. State-of-the-art dual-reflector single-feed-per-beam (SFB) MBAs with one-dimensional sights of view have over one hundred beams in one plane. MBAs with two-dimensional sights of view have up to several dozen beams in cross-section. Good overlapping of beams is achieved by grouping

several SFB reflector (or lens) MBAs with alternated beams. The other way of providing good overlapping is generating beams from single aperture by multiple-feed-per-beam (MFB). Antenna arrays with Rotman lens beamformers can have hundreds of fixed or frequency scanned beams. These MBAs have low losses, are simple, and compact. In active arrays, losses in beamformers do not decrease significantly antenna electrical performances. For this reason, compact printed microstrip beamformers or even integrated circuit (IC) beamformers having reach beamforming capabilities can be used in active arrays despite valuable losses.

Active electronically scanned arrays (AESA) are capable to form several independent scanning beams. AESAs with digital beamforming are capable to form hundreds or thousands independent beams due to advanced digital ICs.

Keywords: multibeam antenna (MBA), multibeam reflector antenna, multibeam lens antenna, multibeam phased array antenna, multibeam array-fed reflector antenna.

Введение

МЛА в системах связи многократно увеличивает их радиочастотный ресурс, что позволяет одновременно обслуживать большое количество абонентов [1]. Это обеспечивается либо за счет пространственно-частотного разделения, либо за счёт пространственно-временного разделения передачи информации между лучами (за счёт быстрых скачков лучей в пространстве). При этом МЛА позволяет оптимально использовать информационную емкость системы в зависимости от текущего трафика в рабочей зоне каждого луча. В итоге достигается низкая стоимость передачи единицы информации и оптимальное (отвечающее текущему трафику) использование ресурса системы связи в зоне обслуживания.

МЛА в радиолокаторах дают возможность быстро обнаруживать объекты в пространстве и одновременно сопровождать большое их количество. Это достигается за счет освещения объектов в зоне обслуживания широким передающим лучом и покрытия её многими высоконаправленными приемными лучами.

Однозначно сформулировать различия между МЛА систем связи и локации не представляется возможным. И в локации, и в связи используются практически одни и те же технические решения при создании антенн, применяются как непрерывные, так и импульсные сигналы, используются режимы с временным разделением сеансов приема и передачи. Также, характерны одинаковые тенденции (освоение всё более высоких диапазонов частот, расширение рабочей полосы частот, применение активных решеток с электрическим сканированием, переход к цифровому диаграммоформированию с применением интегральных микросхем). Различие систем состоит только в том, что в системах связи излучаемый и принятый сигналы разные, а в радиолокации – одинаковые, с точностью до задержки во времени и доплеровского сдвига по частоте.

Кроме того, в системах связи применяются передающие МЛА, излучающие сигналы одновременно в разных лучах на разных частотах, а в системах локации передающие МЛА практически не используются.

Известны несколько типов МЛА, имеющие различные возможности и применяемые в разных радиосистемах. В настоящем обзоре рассмотрены основные особенности таких МЛА, приведены примеры их применения в практических разработках, а также даны рекомендации относительно целесообразности применения того или иного типа МЛА в различных радиосистемах.

За десятилетия разработок создано большое количество различных МЛА, предложены многочисленные технические решения, оформленные патентами, опубликовано множество книг и статей. В настоящем обзоре не ставится задача обзора этих публикаций. Наша цель – рассмотреть основные тенденции и проиллюстрировать их примерами.

Многолучевые антенные системы в виде наборов однолучевых антенн

МЛА в виде набора однолучевых антенн широко применяются в системах сотовой связи [2], поскольку каждая однолучевая антенна может быть выбрана независимо так, чтобы обеспечить оптимальное покрытие заданной соты за

счёт формы, ширины и ориентации луча. Кроме того, каждая антенна может быть независимо оптимизирована для заданных частотного диапазона и поляризации. При наличии необходимого места для размещения такой антенной системы (например, на мачте сотовой связи) данный подход позволяет применять простые широко представленные на рынке однолучевые антенны для базовых станций. На рис. 1а показана МЛА базовой станции сотовой связи S-диапазона. Каждая антенна этой системы представляет собой дипольную антенную решетку, излучатели которой питаются через делитель. Луч каждой антенны имеет веерную форму, вытянут в горизонтальной плоскости и обеспечивает покрытие соты в виде углового сектора.

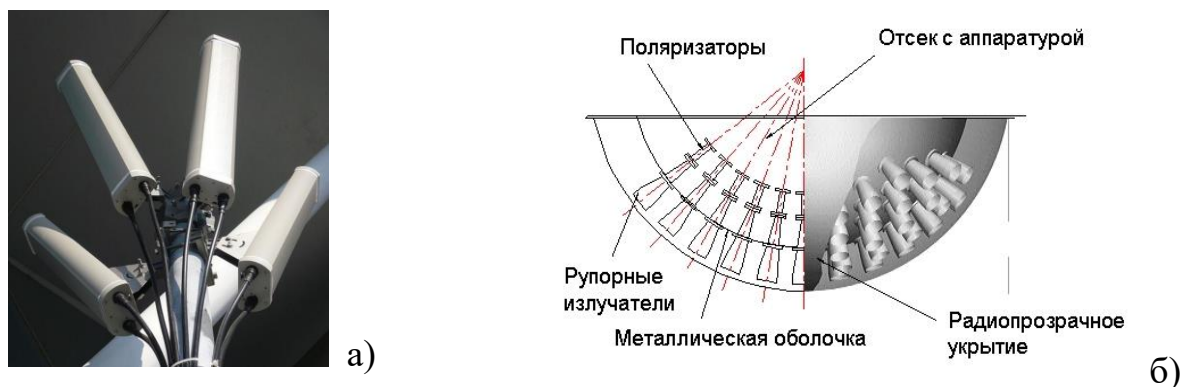


Рис. 1. Многолучевые антенны в виде набора однолучевых антенн

МЛА, выполненные в виде наборов однолучевых антенн, находят применение в станциях связи и в короткой части сантиметрового, и в миллиметровом диапазонах волн, где размеры антенн, необходимые для формирования лучей заданной ширины, относительно малы. Так, на рис. 1б представлена 119-лучевая антенна V-диапазона (47-48 ГГц) [3] для базовой станции сотовой связи, устанавливаемой на стратосферном дирижабле. Антенна выполнена из 119 независимых осесимметричных двухмодовых рупоров, установленных на панели полусферической формы. Каждый рупор формирует луч шириной 12° . Соседние лучи пересекаются по уровню половинной мощности. Диаметр антенной системы составляет примерно один метр. Такие МЛА в виде систем небольших рупорных, диэлектрических или

других типов антенн в последние годы рассматриваются также в системах связи 5G [4,5].

Другой пример бортовой многолучевой системы показан на рис. 2а. Это МЛА Ка-диапазона в виде набора из 16 линейных антенн спутника LEO-HTS (Low Earth Orbit - High Throughput Satellite) OneWeb [6]. Спутники расположены на низких орбитах (1200 км), поэтому для обеспечения высокой пропускной способности линии связи использованы антенны с относительно невысокой направленностью. Каждая линейная антенна формирует веерный луч шириной $48^\circ \times 3^\circ$. Шестнадцать таких приемо-передающих антенн, имеющих разные углы наклона в угломестной плоскости, формируют связку из 16 лучей, покрывающих зону обслуживания $48^\circ \times 48^\circ$ (рис. 2б). Технических описаний антенн в известной литературе нет. Предположительно, каждая линейная антенна выполнена в виде волновода с крестообразными щелями, через которые излучается поле круговой поляризации. Смежные лучи развязаны по частоте.

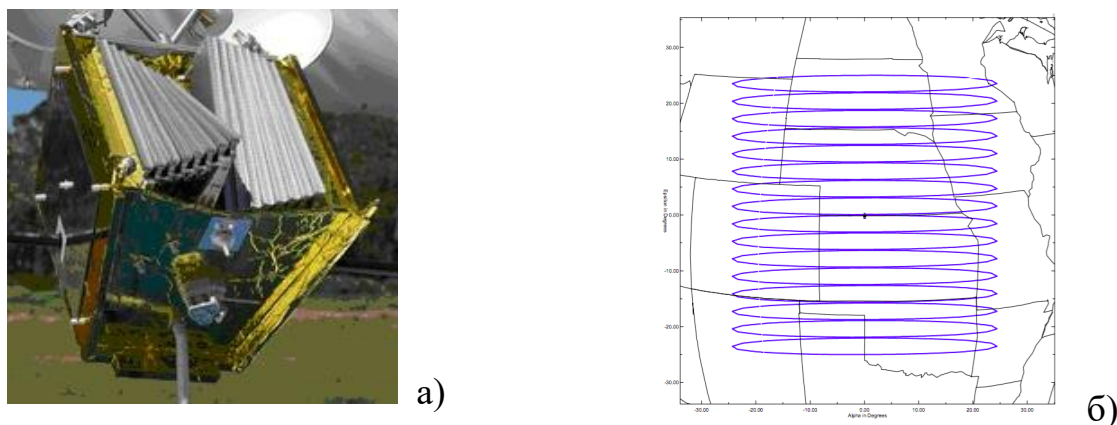


Рис. 2. Спутник OneWeb с многолучевой антенной и карта формируемых ей веерных лучей [6]

МЛА в виде набора однолучевых антенн в ряде задач выполняются в форме кольцевых решеток излучателей, каждый из которых формирует один луч в азимутальной плоскости (см., например [7]).

Зеркальные многолучевые антенны

Зеркальная МЛА состоит из одного или нескольких зеркал и системы облучателей. Главное зеркало является общим для всех лучей и определяет их,

как правило, высокую направленность. Включение любого облучателя соответствует формированию одного луча. Зеркальные МЛА работают в широкой полосе частот, имеют относительно простые отработанные конструкции и высокие эксплуатационные характеристики. Они используются в качестве спутниковых антенн и антенн земных станций для приема сигналов с геостационарных спутников [8,9]. На рис. 3а представлена схема приема телевидения с помощью МЛА одновременно с нескольких спутников, расположенных на геостационарной орбите (ГСО). На рис. 3б показана восьмилучевая зеркальная антенна с профилированными рефлекторами, формирующими остронаправленные лучи в одномерном секторе обзора для приема спутникового телевидения в Ku-диапазоне.



Рис. 3. Многолучевая антенна для приема спутникового телевидения [9]

Две главные задачи, которые возникают при создании зеркальных МЛА – это формирование остронаправленных лучей *в широком секторе обзора* и *плотная расстановка лучей* в этом секторе. Рассмотрим вначале вторую задачу. Возможность сближения лучей для получения высокого уровня их пересечения ограничена поперечными размерами облучателей. В свою очередь, эти размеры обычно выбираются так, чтобы обеспечить высокую эффективность освещения поверхности зеркала и, соответственно высокий коэффициент использования поверхности (КИП) антенны [1].

Многолучевые антенны с плотной расстановкой лучей требуются для спутников, работающих в системах широкополосной спутниковой связи с высокой пропускной способностью для равномерного покрытия зоны

обслуживания на Земле, например, спутников HTS [1]. Для плотной расстановки лучей во многих разработках используют три или четыре МЛА, образующие систему вложенных (перемежающихся) лучей с высоким уровнем пересечения [1] (рис. 4а). Пример такой антенной системы, установленной на спутнике связи Ka-диапазона «Экспресс-АМ6», показан на рис. 4б. Достижимые уровни пересечения соседних лучей составляют минус 1 – минус 2 дБ, при коэффициенте использования поверхности (КИП) рефлектора 60-70%.

