

ОБЛУЧАТЕЛИ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН И ЭЛЕМЕНТЫ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

А. Л. Поландов, А. И. Гиголо, Фам Ван Винь

Приводится обзор работ, посвящённых исследованию характеристик слабонаправленных антенн, работающих в Ки-диапазоне. Рассмотрены облучатели зеркальных антенн. Приведены параметры антенн. Дано описание конструкций и материалов. Отмечены особенности работы наземных стационарных антенных систем и антенных систем, устанавливаемых на мобильных носителях. Приведены результаты моделирования и результаты экспериментального исследования характеристик антенн. Рассмотрены антенны, работающие в широкой полосе частот 8 – 17 ГГц. Приведены конструкции антенн, выполненных с использованием микрополосковой технологии и технологии гальванопластики. Рассмотрена прямоугольная диэлектрическая резонаторная антенна и показаны ее характеристики направленности. Приведена конструкция многослойного печатного излучателя с параметрами подложек его слоев. Рассмотрены конструкции двух- и трехдиапазонных микрополосковых антенн.

Ключевые слова: облучатели параболических зеркальных антенн, слабонаправленные излучатели, антенны Ки-диапазона, микрополосковые антенны, многослойные печатные излучатели, диэлектрические резонаторные антенны, технология гальванопластики.

Введение

В последнее время наблюдается интенсивное развитие систем спутниковой связи. Возникает необходимость в расширении рабочей полосы и повышении энергетического потенциала таких систем, работающих как на орбите, так и на поверхности Земли. Частотные и энергетические характеристики систем связи во многом определяются характеристиками антенно-фидерных устройств, входящих в их состав. Несмотря на общие задачи, решаемые наземными пунктами приема и бортовыми передающими системами связи, антенно-фидерные устройства имеют различную практическую реализацию, так как выбор типа излучателя, его конструкции и материалов зависит от условий эксплуатации. В литературе приводятся зеркальные антенны и антенные решетки (АР) с механическим, электромеханическим и электрическим сканированием. Отдельные варианты построения АР состоят из подрешеток, что обеспечивает удобство практической реализации решетки в модульном исполнении. Высокий энергетический потенциал в секторе сканирования в основном обеспечивается сложной структурой антенного полотна. Одним из важнейших требований к АР является их компактность. Полотна низкопрофильных АР обычно формируются из излучателей, имеющих малые продольные габариты. Это различные печатные и щелевые излучатели. Требования к габаритам и массе также определяются технологией изготовления излучателей, антенного полотна и распределительной системы. На сегодняшний день в России и за рубежом широкое распространение получили две технологии изготовления антенн: печатная (микрополосковая) и технология гальванопластики. Ниже приводятся излучатели антенных систем спутниковой связи, изготовленные с использованием этих технологий.

Антенны Ки-диапазона

Для построения систем спутниковой связи применяются различные типы антенн. Одним из наиболее популярных типов являются зеркальные антенны. Данный тип антенн представляет собой совокупность всенаправленного излучателя (облучателя) и металлического, либо композитного отражателя (зеркала). Форму рефлектора выбирают такой, чтобы сферический фронт волны, падающий от всенаправленного облучателя, после отражения превращался в плоский [1]. Такие антенны применяются как на наземных станциях, так и на спутниках ретрансляторах в силу своей высокой надежности и неприхотливости к условиям внешней среды.

В работе [2] рассматривается зеркальная антенна Ки-диапазона. Её рабочий диапазон частот равен 10,7 – 14,5 ГГц. Наибольший коэффициент усиления измерен на частоте в 11 ГГц и составляет 39 дБ. Зеркало антенны имеет диаметр 1,2 м и представляет собой параболический отражатель, состоящий из 12 сегментов усиленного углеродным волокном полимера (рис. 1). На рис. 2 приведена диаграмма направленности (ДН) зеркальной антенны на частоте 10,95 ГГц.

Преимуществом такой антенны является высокий коэффициент усиления, надежность и возможность развертывания в любой местности. Хотя авторы и позиционируют данную антенну как пригодную к переноске одним человеком, вес в 13 кг и габариты, в сложенном состоянии равные 630 × 630 × 800 мм, делают её пригодной к использованию лишь в составе экспедиции.

В работе [3] представлена широкополосная антенна типа «Бычий глаз». Данная антенна полностью охватывает Ки-диапазон, её возможная полоса пропускания составляет 8 – 17 ГГц. Пиковый коэффициент усиления равен 13,5 дБ, он измерен на частоте 13 ГГц. Во всем рассматриваемом диапазоне частот 10,5 – 14,5 ГГц коэффициент усиления не ниже 11,5 дБ. Описываемая антенна пред-

ставляет собой резонансную структуру, окруженную кольцевыми концентрическими гофрами. Запитка осуществляется с помощью прямоугольного волновода WR-75. На рис. 3 приведены чертеж (а) и фотография (б) антенны. На рис. 4 показаны ее ДН.

Описанная антенна произведена с использованием технологии 3D-печати из пластика, покрытого сверху проводящим никелированным слоем. Данная технология позволила существенно повысить технологичность и простоту производства антенны, а выбранные материалы – значительно снизить её вес.

В работе [4] рассмотрена аналогичная антенна, произведенная с применением аддитивных технологий (рис. 5).

Полоса рабочих частот составляет 10–15 ГГц, что позволяет без ограничений использовать данное изделие для организации спутниковой связи. Максимальное усиление получено на частоте 14 ГГц и составляет 13,25 дБ. На рис. 6 приведено распределение электрического поля на частоте 12,5 ГГц.

Основной объем антенны выполнен из материала полиактид, обладающего диэлектрической проницаемостью, равной 2,8, который в свою очередь покрыт проводящим никелированным слоем. Применение подобной технологии позволяет получать радиотехнические параметры антенны, сопоставимые с цельнометаллическим изделием, значительно снижая итоговый вес.



Рис. 1. Параболическая зеркальная антенна

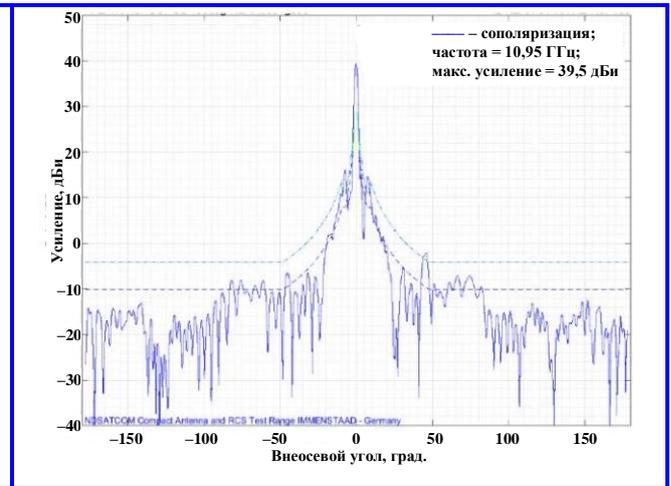


Рис. 2. Диаграмма направленности зеркальной антенны на частоте 10,95 ГГц

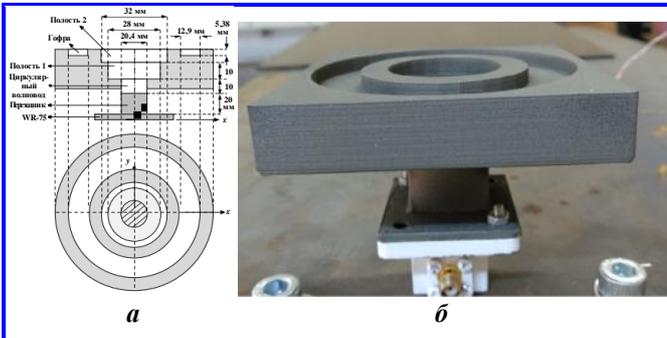


Рис. 3. Строение (а) и внешний вид (б) антенны типа «Бычий глаз»

