

## МНОГОДИАПАЗОННЫЕ АНТЕННЫ

Е. В. Овчинникова, М. А. Соков, С. Г. Кондратьева,  
П. А. Шмачилин, Нгуен Динь То

*Приведен обзор работ, посвященных исследованию характеристик многодиапазонных антенн, применяемых в телекоммуникационных и радиолокационных системах, на основе которого проведена систематизация публикаций в соответствии с назначением многодиапазонных антенн, типом элементов, числом совмещаемых диапазонов и их частот и технологией изготовления антенн. Рассмотрены конструкции двух-, трех- и четырехдиапазонных совмещенных, с гофрированным рупором и многопрофильных антенн. Приведено описание низкопрофильных микрополосковых антенн, в том числе антенн с применением PIN- и варакторных диодов, имеющих широкое применение в системах связи, особенно в сотовой телефонии. Отмечены основные достоинства и недостатки многодиапазонных антенн. Их использование в зависимости от типа и применения позволяет уменьшить количество бортовых антенн информационных и навигационных систем, увеличить число каналов, улучшить энергетические характеристики, увеличить пропускную способность антенн и их помехозащищенность и т.д.*

**Ключевые слова:** антенные системы спутникового телевидения, многодиапазонные антенны, совмещенные облучатели зеркальных антенн, низкопрофильные микрополосковые антенны.

### Введение

Многодиапазонные антенны находят широкое применение в различных отраслях радиотехники. Совмещенные облучатели зеркальных антенн (ЗА) С- и Ku-диапазонов, а также L-, С- и Ku-диапазонов используются в системах спутникового телевидения и спутниковой связи. Применение многодиапазонных антенн в системах спутникового телевидения позволяет увеличить число каналов. Совмещенные многодиапазонные облучатели ЗА наземного сегмента систем спутниковой связи работают в X-/Ku-, C-/X-/Ku- и C-/X-/Ku-/Ka-диапазонах. Применение многодиапазонных антенн позволяет улучшить энергетические характеристики. В системах беспроводной связи также возникает необходимость совмещения нескольких диапазонов частот в одной антенне. Для этой цели разработаны различные конструкции многодиапазонных низкопрофильных печатных антенн [1 – 10]. Такие антенны находят широкое применение и в системах связи, устанавливаемых на мобильных объектах, что позволяет уменьшить количество бортовых антенн информационных и навигационных систем. Такие антенны позволяют эффективно использовать поверхность носителя для размещения бортовой аппаратуры и обладают хорошими массогабаритными характеристиками. Широкополосные и многодиапазонные печатные антенны востребованы также в системах сотовой связи.

Цель работы – подбор, систематизация и аналитический обзор статей, посвященных разработке многодиапазонных антенн различного назначения.

### Совмещенные облучатели зеркальных антенн систем спутниковой связи и телевидения

Большая часть действующих геостационарных спутниковых систем работают в диапазонах L, S, C и Ku [5 – 9]. В телевизионных системах применяется поляризационная развязка каналов. Антенны Ku-

диапазона работают на двух линейных поляризациях: вертикальной – V и горизонтальной – H. В других диапазонах используются две круговые поляризации: правая – R и левая – L. Для приема телевизионных программ со спутника традиционно применяются параболические ЗА [8]. Поэтому перспективным направлением является разработка совмещенных многодиапазонных облучателей ЗА. В настоящее время имеется значительное число работ по совмещенным многодиапазонным антеннам [9].

В работе [9] приведена конструкция совмещенного C-/Ku-облучателя, оснащенного преобразователем поляризации, показанная на рис. 1.

Развязка между входами R- и L-поляризаций совмещенного облучателя составляет от –15 ... –18 дБ. Коэффициент эллиптичности менее 2 дБ.

