

АНТЕННЫЕ РЕШЁТКИ СПУТНИКОВЫХ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Е. В. Овчинникова, Э. В. Гаджиев, С. Г. Кондратьева,
А. Л. Поландов, П. А. Шмачилин,
М. А. Соков, О. А. Волков

Многообразие технических решений, применяемых для практической реализации антенных систем спутниковой связи, устанавливаемых на мобильных объектах, требует систематизации их по способу построения антенного полотна, управления поляризацией, структуре распределительной системы и т. д. Приводится обзор антенных систем спутниковой связи и телевидения, работающих в Ku- и Ka-диапазонах. Отмечены их конструктивные особенности, основные достоинства и недостатки. Рассмотрены элементы антенных решеток и способы реализации распределительных схем на современной элементной базе. Определены пути построения таких антенных систем. Рассмотрены совмещенные и многодиапазонные антенны. Важную роль при разработке антенных систем играет моделирование. В данной работе также приводятся модели, полученные в программах электродинамического моделирования антенн и устройств сверхвысокой частоты.

Ключевые слова: антенные решетки спутниковой связи, рупорные антенные решетки, микрополосковые антенные решетки, активные антенные решетки, цифровые антенные решетки.

Введение

В последние годы возрастает интерес к антенным системам спутниковой связи и телевидения, устанавливаемым на мобильных объектах, к которым относятся наземный, водный и воздушный транспорт. Значительная часть таких систем работает в Ku-диапазоне [1]. Чтобы улучшить пропускную способность в системах спутниковой связи Ku-диапазона используются две линейные ортогональные поляризации. Передача осуществляется в диапазоне 14,0 ~ 14,5 ГГц, а прием – 12,25 ~ 12,75 ГГц. Для построения систем широкополосного доступа (ШПД), а также расширения функциональных возможностей специальных систем спутниковой связи идет освоение Ka-диапазона [2, 3]. Высокой надежностью обладают зеркальные антенны, а в Ka-диапазоне они имеют небольшие размеры, поэтому в ряде практических применений рассматриваются такие антенны. При этом сканирование осуществляется с помощью поворотных устройств [4, 5], которые имеют значительные габариты. При проектировании антенн мобильных систем наиболее остро стоит вопрос минимизации массы и габаритных размеров, поэтому в литературе значительное внимание уделено антенным решеткам с электрическим сканированием, а также микрополосковым антеннам.

Цель работы – подбор и аналитический обзор материалов, посвященных разработке антенных систем спутниковой связи.

Микрополосковые антенные решетки Ku-диапазона

Одним из важнейших конструктивных требований, предъявляемых к антеннам мобильных систем, является их компактность, низкая стоимость, а также малые массогабаритные характеристики. Микропо-

лосковые антенные решетки удовлетворяют предъявляемым требованиям. Широкое развитие микрополосковых антенн также обусловлено их технологичностью. У микрополосковых антенн можно выделить следующие преимущества: простоту конструкции, малый объем, массу и стоимость; высокую точность изготовления; возможность создания невыступающих и маловыступающих конструкций антенн для летательных аппаратов; простоту реализации двухдиапазонных и совмещенных антенн.

В работе [6] представлена малогабаритная фазированная антенная решетка (ФАР) размерами 7×7 элементов (рис. 1). Каждый элемент представляет собой двухслойный печатный излучатель, питаемый двумя проводниками.

Антенная решетка работает в Ku-диапазоне на частотах 14,0 ~ 14,5 ГГц на передачу и 12,25 ~ 12,75 ГГц на прием. Размеры опытного образца составляют: $120 \times 120 \times 55$ мм (длина/ширина/высота). Коэффициент усиления данной антенны не менее 16 дБ, а апертурный коэффициент полезного действия более 50%. Достоинствами рассматриваемой антенной решетки являются небольшие габариты и полный отказ от механики в процессе управления лучом, что обеспечивает достаточно высокую скорость сканирования пространства.

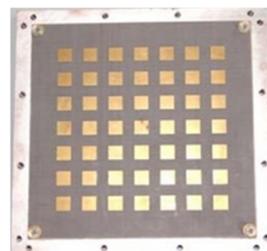


Рис. 1. Фотография микрополосковой фазированной антенной решетки

В статье [7] рассматривается многолучевая антенная решетка с линейной поляризацией, работающая в Ku-диапазоне. Размер решетки 10 на 8 элементов. Антенная решетка работает в диапазонах 12,25 – 12,75 ГГц и 14,0 – 14,5 ГГц на прием и передачу соответственно. Каналы приема и передачи развязаны по поляризации. В качестве диаграммообразующей схемы использована микрополосковая линза Ротмана. Антенная решетка формирует 7 лучей, которые перекрывают сектор от -30° до 30° . Для расчета и оптимизации характеристик антенной решетки была использована программа CST Microwave Studio. Модель антенной решетки приведена на рис. 2. Диаграммообразующая схема показана на рис. 3.

Достоинствами этой антенной решетки являются небольшие продольные размеры, относительно классических рефлекторных антенн с механическим приводом, который обеспечивает широкоугольное сканирование для покрытия 360° в азимутальной плоскости. Излучатель антенной решетки приведен на рис. 4.

Основным требованием к решеткам спутниковой связи является высокий коэффициент усиления (примерно 30 дБ) в рабочей полосе частот. Усиление антенной решетки определяется эквивалентной апертурой при отклонении луча в направлении спутника.

В системах спутниковой связи также находят применение антенные решетки с использованием метаматериалов. Применение данной технологии помогает обойти существенный недостаток – узкополосность. На рис. 5 приведена фотография антенной решетки, работающей в диапазоне от 10 МГц до 43,5 ГГц.

Предложенная антенна выполнена из двух стеклотекстолитовых (FR4) подложек, на которые нанесены два слоя: разводка и метаматериал. Их толщина составляет 1,6 мм, а диэлектрическая проницаемость 4,3. Подложки разделены воздушным зазором в 11,3 мм. Однослойная поверхность метаматериала нанесена на верхний лист стеклотекстолита. Её размеры $80 \times 80 \text{ мм}^2$. На нижнем листе размещена медная пленка толщиной 0,035 мм и проводимостью $6,96 \times 10^7 \text{ См/м}$. В экране прорезаны две щели, имеющие размеры $9,4 \times 1,5 \text{ мм}^2$ и $17,5 \times 1 \text{ мм}^2$ соответственно. Они соединены с питающим портом с помощью микрополосковой линии (рис. 6, 7).

Максимальный измеренный коэффициент усиления равен 14,2 дБ на частоте 14,2 ГГц. Обратные потери на этой частоте равняются -10 дБ .

В работе [8] представлена низкопрофильная передающая антенная решетка спутниковой связи с линейной поляризацией. Структура антенного по-

лотна показана на рис. 8. Фотография антенны приведена на рис. 9. Диапазон частот 14 – 14,5 ГГц.

Антенная решетка возбуждается линией с бегущей волной. Луч формируется в плоскости размещения элементов.

В работе [9] представлена кольцевая антенная решетка K-диапазона из щелевых излучателей с линейно расширяющейся щелью для систем мобильной связи рис. 10.

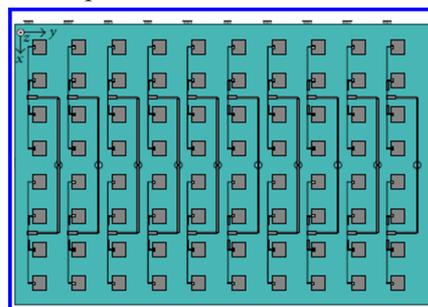


Рис. 2. Модель микрополосковой антенной решетки спутниковой связи с широкоугольным механическим сканированием

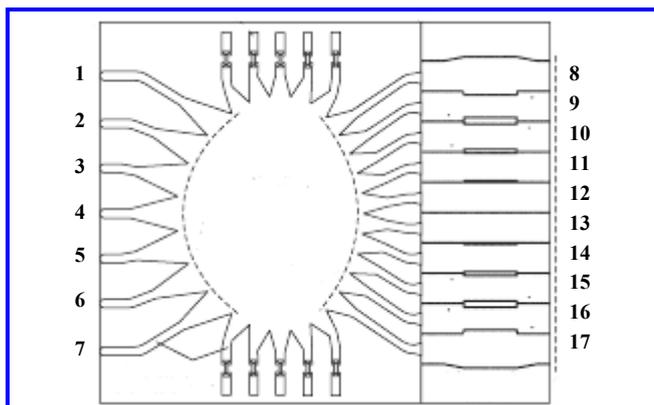


Рис. 3. Диаграммообразующая схема

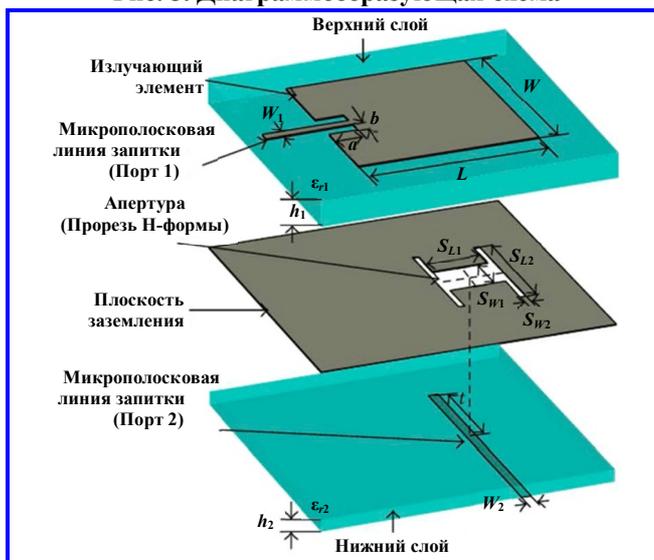


Рис. 4. Модель прямоугольного печатного излучателя с двойной поляризацией, возбуждаемого через щель