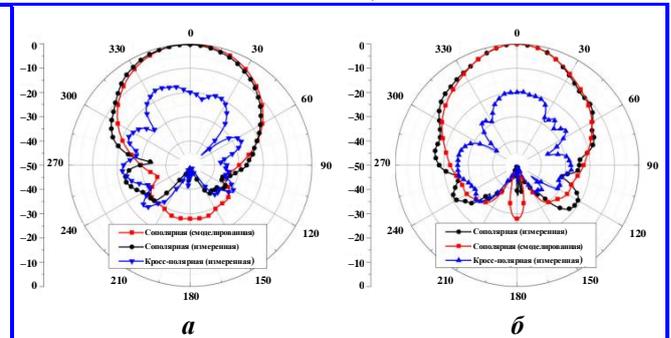


Рис. 4. Диаграмма направленности антенны на частоте 10,5 ГГц в E- (а) и H-плоскостях (б)

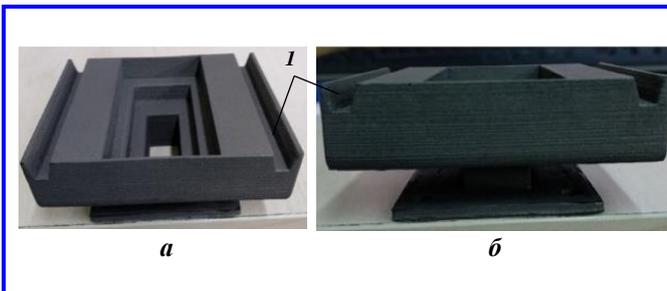


Рис. 5. Внешний вид прототипа антенны с канавкой (1): а – вид сверху; б – вид сбоку

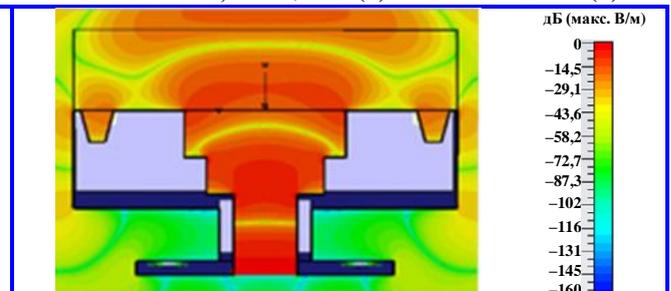


Рис. 6. Распределение электрического поля на частоте 12,5 ГГц в E-плоскости

В работе [5] рассматривается прямоугольная диэлектрическая резонаторная антенна, предназначенная для работы в Ку-диапазоне (рис. 7). Рабочая полоса частот составляет 14,0 – 14,5 ГГц.

На рис. 8 приведена ДН диэлектрического резонатора в E -плоскости. Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r резонатора равна 20. В качестве запитки применена микрополосковая линия, однако питание может подаваться и другими способами: волноводным трактом, коаксиальным кабелем. Плюсом данной антенны является её компактность, простота конструкции, высокая эффективность излучения и возможность управления входным сопротивлением путём изменения соотношения между сторонами резонатора. Кроме того, в данной антенне не возбуждаются поверхностные волны. На сегодняшний день заметное место среди методов построения антенных систем спутниковой связи является применение излучателей, изготовленных по печатной технологии. Это продиктовано неоспоримыми достоинствами, которыми обладают подобные антенны. Во-первых, очередь нельзя не отметить малый вес и размер печатных антенн. Подобные качества очень важны, главным образом для мобильных абонентских терминалов спутниковой связи. Во-вторых, антенные системы, произведенные печатным способом, технологичны – зачастую есть возможность нанести на подложку излучатели и фидерную систему в рамках одной технологической операции. Кроме того, печатные антенны хорошо интегрируются с цифровыми устройствами управления.

В работе [6] представлена печатная многослойная антенна, предназначенная для работы в Ку-диапазоне (рис. 9). Во всей рабочей полосе частот, равной 10,95 – 14,5 ГГц, обеспечивается согласование излучателя и линии передачи: коэффициент стоячей волны (КСВ) меньше 2. Запитка осуществляется через два 50-омных порта (Порт 1 и Порт 2 на рис. 9, б). Изоляция между ними равна –40 дБ. В табл. 1 приведены материалы и основные характеристики слоев антенны.

Антенна обладает двойной ортогональной поляризацией, однако уровень кросс-поляризации удалось понизить до –32 дБ.

На рис. 10 описана плоская антенна, изготовленная по печатной технологии [7]. Её рабочая полоса составляет 1,38 ГГц, от 17,15 до 18,53 ГГц. Антенна выполнена на подложке из стеклотекстолита FR4 толщиной 1,6 мм и относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r , равной 4,6. Питание осуществляется микрополосковой линией с выходным сопротивлением, равным 50 Ом. На рис. 11 приведена фотография печатной антенны.

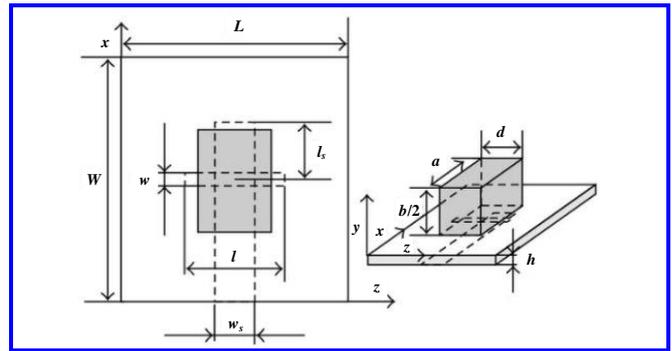


Рис. 7. Структура прямоугольного диэлектрического резонатора $a \times d \times b/2$ и подложки $L \times W$ в трехмерной плоскости x, y, z (l, w – длина и ширина нерезонансной прямоугольной щели; l_s, w_s – длина и ширина микрополосковой линии; h – высота подложки)

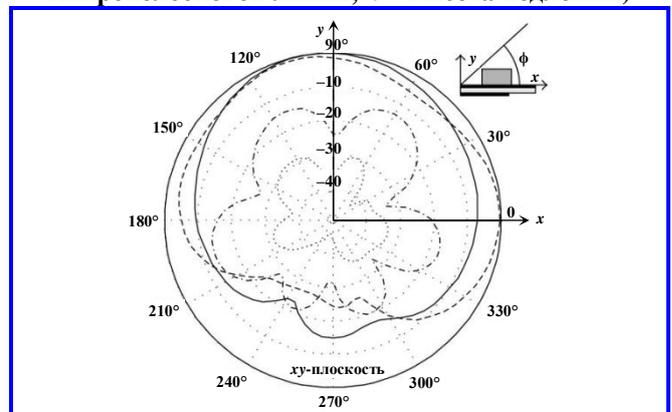


Рис. 8. Диаграмма направленности диэлектрического резонатора в E -плоскости (xy -плоскость)