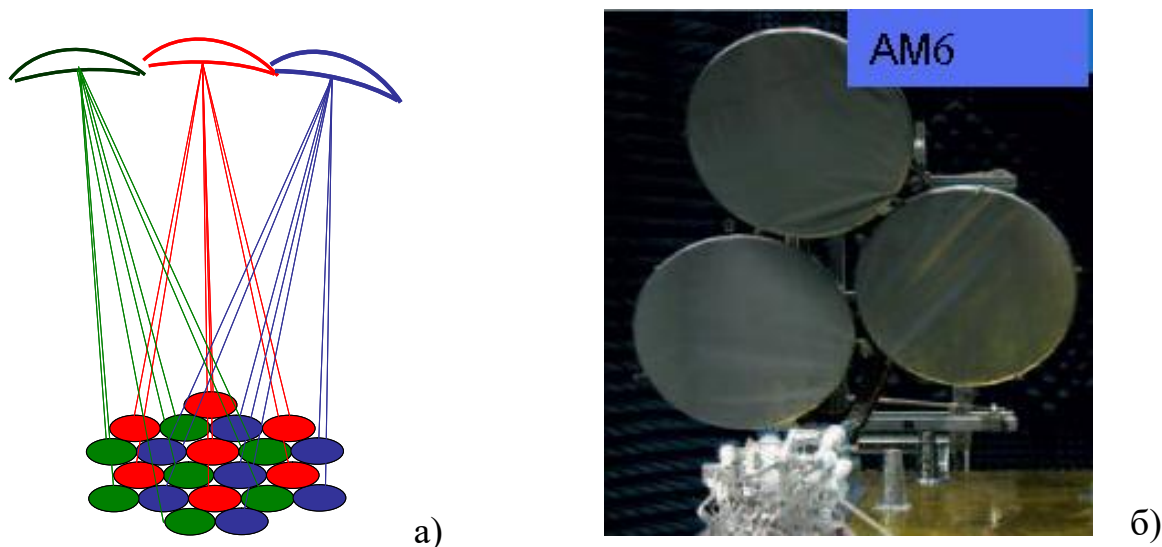


Рис. 4. Многолучевая антенная система из трех антенн с перемежающимися лучами, [1]

Другой тип зеркальной МЛА с высоким уровнем пересечения соседних лучей – антенна с многоэлементным облучателем, в которой для формирования лучей используются пересекающиеся группы излучателей (кластеры). Кластер образован несколькими излучателями облучающей решетки. Каждый излучатель участвует в работе нескольких кластеров. Для возбуждения кластеров применяют как пассивные многополюсники [1], так и протяженные излучающие структуры, в которых кластеры формируются за счет взаимных связей между излучателями. На рис. 5а показана разработанная в ПАО «Радиофизика» решетка ребристо-стержневых излучателей Ka-диапазона, в которой формируются 7-элементные пересекающиеся кластеры [10].

Кластеры сформированы за счёт взаимных связей между ребристо-стержневыми излучателями, имеющими продольный размер в несколько длин волн. Формирование поля в элементах кластера за счет взаимных связей

показано на рис. 5б. Решетка обеспечивает уровень пересечения соседних лучей около минус 4 дБ, а эффективность использования апертуры зеркала составляет примерно 30%. Антенна аналогична по характеристикам МЛА с волноводными диаграммоформирователями [11, 12] (проект «Medusa» Европейского космического агентства), однако имеет меньшую массу и проще в изготовлении.

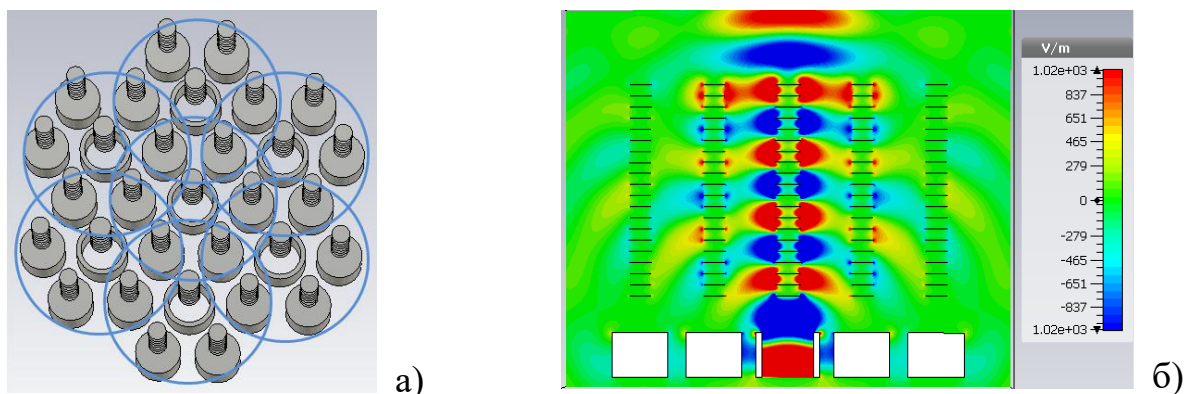


Рис. 5. Решетка ребристо-стержневых (дисковых) излучателей, возбуждаемых круглыми волноводами [10]

Вторая принципиальная задача создания зеркальных МЛА – обеспечение широкого углового сектора, в котором формируются высоконаправленные лучи. В однозеркальной антенне с параболическим зеркалом, а также в антеннах Кассегрена и Грегори сектор отклонения луча обычно не превышает нескольких ширин главного лепестка из-за существенных aberrаций, возникающих при больших углах отклонения луча.

В работах В.А. Калошина и Б.Л. Когана [9,13,14] предложена двухзеркальная МЛА тороидального типа с выпукло-вогнутым вспомогательным зеркалом, которая обеспечивает широкий сектор обзора в одной плоскости при сохранении высокого КИП. Пример такой антенны показан на рис. 3б. В работе [15] на основе оптической системы Калошина-Когана с использованием метода построения трехмерных бифокальных зеркальных систем [16] и методов численной оптимизации были достигнуты значения углов обзора в одной плоскости до 120 ширин главного лепестка при КИП главного зеркала не менее 50%.

В работах [15,17] рассмотрены МЛЖ на основе офсетной двухзеркальной оптической системы типа «раковина». Это оптическая система Кассегрена, в которой используется не выпуклое, а вогнутое гиперболическое вспомогательное зеркало, размер которого сопоставим с размером главного зеркала. В указанных работах продемонстрирована возможность формирования лучей в коническом секторе обзора с углом при вершине до 40 ширин главного лепестка.

В [18,19] рассмотрены двухзеркальные апланатические МЛЖ с двумерным сектором обзора. Показано, что такие системы позволяют формировать узкие лучи в конусе с углом при вершине до 20 ширин главного лепестка.

В [20] предельные возможности отклонения луча в двухзеркальных осесимметричных апланатических антеннах рассмотрены на основе анализа и минимизации aberrаций. Оценки, основанные на полученных значениях aberrаций, показывают возможность отклонения луча в конусе с углом при вершине более 100 ширин луча.

С помощью зеркальных антенн можно формировать не только остронаправленные лучи, но и контурные лучи для обслуживания зон заданной формы [21-24]. В антеннах с многоэлементными облучателями контурные лучи образуются при комплексном сложении полей парциальных лучей, создаваемых излучателями кластера, причем одна многоэлементная решетка может обеспечить формирование нескольких лучей.

Альтернативой является создание контурного луча за счет профилированного зеркала при использовании одиночного облучателя. Однако в однозеркальной антенне не удастся создать несколько лучей разной формы с помощью нескольких одиночных элементарных облучателей. В ПАО «Радиофизика» [25] предложена антенна с несколькими контурными лучами, формируемыми одиночными облучателями, при использовании общего для них параболического главного зеркала и нескольких профилированных вспомогательных зеркал разной формы. В качестве примера рассмотрена

спутниковая двухлучевая многозеркальная антенна для обслуживания территории Юго-Восточной Азии (рис. 6, 7).

Один луч антенны – фиксированный, а второй – перенацеливаемый контурный. Первый луч нацелен на Корейский полуостров, а положение и форма второго луча меняются путем механической замены вспомогательного зеркала. На рис. 6 показана схема антенны, где 1 – главное зеркало, 2 – облучатель для луча на Корейский полуостров, 3 – вспомогательное зеркало для луча на Корейский полуостров, 4 – облучатель для луча изменяемой формы, нацеливаемого на одну из зон обслуживания в Юго-Восточной Азии, 5-8 – четыре сменных вспомогательных зеркала, 9 – поворотное устройство с установленными на нём сменными вспомогательными зеркалами.

На рис. 7 показано расположение антенны на спутнике и обслуживаемые ей территории, где 1 – Корейский полуостров, 2 – 5 – регионы Юго-Восточной Азии, один из которых обслуживается контурным лучом при установке соответствующего вспомогательного зеркала в рабочее положение. Эти территории разнесены на углы более 9° , а их угловые размеры составляют от 0.7° до 3.7° . Размер апертуры главного зеркала - 2 м. При размещении облучателя в фокусе зеркала ширина главного лепестка ДН такой антенны составляет около 0.5° в К-диапазоне и 0.35° в Ка-диапазоне.

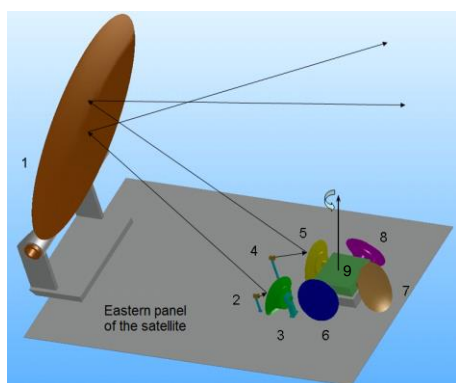


Рис. 6. Структура двухлучевой зеркальной антенны с перенацеливаемым контурным лучом [25]

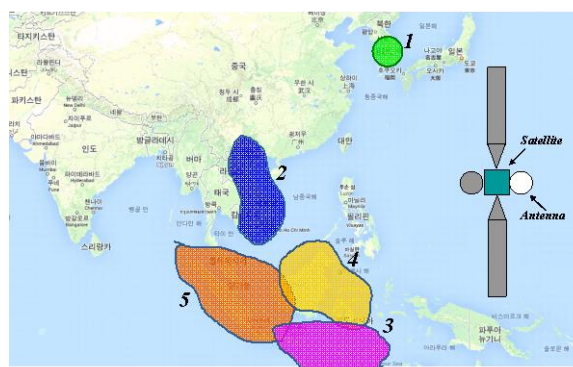


Рис. 7. Антенна на геостационарном спутнике и зоны обслуживания [25]

Выбором положений вспомогательных зеркал (без взаимных затенений) и оптимизацией их поверхностей для работы в двух диапазонах частот (К/Ка) получены высокие значения эффективности покрытия зон обслуживания [25].

Линзовые многолучевые антенны

Одно из основных достоинств линзовых МЛА по сравнению с зеркальными - возможность создания осесимметричных систем без затенения. Недостатками линзовых антенн, ограничивающими их применение в наземных и, тем более, в бортовых системах, являются отражения от граничных поверхностей, диссипативные потери в диэлектрике, большая масса, сложность и дороговизна изготовления линз требуемого качества.

Проблемы создания облучающих систем для линзовых МЛА с плотной расстановкой лучей и применяемые в облучателях технические решения во многом аналогичны тем, что и рассмотренные выше для зеркальных МЛА [1].

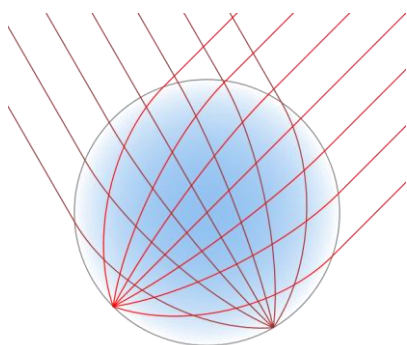
Сектор обзора МЛА с линзами из однородного диэлектрика определяется абберрациями, возникающими при отклонении луча. В [26] показано, что апланатическая линза позволяет отклонять луч в конусе с углом при вершине более 100° ширины луча. Аналогичные результаты получены ранее [27] для металлопластинчатых и волноводных линз с отклонением луча в одной плоскости.