Другая конструкция совмещенного излучателя C- и Ku-диапазонов, применяемого в радиометрической системе, показана на рис. 2 [10]. Здесь облучатель



Рис. 1. Фотография совмещенного C-/Ku-облучателя

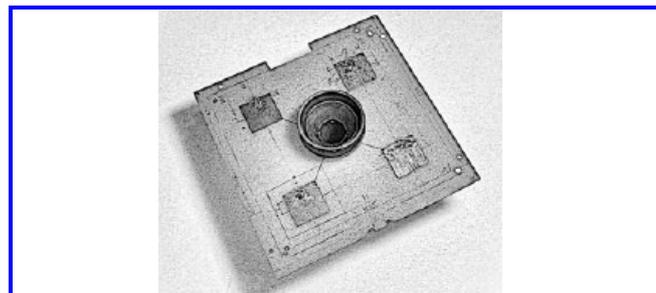


Рис. 2. Вариант исполнения совмещенного C-/Ku-облучателя

С-диапазона представляет собой печатную антенную систему, состоящую из четырех элементов. Рупорный облучатель Ку-диапазона находится в центре печатной платы.

В статье [11] рассматриваются двух-, трех- и четырехдиапазонные гофрированные рупоры, применяемые в составе многодиапазонных зеркальных антенн (МЗА) систем спутниковой связи. Общий вид гофрированного рупора показан на рис. 3. Такой облучатель позволяет совместить следующие диапазоны частот: С-/Ку-диапазоны; Х-/Ку-диапазоны; С-/Х-/Ку-диапазоны; С-/Х-/Ку-/Ка-диапазоны.

Наличие большого числа варьируемых параметров облучателя, в частности угла раскрытия и длины рупора, числа вставок и параметров канавок во вставках, позволяет обеспечить низкий уровень коэффициента стоячей волны по напряжению в требуемых полосах частот при различных сочетаниях совмещаемых диапазонов, что дает возможность максимизировать шумовую добротность МЗА в каждом диапазоне частот [11].

Использование единой антенной системы спутникового телевидения для приема сигналов в С-диапазоне (3,4 – 4,2 ГГц) и Ку-диапазоне (10,5 – 12,75 ГГц) дает возможность без существенных затрат увеличить число программ, принимаемых индивидуальными приемными установками [12]. Для передачи сигналов в С-диапазоне используются электромагнитные волны с круговой поляризацией (правой и левой). В Ку-диапазоне электромагнитные волны имеют линейную поляризацию. На рис. 4 приведена фотография совмещенного двухдиапазонного облучателя ЗА, предназначенной для приема программ в С- и Ку-диапазоне.

Основой конструкции совмещенного С-/Ку-облучателя является круглый волновод С-диапазона. Облучатель снабжен прямоугольным фланцем (конструктив СРР 229, сечение волновода  $46 \times 29$  мм). Крепление фланца – регулируемое, что позволяет установить его относительно волновода облучателя в одно из двух возможных положений. Возможность регулировки положения фланца относительно облучателя позволяет настроить изделие на прием сигнала с заданной поляризацией (правой или левой). Изготовитель по умолчанию поставляет облучатель для приема сигнала с левой круговой поляризацией. Для приема сигналов с правой поляризацией необходимо развернуть фланец на  $90^\circ$  относительно его первоначального положения, предварительно отвернув фиксирующие винты, а затем завернув их в новом положении фланца. Сбоку к волноводу С-диапазона на

расстоянии 53 мм от прямоугольного фланца присоединен круглый волновод Ку-диапазона, заканчивающийся фланцем С-120. Угол между направлениями осей волновода Ку-диапазона и короткой стороной прямоугольного окна во фланце С-диапазона составляет  $45^\circ$ .

Внутри круглого волновода С-диапазона, показанного на рис. 5, между раскрытием облучателя и прямоугольным фланцем, расположена металлодиэлектрическая пластина деполаризатора, имеющая форму эллипса.