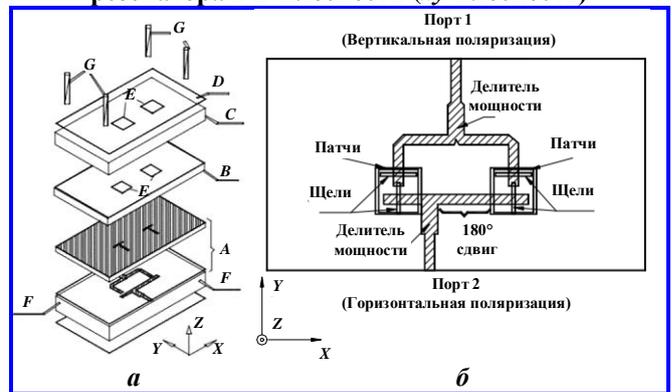


Рис. 9. Послойное строение (а) и схематический вид сверху (б) многослойной микрополосковой антенны с двойной прямой поляризацией: А, В, С, D – диэлектрические слои; Е – патч-резонаторы; F – фидер; G – пластиковые винты

Таблица 1

Параметры слоев				
Слой антенны	Материал	Толщина	ϵ_r	Тангенс угла потерь
A	Duroid 5880	0,508 мм	2,2	0,0009
B	Duroid 5880	0,765 мм	2,2	0,0009
C	Rohacell 51 IG	2,5 мм	1,07	0,001
D	Duroid 5880	0,25 мм	2,2	0,0009

Коэффициент отражения находится на уровне меньше -10 дБ во всем диапазоне рабочих частот, а средний коэффициент усиления составляет 3,89 дБ. В работе [8] представлена трёхдиапазонная антенна, работающая помимо прочего в Ку-диапазоне (рис. 12). Рабочая полоса частот простирается от 5,8 до 18 ГГц. Антенна состоит из двух подложек, выполненных из стеклотекстолита FR4 и прослойки воздуха между ними. На нижнюю подложку нанесен излучающий слой меди размерами $10,44 \times 11,32$ мм, на верхней – располагаются два паразитных излучателя U-образной формы размерами $2,54 \times 3,81$ мм.

Во всем диапазоне частот коэффициент отражения находится на уровне меньше -10 дБ, что соответствует КСВ меньше 2. Максимальный коэффициент усиления равен 11,8 дБ и получен на ча-

стоте 15,97 ГГц. На рис. 13 приведена зависимость коэффициента отражения от частоты.

В работе [9] исследована двухдиапазонная антенна, предназначенная для работы в Ку- и К-диапазонах (рис. 14). Для интересующего нас диапазона рабочая полоса частот составляет 1,07 ГГц: от 14,86 до 15,93 ГГц. Предлагаемая антенна изготавливается на диэлектрической подложке из материала Duroid 5870 и возбуждается микрополосковой линией передачи с сопротивлением 50 Ом. Толщина диэлектрика равна 1,575 мм, а относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r составляет 2,33.

КСВ представленной антенны находится на уровне меньше 2 во всей полосе рабочих частот, а максимальный достигнутый коэффициент усиления составляет 1,87 дБ в Ку-диапазоне. На рис. 15 приведена зависимость КСВ от частоты.

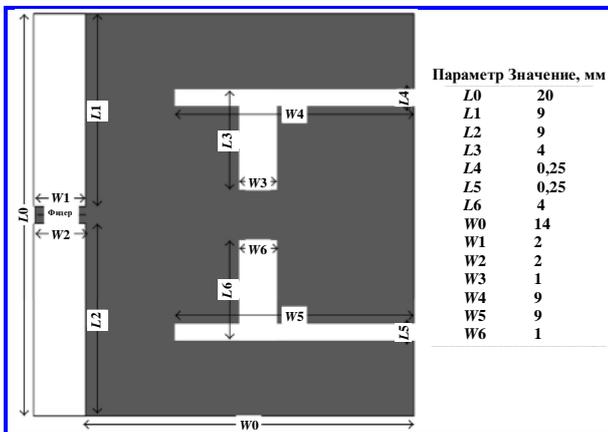


Рис. 10. Геометрия печатной антенны

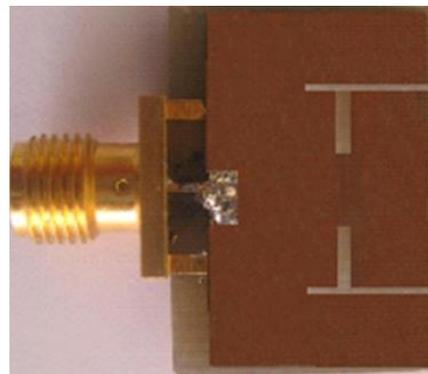


Рис. 11. Прототип печатной антенны

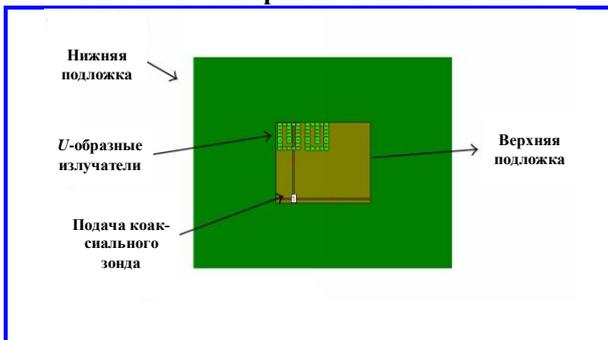


Рис. 12. Расположение элементов трёхдиапазонной антенны

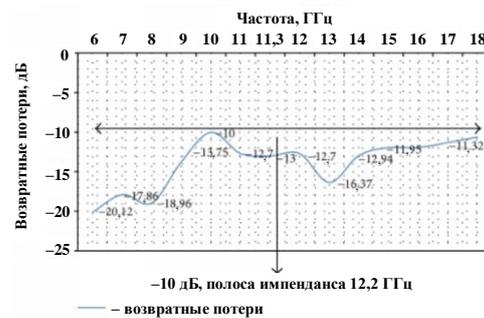


Рис. 13. Зависимость коэффициента отражения от частоты трёхдиапазонной антенны

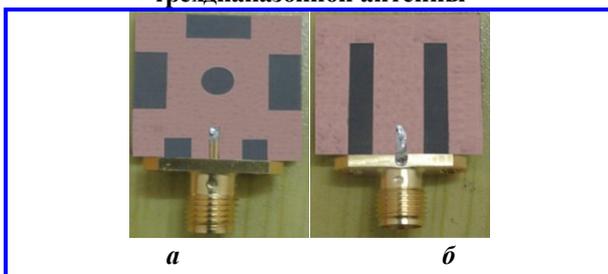


Рис. 14. Двухдиапазонная антенна для работы в Ку- и К-диапазонах: а – вид сверху; б – вид снизу

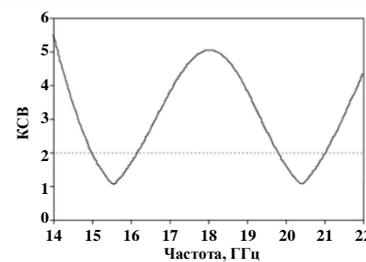


Рис. 15. Зависимость коэффициента стоячей волны двухдиапазонной антенны от частоты

В работе [10] рассматривается миниатюрная антенна, работающая в нескольких диапазонах частот, в том числе и в Ку-диапазоне (рис. 16). Рабочая полоса частот составляет 10,8 ГГц (7,2 – 18 ГГц). Данная антенна изготавливается по печатной технологии на подложке из стеклотекстолита FR4 толщиной 1,6 мм и размерами 10,6 × 10,3 мм (см. рис. 17, а, б).