В ряде задач радиосвязи и радиолокации при заданных ширине луча в единицы или доли градуса при секторе обзора более ста градусов возможности углового обзора зеркальных МЛА и антенн с линзами из однородного диэлектрика недостаточны, и требуются антенны с более широкими секторами отклонения луча. В этих задачах могут быть применены МЛА на основе линз с центральной симметрией с сектором обзора до 140°-160°, - независимо от ширины луча, что обусловлено отсутствием абберраций в таких линзах при перемещении облучателя по фокальной сфере. Ограничения сектора обзора связаны лишь с затенением апертуры линзы облучателями.

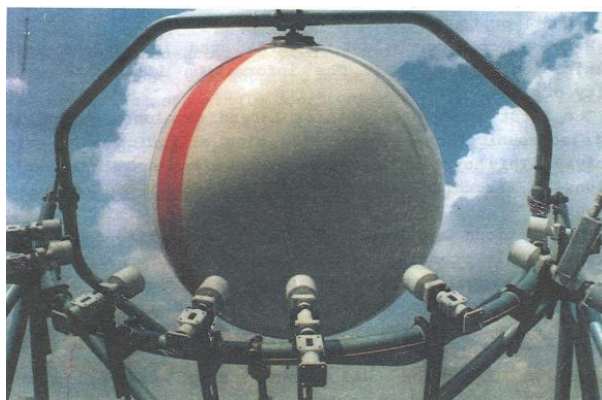
Линзовые МЛА с широким сектором обзора применяются в земных станциях спутниковой связи и вещания, а также в широкополосных

стационарных РЛС.

На рис. 8а показана схема МЛА с линзой Люнебурга, на рис. 8б - восьмилучевая антенна с линзой диаметром 0.9 м для приема телевидения с геостационарных спутников в секторе углов до 150° в Ku-диапазоне [28]. Линза выполнена из блоков пенополистирола и пенокерамики с различной диэлектрической постоянной. КИП антенны для каждого луча – 50-55%.

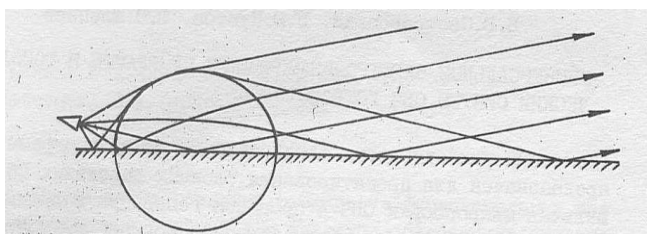


а)

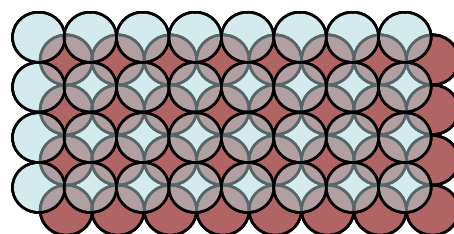


б)

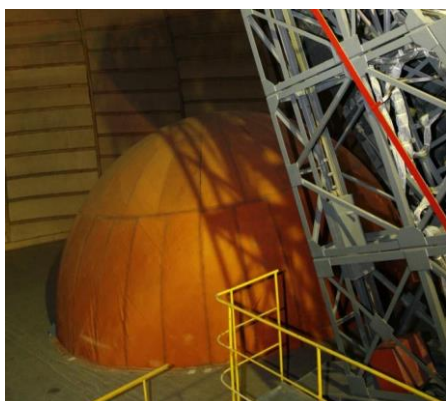
Рис. 8. Многолучевая антенна с диэлектрической линзой центральной симметрии, [28]



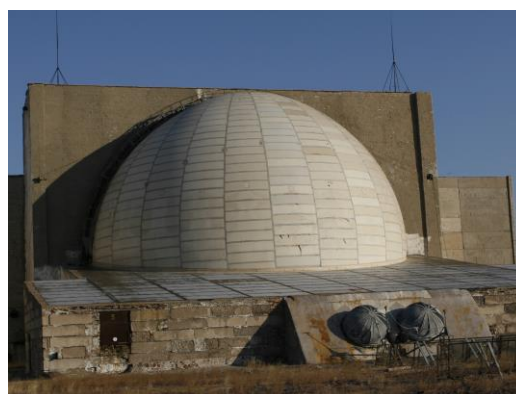
а)



б)



в)



г)

Рис. 9. Приемная многолучевая антенная система РЛС «Неман», [29]

МЛА с линзой Люнебурга в виде полушара на проводящем экране были применены в приемной антенне РЛС С-диапазона «Неман». На рис. 9а показан ход геометрооптических лучей в такой линзе. Для плотной расстановки максимумов ДН (лучей антенны) система состоит из двух линз диаметром около 5 м с решетками облучателей, которые формируют две системы перемежающихся лучей (всего 1024 луча) [29]. Принцип расстановки лучей антенны показан на рис. 9б. Линзы выполнены из блоков пенокерамики и пенополистирола с разной диэлектрической постоянной. Одна из двух полусферических линз на проводящем экране под радиопрозрачным укрытием и ферменная конструкция для установки облучателей показаны на фотографии (рис. 9в). Приемная часть РЛС «Неман» под радиопрозрачным укрытием показана на рис. 9г.

В [13, 30] представлены разработки нескольких вариантов МЛА миллиметрового диапазона с планарными линзами Люнебурга и дуговыми линейными облучающими решетками для формирования системы лучей в одной плоскости.

В следующем разделе рассмотрены МЛА, в которых применяются линзы с принудительным преломлением в сочетании с антенными решетками.

Многолучевые антенные решетки с квазиоптическими диаграммоформирователями

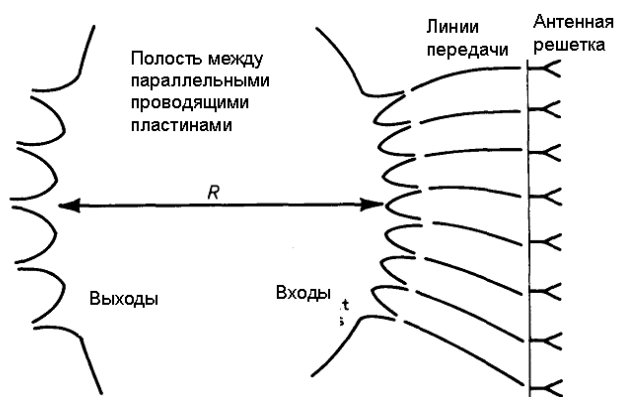
Для создания многолучевых антенных решеток (АР), в цепях питания АР применяют широкополосные квазиоптические диаграммоформирователи. В пассивных антенных решетках это позволяет создавать системы фиксированных лучей, а в фазированных антенных решетках (ФАР) - формировать «дружно сканирующие» системы лучей.

В частности, для создания системы лучей в виде плоского веера применяются планарные квазиоптические диаграммоформирователи, которые размещают на тыльной стороне АР. К выходам диаграммоформирователя подключают входы строк АР. Подключение к разным входам диаграммоформирователя соответствует разным линейным набегам фазы

между строками AP и, соответственно, разным отклонениям луча в плоскости, ортогональной строкам.

Простейшим квазиоптическим диаграммоформирователем является система «пилбокс», представляющая собой многолучевую зеркальную антенну с несколькими облучателями и зеркалом в виде параболического цилиндра, установленными между плоскими проводящими пластинами. Однако вследствие aberrаций, такой диаграммоформирователь позволяет создавать систему из малого числа лучей.

Диаграммоформирователи в виде плоских линз, которые называют «шнурковыми» (рис. 10а), позволяют формировать лучи в более широком секторе углов (сотни ширин луча) за счет большого числа степеней свободы этих линз. В большинстве случаев такие значения углов соответствует максимально возможным углам отклонения луча от нормали к апертуре решетки.



а)



б)

Рис. 10. Приемная МЛА РЛС «Дунай-3», [29]

Шнурковая линза (рис. 10а) образована двумя вспомогательными линейными антенными решетками дуговой формы, обращенными друг к другу и расположенными между плоскими проводящими пластинами, и совокупностью линий передачи, соединяющих элементы первой вспомогательной решетки с излучающими элементами антенны. Выходы элементов второй вспомогательной решетки линзы являются отдельными

каналами антенны, соответствующими различным лучам ДН. Геометрия вспомогательных решеток и длины линий передачи выбираются исходя из минимума aberrаций. Шнурковые линзы широкополосны и просты в изготовлении. Это обуславливает их высокую конкурентоспособность в радиосистемах, где нужны многолучевые антенны.

На рис. 10б показана приемная многолучевая антенна РЛС «Дунай-3» [29]. Эта гигантская волноводно-щелевая антенна дециметрового диапазона состоит из 200 волноводно-щелевых излучателей длиной около 100 м каждый и имеет апертуру размерами около 100 м × 100 м. Выходы волноводов со щелями соединены линиями передачи с диаграммоформирователем в виде плоской шнурковой линзы, которая формирует веер из 135 лучей, расположенных в угломестной плоскости антенны. Обзор пространства лучами антенны в азимутальной плоскости осуществляется за счет частотного сканирования. Плоская линза расположена на тыльной части волноводно-щелевой решетки, поэтому общая толщина антенны существенно меньше размеров её апертуры.

При создании антенной системы «Дунай-3» в начале 60-х годов диаграммоформирователь в виде плоской волноводной линзы был предложен и разработан под руководством А.Г. Шубова в антенном подразделении НИИДАР совместно с предприятиями кооперации. Работа была оформлена закрытым авторским свидетельством. С предложенными Г.А. Евстроповым изменениями такой диаграммоформирователь позднее был применен в приемной антенне РЛС «Дунай-3У» [31].

В 1963 году в США была опубликована статья Ротмана с описанием подобной линзы с дополнительными возможностями, которую теперь принято называть его именем.

На рис. 11 а показана антенна для экспериментального автомобильного радиолокатора диапазона 76-77 ГГц [32]. В радиолокаторе применены отдельные передающая однолучевая печатная антенна и приемная антенная решетка (рис. 11а). Приемная решетка с размерами апертуры 72 мм × 70 мм состоит из шести печатных подрешеток (рис. 11б), которые подключены

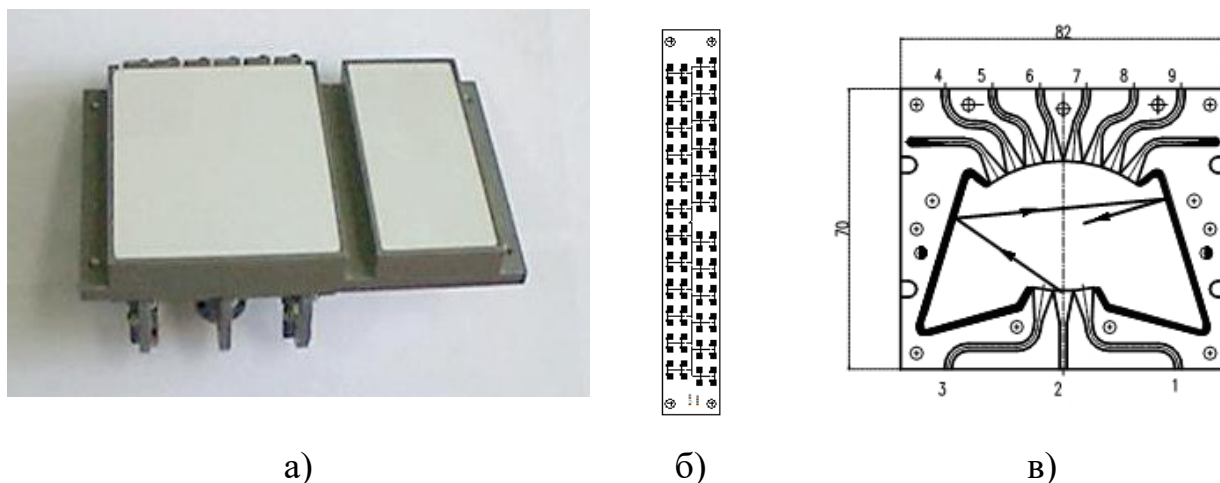
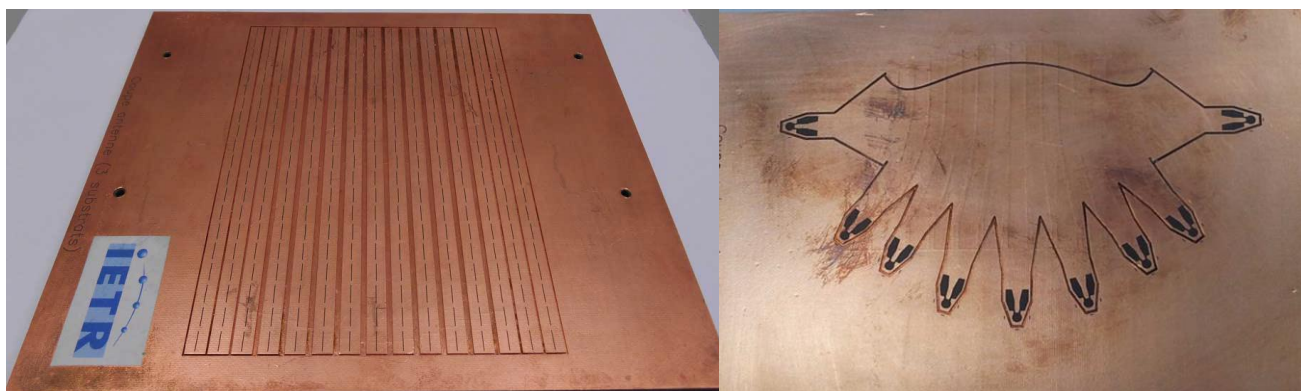


Рис. 11. Приемопередающая антенна автомобильного радиолокатора диапазона 76 ГГц, [32]

к шести входам волноводного диаграммоформирователя в виде планарной волноводной линзы Ротмана (рис. 11в), расположенной на тыльной стороне антенны параллельно её апертуре.