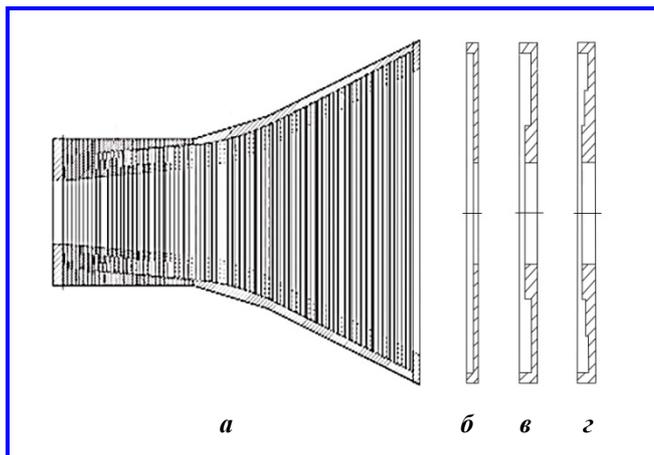


Рис. 3. Гофрированный рупор: а – общая структура рупора; б, в, з – вставки с одно-, двух- и трехступенчатыми канавками соответственно

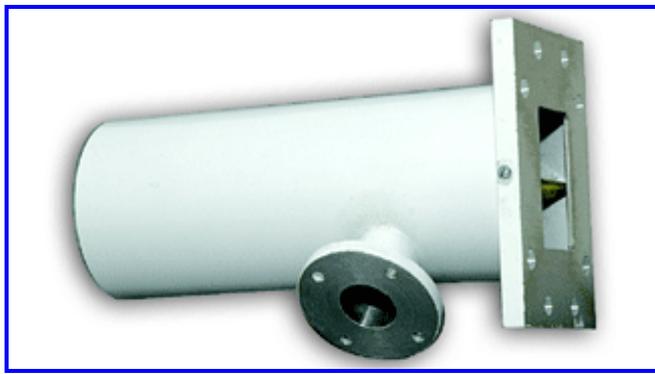


Рис. 4. Фотография совмещенного С-/Ку-облучателя

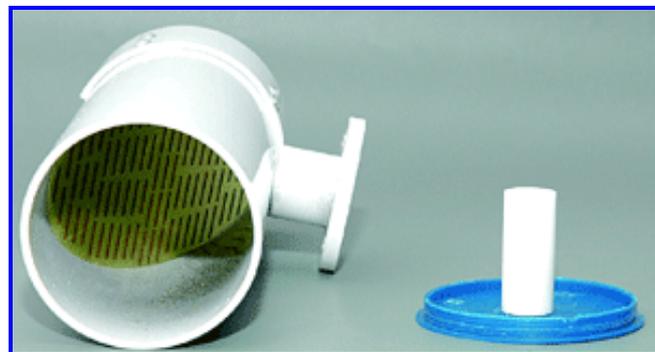
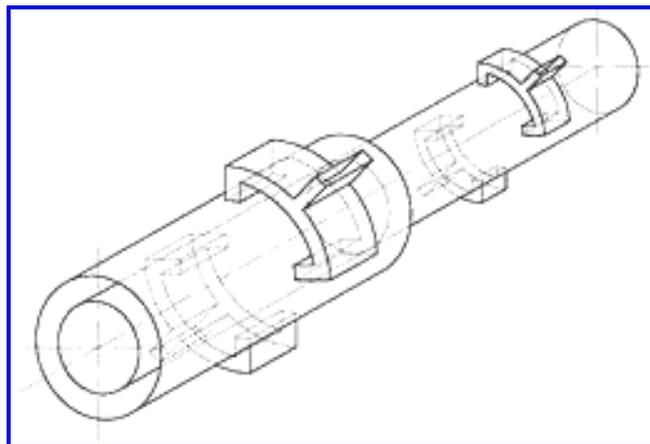