Антенна состоит из двух квадратных патчей 1 размером 3 × 3 мм и двух трапецевидных фидеров 3 с шириной W_f и длиной s , а пара F-образных дорожек 4 с неодинаковыми плечами расположена в плоскости заземления. В середине патчей находится вырез 2 размерами 2 × 2 мм. На рис. 17 приведены зависимости коэффициента отражения от частоты миниатюрной антенны.

В работе [11] представлена трёхдиапазонная печатная антенна, функционирующая в Ку-диапазоне (рис. 18). Полоса пропускания равняется 490 МГц (10,85 – 11,34 ГГц), 1,36 ГГц (11,65 – 13,01 ГГц) и 1,48 ГГц (13,31 – 14,79 ГГц). Антенна представляет собой подложку из стеклотекстолита FR4 с диэлектрической проницаемостью равной 4,4, на которую нанесён слой металлизации, имеющий форму шести concentрических прямоугольных колец. Питание осуществляется с помощью микрополосковой линии. Во всей рабочей полосе достигнут КСВ меньше 1,5 (рис. 19). Коэффициент усиления равен 7,6, 6,8 и 5,7 дБи на центральных частотах рабочих диапазонов.

В работе [12] исследуется микрополосковая печатная антенна Ку-диапазона (рис. 20). Её полоса пропускания составляет 4,155 ГГц (11,595 – 15,75 ГГц). Излучатель выполнен на подложке из стеклотекстолита FR4 толщиной 1,6 мм, относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r материала составляет 4,3, толщина металлизации равна 0,035 мм. Волновое сопротивление предлагаемого излучателя составляет 50 Ом.

КСВ рассматриваемой антенны меньше 2 во всей рабочей полосе, на частоте 12,54 ГГц он достигает 1,098 (рис. 21), на этой же частоте достигнут максимальный коэффициент усиления, равный 6,31 дБ.

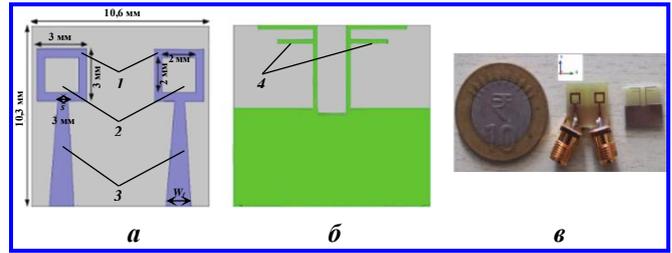


Рис. 16. Геометрия и прототип миниатюрной антенны: а – вид спереди; б – вид сзади; в – изготовленная антенна

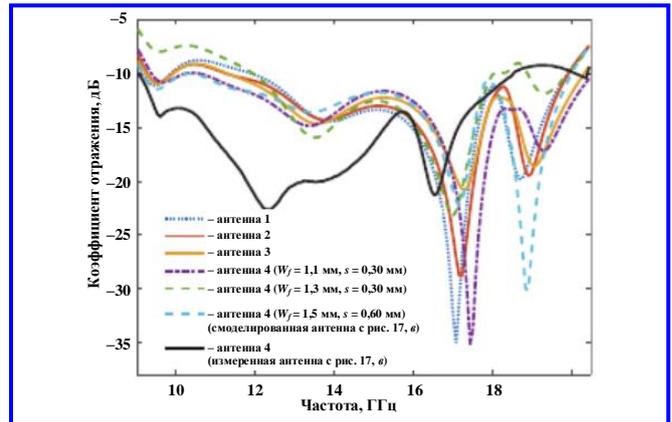


Рис. 17. Зависимости коэффициента отражения миниатюрной антенны от частоты

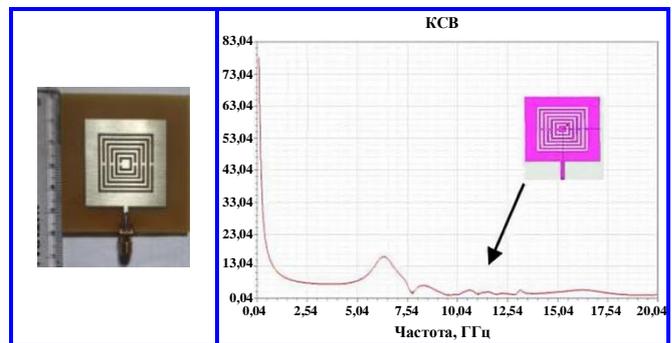


Рис. 18. Фотография трехдиапазонной печатной антенны с шестью кольцами

Рис. 19. График зависимости коэффициента стоячей волны от частоты трехдиапазонной печатной антенны с шестью кольцами

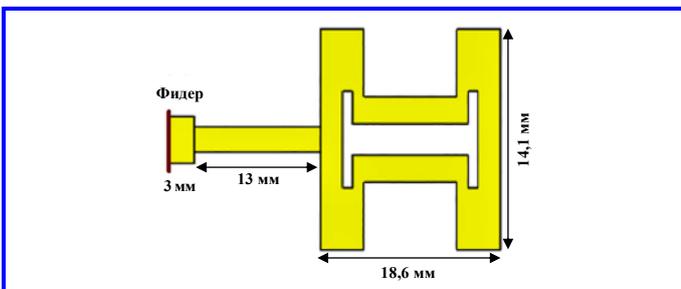


Рис. 20. Графическое изображение и размеры микрополосковой печатной антенны Ку-диапазона

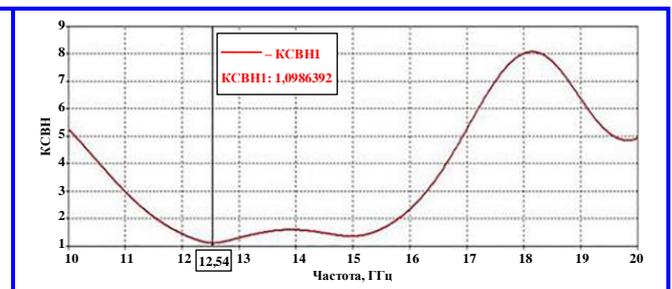


Рис. 21. Зависимость коэффициента стоячей волны микрополосковой печатной антенны от частоты

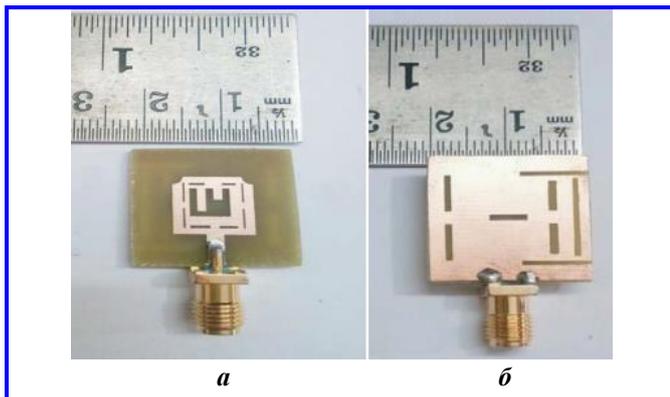


Рис. 22. Фотографии миниатюрной трёхдиапазонной антенны Ку-диапазона: *a* – вид сверху; *б* – вид снизу