Три луча антенны шириной 3° , пересекающиеся по уровню минус 3 дБ расположены в горизонтальной плоскости для обзора дороги перед транспортным средством.

Антенные решетки с линзами Ротмана имеют планарные компактные конструкции, в том числе, выполненные с использованием печатных и аддитивных технологий, поэтому в последние годы они находят множество применений в мобильных и портативных радиолокаторах и в базовых станциях систем связи новых поколений. Из большого числа публикаций на эту тему отметим работу [33], в которой разработана многолучевая антенна диапазона 24 ГГц, выполненная в виде многослойной печатной структуры SIW (Surface Integrated Waveguide), содержащей щелевую решетку размерами 13 см \times 10 см (рис. 12а) и расположенную в другом слое линзу Ротмана (рис. 12б). Толщина антенны – 1.6 мм. Антенна формирует пять фиксированных лучей в секторе углов $\pm 33^\circ$. КСВ по входам не превышает 2 в полосе частот 4%, развязка между входами – не менее 10 дБ. КУ для центрального луча составляет 22.6 дБи, лучей на краях сектора – 21 дБи. Обратим внимание, что КИП антенны не превышает минус 7.7 дБ (или 17%) из-за потерь в SIW-структуре.

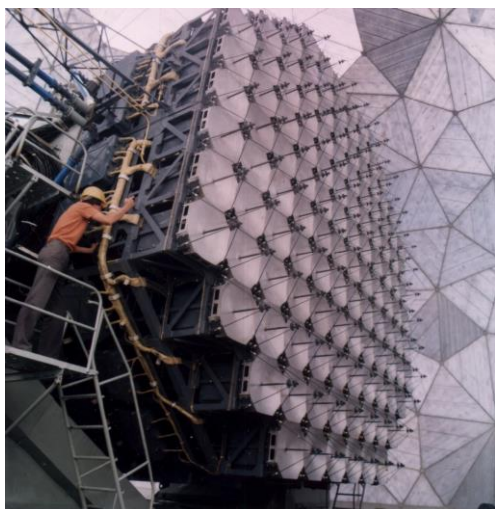


а)

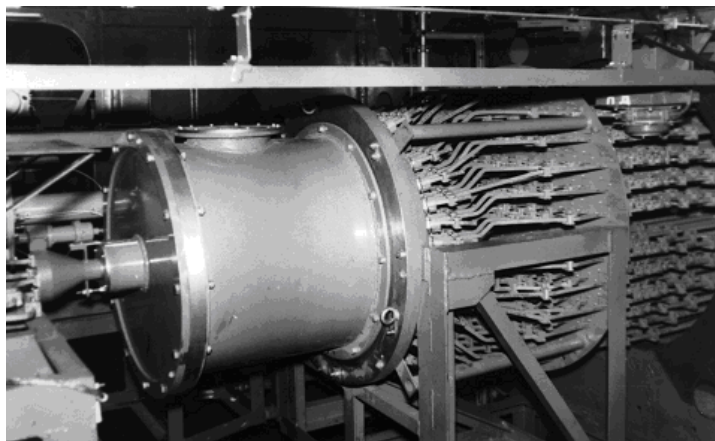
б)

Рис. 12. Многолучевая многослойная печатная антенна в виде щелевой решетки, возбуждаемой линзой Ротмана [33]

В работах [34, 35-37] приведены результаты исследований планарных зеркальных, линзовых и комбинированных многолучевых диаграммоформирователей на основе апланатических и полифокальных квазиоптических систем с секторами обзора в несколько десятков ширин луча.



а)



б)

Рис. 13 Радиолокатор Ка-диапазона «Руза» с АФАР и диаграммоформирователем на основе линзы Ротмана, [24]

Для формирования лучей в двумерном секторе обзора применяют трехмерные линзы Ротмана, в которых вспомогательные антенные решетки расположены на вогнутых сферических поверхностях и обращены навстречу друг другу. Простота такой линзы по сравнению с другими типами

диаграммоформирователей особенно существенна в миллиметровом диапазоне волн. Примером применения такой линзы в качестве диаграммоформирователя является антенна РЛС «Руза», работающая в диапазоне 34 ГГц [29,38]. Входящая в ее состав приемо- передающая ФАР имеет диаметр 7,2 м (рис. 13а).

ФАР состоит из 120 крупноапертурных излучателей, представляющих собой зеркальные антенны размером 60 см. ФАР является активной на прием. Сигналы, принятые излучателями усиливаются в малошумящих усилителях (МШУ), проходят через ферритовые фазовращатели и по волноводным трактам поступают на входы диаграммоформирователя (рис. 13б), на выходах которого образуется связка из четырех лучей шириной 4 угловые минуты каждый. Эта связка лучей сканирует в конусе углов около 1° за счет управления фазовращателями в каналах решетки и перемещается в верхней полусфере за счет опорно-поворотного устройства, на котором установлена ФАР. Среднеквадратичная ошибка измерения угловых координат объектов, обеспечиваемая РЛС «Руза», не превышает 12 угловых секунд.

Антенные решетки с диаграммоформирователями на основе многополюсников

В МЛА на основе антенных решеток применяют также диаграммоформирователи в виде СВЧ-многополюсников. В частности, используют многополюсники, построенные по схемам Батлера и Бласса. Такие многополюсники компактнее, чем квазиоптические диаграммоформирователи. Кроме того, они могут быть выполнены на печатных платах и, за счет этого, иметь малую массу и стоимость.

Диаграммоформирователи, построенные по схеме Батлера, применены, например, в спутниковых активных антенных решетках (ААР) системы глобальной мобильной связи *L*-диапазона Iridium [39]. Приемо-передающая ААР имеет 106 активных каналов и формирует 16 фиксированных лучей покрывающих зону контурной формы. На каждом спутнике установлено по три таких антенны, каждая из которых обслуживает свой сектор углов. Система из 48 фиксированных лучей спутника покрывает на Земле зону диаметром около

4000 км. Общее число спутников – 66. Система Iridium функционирует с 1998 года по настоящее время. В 2017 году начат запуск на орбиты спутников нового поколения Iridium NEXT с модернизированной бортовой аппаратурой.

Другим примером успешного применения многолучевой ААР в спутниковой связи является антенна S-диапазона системы Globalstar [40]. На каждом из 48 спутников этой системы установлены отдельные приемная и передающая ААР, каждая из которых имеет апертуру шестиугольной формы и включает 91 активный канал с излучателями. Диаграммоформирователь состоит из набора делителей и сумматоров на полосковых линиях с tromбонными настроечными фазовращателями. Каждая ААР формирует систему из 16 фиксированных лучей, покрывающих угловой сектор в виде конуса с углом при вершине 110° . Система введена в эксплуатацию в 2000 году.

В настоящее время ААР с фиксированными лучами, в которых применяются диаграммоформирователи Батлера и Бласса, разрабатываются для базовых станций перспективных систем связи 5G [41].

Многолучевые активные антенные решетки с независимо сканирующими лучами

Дальнейшее развитие возможностей МЛА связано с созданием активных фазированных антенных решеток (АФАР). Такие антенны позволяют независимо управлять амплитудами и фазами сигналов в каналах и, за счёт этого, независимо сканировать лучами, а также изменять их форму, т.е. формировать контурные лучи. Принцип работы многолучевых АФАР поясним на примере передающей многолучевой АФАР, упрощенная схема которой показана на рис. 14.

Антенна имеет M входов, каждый из которых соответствует формированию одного из M независимых лучей. На этих входах установлены делители $1:N$, где N – количество излучателей решетки. Выходы делителей подключены ко входам каналов усиления и фазирования, в которых установлены фазовращатели Фв, аттенюаторы Ат и, при необходимости, усилители УМ. Устройства каналов усиления и фазирования управляют

комплексными амплитудами сигналов. Каналы сгруппированы в N модулей, причем число каналов в каждом модуле равно числу лучей M . Каналы усиления и фазирования каждого модуля подключены к сумматору $M:1$, на выходе которого установлен усилитель мощности, подключенный к излучателю решетки.

Таким образом общее количество каналов усиления и фазирования многолучевой АФАР равно $M \times N$. Их количество ограничено допустимыми габаритами, массой и энергопотреблением антенны.

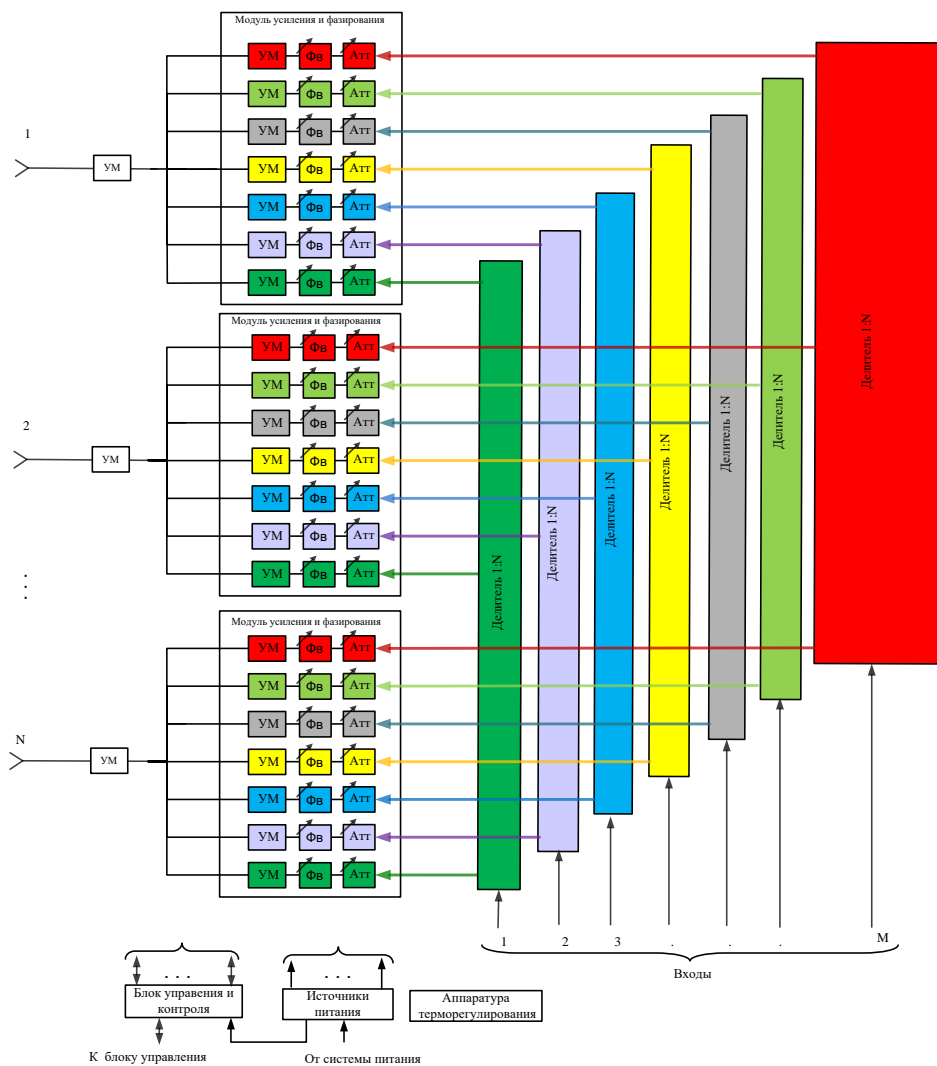
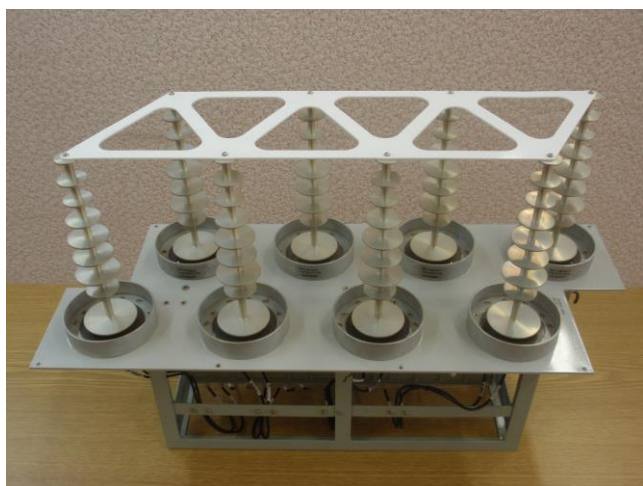