Рис. 5. Фотография антенны с поверхностным слоем из метаматериала



Рис. 6. Фотография экрана со щелями

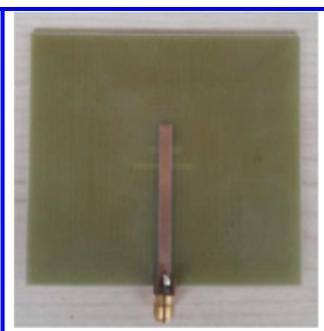


Рис. 7. Микрополосковая линия

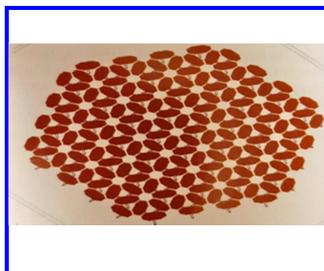


Рис. 8. Структура антенного полотна

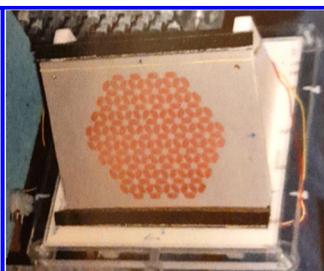


Рис. 9. Фотография антенны

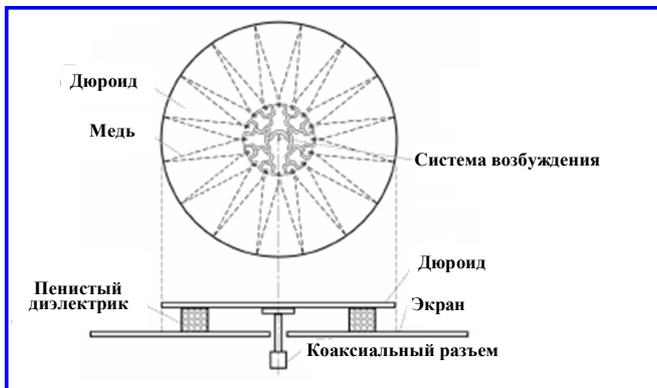


Рис. 10. Кольцевая антенная решетка из 16-ти щелевых излучателей с линейно расширяющейся щелью

Система возбуждения решетки представляет 16 полосковых делителей. Выходы делителей связаны со щелевыми излучателями через переходы щель-полосок, входные сопротивления которых выбраны 120 и 100 Ом соответственно. Решетка размещена над проводящей поверхностью для смещения луча в вертикальной плоскости, пенные вставки различной толщины используются для управления смещением луча. На рис. 11 показаны экспериментально полученные диаграммы направленности (ДН) в Е- и Н-плоскостях.

Кольцевая антенная решетка из щелевых излучателей с линейно расширяющейся щелью имеет ненаправленную ДН в горизонтальной плоскости и луч, отклоненный на 28° в вертикальной плоскости.

В статье [10] показана возможность построения широкополосной активной фазированной антенной решетки из излучателей Вивальди, передающей в диапазоне 10 – 19 ГГц и принимающей в диапазоне 12 – 21 ГГц. Управление лучом в пределах сектора 40° в решетке осуществляется в полосе 10 – 21 ГГц с помощью пьезоэлектрических фазовращателей.

В работе [11] рассмотрена компактная фазированная антенная решетка, работающая в Ку-диапазоне. Модель антенной решетки приведена на рис. 12.

Каждый элемент антенной решетки имеет независимое управление фазой и поляризацией. Излучатели расположены по схеме рис. 13.

В статье также приводятся результаты экспериментального исследования антенной решетки, модель которой показана на рис. 14.

В статьях [12] и [13] приведены конструкции и результаты исследования характеристик микрополосковых излучателей, работающих в Ку-диапазоне.

В работе [14] рассмотрена ещё одна антенна с использованием метаматериалов (рис. 15, 16). Ее рабочая частота составляет 12,75 ГГц. Антенна представляет собой две диэлектрические подложки толщиной 1,575 мм и диэлектрической проницаемостью, равной 2,3 (одна из них двусторонняя с нанесенным на нее слоем метаматериала) отнесенных друг от друга на расстояние 12 мм (рис. 17).

Применение метаматериалов для построения на их основе антенных решеток позволяет получить ряд преимуществ, таких как расширение рабочей полосы, уменьшение взаимного влияния излучателей, повышение эффективности использования излучающей поверхности. Поэтому такие решетки рассмотрены во многих работах, например [15 – 17].

В работе [18] представлена прямо-передающая антенная система, работающая в Ку-диапазоне. Приём осуществляется на частоте 11,575 ГГц, а

передача – на 14,125 ГГц. Полоса пропускания равняется 300 МГц. Антенна состоит из двух излучающих решеток, каждая из которых разделена на четыре секции, выполненные из 32-х щелевых вол-

новодных антенн по 8 элементов в каждой (рис. 18). Продольная ориентация щелей применяется в приемной секции, а поперечная используется для передающей антенны.

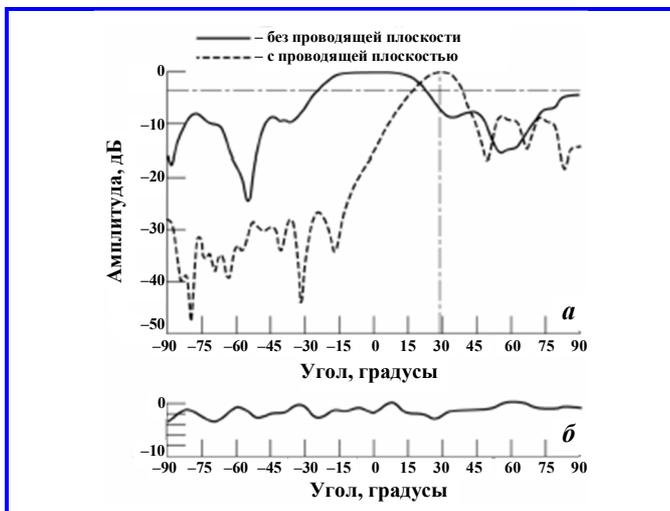


Рис. 11. Измеренные на частоте 19 ГГц диаграммы направленности: а – в Н-плоскости; б – в Е-плоскости