Рис. 5. Фотография излучателя С-диапазона с деполаризатором

Пластина деполяризатора приклеена к стенке круглого волновода. Между раскрытом облучателе и пластиной деполяризатора имеется регулярный участок волновода С-диапазона. Угол между направлением оси С-волновода и плоскостью пластины составляет примерно  $21,5^\circ$ . Пластина деполяризатора изготовлена из тонкого диэлектрика, на который печатным способом нанесена густая сетка полосковых элементов, являющихся резонансными диполями, настроенными на частоту Ку-диапазона. Для достижения стабильности параметров деполяризатора поверхность металлодиэлектрической пластины покрыта защитным лаком. Деполяризатор содержит решетку из 25 рядов диполей, общее число диполей равно 87. На участке С-волновода между деполяризатором и прямоугольным окном фланца расположена металлодиэлектрическая согласующая пластина перехода. Диполи ориентированы перпендикулярно оси круглого волновода С-диапазона и под углом  $45^\circ$  по отношению к вектору электрического поля волны С-диапазона в месте расположения пластины перехода. В С-диапазоне количество и расположение диполей обеспечивает внесение дифференциального фазового сдвига в  $90^\circ$  в составляющую волны, параллельную диполям. Составляющая волны, перпендикулярная диполям, не претерпевает замедления. Таким образом, после деполяризатора формируется волна с линейной поляризацией, вектор электрического поля которой ориентирован вдоль короткой стороны прямоугольного окна выходного волновода С-диапазона.

В Ку-диапазоне пластина деполяризатора играет роль селективного экрана. Хорошая отражательная способность этого экрана обусловлена достаточно плотным расположением резонансных полосковых диполей. Волна Ку-диапазона распространяется по плавному переходу, образованному пластиной деполяризатора и стенкой круглого волновода С-диапазона. Вектор электрического поля волны Ку-диапазона параллелен диполям. Таким образом, в выходном Ку-волноводе присутствует только одна из двух линейных поляризаций подающей волны. Для приема сигналов с другой линейной поляризацией необходимо повернуть корпус совмещенного волновода, вращая его в рефлекторе, на  $90^\circ$ . На принимаемый в С-диапазоне сигнал с круговой поляризацией это действие влияния не оказывает.

Четырехдиапазонный облучатель ЗА на основе всеполяризованного селектора (ВПС) рассмотрен в работе [13]. Он представляет собой коаксиальное соединение секций ВПС, где размеры круглого (внутреннего) и коаксиального волноводов выбраны из условий распространения в них



**Рис. 6. Четырехдиапазонный облучатель зеркальной антенны**

основной волны  $H_{11}$ . Применение облучателя того или иного типа (последовательного, параллельного либо смешанного) определяется конструктивными особенностями ЗА в целом, допускающей увеличение (уменьшение) размера облучателя в длину или ширину. Конструкция облучателя показана на рис. 6.

В этой же статье приведена методика расчета такого облучателя и определены его характеристики направленности. Проведенные исследования показали, что при заданных рабочих диапазонах частот (разноса между ними) обеспечение одинаковой ширины главного лепестка диаграммы направленности возможно путем выбора соответствующей схемы построения многофункционального облучателя, принятия мер для выравнивания в Е- и Н-плоскостях и минимизации уровня боковых лепестков и кросс-поляризационной составляющей. Применение многофункциональных облучателей в ЗА многоканальных многодиапазонных систем радиосвязи наземного и спутникового базирования обеспечивает увеличение их пропускной способности и помехозащищенность.

### **Многодиапазонные низкопрофильные печатные антенны**

В системах связи широкое применение находят многодиапазонные микрополосковые антенны. В работах [14 – 16] представлены конструкции и характеристики двух- и трехдиапазонных печатных антенн сотовых телефонов. Модель антенны приведена на рис. 7, а ее параметры в таблице.

Такие излучатели позволяют совместить следующие частотные диапазоны: GSM 1900 (1850 – 1990 МГц), WiMAX (2,5 – 2,69 ГГц) и WiMAX (3,3 – 3,5 ГГц).