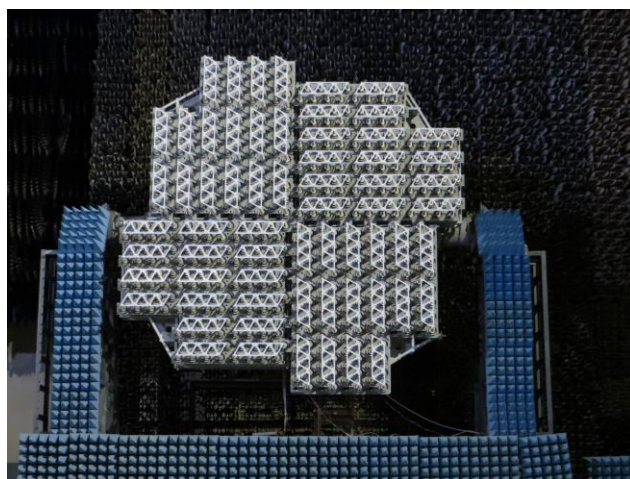
Рис. 14. Схема передающей многолучевой активной фазированной антенной решетки

Схема приемной многолучевой АФАР аналогична и отличается от передающей тем, что на выходах излучателей установлены МШУ (а не усилители мощности).

Как следует из приведенного описания, МЛА на основе АФАР обладают большими функциональными возможностями, но являются весьма сложными, громоздкими, энергозатратными и дорогостоящими устройствами. Указанные факторы обуславливают применение АФАР до настоящего времени преимущественно в радиолокаторах специального назначения или уникальных станциях спутниковой связи (в том числе – бортовых).



а)



б)

Рис. 15. Двухлучевая приемная активная фазированная антенная решетка S-диапазона для приема телеметрии [29]

В конце 70-х, начале 80-х годов в СССР была разработана и запущена в эксплуатацию система спутниковой связи С-диапазона с геостационарным спутником «Поток», на котором были установлены первые отечественные многолучевые АФАР, в том числе, приемные двухлучевая 448 элементная АФАР и шестилучевая 16-элементная АФАР, а также две передающие двухлучевые 16-элементные АФАР, построенные по схеме, показанной на рис. 14 [28,42]. В 1997 году был создан и запущен на орбиту геостационарный спутник связи Ku-диапазона «Купон», с четырехлучевыми АФАР (рис. 16а), построенными по той же схеме.

Излучающая структура каждой АФАР спутника «Купон» выполнена в виде многокольцевой решетки, содержащей 64 конических рупора с диаметром апертуры около 3 длин волн каждый. Модули имеют по одному усилителю и по четыре канала с четырехразрядными полупроводниковыми фазовращателями (рис. 16 б). Четыре луча АФАР шириной около 2° , независимо сканирующие в конусе с углом при вершине 18° , покрывают сектор, соответствующий видимой части Земли. АФАР работают в режиме последовательного обслуживания разных территорий, передавая информацию в пакетном режиме. Также предусмотрено формирование контурных лучей за счет надлежащих фазовых распределений по решетке, определяемых методами фазового синтеза.

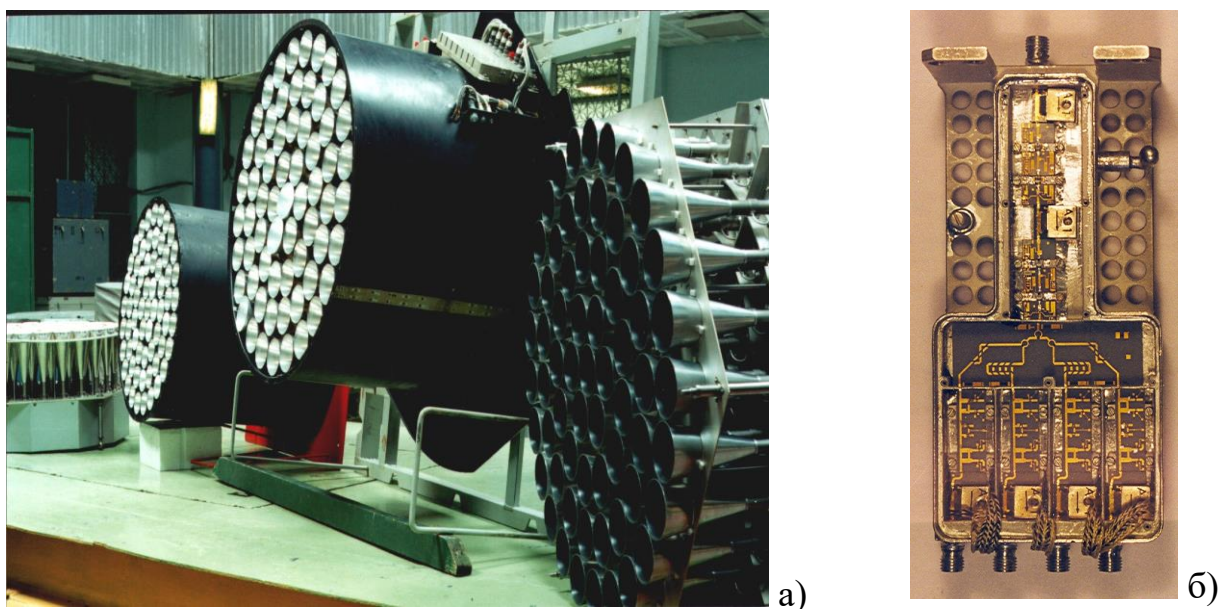


Рис. 16. Приемные и передающие активные фазированные антенные решетки спутника связи «Купон», [42]

Многочувствительные активные антенные решетки с цифровым диаграммоформированием

В современных системах спутниковой связи и радиолокации применяются антенны, ширина луча которых не превышает 1° , а сектор обслуживания измеряется десятками и даже сотнями градусов. Так, в геостационарных высокоинформативных спутниках связи HTS Ka-диапазона [1] ширина луча составляет около 0.2° , и для обслуживания видимой поверхности Земли

антенна должна формировать тысячи лучей ($M > 1000$) с широкой мгновенной полосой частот. При количестве излучателей АФАР $N=1000$, число управляемых каналов усиления и фазирования $M \times N$ (см. рис. 14) должно составлять миллионы! Необходимость создания такого объёма аппаратуры при использовании традиционных технологий СВЧ-микроэлектроники приводит к нереализуемым техническим решениям из-за габаритов, массы и энергопотребления этой аппаратуры.

Даже применение монолитных микроволновых интегральных схем (ММИС), созданных для уменьшения размеров, массы и энергопотребления канальной аппаратуры АФАР, не решает задачи создания МЛА с сотнями и тысячами лучей.

Решением проблемы создания АФАР с большим количеством независимых лучей является переход от радиочастотного к цифровому диаграммоформированию с использованием программируемых интегральных схем (ПЛИС, FPGA) или специализированных интегральных схем (СБИС, ASIC) [43-45]. Современные технологии создания ИС с разрешением 5-10 нм позволяют размещать в кристалле ИС миллиарды приборов и соединительных линий [46], что является основой для создания компактных многоканальных цифровых диаграммоформирователей с сотнями и тысячами лучей.

В качестве примера рассмотрим передающую АФАР с цифровым диаграммо-формированием спутника связи Ка-диапазона SpaceWay 3 [47], запущенного на ГСО в 2007 году (рис. 17а). АФАР работает в диапазоне частот 19.7 – 20.2 ГГц. Решетка содержит 1500 рупорных излучателей, объединённых в линейки (рис. 17б). Диаметр апертуры - 2 метра, что соответствует ширине луча 0.189° . АФАР имеет цифровой диаграммоформирователь, с помощью которого 24 независимых луча оперативно перенацеливаются в 784 позиции, занимая 7 положений в пределах каждого приёмного луча. Приёмная антенна, установленная на спутнике, выполнена в виде двухзеркальной МЛА, она формирует 112 фиксированных лучей шириной 0.5° , покрывающих территорию США и ряда других регионов Америки.



а)



б)

Рис. 17. Спутник SpaceWay 3 с передающей многолучевой активной фазированной антенной решеткой с цифровым диаграммоформированием [47]

По заявлениям представителей фирмы Хьюз, эксплуатация спутника SpaceWay 3 показала, что цифровой диаграммоформирователь АФАР в сочетании с обработкой сигналов на борту весьма энергозатратен и отнимает значительную долю энергетики спутника. По этой причине стоимость передачи единицы информации выше, чем при использовании существующих спутников HTS с зеркальными МЛА.

По-видимому, экономически эффективные спутники связи высокой пропускной способности с АФАР и цифровым диаграммоформированием могут появиться лишь при условии повышения производительности микросхем, снижения их энергопотребления, массы, габаритов и стоимости в исполнении Space.

На рис. 18а показан разработанный в ПАО «Радиофизика» обзорный радиолокатор Р-диапазона с непрерывным излучением «Демонстратор» [29]. В нём применены отдельные приемная и передающая АФАР с цифровым диаграммоформированием. Передающая АФАР содержит 128 излучателей вертикальной поляризации и 32 четырехканальных модуля с цифровыми входами и усилителями мощности. Луч передающей АФАР может быть

расширен для покрытия области контурной формы за счет соответствующего фазирования каналов решетки [48, 49].