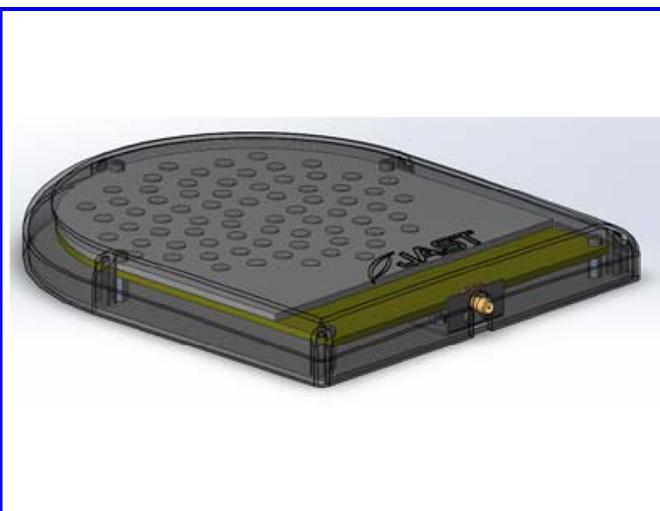


Рис. 12. Модель фазированной антенной решетки

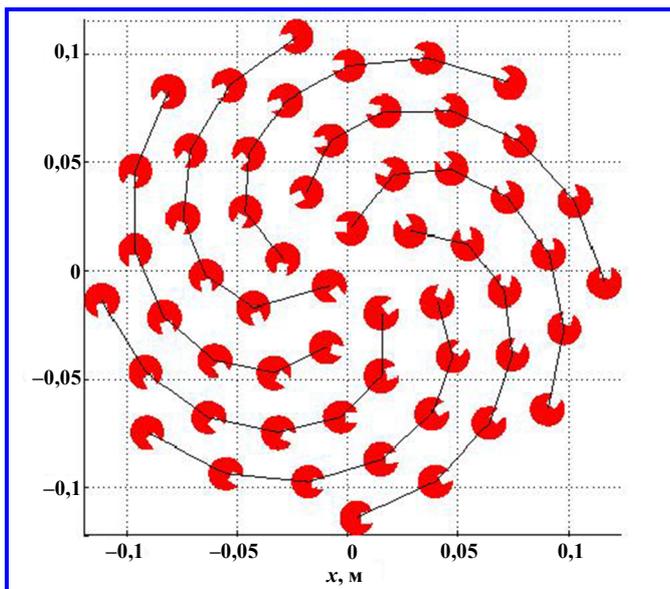


Рис. 13. Спиральная схема размещения элементов

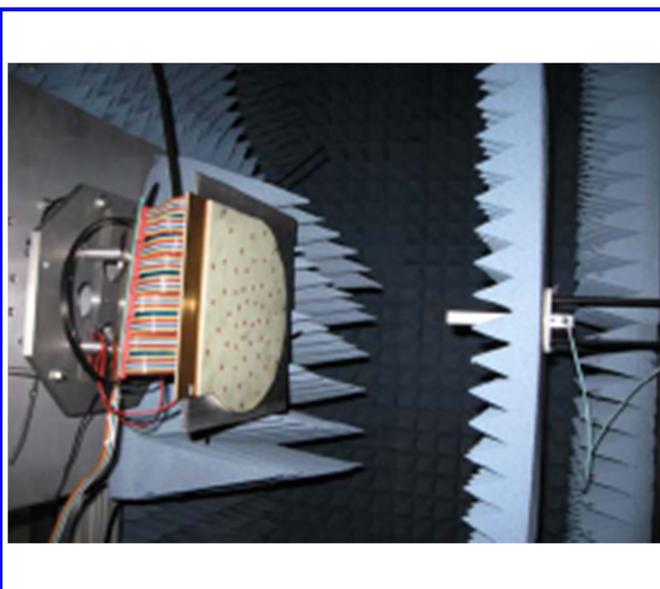


Рис. 14. Фотография антенны на измерительном стенде

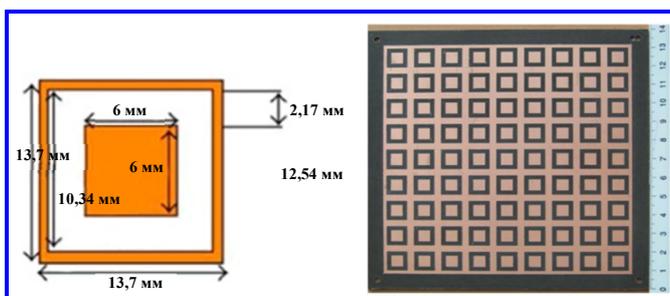


Рис. 15. Верхний слой частотно-селективной поверхности

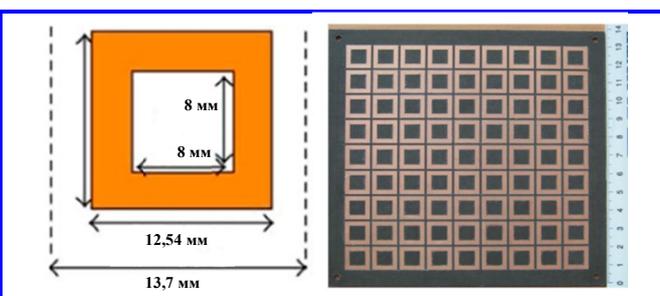


Рис. 16. Нижний слой частотно-селективной поверхности



Рис. 17. Фотография антенны

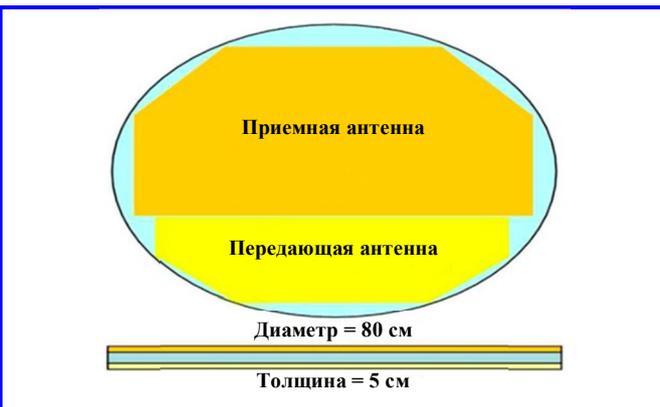


Рис. 18. Размеры и геометрия антенной системы

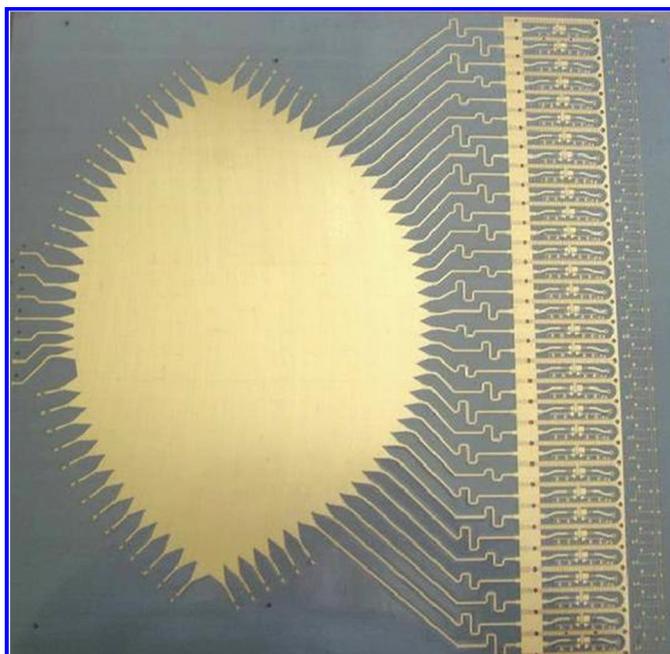


Рис. 19. Линза Ротмана

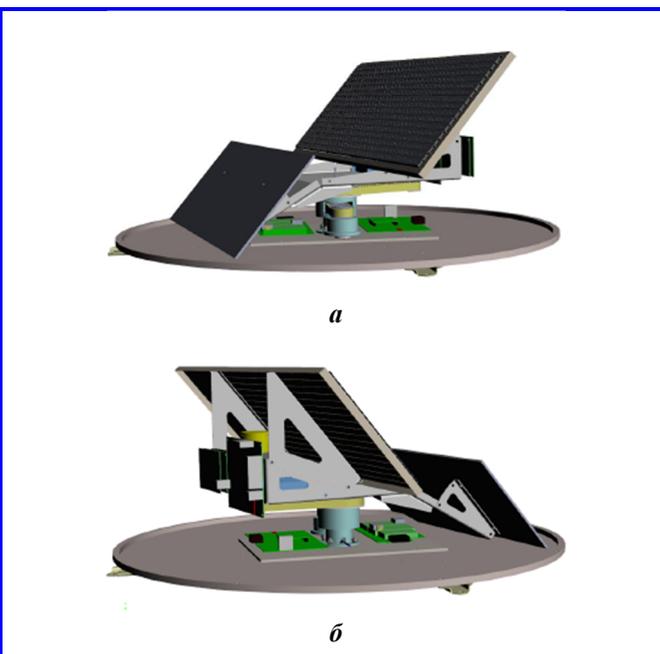


Рис. 20. Виды макета антенной системы мобильного терминала спутниковой связи, размещённого на опорно-поворотной платформе:
а – вид спереди; б – вид сзади

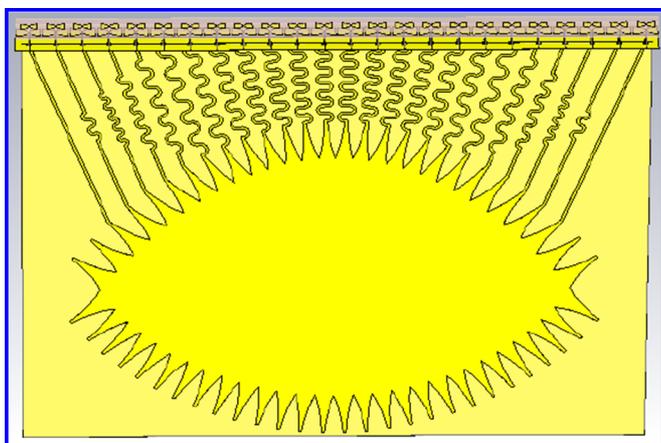


Рис. 21. Линза Ротмана

В качестве диаграммообразующей схемы в данной антенной системе использована микрополосковая линза Ротмана с 32-мя входными портами (рис. 19). С её помощью осуществляется управление лучом по углу места в диапазоне от 25 до 50 градусов.

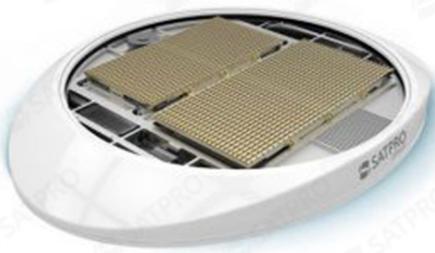
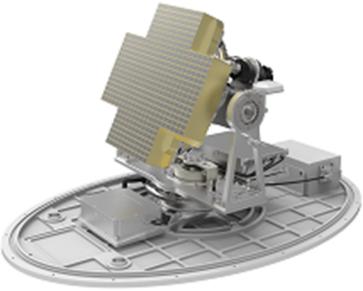
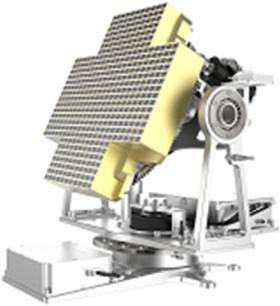
Аналогичная диаграммообразующая схема используется и в отечественных разработках. На рис. 20 приведена антенная система спутниковой связи решетки для мобильного терминала спутниковой связи, разработанная АО НПП «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж).

Антенная решетка состоит из плоских вибраторов с рефлекторами и директорами и работает в диапазоне частот 10,9 – 14,5 ГГц. Управление лучом осуществляется с помощью линзы Ротмана (рис. 21).

Широкоугольное сканирование в азимутальной плоскости в секторе 360° производится средствами механической вращающейся платформы. Коэффициент усиления рассмотренной антенной системы составляет 12 дБ.

Компания SATPRO M&C TECH CO., LTD, являющаяся производителем мобильных терминалов спутниковой связи, разработала и выпускает антенны, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Тип антенны	Характеристики
<p>PA450-0.45m ku band Phased Array Antenna – электромеханическая фазированная антенная решетка, работающая в Ku-диапазоне</p> 	<p>Приём сигнала ведется на частотах 12,25 – 12,75 ГГц, а передача на частотах 14,00 – 14,50 ГГц. Максимальный коэффициент усиления при передаче составляет 34,7 дБ на частоте 14,25 ГГц, при приёме – 33,6 дБ на частоте 12,5 ГГц. Антенная система имеет следующие габариты: 1200 × 900 × 120 мм (длина/ширина/высота). Её масса составляет 37 кг. Сканирование производится с помощью электромеханического управления лучом: 360 град. по азимуту и 30 – 90 град. по углу места.</p>
<p>GA300N-Ku band Helicopter Airborne VSAT – приемопередающая антенная система Ku-диапазона, предназначенная для установки на вертолётах</p> 	<p>Антенная решетка осуществляет приём на частотах 12,25 – 12,75 ГГц и передачу на 14,00 – 14,50 ГГц и имеет развязку передающего и приемного каналов по поляризации. Антенная система имеет размеры 470 × 390 мм и массу в 13,5 кг.</p>
<p>GA280-Fixed-wing plane Airborne Satellite Communication System – малогабаритная антенная система Ku-диапазона, предназначенная для установки на небольших вертолетах, беспилотниках и самолётах</p> 	<p>Антенная решетка осуществляет приём на частотах 10,7 – 12,75 ГГц и передачу в диапазоне 13,75 – 14,5 ГГц и имеет линейную горизонтальную, а также вертикальную поляризацию. Вся система имеет габариты 390 × 360 мм и массу, равную 13 кг. Управление лучом организовано исключительно механическим способом. Сканирование пространства по азимуту происходит во время непрерывного вращения антенны на 360 град. вокруг своей оси. Диапазон охвата пространства по углу места составляет от 0 до 90 град.</p>

В работе [19] рассматривается фазированная антенная решетка для мобильных терминалов спутниковой связи, работающая в Ku-диапазоне. Рабочая полоса частот составляет 10,7 – 12,75 ГГц. Антенна представляет собой решетку размерами 8 × 8 элементов (рис. 22). Каждый элемент антенной решетки является семислойным печатным излучателем (рис. 23).