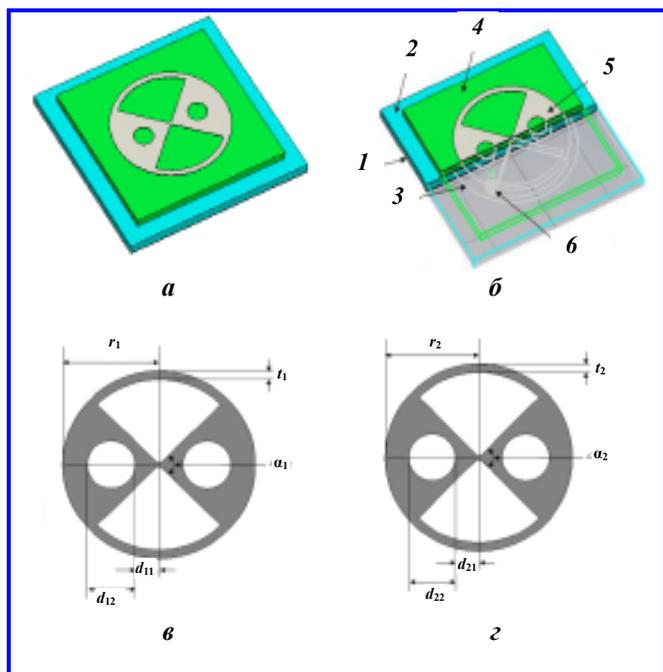


Рис. 7. Печатная антенна: а – общий вид; б – продольный разрез структуры, где 1 – экран; 2 – первый диэлектрик; 3 – первая бабочка; 4 – второй диэлектрик; 5 – вторая бабочка; 6 – коаксиальное питание; размеры первой (с) и второй бабочек (д)

Таблица

Диэлектрики		Бабочки									
1-й	2-й	1-ая					2-ая				
60 × 60 × 3 мм	50 × 50 × 2,5 мм	r <sub>1</sub> мм	d <sub>11</sub> мм	d <sub>12</sub> мм	α <sub>1</sub> град	t <sub>1</sub> мм	r <sub>2</sub> мм	d <sub>21</sub> мм	d <sub>22</sub> мм	α <sub>2</sub> град	t <sub>2</sub> мм
		20,3	6,77	6,77	90	2	18,26	0,76	0,07	90	1,8

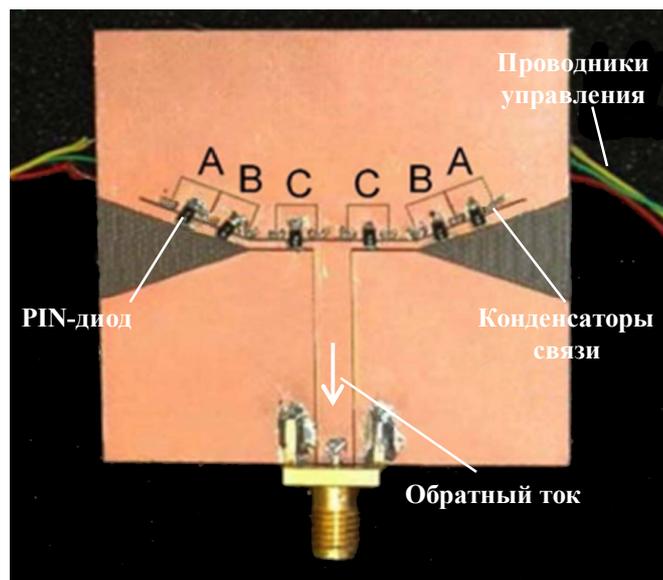


Рис. 8. Пример планарной монополярной антенны с PIN-диодами

С расширением функций сотовой телефонии возникла необходимость совмещения большего числа диапазонов при сохранении компактности и технологичности антенн. Антенны сотового телефона также должны поддерживать несколько стандартов беспроводной связи, включая GSM 850/900 и DCS/PCS/WCDMA. Кроме того, стандарт LTE в последнее время стал одной из ключевых технологий для мобильных услуг беспроводной связи, так как он обеспечивает более высокую пропускную способность системы и максимальную скорость передачи данных [17].

Для перестройки полосы запыриания сверхширокополосных антенн чаще всего применяют PIN-диоды и варакторные диоды. Идея использования PIN-диодов заключается в создании альтернативных путей для токов на резонансной частоте того элемента, куда встраивают навесной PIN-диод. Как правило, такими элементами выступают щели.

Идея использования варакторных диодов заключается во введении реактивной емкостной составляющей в место максимума напряженности поля на резонансной частоте элемента, реализующего полосу запыриания. Также в последнее время, с развитием технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), применяют МЭМС-ключи и конденсаторы на основе МЭМС.

Пример использования PIN-диодов для перестройки полосы запыриания планарной монополярной антенны изображен на рис. 8.