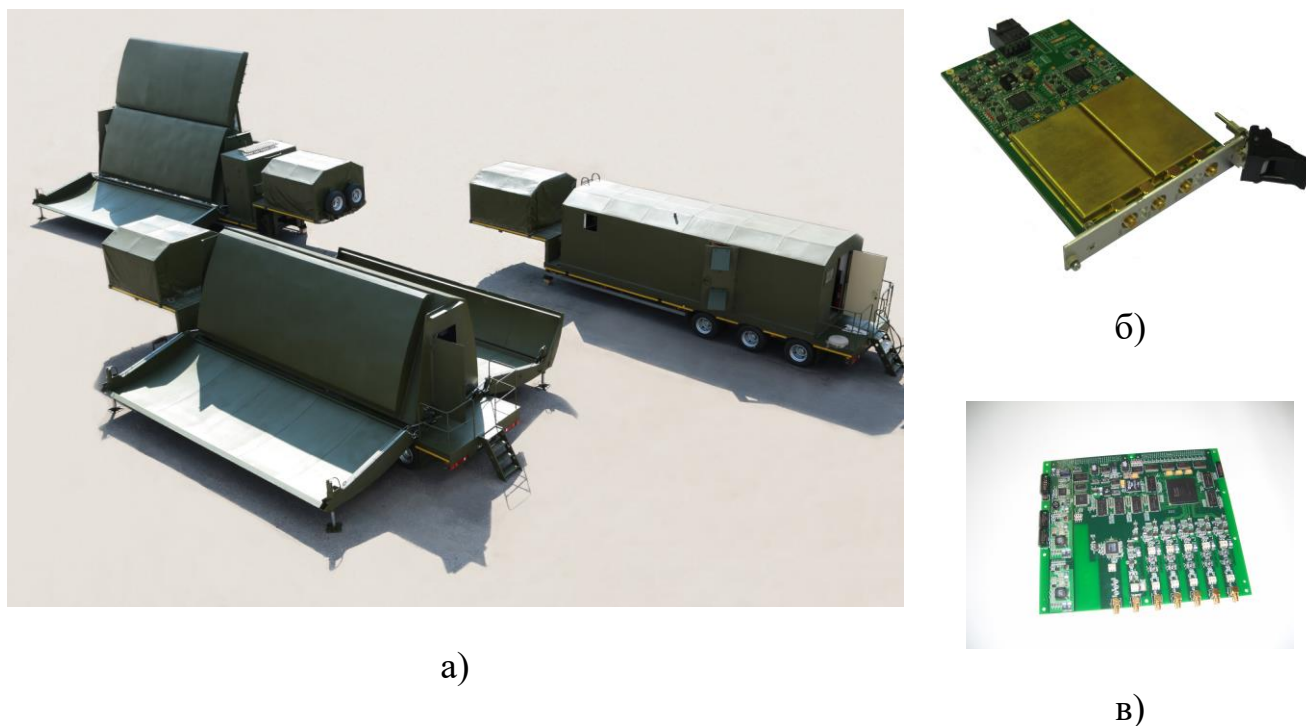


Рис. 18. Радиолокатор Р-диапазона «Демонстратор», [29]

Приемная АФАР содержит 256 излучателей в виде турникетных вибраторов. Выходы вертикальной и горизонтальной поляризаций излучателей подключены к 512 входам четырехканальных приемных модулей с цифровыми выходами (рис. 18б), соединенными с цифровым блоком пространственно-временной обработки, одна из плат которого показана на рис. 18в.

Приемная антенна формирует 64 луча заданной эллиптической поляризации шириной $6^\circ \times 14^\circ$, независимо сканирующих в секторе обзора $\pm 45^\circ$ по азимуту и 10° - 90° по углу места.

Гибридные зеркальные антенны с облучающими активными решетками и цифровым диаграммоформированием

На геостационарных спутниках мобильной связи L - и S - диапазонов, таких как Inmarsat, SkyTerra и других для формирования узких лучей необходимы антенны с апертурами 10-30 метров [50]. Создание спутниковых АФАР таких размеров в настоящее время практически невозможно. Рациональным

решением является создание МЛА в виде гибридных зеркальных антенн (ГЗА), в которых высокая направленность луча обеспечивается раскладным рефлектором больших размеров, а формирование лучей в секторе обслуживания 10° - 20° – относительно небольшой (единицы метров) облучающей АФАР. Теория таких антенн изложена, например, в [51-53]. Варианты построения ГЗА рассмотрены в [54].

На рис. 19 показана ГЗА спутника L-диапазона Inmarsat-4. Рефлектор антенны выполнен в виде раскладного каркаса с закрепленным на нём отражающим сетеполотном (рис. 19а). В сложенном положении он входит в отсек полезной нагрузки ракеты-носителя, а в рабочем – представляет собой офсетный рефлектор с диаметром апертуры 9 м. Облучающая решетка (рис. 19б) содержит 120 спиральных излучателей. Цифровой диаграммоформирователь позволяет создать 228 независимых лучей шириной около 1.5 градусов. Три геостационарных спутника обеспечивают практически полное покрытие поверхности Земли лучами антенн (рис. 19в).

Аналогичные принципы заложены в МЛА на основе ГЗА спутников Thuraya, Alphasat I-XL, SkyTerra, TerreStar и некоторых других [50]. Обратим внимание, что в рассматриваемых системах мобильной спутниковой связи L-/S-диапазонов применение технологии АФАР с цифровым диаграммоформированием в ГЗА оказывается экономически оправданным в отличие от спутников HTS с цифровыми АФАР Ku-/Ka-диапазонов.

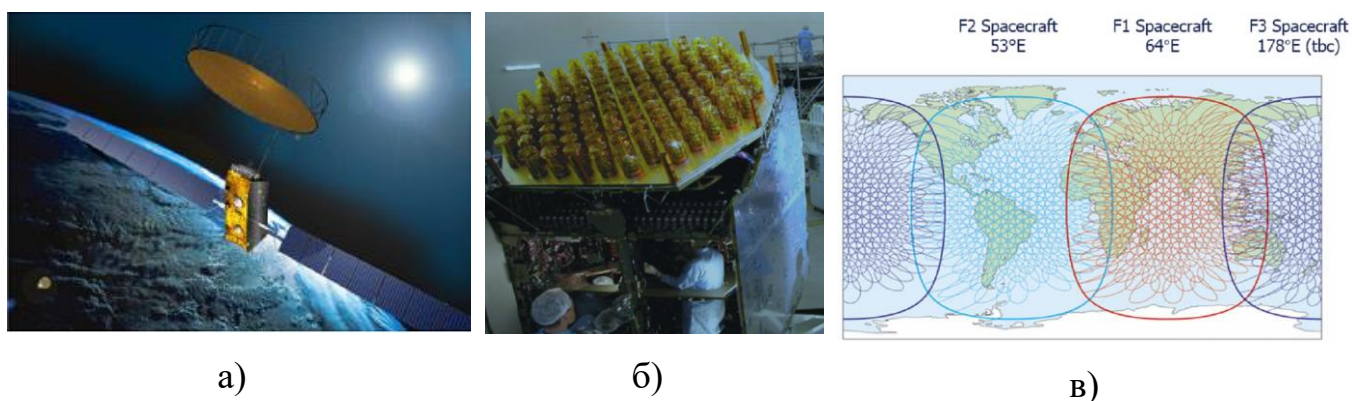


Рис. 19. Многолучевая гибридная зеркальная антенна спутника Inmarsat 4 [50]

«Дешевые» АФАР на кремний-германиевых БИС

Появление технологий создания больших интегральных схем (БИС) с использованием кремний-германиевых сплавов SiGe привело к революционным изменениям в технике АФАР. Эти технологии позволяют создавать АФАР с десятками и даже сотнями активных каналов в виде одной БИС. Их главное достоинство – низкая стоимость при крупносерийном производстве: единицы долларов США на один канал [55]. Недостатками являются малая излучаемая мощность (единицы или десятки милливольт на канал) и высокая шумовая температура (коэффициент шума от 4 дБ до 20 дБ, - в зависимости от диапазона частот).

Лидером в разработке SiGe БИС для АФАР является группа профессора Габриэля Ребейца (G. Rebeiz) из университета Сан-Диего (UCSD), работающая в этом направлении более 15 лет. В настоящее время разработанные в UCSD и других группах технологии освоены компаниями, которые серийно изготавливают аппаратуру с АФАР на SiGe БИС. Эти АФАР применяются для базовых станций и терминалов систем связи 5G, для терминалов связи с беспилотными летательными аппаратами, а также для РЛС, устанавливаемых на транспортных средствах и для РЛС охраны различных объектов и метеорологических наблюдений. Предпринимаются попытки создать такие АФАР и для абонентских терминалов систем спутниковой связи.

Продажи коммерческих систем с АФАР на кремний-германиевых БИС в настоящее время растут быстрее, чем продажи радиосистем с АФАР специального назначения на арсенид-галлиевой и нитрид-галлиевой элементной базе [56]. К 2020 году объемы выпуска коммерческих систем будут больше в стоимостном и, тем более, в количественном выражении. В основном это наземные системы связи ближнего радиуса действия и радиолокации.

По заявлению Г. Ребейца [56] компания «Toyota» установила в последние годы на своих автомобилях десятки миллионов дешевых обзорных РЛС непрерывного излучения (Frequency Modulated Continuous Wave - FMCW) диапазона 77-81 ГГц с шестнадцатиканальной приемной АФАР и двухканальной

передающей АФАР (рис. 20). РЛС разработана в университете Сан-Диего совместно с фирмами Intel и Toyota [57]. Раздельные приемная и передающая излучающие структуры (рис. 20а) представляют собой печатные решетки линейных излучателей на плате из RO3003. Передающая антенна подключена к интегральной схеме передатчика с выходную мощностью $P_{\text{ВЫХ}} = 10-12$ дБм, установленной на той же плате. Антенна формирует луч с ЭИИМ в максимуме 27 дБм.

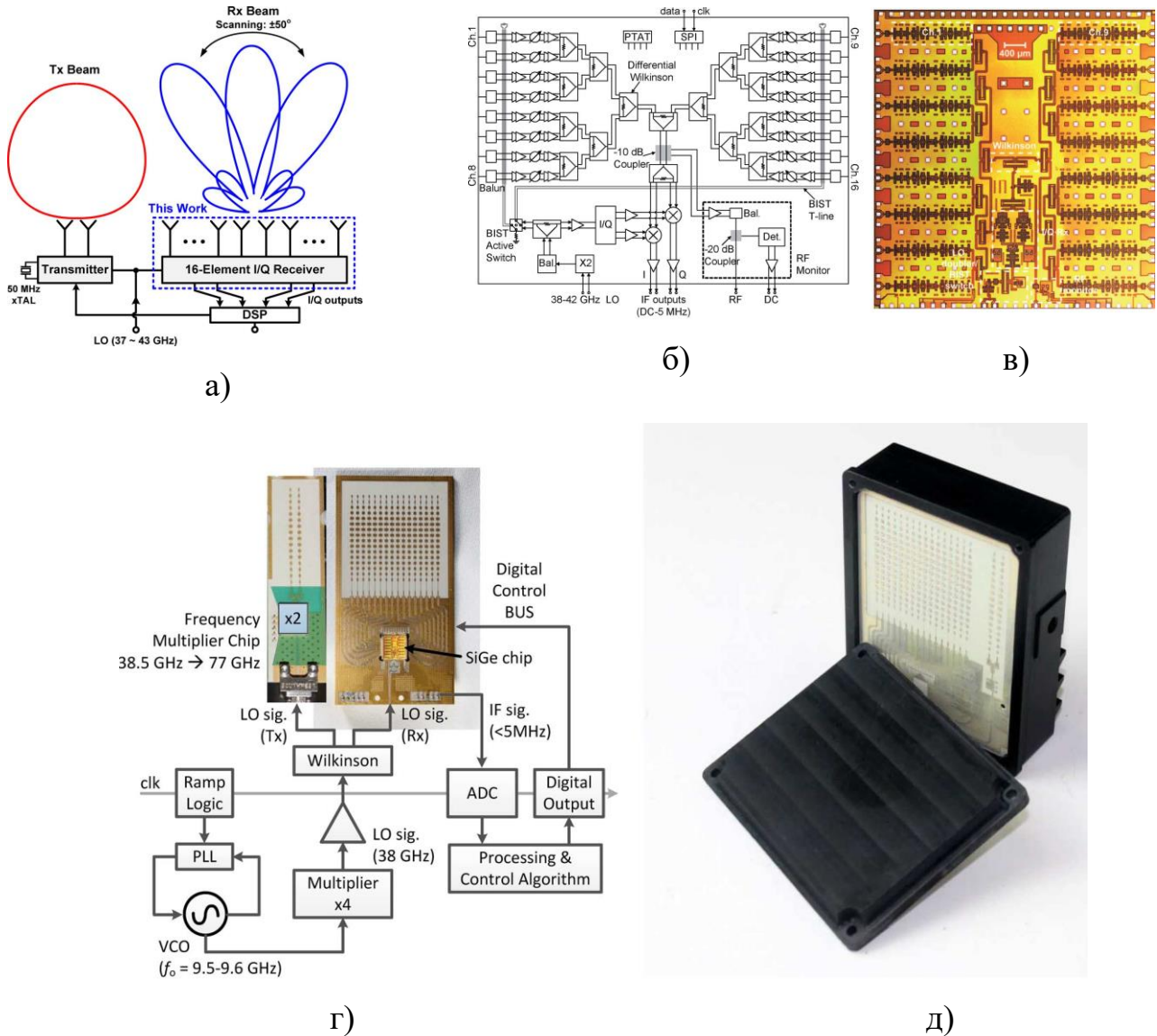


Рис. 20. Автомобильная РЛС диапазона 75-85 ГГц с шестнадцатиканальной приемной АФАР, [57]