Размеры излучающих элементов составляют соответственно 5,38 и 6,30 мм. В качестве подложки использован материал Rogers RT/durroid 5880 толщиной 1,575 мм, обладающий диэлектрической проницаемостью, равной 2,2. Максимальный коэффициент усиления равен 20 дБ и достигается на частоте 12,75 ГГц. Управление лучом производится чисто электрическими методами по азимуту и углу места в диапазоне ±45 градусов.

В литературе рассматриваются различные типы печатных излучателей, предназначенных для использования в составе бортовой ФАР спутниковой связи Ku-диапазона. Один из них приведен на рис. 24 и 25. Рабочая полоса частот составляет 10,75 – 12,75 ГГц,

а полоса пропускания равняется 2,05 ГГц. Печатный излучатель состоит из двух слоёв разного размера (рис. 24), что позволяет расширить полосу пропускания, а также имеет два вывода для реализации управления поляризацией (рис. 25). Для данной антенны заявлен коэффициент усиления, равный 4 дБ на частоте 12,7 ГГц. На этой же частоте зафиксирован минимальный коэффициент отражения – 14 дБ.

Бортовые фазированные антенные решетки Ku-диапазона, используемые для спутниковой связи, имеют низкопрофильную конструкцию и широкие углы сканирования.

В работе [20] рассматривается планарная активная антенная решетка для мобильных терминалов Ku-диапазона. Конструкция имеет низкий профиль. В распределительной системе имеется модуль, позволяющий осуществлять электрическое сканирование луча. Большая апертура достигается за счёт того, что антенная система состоит из отдельных подсистем, каждая из которых имеет питание (рис. 26).

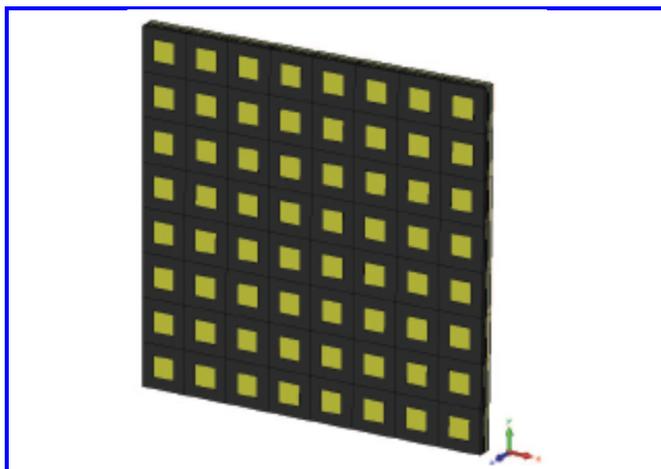


Рис. 22. Модель антенны

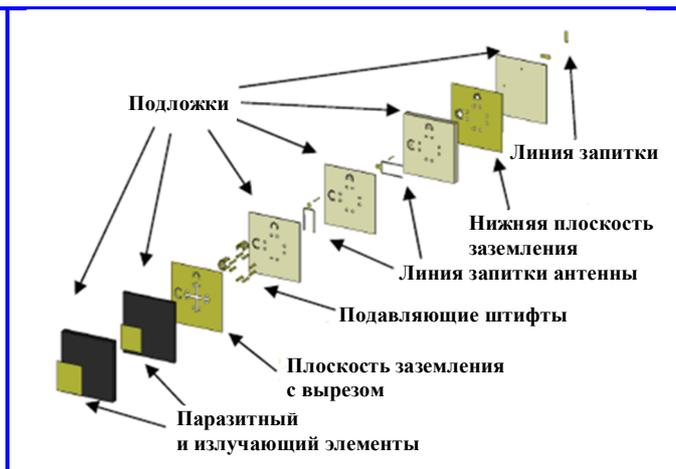


Рис. 23. Структура элемента антенной решетки

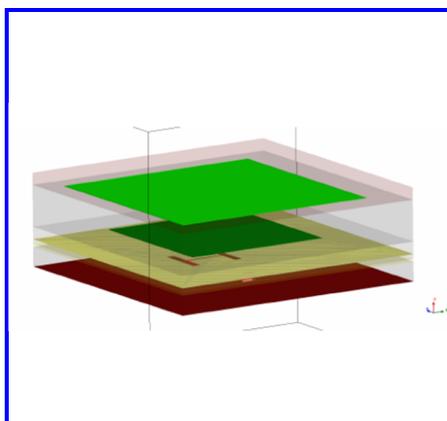


Рис. 24. 3D-модель микрополосковой антенны

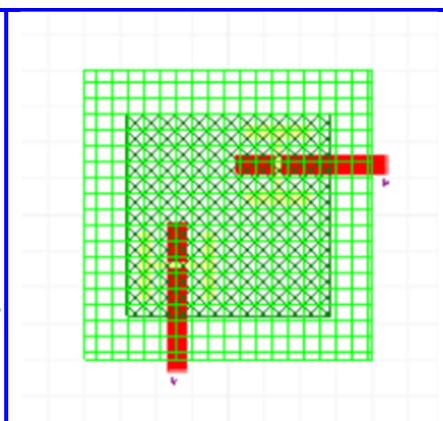


Рис. 25. Вид сверху

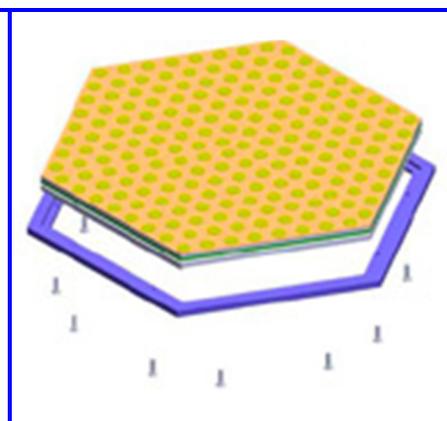


Рис. 26. Планарная активная антенная решетка

Китайская компания China Starwin Science & Technology Co., Ltd (Starwin) специализируется на производстве фазированных антен-

ных решеток. В табл. 2 представлен перечень готовых антенных систем Ку-диапазона компании.

Таблица 2

Антенная система Ку-диапазона	Характеристики
<p>PORTABLE 36dB Ku BAND AUTO FLAT ANTENNA – приемо-передающая антенна мобильных терминалов спутниковой связи Ку-диапазона</p> 	<p>Антенная система осуществляет приём сигналов на частоте 10,95 – 12,75 ГГц, а передачу в диапазоне частот 13,75 – 14,5 ГГц. Усиление при приёме достигает 35,5 и 36 дБ при передаче. Поляризация антенны – линейная. Заявленный коэффициент стоячей волны (КСВ) меньше или равен 1,5. Габариты антенны составляют 570 × 570 × 34 мм, а вес 5 кг. Сканирование пространства реализовано электромеханическими методами. Диапазон рабочих температур, заявленный производителем, составляет от –40 до +60 градусов по Цельсию.</p>
<p>USat Ku BAND FIXED FLAT TERMINAL – антенная решетка печатных излучателей</p> 	<p>Осуществляет приём сигналов на частотах 11,75 – 12,75 ГГц и передачу в полосе частот 13,75 – 14,5 ГГц. Данная антенна обладает линейной поляризацией. Её заявленный КСВ меньше, либо равен 1,5. Коэффициент усиления приёма сигналов равен 35,5 дБ, коэффициент передачи составляет 36 дБ. Габариты антенны составляют 570 × 570 × 34 мм, а вес 4,2 кг. Диапазон рабочих температур составляет от –25 до 65 градусов по Цельсию.</p>
<p>HIGH GAIN 38dB PORTABLE Ku BAND FLAT ANTENNA (TRIPOD TYPE) – компактная антенная система Ку-диапазона</p> 	<p>Приём ведётся на частотах 10,95 – 12,75 ГГц, а передача осуществляется в диапазоне 13,75 – 14,5 ГГц. Максимальный коэффициент усиления антенны при приёме составляет 37,5 дБ, при передаче – 38 дБ. Значение КСВ, указанное производителем не превышает 1,5. Габариты антенны составляют 570 × 570 × 58 мм при весе в 9 кг. Диапазон рабочих температур, заявленный производителем, от –40 до +60 градусов по Цельсию.</p>

В работе [21] представлена гибридная активная фазированная антенная решетка (АФАР), применяемая для спутниковой связи (рис. 27).

Элементами АФАР являются волноводные излучатели, что обеспечивает возможность формирования и излучения полей горизонтальной и вертикальной поляризации. Данная антенная система используется для приёма сигналов на частоте 12,25 – 12,75 ГГц и передачи на 14,0 – 14,5 ГГц. Она состоит из 12-ти активных подрешеток, размером 1×32 элемента. Общее число элементов в решетке составляет 384. Вся конструкция установлена на движущейся платформе, обеспечивающей широкоугольное сканирование от 0 до 360° в азимутальной плоскости. Коэффициент усиления антенны составляет 9 дБ, а ширина луча – более 60° . Выбранное расположение излучателей – наклонное, чересстрочное обеспечивает антенне низкий, относительно рефлекторных, профиль, что безусловно относится к достоинствам. Кроме того, применяется гибридная система сканирования – электрическое по углу места и механическое по азимуту, что значительно понижает стоимость всей системы.

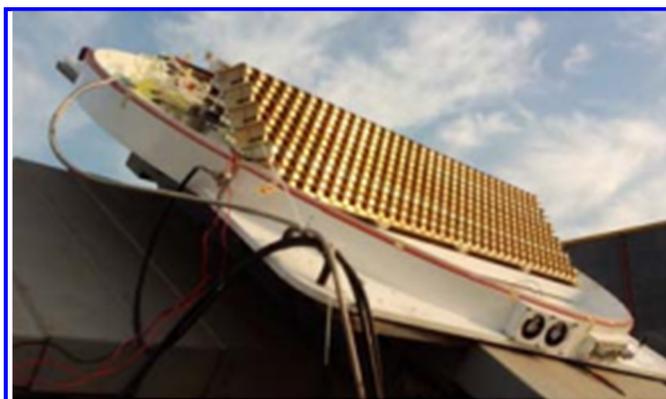


Рис. 27. Гибридная активная фазированная антенная решетка системы спутниковой связи

В работе [22] приведена бортовая антенная решётка с круглой апертурой для спутникового телевидения в самолёте (рис. 28).