Антенна содержит шесть PIN-диодов, интегрированных в щель, реализующую полосу запыриания, диоды задействуют попарно: А – А, В – В, С – С.

### Выводы

В статье собраны и проанализированы современные публикации по многодиапазонным антеннам. Актуальность темы подтверждается широким применением таких антенн во многих отраслях радиотехники. Выделены различные типы (совмещенные облучатели, с гофрированным рупором, низкопрофильные печатные антенны...) и области применения многодиапазонных антенн (спутниковое телевидение и спутниковая связь, в том числе на мобильных объектах и в системах сотовой связи). Отмечены достоинства и недостатки в зависимости от назначения. Так применение многодиапазонных антенн на мобильных объектах позволяет уменьшить количество бортовых антенн информационных и навигационных систем, а в системах спутникового телевидения – увеличить число каналов, а также улучшить энергетические характеристики, увеличить их пропускную способность и

помехозащищенность. По числу совмещаемых диапазонов были рассмотрены двух-, трех- и четырехдиапазонные антенны, а также приведены частоты этих диапазонов. Количество диапазонов и частоты также зависят от назначения и области применения антенн. Необходимость совмещения большего числа диапазонов в сотовой телефонии привело к идее применения PIN- и варакторных диодов.

### Литература

1. Design of microstrip antennas for dual-frequency on-board transmitter «Mayak 150/400» / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // CriMiCo 2013-2013. 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Conference Proceedings. – 2013. – С. 582 – 583.
2. Разработка модели двухчастотной микрополосковой антенны для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера» / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. – Т. 141. – № 4. – С. 23 – 26.
3. Патент на полезную модель № 162204 U1 Российская Федерация, МПК H01Q 1/38. Многодиапазонная микрополосковая антенна : № 2015139120/28 : заявл. 07.09.2015 : опублик. 27.05.2016 / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев. – 13 с.
4. Многодиапазонная микрополосковая антенна / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 160. – С. 37 – 44.
5. Двухдиапазонная микрополосковая антенная решётка системы спутникового телевидения / Ф. В. Винь, Э. В. Гаджиев, О. В. Васильев [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 161. – № 6. – С. 12 – 16.
6. Двухдиапазонные и широкополосные антенны телекоммуникационных систем / Е. В. Овчинникова, В. В. Фам, С. Г. Кондратьева [и др.] // VII Всероссийские Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской научной конференции : сборник. – 2017. – С. 330 – 338.
7. A Compact Multiple Band-Notched Planer Antenna with Enhanced Bandwidth Using Parasitic Strip Lumped Capacitors and DGS Technique / A. Boutejdar, A. A. Ibrahim, E. P. Burte // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2015. – Vol. 13. – № 2. – P. 203 – 208. – DOI : 10.11591/telkomnika.v13i2.6976.
8. Study of CPW-Fed Slot Antenna for UWB Application / P. Tendolkar, A. Shah, A. Jeyakumar // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. – 2015. – Vol. 3. – № 4. – P. 2826 – 2830 – DOI:10.15680/IJIRCCSE.2015.0304023.
9. A Dual Broadband MIMO Antenna System for GSM/UMTS/LTE and WLAN Handsets / X. Zhou, X. Quan, Li. A. Rong Lin // IEEE Antennas and Wireless Propagation. – 2012. – Vol. 11. – P. 551 – 554. – DOI:10.1109/LAWP.2012.2199459.
10. Разработка многодиапазонного СВЧ-радиометрического картирующего комплекса для БПЛА на базе тороидальной антенны / О. А. Герасимов, Д. В. Дроздов, Ю. В. Рыбаков // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». – Муром, 2020. – С. 285 – 291.
11. Построение облучателей многодиапазонных зеркальных антенн систем спутниковой связи / Д. Д. Габриэлян, В. И. Демченко, А. Е. Коровкин [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Т. 4. – Вып. 1. – С. 40 – 45.
12. Алешин Г. Испытания совмещенных С/Ку-облучателей спутниковых антенн / Г. Алешин // Телеспутник : [сайт]. – Москва : Телеспутник, 2007. – № 2 (136), февраль. – С. 88. – URL : <http://www.telesputnik.ru>. (дата обращения: 5.02.21).
13. Всеполяризационный селектор облучателя зеркальных антенн / Е. П. Медведев, М. Е. Медведев // 15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005). Материалы конф. [Севастополь, 12 – 16 сент. 2005 г.]. – Севастополь : Вебер, 2005. – С. 412 – 413.
14. Колубакин В. Новый спутник Ka-Sat / Всеволод Колубакин // Телеспутник : [сайт]. – Москва : Телеспутник, 2011. – С. 128 – 129. – URL : <http://www.telesputnik.ru> (дата обращения: 5.02.21).
15. Трёхдиапазонные печатные антенны сотовых телефонов / Е. В. Овчинникова, Буй Као Нинь, Фам Ван Винь [и др.] // Сборник тезисов докладов Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2015». – Москва, 2015. – С. 106 – 107.
16. Буй Као Нинь. Электродинамическое моделирование трёхдиапазонных микрополосковых антенн сотовых телефонов / Буй Као Нинь // Материалы IX международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки, технологии и производства». – Санкт-Петербург, 2015. – С. 48 – 51.
17. Джалилов Б. О. Исследование и разработка электрически перестраиваемой антенны для мобильных устройств : специальность 01.04.03 «Радиофизика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Бахромжон Одилжонович Джалилов. – Санкт-Петербург, 2017. – 93 с.