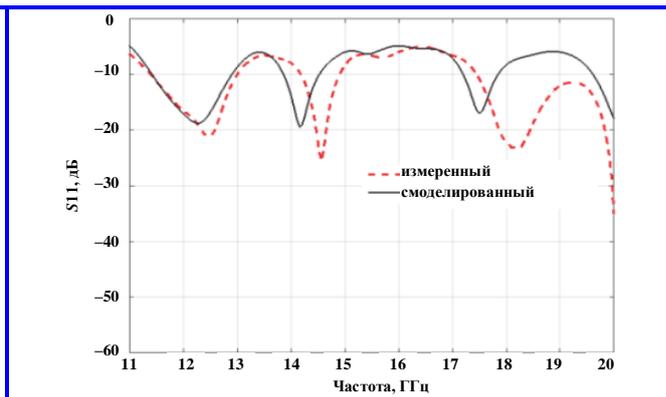


Рис. 23. Коэффициент отражения миниатюрной трёхдиапазонной антенны в зависимости от частоты

В работе [13] представлена миниатюрная трёхдиапазонная антенна Ку-диапазона (рис. 22). Рабочие полосы частот составляют 11,40 – 12,98 ГГц, 14,21 – 14,86 ГГц и 17,41 – 18,98 ГГц. Антенна напечатана на подложке из стеклотекстолита FR4 размерами 20 × 20 × 1,6 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r материала равняется 4,3.

Антенна согласована во всех трёх диапазонах рабочих частот, коэффициент отражения находится на уровне меньше –10 дБ. Наибольший коэффициент усиления равен 5,25 дБ и зафиксирован на частоте в 12 ГГц. На рис. 23 приведены зависимости коэффициента отражения от частоты миниатюрной трёхдиапазонной антенны.

В работе [14] представлена печатная антенна Ку-диапазона (рис. 24) и приведены параметры этого излучателя (табл. 2). Рассмотрены три варианта подложки, состоящие из различных комбинаций таких материалов как стеклотекстолит FR4, Rogers RT/duroid 5870, Rogers RT/duroid 6006 и воздушная прослойка (табл. 3). Их относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r имеет следующие значения: 4,4, 2,33, 6,15, 1,0006 соответственно.

В результате электродинамического моделирования были получены следующие характеристики:

Для варианта 1:

- полоса частот – 363 МГц (14,2700 – 14,6331 ГГц);
- КСВ – 1,28 на частоте 14,4 ГГц;
- коэффициент усиления – 3,81 дБ на частоте 14,4 ГГц.

Для варианта 2:

- полоса частот – 611,3 МГц (14,5426 – 15,1539 ГГц);
- КСВ – 1,10 на частоте 14,9 ГГц;
- коэффициент усиления – 21,84 дБ на частоте 14,9 ГГц.

Для варианта 3:

- полоса частот – 330,9 МГц (16,0206 – 16,3515 ГГц);
- КСВ – 1,33 на частоте 16,2 ГГц;
- коэффициент усиления – 15,73 дБ на частоте 16,2 ГГц.

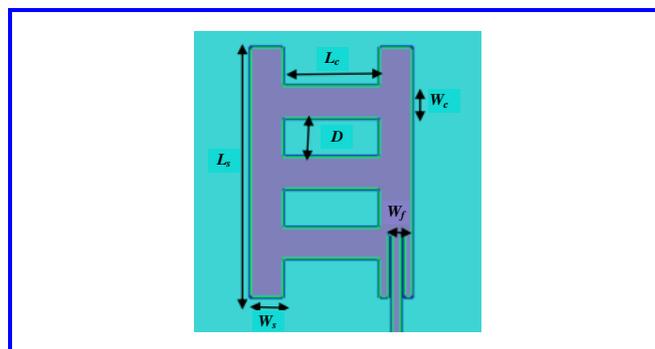


Рис. 24. Геометрия печатной антенны Ку-диапазона

Таблица 2

Значение размеров печатной антенны

Параметр	Описание	Значение, мм
L_s	Длина полосковой линии	7,8
W_s	Ширина полосковой линии	1
L_c	Длина зазора	3
W_c	Ширина полосковой линии	1
D	Ширина зазора	1,2
W_f	Ширина полосковой линии	0,25

Таблица 3

Варианты комбинации материалов подложки печатной антенны Ку-диапазона

Вариант 1:	Стеклотекстолит FR4	1 мм
	Rogers RT/duroid 5870	1 мм
Вариант 2:	Rogers RT/duroid 6006	1,5 мм
	Rogers RT/duroid 5870	1,5 мм
Вариант 3:	Стеклотекстолит FR4	0,75 мм
	Воздушная прослойка	0,5 мм
	Rogers RT/duroid 5870	0,75 мм

В работе [15] рассмотрена широкополосная печатная антенна, способная работать в Ку-диапазоне (рис. 25). Рабочая полоса частот составляет 4,5 – 15 ГГц. Излучатель изготовлен на подложке из диэлектрического материала размерами 21 × 15 мм и толщиной 0,5 мм с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r , равной 1,96.

Во всем диапазоне рабочих частот КСВ находится на уровне меньше 2, что говорит о согласовании антенны и фидерного тракта. Наибольший коэффициент усиления в Ку-диапазоне равен 4,2 дБ и достигается на частоте 13,4 ГГц. На рис. 26 приведена зависимость КСВ широкополосной печатной антенны от частоты.

В работе [16] представлена печатная антенна, работающая в Ку-диапазоне (рис. 27). Излучатель изготовлен на подложке из стеклотекстолита FR4 размерами 30 × 30 мм и толщиной 1 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r подложки составляет 4,7. Излучатель имеет форму окружности радиусом 8,56 мм и запитывается микрополосковой линией шириной 3 мм. Минимальный коэффициент

отражения равен –28,6 дБ, а КСВ – 1,077 на частоте 17,118 ГГц (рис. 28). Наибольший коэффициент усиления составляет 3,23 дБ на частоте 15,6 ГГц.

В работе [17] рассмотрена антенна Ку-диапазона (рис. 29). Рабочая полоса частот составляет 4,155 ГГц (11,595 – 15,75 ГГц). Излучатель напечатан на диэлектрической подложке из материала Teflon (PTFE) размерами 40 × 10 мм и толщиной 0,8 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость материала равна 2,1.

КСВ данной антенны равен 1,098 (рис. 30), а коэффициент усиления равняется 6,9 ГГц, значения получены на частоте 12,54 ГГц

В работе [18] представлена антенна, работающая в Ку-диапазоне (рис. 31). Излучатель напечатан на подложке из стеклотекстолита FR4 толщиной 1,6 мм. Излучатель запитан микрополосковой линией с сопротивлением, равным 50 Ом.

Рабочий диапазон данной антенны составляет 6,75 – 18,96 ГГц, КСВ меньше двух во всей полосе рабочих частот (рис. 32). Наибольший коэффициент усиления равен 7,41 дБ и получен на частоте 17 ГГц.