При компоновке антенного полотна излучатели удобно объединять в модули. Данная конструкция состоит из модулей квадратной формы по 64 элемента, которые расположены на плоской подложке из диэлектрика. В качестве элементов решетки используются прямоугольные печатные излучатели. Размер антенной решётки: диаметр 60 см, высота 10 см. Диапазон рабочих частот: 10,7 – 12,75 ГГц; углы слежения по азимуту 360° , по углу места 60° . Усиление антенны 35 дБи, поляризация линейная.

В [23] рассмотрена антенная решетка Ку-диапазона, которая предназначена для обеспечения высокоскоростных каналов связи в движении (рис. 29). Может широко использоваться на любых транспортных средствах – автомобилях, железной дороге, морских и речных судах, самолетах, спецтехнике. Обеспечивает точное наведение и автосопровождение спутников с использованием встроенной системы автосопровождения.

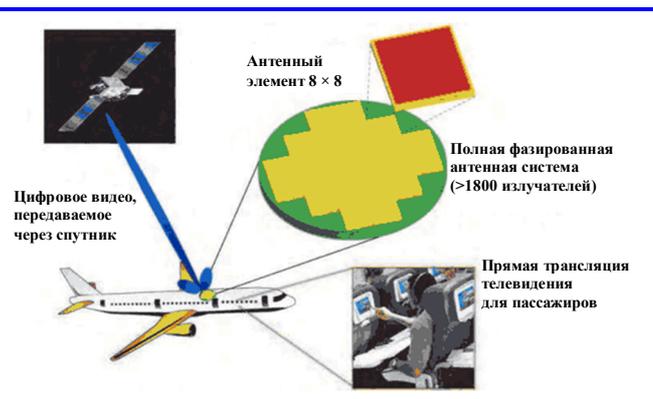


Рис. 28. Иллюстрация работы бортовой системы спутникового телевидения



Рис. 29. Внешний вид антенной системы и объект ее установки [23]

В статье [24] представлена активная фазированная антенная решетка спутниковой связи (рис. 30). Рабочий диапазон частот – 10,7 – 12,75 ГГц, поляризация – линейная. Размер апертуры: диаметр 20 см (ЕС), 30 см (США). Сектор сканирования: 20 – 60° по высоте от горизонта, 0 – 360° по азимуту. Структура антенного полотна, состоящего из печатных излучателей, показана на рис. 31. Излучающий элемент состоит из двух печатных излучателей.

В этой статье также рассмотрена фазированная антенная решетка для услуг мобильной спутниковой связи. Показана возможность недорогой реализации фазированных решеток с использованием модульного построения. Приведены результаты компьютерного моделирования элементов.

Выпуклые антенные решетки спутниковой связи

Перспективным направлением по созданию антенн спутниковой связи является применение выпуклых антенных систем [25 – 38]. Для этого необходима антенна с высоким усилением и постоянным слежением за спутником на геостационарной орбите, то есть апертурная антенна с электрическим или механическим сканированием. К таким антеннам относятся:

- зеркальная антенна с механическим сканированием (рис. 32);
- антенная решетка с механическим сканированием;
- антенная решетка с электрическим сканированием (рис. 33);
- гибридная сканирующая антенная решетка с механическим и электрическим сканированием.

Первый вариант требует применения поворотных устройств, защитных обтекателей, а также ухудшает аэродинамические характеристики. Конформные антенные решетки позволяют преодолеть отмеченные недостатки антенн с механическим сканированием и имеют более широкий сектор обзора, чем плоские.

Выпуклую антенную решетку также удобно строить в активном варианте. В этом случае существенно упрощается структура распределительной системы, системы управления лучом и возрастает энергетический потенциал антенны. Активная выпуклая фазированная антенная решетка позволяет осуществлять обзор пространства в полусфере, но требует управления поляризацией. При этом уровень паразитной кроссполяризационной составляющей вместе с ошибками системы управления составляет 15 дБ, а энергетический потенциал – 43 дБ·Вт. Оптимальная структура антенного по-

лотна получается путем разбиения полусферической поверхности на отдельные подрешетки. На рис. 34 показан вариант разбиения антенной решетки на модули. После этого антенная решетка приобретает форму икосаэдра – многогранника с 20-ю гранями, каждая из которых представляет собой равносторонний треугольник (рис. 35).

Излучатели с приемо-передающим модулем расположены в треугольной решетке с числом элементов равным 36 (рис. 36). Схема возбуждения подрешетки показана на рис. 37.

Подрешетки закрепляются на легком каркасе, показанном на рис. 38. В результате полусферическая антенна, собранная из подрешеток, представлена на рис. 39. Некоторые детали внутренней части прокладки кабеля между подрешетками и схема формирования луча представлены на рис. 40.

Антенна обеспечивает формирование луча и управление им в широком секторе углов (360 градусов по азимуту и 90 градусов по углу места). Снижение усиления на нижней границе сектора сканирования обусловлено различными углами ориентации подрешеток по отношению к горизонту. Диаграмма направленности антенной решетки в азимутальной плоскости показана на рис. 41. Диаграмма рассчитана на частоте 11,7 ГГц в режиме передачи при 30° отклонении от горизонта.

Оптимизированная комбинированная приемопередающая антенная решетка состоит из 1440 элементов, имеет диаметр 84 см, высоту 39 см и весит 90 кг. Каждая треугольная подрешетка содержит 36 излучающих элементов.

Система формирования и управления лучом показана на рис. 42.

На порты ввода/вывода процессора поступает сигнал на промежуточной частоте, после обработки он преобразуется в Ku-сигнал. Каждая подрешетка состоит из излучающих элементов и модулей приема/передачи, объединенных элементами фидерного тракта. Процессор контролирует управление лучом и поляризацией. Прием осуществляется на рабочих частотах – 10,7/12,75 ГГц, а передача – 14,0/14,5 ГГц.

В работе [32] рассмотрена широкополосная антенная решетка Ku-диапазона размерами 13 на 19 печатных излучателей. Её отличительной особенностью является расположение элементов на сферической поверхности радиусом 153 мм (рис. 43).