Выходы шестнадцатиэлементной приемной решетки с апертурой $38,5 \times 38,5$ мм², выполненной на плате из RO3003, подключены полосковыми

линиями ко входам 16-канальной SiGe БИС, которая содержит усилители, 5-разрядные фазовращатели, сумматоры, цепи встроенного контроля и управления. Схема и фотография кристалла БИС показаны на рис. 20 б, в. АФАР имеет коэффициент шума 18 дБ. На выходе каждой группы из 8 каналов БИС установлены независимые I/Q смесители, квадратурные сигналы с выходов которых подаются на цифровой процессор, который формирует сканирующий луч, занимающий последовательно примерно 100 положений в азимутальной плоскости, и имеющий ширину от 5,5 до 7 градусов.

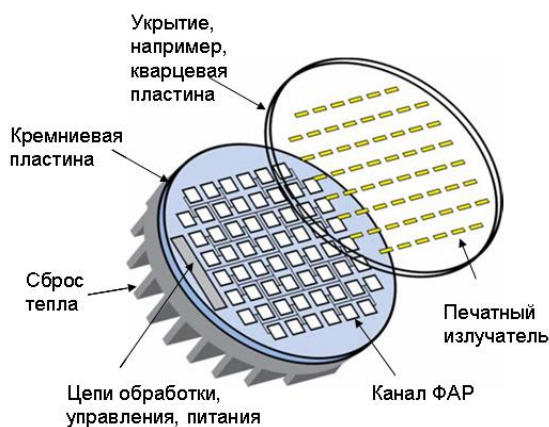
Схема РЛС приведена на рис. 20г, а её фотография в корпусе – на рис. 20д.

РЛС обеспечивает обзор объектов на дороге и в придорожной полосе в секторе $\pm 50^\circ$ на дальностях от единиц до нескольких сотен метров с высоким разрешением.

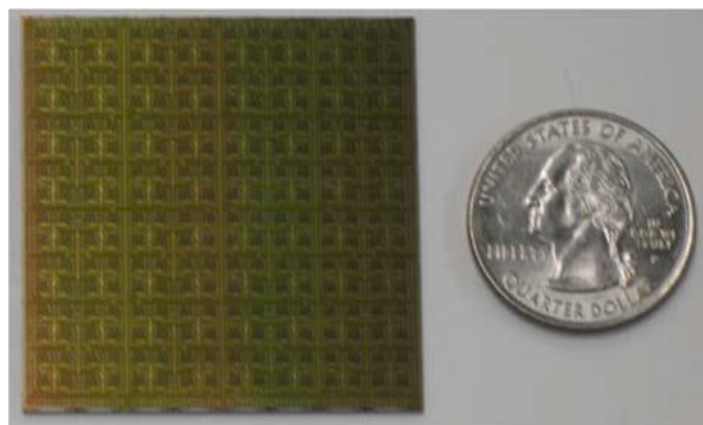
От формирования одновременно многих лучей в рассматриваемой версии АФАР авторы отказались, ограничившись формированием одного сканирующего луча. В другой модификации АФАР реализованы четыре независимо сканирующих луча [58].

В [55, 56] представлена разработка БИС 8-канальной трехлучевой приемной АФАР диапазона 8-20 ГГц с цифровым диаграммоформирователем для терминалов спутниковой связи. Коэффициент шума приемников БИС составляет 3-4 дБ.

Ещё одно существенное достижение последних лет – создание АФАР миллиметрового диапазона, на одной кремниевой пластине [59], т.е. монолитных АФАР. На рис. 21а показана компоновка такой АФАР, а на рис. 21б - образец пластины с передающей АФАР диапазона 60 ГГц размерами $41.4 \times 42 \text{ мм}^2$. На ней выполнена 256-канальная АФАР, включающая усилители, сумматоры, 5-разрядные фазовращатели, 3-разрядные аттенюаторы, цепи контроля, управления и питания. АФАР формирует луч шириной 6° , сканирующий в секторе $\pm 55^\circ$ в двух плоскостях при ЭИИМ 45 дБм в максимуме.



а)



б)

Рис. 21. 256-канальная АФАР диапазона 60 ГГц на кремниевой пластине в виде одной БИС, [59]

В [59] продемонстрирована линия связи диапазона 60 ГГц с применением рассмотренной АФАР и подвижного приемного терминала. Терминал перемещался в диапазоне дальностей 4 – 100 м в секторе углов $\pm 45^\circ$. Скорость передачи данных составляла 1 – 4 ГБ/с.

В компании Anokiwave (Сан-Диего, США) разработана АФАР на БИС AWA-0142 диапазона 24-27 ГГц для систем связи 5G [60]. АФАР содержит 256 каналов, обеспечивает ЭИИМ 60 дБм на передачу и коэффициент шума 5 дБ в режиме приёма. Также разработана четырехканальная АФАР диапазона 37-40 ГГц на кремниевой БИС AWMF-0123/5 [61].

В [62] заявлено о разработке АФАР с БИС Ku-диапазона компании SatixFy UK (рис. 22) для терминалов HTS и LEO-HTS. Декларируется, что БИС на кремниевой подложке обеспечивает цифровое формирование 32 лучей на прием и на передачу на любой заданной поляризации. Сведения о ЭИИМ и шумовой добротности антенны не приводятся. Заявлено, что эта АФАР может быть наращиваемой до 1 миллиона каналов (апертура 10 м \times 10 м в Ku-диапазоне), в том числе на искривленных поверхностях (конформная решетка).

В [63] размещена реклама компании Isotropic. Заявлено о создании дешевых широкополосных антенных терминалов для мобильных пользователей спутниковой связи (рис. 23). Согласно приведенным комментариям, антенна

состоит из модулей с оптическим диаграммоформированием, причем плотность элементов в модулях зависит от требуемого сектора обзора. Антенна может наращиваться для увеличения апертуры. Кроме того она формирует много лучей для связи с несколькими спутниками. Технических описаний антенны нет.



Рис. 22. Многолучевая АФАР «SatixFy» для связи LEO-HTS, [62]

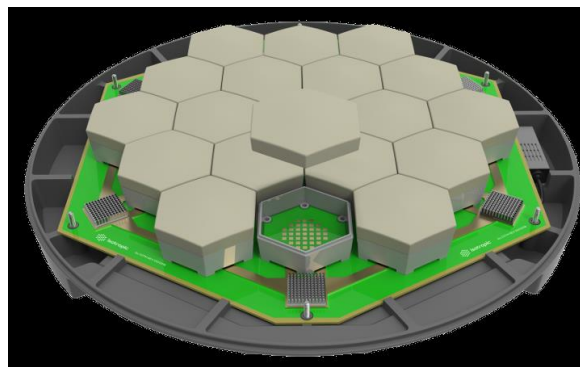


Рис. 23 Терминал спутниковой связи с МЛА, [63]

В настоящее время ведутся работы по созданию АФАР на БИС в короткой части миллиметрового и в терагерцовом диапазонах [55,56].

Разработка микросборок с комбинированием кристаллов SiGe, GaAs, GaN дает возможность существенно увеличить выходную мощность и уменьшить шумовую температуру АФАР при стоимости канала, составляющей несколько десятков долларов США [55, 56]. Применение таких АФАР в качестве облучающих решеток ГЗА – способ создания высоконаправленных многолучевых и сканирующих антенн для систем спутниковой связи, в том числе, для будущих систем LEO-HTS.

Обратим внимание, что упомянутые публикации по дешевым многолучевым антеннам для терминалов спутниковой связи носят скорее рекламный характер и свидетельствуют в большей степени не о наличии готовой серийно выпускаемой продукции, а о ведущихся разработках и о намерениях компаний занять соответствующую нишу на рынке.

Заключение

- Многолучевые антенны широко применяются в радиосистемах и в

значительной степени определяют возможности экономически эффективного обслуживания большого количества абонентов в системах широкополосной связи, а также обнаружения и сопровождения большого числа объектов с помощью РЛС.

- Многолучевые антенны в виде набора многих однолучевых антенн применяются в базовых станциях сотовой связи, а также в станциях спутниковой связи Ku/Ka- диапазонов и миллиметрового диапазона волн. Формирование лучей независимыми апертурами позволяет эффективно их оптимизировать. Применение таких антенн ограничено лишь их габаритами и возможностями размещения на заданных объектах.
- Для плотного покрытия зоны обслуживания системой фиксированных лучей применяются зеркальные (линзовые) многолучевые антенны двух типов:
 - с системами вложенных лучей от нескольких апертур,
 - с облучающими решетками, формирующими перекрывающиеся кластеры.
- Антенные решетки с диаграммоформирователями в виде квазиоптических линз Ротмана формируют многолучевые связки фиксированных или сканирующих лучей, и характеризуются простотой, компактностью и малыми потерями.
- В активных антенных решетках с фиксированными лучами применяются диаграммоформирователи в виде компактных печатных СВЧ многополюсников, поскольку относительно большие потери в полосковых многополюсниках слабо влияют на энергетические характеристики активных антенных решеток.
- В радиосистемах с активными фазированными антенными решетками и диаграммоформированием на несущей радиочастоте можно формировать небольшое количество (как правило, не более десяти) лучей с независимым оперативным изменением направления и формы.
- Активные фазированные антенные решетки с цифровым диаграммоформированием на основе специализированных цифровых интегральных схем позволяют формировать десятки и сотни, а в перспективе

– тысячи, независимо нацеливаемых лучей изменяемой формы. Недостатком является большое энергопотребление цифровой аппаратуры.

- Многолучевые гибридные зеркальные антенны с облучателями в виде активных решеток эффективны в спутниковых радиосистемах с независимыми высоконаправленными лучами, формируемыми в ограниченном секторе обзора.
- Активные фазированные антенные решетки на основе больших интегральных схем на пластинах из кремний-германиевых сплавов имеют низкую стоимость (единицы долларов США на канал), низкую излучаемую мощность и высокую шумовую температуру, и могут применяться в радиосистемах ближнего радиуса действия.
- Разрабатываются АФАР на основе микросборок с комбинированием устройств на кристаллах кремний-германия, арсенида галлия и нитрида галлия при стоимости в несколько десятков долларов США на канал для применения в радиолокаторах среднего радиуса действия и системах спутниковой связи.
- Анализ современных технологических решений, предлагаемых для будущих ФАР/АФАР, тем более многолучевых, пока не позволяет сделать заключение о возможности достижения ценовых параметров, приемлемых в перспективе для их массового применения в абонентских терминалах спутниковой связи.

Авторы благодарят Калошина В.А., Козлова В.Н., Россельс Н.А., Шестакова А.В. за полезные обсуждения и представленные материалы.

Литература

1. Анпилогов В.Р., Шишлов А.В., Эйбус А.Г. Многолучевые антенные системы HTS // Технологии и средства связи. 2013, № 6-2 (99), с. 54 – 67.
2. Fujimoto K. Mobile antenna systems handbook Third edition. 2008 Artech House, Inc., 2008, 769 p.