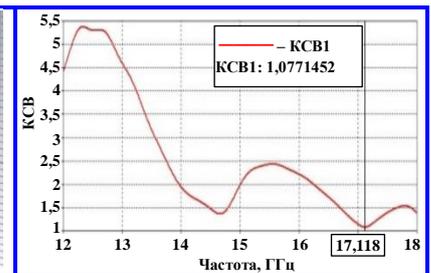
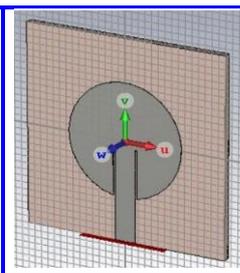
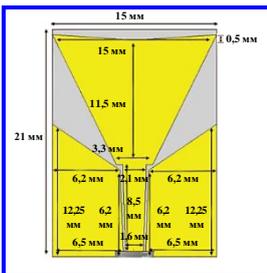


Рис. 25. Геометрия и размеры широкополосной печатной антенны (вид сверху)

Рис. 26. Зависимость коэффициента стоячей волны широкополосной печатной антенны от частоты

Рис. 27. Печатный излучатель в форме окружности

Рис. 28. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты печатного излучателя в форме окружности

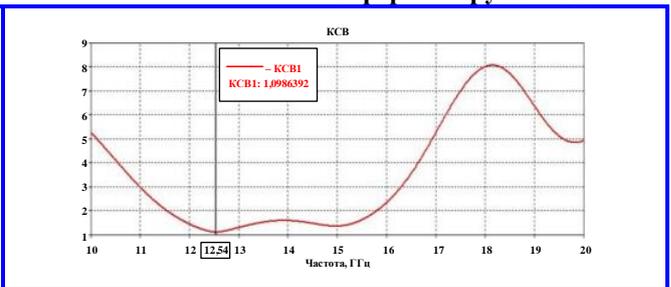
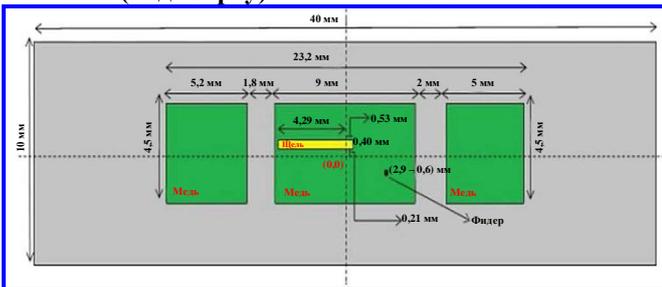


Рис. 29. Геометрия и размеры излучателя на диэлектрической подложке из материала Teflon

Рис. 30. Зависимость коэффициента стоячей волны излучателя на диэлектрической подложке из материала Teflon от частоты

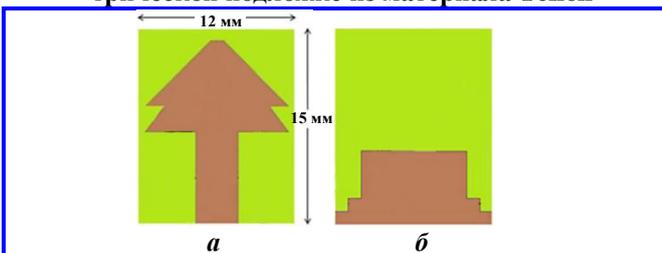


Рис. 31. Печатный излучатель, модифицированный в виде стреловидной накладки: а – вид сверху; б – вид снизу

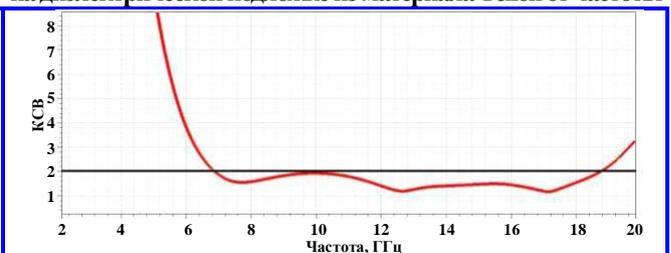


Рис. 32. График коэффициента стоячей волны антенны, модифицированной в виде стреловидной накладки

В работе [19] рассмотрена антенна Ку-диапазона (рис. 33). Она представляет собой излучатель с тремя паразитными излучателями, расположенными на подложке из диэлектрического материала Rgerm L-450 размерами $17 \times 6,4$ мм и толщиной 1,64 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость данного материала равна 4,4. Питание данного излучателя осуществляется коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом.

Рабочий диапазон представленной антенны составляет 12,88 – 17,99 ГГц. Во всей полосе КСВ находится на уровне меньше 2 (рис. 34). Коэффициент усиления равен 7,13 дБ и получен на частоте 15,15 ГГц.

В работе [20] исследован печатный излучатель, предполагающийся для применения в фазированной антенной решетке бортовой спутниковой связи Ку-диапазона (рис. 35). Его полоса рабочих частот составляет 10,75 – 12,75 ГГц, а полоса пропускания равняется 2,05 ГГц.

Антенна имеет два печатных слоя разного размера, которые показаны на рис. 35 зеленым цветом. Это позволяет расширить полосу пропускания. Для представленной антенны заявлен коэффициент усиления, равный 4 дБ, измеренный на частоте 12,7 ГГц. На этой же частоте зафиксирован минимальный коэффициент отражения –14 дБ.

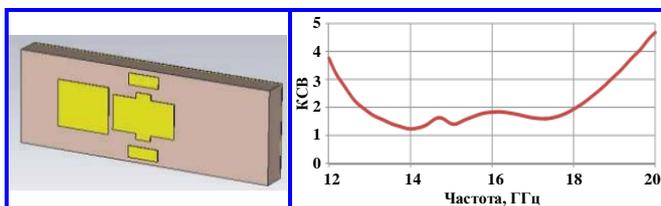


Рис. 33. Антенна с тремя паразитными излучателями

Рис. 34. График зависимости коэффициента стоячей волны от частоты антенны с тремя паразитными излучателями

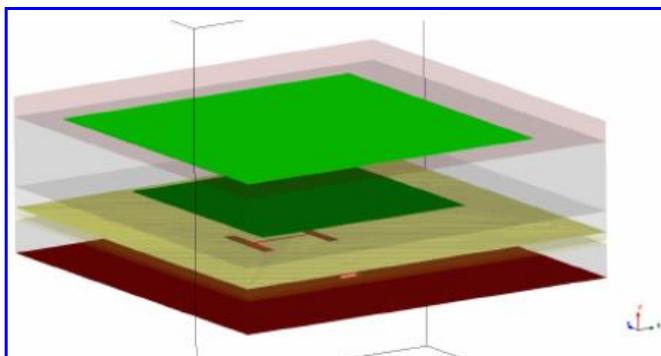


Рис. 35. 3D-изображение антенны с двумя печатными слоями разного размера для применения в фазированной антенной решетке бортовой спутниковой связи Ку-диапазона

Заключение

Приведен обзор зарубежных работ по излучателям, работающим в Ку-диапазоне. Такие антенны находят применение в качестве облучателей зеркальных антенн и элементов антенных решеток спутниковой связи и телевидения. Из приведенного обзора литературы видно, что большая часть рассмотренных антенн выполняется с использованием печатной технологии, что обеспечивает их компактность и технологичность. В статье приведены топологии печатных широкополосных и многодиапазонных антенн.