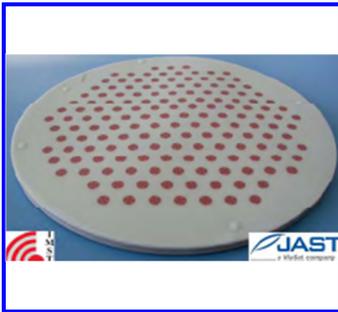


Рис. 30. Структура антенного полотна

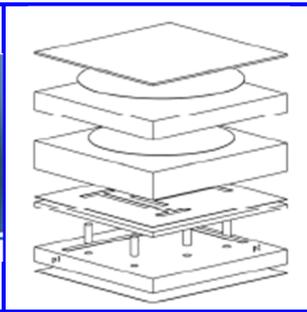


Рис. 31. Покомпонентное изображение излучающего элемента

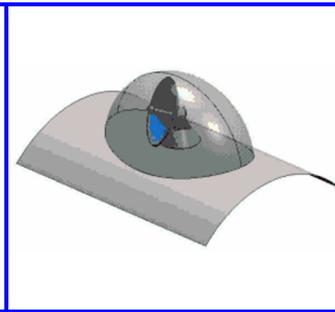


Рис. 32. Зеркальная антенна с механическим сканированием

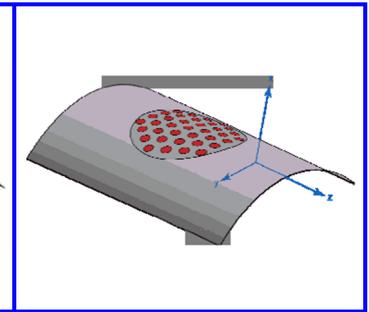


Рис. 33. Антенная решетка с электрическим сканированием

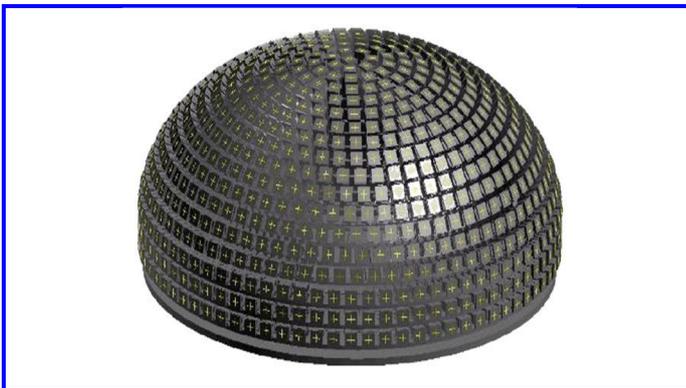


Рис. 34. Сферическая антенная решетка

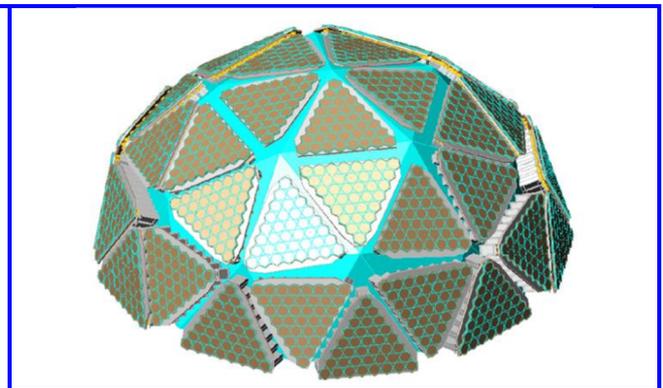


Рис. 35. Антенная решетка в виде икосаэдра

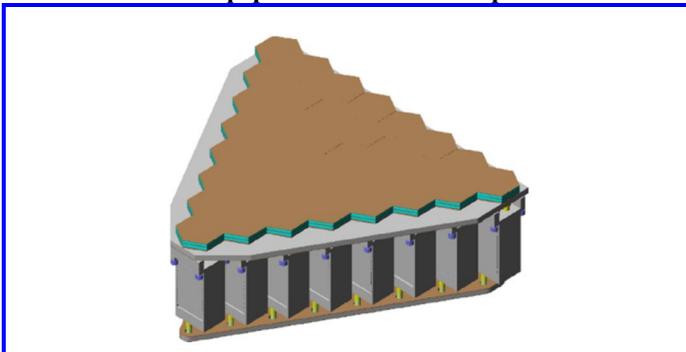


Рис. 36. Треугольная подрешетка полусферической антенны

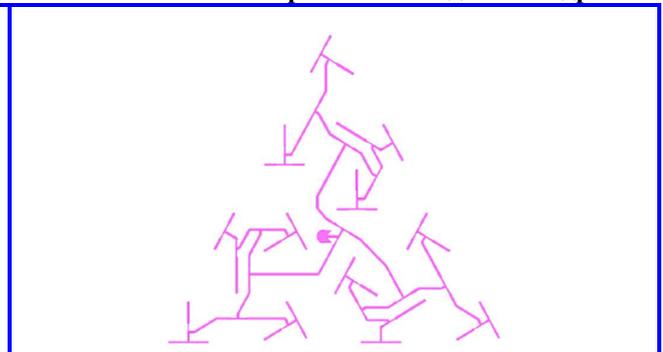


Рис. 37. Схема возбуждения треугольной подрешетки

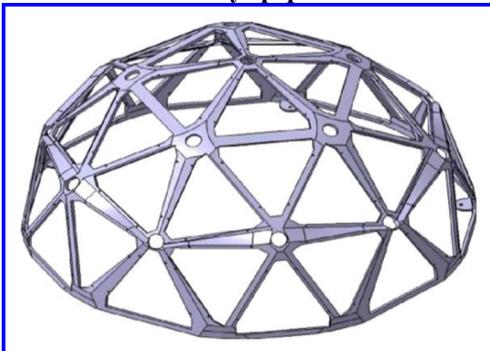


Рис. 38. Каркас для крепления подрешеток

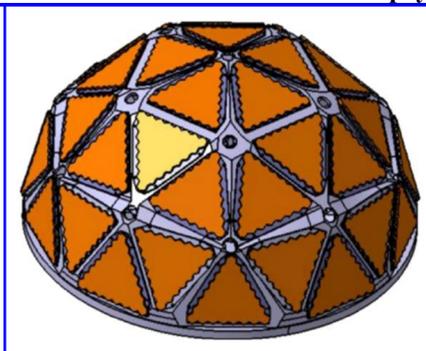


Рис. 39. Полусферическая антенна, собранная из подрешеток

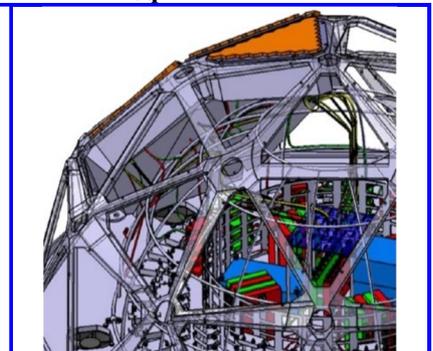


Рис. 40. Схема формирования луча, совмещенная с распределительной системой и антенным полотном

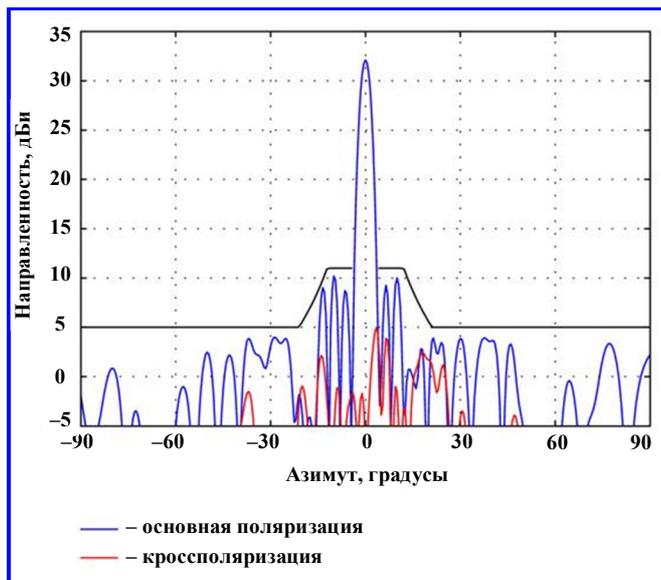


Рис. 41. Диаграмма направленности антенной решетки в азимутальной плоскости, рассчитанная на частоте 11,7 ГГц в режиме передачи при 30° отклонении от горизонта

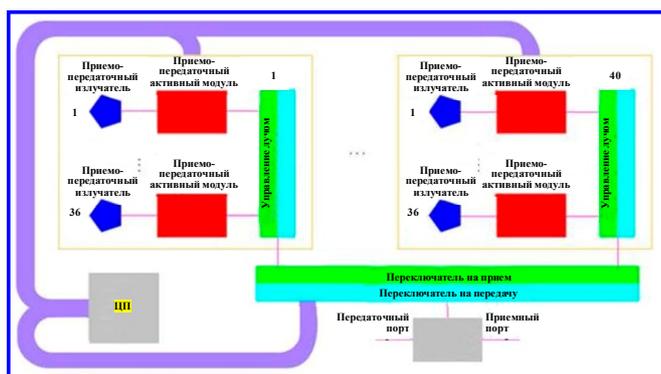


Рис. 42. Система формирования и управления лучом

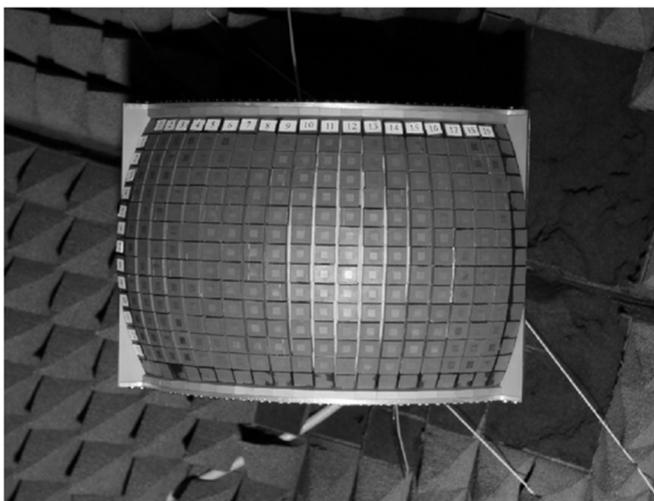


Рис. 43. Фотография антенной решетки

Измеренная полоса пропускания составляет от 12 до 18,4 ГГц, что совпадает с результатами компьютерного моделирования. В рассматриваемом диапазоне коэффициент усиления данной антенной решетки достигает максимума на частоте 14,75 ГГц и равен 7 дБ.

Заключение

В статье приведен обзор антенн спутниковой связи, который позволяет выявить основные направления развития, такие как миниатюризация, гибкое управление характеристиками для улучшения качества связи, расширение сектора сканирования. Показаны возможные схемы построения таких антенн. Рассмотрены различные конструкции излучателей, распределительные системы антенных решеток и способы управления лучом. Приведены антенные решетки с электрическим сканированием и управлением поляризацией поля излучения отдельных элементов. Рассмотрены выпуклые антенные решетки, обеспечивающие широкоугольное сканирование.

Литература

1. Status of the Mobile User Objective System / J. Nicholson // Military Communications Conference (MILCOM). – 2006. – P. 1 – 4.
2. Future developments trend for Ku and Ka antenna for satcom on the move / L. Marcellini, R. Lo Forti, G. Bellavaglia // Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on. – 2011. – P. 2346 – 2350.
3. Quadrature-modulated circular microstrip patch antenna for phased arrays / B. H. Uhl, M. Dawood, S. Castillo // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. – 2010. – Vol. 9. – P. 958 – 961.
4. Antenna concepts for Ka-band SATCOM on the move / J. S. Kot, I. M. Davis, C. Granet [et al.] // MilCIS. – Canberra, 2009. – P. 1 – 3.
5. Compact Shaped Dual-Reflector System For Military Ka-band SATCOM on the move / J. S. Kot, I. M. Davis, C. Granet [et al.] // Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on. – 2011. – P. 3518 – 3521.
6. A Small Ku-Band Polarization Tracking Active Phased Array for Mobile Satellite Communications / S. Wei, Q. Zuping, Z. Jun [et al.] // International Journal of Antennas and Propagation. – 2013. – P. 1 – 12. – DOI : 10.1155/2013/747629.
7. A Multibeam Dual-Band Orthogonal Linearly Polarized Antenna Array for Satellite Communication on the Move / Y. Liu, H. Yang, S. Mao [et al.] // International Journal of Antennas and Propagation ; Hindawi Publishing Corporation. – Vol. 2015. – Article ID 102959. – 8 p. – DOI : 10.1155/2015/102959.
8. A new aperture for sweeched-beam low-profile Ku-band mobil terminal array antennas / F. Bongrd, D. L. del Rio,