Поступила в редакцию 18.02.2021

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

**Максим Андреевич Соков**, аспирант, т. 8(985) 979-51-49, e-mail: s.maks.s@mail.ru.  
(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ))).

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

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

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

**Нгуен Динь То**, аспирант, т. 8(968) 447-99-44, e-mail: ndt.mai.198@gmail.com.  
(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ))).

## MULTI-BAND ANTENNAS

**E. V. Ovchinnikova, M. A. Sokov, S. G. Kondrateva,  
P. A. Shmachilin, Nguyen Dinh Tho**

*The article contains an overview of proceedings dealing with studies of characteristics of multi-band antennas used in telecommunication and radar systems, on the basis of which the publications were systemized according to the purpose of multi-band antennas, type of elements, number of supported bands and their frequencies, and antenna manufacturing technology. Designs of dual-, triple- and quadruple-band integrated antennas with a corrugated horn and multi-purpose antennas are considered. The description of low-profile microstrip antennas, including the antennas with PIN- and varactor diodes, which are widely used in communication systems, particularly in mobile phones, is provided. The main advantages and disadvantages of multi-band antennas are indicated. The use of multi-band antennas according to their type and functions offers the possibility to reduce the number of on-board antennas of information and navigation systems, increase the number of channels, improve the power budget, enhance the bandwidth and noise immunity of antennas, etc.*

**Key words:** satellite television antenna systems, multi-band antennas, integrated feeders of reflector antennas, low-profile microstrip antennas.