Литература

1. Устройства СВЧ и антенны : учебник для вузов / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарев; под ред. Д. И. Воскресенского. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва : Радиотехника, 2016. – 560 с. : ил.
2. Lightweight deployable X/Ku-band antenna for land-mobile satellite communication / M. Ploeckl, S. Endler, D. Hartmann [et. al.] // 70th International astronomical congress (IAC). – Washington D.C., United States, 2019. – URL : https://www.researchgate.net/publication/337630766_Lightweight_Deployable_XKu-Band_Antenna_for_Land-Mobile_Satellite_Communication.
3. Ascı Y. Three-dimensional printed wideband, dual-cavity Ku-band antenna / Y. Ascı, K. Yegin // Wiley : International journal of RF and microwave computer-aided engineering. – 2019. – 30 (2). – DOI : 10.1002/mmce.22071. – URL : https://www.researchgate.net/publication/337490475_Three-dimensional_printed_wideband_dual-cavity_Ku-band_antenna.
4. Ascı Y. Additively manufactured trapezoidal grooves for wideband and high gain Ku-band antenna / Y. Ascı, K. Yegin // Wiley : International journal of RF and microwave computer-aided engineering. – 2019. – 30 (167). – DOI : 10.1002/mmce.22089. – URL : https://www.researchgate.net/publication/337892795_Additively_manufactured_trapezoidal_grooves_for_wideband_and_high_gain_Ku-band_antenna.
5. Investigation on harmonic tuning for active Ku-band rectangular dielectric resonator antennas / A. Guraliuc, G. Manara, P. Nepa [et. al.]. – 2008. – Vol. 2008. – DOI : 10.1155/2008/437538. – URL : <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2008/437538/>.
6. Martynyuk S. A novel dual-polarized Ku-band antenna subarray / S. Martynyuk, F. Dubrovka, P. Edenhofer // International conference on mathematical methods in electromagnetic theory. – 2002. – DOI : 10.1109/mmet.2002.1106859.
7. Analysis of a compact wideband slotted antenna for Ku band applications / M. R. Ahsan, M. Habib Ullah, F. Mansor [et. al.] // International journal of antennas and propagation. – 2014. – Vol. 2014. – 6 p. – DOI : [org/10.1155/2014/423495](https://doi.org/10.1155/2014/423495).
8. Triple band parasitic array antenna for C-X-Ku-band application using out-of-phase coupling approach / Anubhuti

- Khare Rajesh Nema // International journal of antennas and propagation. – 2014. – № 2. – DOI : 10.1155/2014/716829. – URL : https://www.researchgate.net/publication/287430012_Triple_Band_Parasitic_Array_Antenna_for_C-X-Ku-Band_Application_Using_Out-of-Phase_Coupling_Approach.
9. Dual-band operation of a microstrip patch antenna on a duroid 5870 substrate for Ku- and K-bands / M. M. Islam, M. T. Islam, M. R. I. Faruque // The scientific world journal. – 2013. – Vol. 2013. – DOI : 10.1155/2013/378420. – URL : <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/378420/>.
10. A miniaturized MIMO antenna for C, X, and Ku band applications / A. K. Singh, S. K. Mahto, R. Sinha // Progress in electromagnetics research C. – 2021. – Vol. 117. – P. 31–40. – DOI : 10.2528/PIERC21100202. – URL : <https://www.jpier.org/issues/volume.html?paper=21100202>.
11. Design and analysis of patch antenna for C, X, Ku band applications / R. Shantha Selvakumari, P. Vishnoo Priyaa // Research square. – 2021. – 9 p. – DOI : 10.21203/rs.3.rs-583592/v1. – URL : https://assets.researchsquare.com/files/rs-583592/v1_covered.pdf?c=1631872079.
12. Design of a microstrip patch antenna for the Ku band applications / M. T. Islam, M. S. Mahmud, M. H. Islam [et. al.] // Materials today: proceedings. – 2021 – Vol. 42. – P. 1502–1505. – DOI : 10.1016/j.matpr.2021.01.445.
13. Kumar R. Compact tri-band patch antenna for Ku band applications / R. Kumar, G. S. Saini, D. Singh // Progress in electromagnetics research C. – 2020. – Vol. 103. – P. 45–58. – DOI : 10.2528/pierc20013101.
14. Ladder shaped patch antenna for Ku band applications / Bahadursha Sessa Sai Maanas, S. Sai Swaroop Reddy, Dr. K. Karunakumari [et. al.] // International journal of engineering research & technology (IJERT). – 2021. – Vol. 10. – Issue 05. – URL : <https://www.ijert.org/research/ladder-shaped-patch-antenna-for-ku-band-applications-IJERTV10IS050185.pdf>.
15. Broadband microstrip antenna for C-band, X-band, and KU-band applications / H. N. Awl, B. A. Karim, Y. I. Abdulkarim [et. al.] // International conference on information and telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo). – DOI : 10.1109/ukrmico47782.2019.916.
16. Design of Ku band microstrip patch antenna array for satellite applications/M. Vamsi Kumar, K. V. Satyanarayana, Addanki Purna Ramesh // International journal of recent technology and engineering. – 2019. – Vol. 8. – Issue 3. – URL : <https://www.ijrte.org/portfolio-item/C6568098319/>.
17. Microstrip patch antenna design for Ku band application / Vijaykumar V. Chodavadiya, Shivani S. Aggarwal // International journal of engineering research & technology (IJERT). – 2014. – Vol. 3. – Issue 4. – 4 p. – URL : <https://www.ijert.org/research/microstrip-patch-antenna-design-for-ku-band-application-IJERTV3IS041867.pdf>.
18. Design of arrow shaped microstrip patch antenna for X and Ku band applications / Yuvaraj. D., Nageswara Rao M. V., Shanmuga Priya P. [et. al.] // ECS Transactions. – 2022. – Vol. 107. – Number 1. – DOI : 10.1149/10701.12901ecst. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/10701.12901ecst/pdf>.
19. Bandwidth enhancement of patch antenna through various techniques for Ku-band application / Gulzar Ahmad, M. Inayatullah Babar, M. Irfan [et. al.] // Proceedings of the pakistan academy of sciences ; Pakistan academy of sciences A. Physical and computational sciences. – 2018. – Vol. 55 (1). – P. 109–116. – URL : <https://www.paspk.org/wp-content/uploads/2018/05/Bandwidth-Enhancement-of-Patch-Antenna.pdf>.
20. Development of a broadband stacked patch antenna element for Ku-band phased array antenna / A. Hulzinga, J. Verpoorte, N. V. Venkatarayalu [et. al.] // 34th ESA Antenna Workshop. – 2012. – 7 p. – URL : https://www.researchgate.net/publication/331064173_Development_of_a_broadband_stacked_patch_antenna_element_for_Ku-band_phased_array_antenna.

Поступила в редакцию 12.04.2023

Артеми́й Лазаре́вич Пола́ндов, студент, т. +7 (962) 008-68-79, e-mail: dobro-pobedit-z@yandex.ru.
(Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (АО «НПО Лавочкина»)).
Антон Иосифович Гиголо, кандидат технических наук, доцент, т. +7(905)703-38-65, e-mail: gigolo_ai@mail.ru.
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ)).
Фам Ван Винь, кандидат технических наук, т. +84 93 462 45 87, e-mail: phamvinh1609@gmail.com.
(Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона).

FEEDERS OF REFLECTOR ANTENNAS AND ELEMENTS OF ANTENNA ARRAYS OF SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

A. L. Polandov, A. I. Gigolo, Pham Van Vinh

The article provides an overview of the works devoted to the study of the characteristics of weakly directional antennas operating in the Ku-band. The irradiators of mirror antennas are considered. The parameters of the antennas are given. The description of structures and materials is given. The peculiarities of the operation of ground-based stationary antenna systems and antenna systems installed on mobile carriers are noted. The results of modeling and the results of an experimental study of antenna characteristics are presented. Antennas operating in a wide frequency band of 8–17 GHz are considered. The designs of antennas made using microstrip technology and electroplating technology are given. A rectangular dielectric resonator antenna is considered and its directional characteristics are shown. The design of a mul-

tilayer printed radiator with the parameters of the substrates of its layers is given. The designs of two- and three-band microstrip antennas are considered.

Keywords: feeds of parabolic reflector antennas, weakly directional radiators, Ku-band antennas, microstrip antennas, multilayer printed radiators, dielectric resonator antennas, electroforming technology.