- M. C. Vigano [et al.] // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2012. – Vol. 54. – No. 3. – P. 289 – 300.
9. Radial microstrip slotline feed network for circular mobile communication array / R. N. Simons, E. Kelly, R. Q. Lee [et al.] // IEEE AP – S International Symposium Dijest. – 1994. – Vol. 2. – P. 1024 – 1027.
10. Low-cost, multifrequency, and full-duplex phased-array antenna system / T.-Y. Yun, C. Wang, P. Zepeda [et al.] // IEEE Trans Antennas and propagation. – 2002. – Vol. 50. – № 5. – P. 641 – 649.
11. One-bit phased array with wide scan and linear polarization control for mobile satellite applications / M. C. Vigany, D. Llorens del Rno, F. Bongard [et al.] // European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – 2012. – P. 1641 – 1644.
12. Design of a Compact Dual Band Microstrip Antenna for Ku-Band Applications / A. S. I. Amar, R. S. Ghonam, A. A. Zekry // International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). – 2015. – Vol. 115 – № 13. – P. 11 – 14.
13. Compact Dual Band Microstrip Antenna for Ku-Band Application / M. T. Islam, N. Misran, A. T. Mobashsher // Microwave Journal. – 2010. – Vol. 54 (9). – P. 146 – 158.
14. Design and Realization of a Wide-Band EBG Antenna Based on FSS and Operating in the Ku-Band / L. Moustafa, B. Jecko // International Journal of Antennas and Propagation. – 2010. – P. 1 – 8. – DOI : 10.1155/2010/139069. – URL : <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2010/139069/>.
15. A composite heterostructure mesh-shaped patch antenna based on left handed material / Ji-jun Wang, Zhi-pan Zhu // IJWMT. – 2014. – Vol. 4. – No. 1. – P. 10 – 19. – DOI : 10.5815/ijwmt.2014.01.02.
16. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы / В. Слюсар // ЭЛЕКТРОНИКА НТБ. – 2009. – № 7. – С. 70 – 79.
17. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот / И. Б. Вендик, О. Г. Вендик // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – Вып. 1. – С. 3 – 28.
18. Flat Array Antennas for Ku-Band Mobile Satellite Terminals / R. V. Gatti, L. Marcaccioli, E. Sbarra [et al.] // International Journal of Antennas and Propagation. – 2009. – Vol. 2009. – Article ID 836074. – DOI : 10.1155/2009/836074. – URL : <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2009/836074>.
19. Low-profile scalable phased array antenna at Ku-band for mobile satellite communications / K. Y. Kapusuz, Y. Sen, M. Bulut [et al.] // IEEE 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST). – Waltham, MA, USA, 2016. – P. 1 – 4. – DOI : 10.1109/ARRAY.2016.7832648. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7832648>.
20. Low-profile Ku-band array antenna for broadband mobile satellite communications / F. Tiezzi, S. Vaccaro, D. L. del Rio [et al.] // IEEE Computer Society Washington. – 2011. – P. 1 – 6. – URL : <https://referatbooks.ru/diplomnaya-rabota/bortovaya-fazirovannaya-antennaya-reshetka-dlya-sputnikovoy-svyazi/>.
21. A Novel Hybrid Phased Array Antenna for Satellite Communication on-the-Move in Ku-band / G. Han, B. Du, W. Wu [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 63 (4). – P. 1375 – 1383. – DOI : 10.1109/tap.2015.2389951. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7004863>.
22. Marpaung D. Development of a broadband and squint free Ku-band phased array antenna system for airborne satellite communications / D. Marpaung, C. Roeloffzen, W. Beeker [et al.] // IntechOpen : [сайт]. – 2011. – DOI : 10.5772/28399. – URL : <http://www.intechopen.com/books/future-aeronautical-communications/development-of-a-broadband-and-squint-free-ku-band-phased-array-antenna-system-for-airborne-satellit>.
23. Спецификация «Антенна SOTM 0.6 м Ку-диапазона ФАР ТИШДЖ464659.015» // ООО «Технологии Радиосвязи» : [сайт]. – 2016. – P. 15. – URL : [http://www.rc-tech.ru/products/antenna-systems/antennas-for-communications-on-the-move/satcom-on-the-move-\(sotm\)/sotm-antenna-0-6-m-ki-range-far.html](http://www.rc-tech.ru/products/antenna-systems/antennas-for-communications-on-the-move/satcom-on-the-move-(sotm)/sotm-antenna-0-6-m-ki-range-far.html).
24. First Prototyping of a Compact Mobile Ku-band Satellite Terminal / R. Baggen, S. Vaccaro, D. del Rio [et al.] // Proceedings of the 4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2010). – Barcelona, Spain, 2010. – P. 1 – 5.
25. Two-way low profile satellite antenna system for mobile applications / G. Bellaveglia, L. Marcellini, A. Ferrarotti [et al.] // Proceedings of the 30th ESA Antenna Workshop on Antennas for Earth Observation, Science, Telecommunication and Navigation Space Missions. – Noordwijk, The Netherlands, 2008. – P. 1 – 3.
26. Two-way airborne broadband communications using phased array antennas / C. O. Adler, A. D. Monk, D. N. Rasmussen [et al.] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference. – Big Sky, Mont, USA, 2003. – Vol. 2. – P. 925 – 932.
27. Airborne DBS receive system / P. Halsema, B. Anderson, J. Frisco // Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium. – Montreal, Canada, 1997. – P. 2 – 4.
28. Low profile, dual polarised antenna for aeronautical and land mobile satcom / M. Shelley, R. Pearson, J. Vazquez // Proceedings of the 4th Advanced Satellite Mobile Systems (ASMS '08). – Bologna, Italy, 2008. – P. 16 – 19.
29. ETSI EN 302 186 V1.1.1 (2004-01). Satellite Earth Stations and Systems (SES); Harmonized EN for satellite mobile Aircraft Earth Stations (AESs) operating in the 11/12/14 GHz frequency bands covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive / European Telecommunications Standards Institute. – 2004. – 56 p.
30. Ku Band Hemispherical Fully Electronic Antenna for Aircraft in Flight Entertainment / Alfredo Catalani, Franco Di Paolo, Migliorelli Marzia [et al.] // International Journal of Antennas and Propagation. – 2009. – 7 p. – DOI : 10.1155/2009/230650. – URL : https://www.researchgate.net/publication/26620622_Ku_Band_Hemispherical_Fully_Electronic_Antenna_for_Aircraft_in_Flight_Entertainment.
31. Recommendation ITU-R M.1643. Technical and operational requirements for aircraft earth stations of aeronautical mobile-satellite service including those using fixed-satellite service network transponders in the band 14 – 14,5 GHz (Earth-to-space). – 2003. – 6 p. – URL : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1643-0-200306-I!!PDF-E.pdf.
32. A Broadband Conformal Phased Array Antenna on Spherical Surface / Sun, Dan; Shen, Rong; Yan, Xuequan // International Journal of Antennas and Propagation. – 2014. – P. 1 – 5. – DOI : 10.1155/2014/206736.

33. Beam synthesis for conformal array antennas with efficient tapering / P. Jorna, H. Schippers, J. Verpoorte // Proceedings of 5th European workshop on Conformal antennas. – Bristol, 2007. – P. 1 – 4.
34. Conformal antenna array theory and design / L. Josefsson, P. Persson // IEEE Press. – Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2006. – P. 57 – 67.
35. Phase synthesis of conformal array antennas / L. I. Vaskelainen // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2000. – Vol. 48. – № 6. – P. 987 – 991.
36. Constrained Least-square optimization in conformal array antenna synthesis / L. I. Vaskelainen // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2007. – Vol. 55. – No. 3. – P. 859 – 867.
37. Boyd S. Convex optimization / S. Boyd, L. Vandenberghe. – New-York, USA : Cambridge university press, 2004. – 716 p.
38. Conformal array beam synthesis and taper efficiency comparisons / R. G. Elliot // Proceedings antennas, radar and wave propagation (ARP). – 2005. – P. 1 – 6.

Поступила в редакцию 22.06.2021

Елена Викторовна Овчинникова, доктор технических наук, доцент,
e-mail: oea8888@gmail.com, т. 8 (915) 323-40-36.
(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ))).

Эльчин Вахидович Гаджиев, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер, т. 8 (926) 392-96-27,
e-mail: gadzhiev_elchin@mail.ru.
(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ))), (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

Светлана Геннадьевна Кондратьева, кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kondratieff89@ya.ru, т. 8 (915) 042-94-22.

(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ)), Российский университет дружбы народов (РУДН)).

Артемиий Лазаревич Поландов, магистр, e-mail: polandoff@yandex.ru, т. 8 (962) 008-68-79.
(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ))).

Павел Александрович Шмачилин, кандидат технических наук,
доцент, e-mail: shmachilin@gmail.com, т. 8 (916) 586-44-32.

(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ)),
Российский университет дружбы народов (РУДН)).

Максим Андреевич Соков, аспирант, e-mail: s.maks.s@mail.ru, т. 8 (985) 979-51-49.

Олег Александрович Волков, кандидат технических наук, доцент,
т. 8 (909) 622-20-58, e-mail: volkov.kaf406@ya.ru.
(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ))).

ANTENNA ARRAYS FOR SATELLITE MOBILE TELECOMMUNICATION SYSTEMS

**E. V. Ovchinnikova, E. V. Gadzhiev, S. G. Kondratieva,
A. L. Polandov, P. A. Shmachilin, M. A. Sokov, O. A. Volkov**

The variety of technical solutions used for the practical implementation of satellite communication antenna systems installed on mobile objects requires their systematization according to the method of constructing the antenna fabric, polarization control, the structure of the distribution system, etc. The article provides an overview of antenna systems for satellite communications and television operating in the Ku- and Ka-bands. Their design features, main advantages and disadvantages are noted. The elements of such systems and methods of implementation of distribution systems on a modern element base are considered. The ways of constructing such antenna systems have been determined. Co-located and multiband antennas are considered. Simulation plays an important role in the development of antenna systems. This paper also presents models obtained in programs for electrodynamic modeling of antennas and microwave devices.

Keywords: Satellite communication antenna arrays, horn antenna arrays, microstrip antenna arrays, active antenna arrays, digital antenna arrays.

References

1. Status of the Mobile User Objective System / J. Nicholson // Military Communications Conference (MILCOM). – 2006. – P. 1 – 4.
2. Future developments trend for Ku and Ka antenna for satcom on the move / L. Marcellini, R. Lo Forti, G. Bellaveglia // Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on. – 2011. – P. 2346 – 2350.
3. Quadrature-modulated circular microstrip patch antenna for phased arrays / B. H. Uhl, M. Dawood, S. Castillo // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. – 2010. – Vol. 9. – P. 958 – 961.
4. Antenna concepts for Ka-band SATCOM on the move / J. S. Kot, I. M. Davis, C. Granet [et al.] // MilCIS. – Canberra, 2009. – P. 1 – 3.