3. Design of Multibeam Antennas for the Commercial Stratospheric Communication System // Final Report of research project for ETRI, Project Manager Shishlov A., 2000, Moscow, JSC “Apex”, 147 p.
4. Sayeed A. AT&T debuts 5G channel sounder ‘Porcupine’ with NI | FierceWireless // University of Wisconsin–Madison, Wireless Communication and Sensing Lab, URL: <https://dune.ece.wisc.edu/?p=1013>
5. Huang K.Ch., Edwards D.J. Millimeter Wave Antennas for Gigabit Wireless Communications. A John Wiley and Sons Ltd., 2008, 274 p.
6. Анпилогов В.Р., Гриценко А. Анализ многолучевой рабочей зоны спутников OneWeb // Технологии и средства связи. Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание-2017», с. 78-86.
7. Бирюков В.Л., Ефимова Н.А., Калиничев В.И., Калошин В.А., Пангонис Л.И.. Исследование сверхширокополосной кольцевой антенной решетки, Журнал радиоэлектроники, 2013, №1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/20/text.pdf>
8. Сомов А.М., Кабетов Р.В. Проектирование антенно-фидерных устройств // М. Горячая линия – Телеком, 2015, 500 с.
9. Калошин В.А. Зеркальная антенна // Патент РФ, №2173496, 10.09.2001 г.
10. Кривошеев Ю.В., Шишлов А.В., Ганин С.А., Ём И.В., Ом М.С., Юн С.Х. Кластерный облучатель многолучевых зеркальных антенн на основе ребристо-стержневых излучателей // Радиотехника, 2016, № 4, с. 56-62.
11. Schneider M., Hartwanger C., Wolf H. Antennas for multiple spot beam satellites // CEAS Space J. – 2011, URL: <https://link.springer.com/>
12. Céline Leclerc, Maxime Romier, Hervé Aubert, and Ayoub Annabi. Ka-Band Multiple Feed per Beam Focal Array Using Interleaved Couplers. - IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 62, No. 6, June 2014, pp. 1322-1329.
13. Калошин В.А., Многолучевые гибридные антенны, Труды 13 Международной Крымской конференции «КрыМиКо-2003: СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», с.383-390, Севастополь, сентябрь 2003 г., стр. 387-390.

14. Гуркин Е.Н., Коган Б.Л. Двухзеркальная система для антенны с широким сектором формирования лучей в одной плоскости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, Специальный выпуск «Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов», с.23-28.
15. Пластиков А.Н. Проектирование многолучевых офсетных двухзеркальных антенн с однокоординатным и двухкоординатным сканированием // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. МЭИ. 2013. 186 с.
16. Кинбер Б.Е., Классен В.И., Стеблин В.И. Теория трехмерных бифокальных антенн // Радиотехника и электроника, 1983, №8, с. 1509-1517.
17. Dragone C. Unique reflector arrangement with very wide field of view for multibeam antennas // Electronic Letters, 1983, vol. 19, No 25/26, pp. 1061-1062.
18. Калошин В.А., Фролова Е.В. Характеристики двухзеркальных осесимметричных апланатических антенн. – Антенны, № 7 (110), 2006 г., с. 45 – 51.
19. Калошин В.А., Фролова Е.В. Характеристики офсетных двухзеркальных апланатических антенн. – Антенны, № 10 (137), 2008 г., с. 9 – 13.
20. Венецкий А.С., Калошин В.А., Об абберациях эйконала в осесимметричных двухзеркальных телескопических системах // Радиотехника и Электроника, 2016, т.61, №4, с.327-336.
21. Шишлов А.В., Шубов А.Г. Эффективность антенных устройств с контурными диаграммами направленности // Электромагнитные волны и электронные системы. 1997, т.2, № 1, с. 54-57.
22. Реутов А.С., Шишлов А.В. Особенности поэтапного синтеза рефлекторов зеркальных антенн с контурными диаграммами направленности с использованием сплайнового представления поверхности зеркала // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003, т.8, № 2, с. 4-14.
23. Шишлов А.В. Зеркальные антенны с контурными диаграммами направленности – эффективность и предельные возможности // Радиотехника, 2006, №4, с.45-50.

24. Шишлов А.В. Теория и проектирование зеркальных антенн для радиосистем с контурными зонами обслуживания // Радиотехника, 2007, № 4, с. 39 – 49.
25. Виленко И.Л., Кривошеев Ю.В., Шишлов А.В., Ём И.В., Ом М.С., Юн С.Х.. Двухлучевая многозеркальная бортовая антенна спутниковой связи диапазона 20/30 ГГц с перенацеливаемым лучом изменяемой формы // Антенны, 2016, №10 (230), с. 51-60.
26. Венецкий А.С, Калошин В.А, Распределение эйконала на поверхности осесимметричной диэлектрической линзы и минимизация aberrаций // Радиотехника и Электроника, 2018, т.63, №2, с. 144-156.
27. Ruze J. Wide-Angle Metal-Plate Optics // Proceedings of the IRE, 1950, vol. 38, No. 1, pp. 53 – 59.
28. 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, 1994, Seoul, Korea, pp. 211 - 221.
29. Технологии радиолокации – к 55-летию ПАО «Радиофизика» // 2-е издание под. Редакцией Б.А. Левитана. М. Вече. 2015. – 672 с.
30. Ахияров В.В., Калошин В.А., Никитин Е.А., Исследование широкополосных планарных линз Люнебурга // Журнал радиоэлектроники, 2014, №1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/18/text.pdf>
31. Евстропов Г.А., Антенны с электрическим качанием луча // Антенны, 2009, № 7 (146), с. 30-34.
32. 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, вып. 6 (52), с. 23-28.
33. Tekkouk K., Ettorre M., Coq L.L., Sauleau R. Multibeam SIW Slotted Waveguide Antenna System Fed by a Compact Dual-Layer Rotman Lens // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, v. 64, No 2, pp. 504 – 514.

34. Калошин В.А., Фролова Е.В., Синтез и анализ зеркально-линзовых диаграммо-образующих систем для планарных многолучевых антенн, Журнал радиоэлектроники, 2015, №12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec15/19/text.html>
35. Венецкий А.С., Калошин В.А., Нгуен К.Т., Фролова Е.В. Синтез и исследование сверхширокополосной планарной трехзеркальной системы // Журнал радиоэлектроники, 2018, №1, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/4/text.pdf>, DOI 10.30898/1684-1719-2018-1-5
36. Калошин В.А., Нгием Х.Д., Фролова Е.В. Синтез и исследование сверхширокополосной планарной волноводной трехфокальной линзо-зеркальной системы с принудительным преломлением// Журнал радиоэлектроники, 2018, №1, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/3/text.pdf>, DOI 10.30898/1684-1719-2018-1-4
37. Калошин В.А., Ле Д. Т., Фролова Е.В., Планарная бифокальная волноводно-щелевая решетка // Доклады межд. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы для инфо-коммуникационных технологий». Сер. Научные конференции, посвященные Дню радио. Вып.73. М. РСНТОРЭС им. Попова. 2018.
38. Толкачев А.А., Егоров Е.Н., Шишлов А.В. Некоторые тенденции развития радиолокационных и связных систем // «Радиотехника», 2006, №4, с. 5 – 11.
39. 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. pp. 504-511.
40. Metzen P.L. Globalstar Satellite Phased Array Antennas // 2000 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. pp. 207-210.
41. Hong W., Jiang Z.H., Yu S., Zhou J., Chen P., Yu Z., Yang B., Pang X., Jiang M., Cheng Y., Al-Numaimi M.K.T., Zhang Y., Chen J., He S. Multibeam Antenna Technologies for 5G Wireless Communications // IEEE Transactions on Antennas and Propagations, 2017, vol. 65, No. 12, pp. 6231- 62-49.

42. Егоров Е.Н., Сбитнев Г.В., Чистюхин В. В. Очерки развития техники твердотельных активных фазированных решеток в зеленоградской школе СВЧ микроэлектроники // Радиотехника №4. 2010. с. 6-13.
43. Herd J.S., Conway M.D. The Evolution to Modern Phased Array Architectures // Proceedings of the IEEE, 2016, Vol. 104, No. 3, pp. 519-529.
44. Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы // Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А. под ред. Д.И. Воскресенского. М. Радиотехника, 2013.
45. Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи // Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С.; под. Ред. Л.И. Пономарева. – Москва,: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 197 с.
46. Brookner Eli. Advances and Breakthroughs in Radars and Phased Arrays // 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. pp. 1-8.
47. Fang R. J. F. Broadband IP Transmission over SPACEWAY® Satellite with On-Board Processing and Switching. // Proceedings of IEEE Globecom Conference, 2011, 5 p.
48. Шишлов А.В., Кривошеев Ю.В., Мельничук В.И. Свойства контурных диаграмм направленности фазированных антенных решеток // «Антенны», 2016, вып № 8 (228), с.44 - 58.
49. Shishlov A.V., Krivosheev Yu.V., Melnichuk V.I. Principal Features of Contour Beam Phased Array Antennas // URL: [2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology \(PAST\)](#), pp. 1-8.
50. Space Antenna Handbook // Editors: Imbriale V.A., Gao S., Voccia L., A John Willey & Sons, 2012.
51. Виленко И.Л., Кривошеев Ю.В., Шишлов А.В. Гибридные зеркальные антенны с облучающими активными фазированными решетками // «Антенны», вып 10 (173), 2011, с. 22 - 42.

52. Shishlov A.V., Vilenko I.L., Krivosheev Yu.V., Active Array Fed Reflector Antennas. Practical Relations and Efficiency // 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 2362 – 2366.
53. Shishlov A.V., Vilenko I.L., Krivosheev Yu.V., Asymptotic Theory, Design and Efficiency of Array Fed Reflector Antennas // 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, pp. 320 – 327.
54. Cooly M. Phased Array Fed Reflector (PAFR) Antenna Architectures for Space Based Sensors // 2015 IEEE Aerospace Conference, pp. 1-11.
55. Rebeiz G.M. Advances in SiGe BiCMOS Technology with Chip-Scale Phased Array Applications // 2013 Phased Array Symposium, Tutorial, Boston, pp. 1-90.
56. Rebeiz G.M. SiGe and CMOS for Advanced Phased Array Communication and Radar Systems // 2016 Phased Array Symposium, Tutorial, Boston, pp. 1-107.
57. Ku B.H., Schmalenberg P., Inac O., Gurbus O.D., Lee J.S., Shiozaki K., Rebeiz G.M. A 77-81-GHz 16-element Phased-Array Receiver With $\pm 50^\circ$ Beam Scanning for Advanced Automotive Radars // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, 2014, vol. 62, No. 11, pp. 2823-2832.
58. Ku B.H., Inac O., Chang M., Rebeiz G.M. 75-85 GHz Flip-Chip Phased Array RFIC with Simultaneous 8-Transmit and 8-Receive Paths for Automotive Radar Applications // 2013 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. pp. 371-374.
59. Zahir S., Gurbus O.D., Kar-Roy A., Raman S., Rebeiz G.M. 60-GHz 64- and 256-Elements Wafer-Scale Phased-Array Transmitters Using Full-Reticle and Subreticle Stitching Techniques // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, Vol. 64, No 12, pp. 4701 – 4719.
60. Anokiwave Introduces 26 GHz 5G mm Wave Reconfigurable 256-Element Active Antenna Array // Microwave Journal, February 1, 2018, URL: <http://www.microwavejournal.com/articles/29738>
61. Anokiwave Introduces First 39 GHz Silicon 5G Active Antenna ICs // Microwave Journal, May 16, 2017, URL: <http://www.microwavejournal.com/articles/28378>

62. SatixFy UK Introduces Silicon Based ESMA Antenna // Microwave Journal, March 15, 2018, URL: <http://www.microwavejournal.com/articles/29983>
63. Solution: A new class of satellite terminal // Isotropic Systems, April 14, 2017, URL: <https://www.isotropicsystems.com/solution/>

Для цитирования:

А. В. Шишлов, Б. А. Левитан, С.А. Топчиев, В. Р. Анпилогов, В. В. Денисенко. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/6/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.7.6