References

1. Microwave devices and antennas : textbook for universities / D. I. Voskresenskiy, V. L. Gostyukhin, V. M. Maksimov, L. I. Ponomaryov; edited by D. I. Voskresenskiy. – 4th edition, corrected and updated. – Moscow : Radiotekhnika, 2016. – 560 p. : with figures.
2. Lightweight deployable X/Ku-band antenna for land-mobile satellite communication / M. Ploeckl, S. Endler, D. Hartmann [et. al.] // 70th International astronomical congress (IAC). – Washington D.C., United States, 2019. – URL : https://www.researchgate.net/publication/337630766_Lightweight_Deployable_XKu-Band_Antenna_for_Land-Mobile_Satellite_Communication.
3. Asci Y. Three-dimensional printed wideband, dual-cavity Ku-band antenna / Y. Asci, K. Yegin // Wiley : International journal of RF and microwave computer-aided engineering. – 2019. – 30 (2). – DOI : 10.1002/mmce.22071. – URL : https://www.researchgate.net/publication/337490475_Three-dimensional_printed_wideband_dual-cavity_Ku-band_antenna.
4. Asci Y. Additively manufactured trapezoidal grooves for wideband and high gain Ku-band antenna / Y. Asci, K. Yegin // Wiley : International journal of RF and microwave computer-aided engineering. – 2019. – 30 (167). – DOI : 10.1002/mmce.22089. – URL : https://www.researchgate.net/publication/337892795_Additively_manufactured_trapezoidal_grooves_for_wideband_and_high_gain_Ku-band_antenna.
5. Investigation on harmonic tuning for active Ku-band rectangular dielectric resonator antennas / A. Guraliuc, G. Manara, P. Nepa [et. al.]. – 2008. – Vol. 2008. – DOI : 10.1155/2008/437538. – URL : <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2008/437538/>.
6. Martynyuk S. A novel dual-polarized Ku-band antenna subarray / S. Martynyuk, F. Dubrovka, P. Edenhofer // International conference on mathematical methods in electromagnetic theory. – 2002. – DOI : 10.1109/mmet.2002.1106859.
7. Analysis of a compact wideband slotted antenna for Ku band applications / M. R. Ahsan, M. Habib Ullah, F. Mansoor [et. al.] // International journal of antennas and propagation. – 2014. – Vol. 2014. – 6 p. – DOI : 10.1155/2014/423495.
8. Triple band parasitic array antenna for C-X-Ku-band application using out-of-phase coupling approach / Anubhuti Khare Rajesh Nema // International journal of antennas and propagation. – 2014. – No. 2. – DOI : 10.1155/2014/716829. – URL : https://www.researchgate.net/publication/287430012_Triple_Band_Parasitic_Array_Antenna_for_C-X-Ku-Band_Application_Using_Out-of-Phase_Coupling_Approach.
9. Dual-band operation of a microstrip patch antenna on a duroid 5870 substrate for Ku- and K-bands / M. M. Islam, M. T. Islam, M. R. I. Faruque // The scientific world journal. – 2013. – Vol. 2013. – DOI : 10.1155/2013/378420. – URL : <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/378420/>.
10. A miniaturized MIMO antenna for C, X, and Ku band applications / A. K. Singh, S. K. Mahto, R. Sinha // Progress in electromagnetics research C. – 2021. – Vol. 117. – P. 31 – 40. – DOI : 10.2528/PIERC21100202. – URL : <https://www.jpier.org/issues/volume.html?paper=21100202>.
11. Design and analysis of patch antenna for C, X, Ku band applications / R. Shantha Selvakumari, P. Vishnoo Priyaa // Research square. – 2021. – 9 p. – DOI : 10.21203/rs.3.rs-583592/v1. – URL : https://assets.researchsquare.com/files/rs-583592/v1_covered.pdf?c=1631872079.
12. Design of a microstrip patch antenna for the Ku band applications / M. T. Islam, M. S. Mahmud, M. H. Islam [et. al.] // Materials today: proceedings. – 2021 – Vol. 42. – P. 1502 – 1505. – DOI : 10.1016/j.matpr.2021.01.445.
13. Kumar R. Compact tri-band patch antenna for Ku band applications / R. Kumar, G. S. Saini, D. Singh // Progress in electromagnetics research C. – 2020. – Vol. 103. – P. 45 – 58. – DOI : 10.2528/pierc20013101.
14. Ladder shaped patch antenna for Ku band applications / Bahadursha Sessa Sai Maanas, S. Sai Swaroop Reddy, Dr. K. Karunakumari [et. al.] // International journal of engineering research & technology (IJERT). – 2021. – Vol. 10. – Issue 05. – URL : <https://www.ijert.org/research/ladder-shaped-patch-antenna-for-ku-band-applications-IJERTV10IS050185.pdf>.
15. Broadband microstrip antenna for C-band, X-band, and KU-band applications / H. N. Awl, B. A. Karim, Y. I. Abdulkarim [et. al.] // International conference on information and telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo). – DOI : 10.1109/ukrmico47782.2019.916.
16. Design of Ku band microstrip patch antenna array for satellite applications/M. Vamsi Kumar, K. V. Satyanarayana, Addanki Purna Ramesh // International journal of recent technology and engineering. – 2019. – Vol. 8. – Issue 3. – URL : <https://www.ijrte.org/portfolio-item/C6568098319/>.
17. Microstrip patch antenna design for Ku band application / Vijaykumar V. Chodavadiya, Shivani S. Aggarwal // International journal of engineering research & technology (IJERT). – 2014. – Vol. 3. – Issue 4. – 4 p. – URL : <https://www.ijert.org/research/microstrip-patch-antenna-design-for-ku-band-application-IJERTV3IS041867.pdf>.
18. Design of arrow shaped microstrip patch antenna for X and Ku band applications / Yuvaraj. D., Nageswara Rao M. V., Shanmuga Priya P. [et. al.] // ECS Transactions. – 2022. – Vol. 107. – Number 1. – DOI : 10.1149/10701.12901ecst. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/10701.12901ecst/pdf>.

19. Bandwidth enhancement of patch antenna through various techniques for Ku-band application / Gulzar Ahmad, M. Inayatullah Babar, M. Irfan [et. al.] // Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences ; Pakistan Academy of Sciences A. Physical and Computational Sciences. – 2018. – Vol. 55 (1). – P. 109–116. – URL : <https://www.paspk.org/wp-content/uploads/2018/05/Bandwidth-Enhancement-of-Patch-Antenna.pdf>.
20. Development of a broadband stacked patch antenna element for Ku-band phased array antenna / A. Hulzinga, J. Verpoorte, N. V. Venkatarayalu [et. al.] // 34th ESA Antenna Workshop. – 2012. – 7 p. – URL : https://www.researchgate.net/publication/331064173_Development_of_a_broadband_stacked_patch_antenna_element_for_Ku-band_phased_array_antenna.

Artemiy Lazarevich Polandov, Student, tel.: +7 (962) 008-68-79, e-mail: dobro-pobedit-z@yandex.ru.
(Joint Stock Company 'Lavochkin Research and Production Association' (JSC NPO Lavochkin)).

Anton Iosifovich Gigolo, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor,
tel.: +7 (905) 703-38-65, e-mail: gigolo_ai@mail.ru.

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

Pham Van Vinh, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),
tel.: +84 93 462 45 87, e-mail: phamvinh1609@gmail.com.

(Le Quy Don Technical University).