5. Compact Shaped Dual-Reflector System For Military Ka-band SATCOM on the move / J. S. Kot, I. M. Davis, C. Granet [et al.] // Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on. – 2011. – P. 3518 – 3521.
6. A Small Ku-Band Polarization Tracking Active Phased Array for Mobile Satellite Communications / S. Wei, Q. Zuping, Z. Jun [et al.] // International Journal of Antennas and Propagation. – 2013. – P. 1 – 12. – DOI : 10.1155/2013/747629.
7. A Multibeam Dual-Band Orthogonal Linearly Polarized Antenna Array for Satellite Communication on the Move / Y. Liu, H. Yang, S. Mao [et al.] // International Journal of Antennas and Propagation ; Hindawi Publishing Corporation. – Vol. 2015. – Article ID 102959. – 8 p. – DOI : 10.1155/2015/102959.
8. A new aperture for sweeched-beam low-profile Ku-band mobil terminal array antennas / F. Bongrd, D. L. del Rio, M. C. Viganò [et al.] // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2012. – Vol. 54. – No. 3. – P. 289 – 300.
9. Radial microstrip slotline feed network for circular mobile communication array / R. N. Simons, E. Kelly, R. Q. Lee [et al.] // IEEE AP – S International Symposium Dijest. – 1994. – Vol. 2. – P. 1024 – 1027.
10. Low-cost, multifrequency, and full-duplex phased-array antenna system / T.-Y. Yun, C. Wang, P. Zepeda [et al.] // IEEE Trans Antennas and propagation. – 2002. – Vol. 50. – № 5. – P. 641 – 649.
11. One-bit phased array with wide scan and linear polarization control for mobile satellite applications / M. C. Viganò, D. Llorens del Río, F. Bongard [et al.] // European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – 2012. – P. 1641 – 1644.
12. Design of a Compact Dual Band Microstrip Antenna for Ku-Band Applications / A. S. I. Amar, R. S. Ghonam, A. A. Zekry // International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). – 2015. – Vol. 115 – № 13. – P. 11 – 14.
13. Compact Dual Band Microstrip Antenna for Ku-Band Application / M. T. Islam, N. Misran, A. T. Mobashsher // Microwave Journal. – 2010. – Vol. 54 (9). – P. 146 – 158.
14. Design and Realization of a Wide-Band EBG Antenna Based on FSS and Operating in the Ku-Band / L. Moustafa, B. Jecko // International Journal of Antennas and Propagation. – 2010. – Pp. 1 – 8. – DOI: 10.1155/2010/139069. – URL : <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2010/139069/>.
15. A composite heterostructure mesh-shaped patch antenna based on left handed material / Ji-jun Wang, Zhi-pan Zhu // IJWMT. – 2014. – Vol. 4. – No. 1. – P. 10 – 19. – DOI : 10.5815/ijwmt.2014.01.02.
16. Metamaterials in antenna technology: backstory and main principles / V. Sliusar // ELECTRONICA NTB. – 2009. – No. 7. – Pp. 70 – 79.
17. Metamaterials and their application in high-frequency engineering technology / I. B. Vendik, O. G. Vendik // Journal of Applied Physics. – 2013. – Vol. 83. – Issue 1. – Pp. 3 – 28.
18. Flat Array Antennas for Ku-Band Mobile Satellite Terminals / R. V. Gatti, L. Marcaccioli, E. Sbarra [et al.] // International Journal of Antennas and Propagation. – 2009. – Vol. 2009. – Article ID 836074. – DOI : 10.1155/2009/836074. – URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2009/836074>.
19. Low-profile scalable phased array antenna at Ku-band for mobile satellite communications / K. Y. Kapsuz, Y. Sen, M. Bulut [et al.] // IEEE 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST). – Waltham, MA, USA, 2016. – Pp. 1 – 4. – DOI : 10.1109/ARRAY.2016.7832648. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7832648>.
20. Low-profile Ku-band array antenna for broadband mobile satellite communications / F. Tiezzi, S. Vaccaro, D. L. del Rio [et al.] // IEEE Computer Society Washington. – 2011. – Pp. 1 – 6. – URL : <https://referatbooks.ru/diplomnaya-rabota/bortovaya-fazirovannaya-antennaya-reshetka-dlya-sputnikovoy-svyazi/>.
21. A Novel Hybrid Phased Array Antenna for Satellite Communication on-the-Move in Ku-band / G. Han, B. Du, W. Wu [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 63 (4). – Pp. 1375 – 1383. – DOI : 10.1109/tap.2015.2389951. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7004863>.
22. Marpaung D. Development of a broadband and squint free Ku-band phased array antenna system for airborne satellite communications / D. Marpaung, C. Roeloffzen, W. Beeker [et al.] // IntechOpen : [web-site]. – 2011. – DOI : 10.5772/28399. – URL : <http://www.intechopen.com/books/future-aeronautical-communications/development-of-a-broadband-and-squint-free-ku-band-phased-array-antenna-system-for-airborne-satellit>.
23. Datasheet ‘SOTM 0.6m Ku-band PAA Antenna ТИИДЖ.464659.015’ // Tekhnologii Radiosvyazi LLC: [web-site]. – 2016. – Pp. 15. – URL : [http://www.rc-tech.ru/products/antenna-systems\antennas-for-communications-on-the-move-satcom-on-the-move-\(sotm\)/sotm-antenna-0-6-m-ki-range-far.html](http://www.rc-tech.ru/products/antenna-systems\antennas-for-communications-on-the-move-satcom-on-the-move-(sotm)/sotm-antenna-0-6-m-ki-range-far.html).
24. First Prototyping of a Compact Mobile Ku-band Satellite Terminal / R. Baggen, S. Vaccaro, D. del Rio [et al.] // Proceedings of the 4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2010). – Barcelona, Spain, 2010. – P. 1 – 5.
25. Two-way low profile satellite antenna system for mobile applications / G. Bellaveglia, L. Marcellini, A. Ferrarotti [et al.] // Proceedings of the 30th ESA Antenna Workshop on Antennas for Earth Observation, Science, Telecommunication and Navigation Space Missions. – Noordwijk, The Netherlands, 2008. – P. 1 – 3.
26. Two-way airborne broadband communications using phased array antennas / C. O. Adler, A. D. Monk, D. N. Rasmussen [et al.] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference. – Big Sky, Mont, USA, 2003. – Vol. 2. – P. 925 – 932.
27. Airborne DBS receive system / P. Halsema, B. Anderson, J. Frisco // Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium. – Montreal, Canada, 1997. – P. 2 – 4.
28. Low profile, dual polarised antenna for aeronautical and land mobile satcom / M. Shelley, R. Pearson, J. Vazquez // Proceedings of the 4th Advanced Satellite Mobile Systems (ASMS '08). – Bologna, Italy, 2008. – P. 16 – 19.

29. ETSI EN 302 186 V1.1.1 (2004-01). Satellite Earth Stations and Systems (SES); Harmonized EN for satellite mobile Aircraft Earth Stations (AESs) operating in the 11/12/14 GHz frequency bands covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive / European Telecommunications Standards Institute. – 2004. – 56 p.
30. Ku Band Hemispherical Fully Electronic Antenna for Aircraft in Flight Entertainment / Alfredo Catalani, Franco Di Paolo, Migliorelli Marzia [et al.] // International Journal of Antennas and Propagation. – 2009. – 7 p. – DOI : 10.1155/2009/230650. – URL : https://www.researchgate.net/publication/26620622_Ku_Band_Hemispherical_Fully_Electronic_Antenna_for_Aircraft_in_Flight_Entertainment.
31. Recommendation ITU-R M.1643. Technical and operational requirements for aircraft earth stations of aeronautical mobile-satellite service including those using fixed-satellite service network transponders in the band 14 – 14,5 GHz (Earth-to-space). – 2003. – 6 p. – URL : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1643-0-200306-1!!PDF-E.pdf.
32. A Broadband Conformal Phased Array Antenna on Spherical Surface / Sun, Dan; Shen, Rong; Yan, Xuequan // International Journal of Antennas and Propagation. – 2014. – P. 1 – 5. – DOI : 10.1155/2014/206736.
33. Beam synthesis for conformal array antennas with efficient tapering / P. Jorna, H. Schippers, J. Verpoorte // Proceedings of 5th European workshop on Conformal antennas. – Bristol, 2007. – P. 1 – 4.
34. Conformal antenna array theory and design / L. Josefsson, P. Persson // IEEE Press. – Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2006. – P. 57 – 67.
35. Phase synthesis of conformal array antennas / L. I. Vaskelainen // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2000. – Vol. 48. – № 6. – P. 987 – 991.
36. Constrained Least-square optimization in conformal array antenna synthesis / L. I. Vaskelainen // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2007. – Vol. 55. – No. 3. – P. 859 – 867.
37. Boyd S. Convex optimization / S. Boyd, L. Vandenberghe. – New-York, USA : Cambridge university press, 2004. – 716 p.
38. Conformal array beam synthesis and taper efficiency comparisons / R. G. Elliot // Proceedings antennas, radar and wave propagation (ARP). – 2005. – P. 1 – 6.

*Elena Viktorovna Ovchinnikova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: oea8888@gmail.com, tel.: +7 (915) 323-40-36.*

(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University))).

*Elchin Vakhidovich Gadzhiev, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Leading Engineer,
tel.: +7 (926) 392-96-27, e-mail: gadzhiev_elchin@mail.ru.*

(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University)), (JSC «Corporation VNIIEM»).

*Svetlana Gennadevna Kondratieva, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor,
e-mail: kondratieff89@ya.ru, tel.: +7 (915) 042-94-22.*

(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University)), (Peoples' Friendship University of Russia (RUDN)).

*Artemii Lazarevich Polandov, Master, e-mail: polandoff@yandex.ru, tel.: +7 (962) 008-68-79.
(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University))).*

*Pavel Aleksandrovich Shmachilin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor,
e-mail: shmachilin@gmail.com, tel.: +7 (916) 586-44-32.*

(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University)), (Peoples' Friendship University of Russia (RUDN)).

Maksim Andreevich Sokov, Ph. D. Student, e-mail: s.makc.s@mail.ru, tel.: +7 (985) 979-51-49.

*Oleg Aleksandrovich Volkov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor,
tel.: +7 (909) 622-20-58, e-mail: volkov.kaf406@ya.ru.*

(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University))).