### References

1. Design of microstrip antennas for dual-frequency on-board transmitter ‘Mayak 150/400’ / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // CriMiCo 2013-2013. 23<sup>rd</sup> International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Conference Proceedings. – 2013. – Pp. 582 – 583.
2. Designing a dual-frequency microstrip antenna model for potential application on Ionosphere satellite / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2014. – V. 141. – No. 4. – Pp. 23 – 26.
3. Utility model patent No. 162204 U1 Russian Federation, IPC H01Q 1/38. Multi-band microstrip antennas : No. 2015139120/28 : appl. 07.09.2015 : publ. 27.05.2016 / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev. – 13 p.
4. Multi-band microstrip antennas / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2017. – V. 160. – Pp. 37 – 44.
5. Dual-band microstrip antenna array of a satellite television system / P. V. Vinh, E. V. Gadzhiev, O. V. Vasilev [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2017. – V. 161. – No. 6. – Pp. 12 – 16.
6. Dual-band and wide-band antennas of telecommunication systems / E. V. Ovchinnikova, V. V. Pham, S. G. Kondrateva [et al.] // VII<sup>th</sup> All-Russian Armand Readings. Current Problems of Remote Sensing, Radio Detection and Ranging, Diffraction and Propagation of Radio Waves. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference : collected volume. – 2017. – Pp. 330 – 338.
7. A Compact Multiple Band-Notched Planer Antenna with Enhanced Bandwidth Using Parasitic Strip Lumped Capacitors and DGS Technique / A. Boutejdar, A. A. Ibrahim, E. P. Burte // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2015. – Vol. 13. – No. 2. – Pp. 203 – 208. – DOI : 10.11591/telkomnika.v13i2.6976.
8. Study of CPW-Fed Slot Antenna for UWB Application / P. Tendolkar, A. Shah, A. Jeyakumar // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. – 2015. – Vol. 3. – No. 4. – Pp. 2826 – 2830 – DOI : 10.15680/IJIRCCCE.2015.0304023.
9. A Dual Broadband MIMO Antenna System for GSM/UMTS/LTE and WLAN Handsets / X. Zhou, X. Quan, Li. A. Rong Lin // IEEE Antennas and Wireless Propagation. – 2012. – Vol. 11. – Pp. 551 – 554. – DOI : 10.1109/LAWP.2012.2199459.
10. Designing a multi-band microwave radiometric mapping system for unmanned aerial vehicles on the basis of a toroid antenna / O. A. Gerasimov, D. V. Drozdov, Iu. V. Rybakov // All-Russian Open Scientific Conference ‘Current Problems of Remote Sensing, Radio Detection and Ranging, Diffraction and Propagation of Radio Waves’. – Murom, 2020. – Pp. 285 – 291.
11. Design of feeders of multi-band reflector antennas for satellite communications systems / D. D. Gabrielian, V. I. Demchenko, A. E. Korovkin [et al.] // Rocket-and-space instrument engineering and information systems. – 2017. – V. 4. – Issue 1. – Pp. 40 – 45.
12. Aleshin G. Testing integrated C/Ku-feeders of satellite antennas / G. Aleshin // Telesputnik : [website]. – Moscow : Telesputnik, 2007. – No. 2 (136), February. – P. 88. – URL : <http://www.telesputnik.ru>. (Date of access: 5.02.21).

13. All-band polarization selector of a reflector antenna feeder / E. P. Medvedev, M. E. Medvedev // 15<sup>th</sup> International Crimean Conference 'Microwave and telecommunication technology' (CriMiCo 2005). Conference proceedings [Sevastopol, September 12 – 16, 2005]. – Sevastopol : Weber, 2005. – Pp. 412 – 413.
14. Koliubakin V. New satellite Ka-Sat / Vsevolod Koliubakin // Telesputnik : [website]. – Moscow : Telesputnik, 2011. – Pp. 128 – 129. – URL : <http://www.telesputnik.ru> (date of access: 5.02.21).
15. Triple-band printed antennas of mobile phones / E. V. Ovchinnikova, Bui Cao Ninh, Pham Van Vinh [et al.] // Collected abstracts of proceedings of the Moscow Youth Scientific and Practical Conference 'Innovations in Aviation and Cosmonautics – 2015'. – Moscow, 2015. – Pp. 106 – 107.
16. Bui Cao Ninh. Electrodynamics modelling of triple-band microstrip antennas of mobile phones / Bui Cao Ninh // Proceedings of the IX<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference 'Topical Issues of Science, Technology and Production'. – Saint Petersburg, 2015. – Pp. 48 – 51.
17. Dzhililov B. O. Studying and designing an electrically tuned antenna for mobile devices : speciality 01.04.03 'Radio-physics' : Thesis for the degree of Candidate of Physics and Mathematics / Bakhromzhon Odilzhonovich Dzhililov. – Saint Petersburg, 2017. – 93 p.

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

*Maksim Andreevich Sokov, Ph. D. Student, tel.: +7 (985) 979-51-49, e-mail: s.makc.s@mail.ru.  
(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University))).*

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

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

*Nguyen Dinh Tho, Ph. D. Student, tel.: +7 (968) 447-99-44, e-mail: ndt.mai.198@gmail.com.  
(Peoples' Friendship University of Russia (RUDN)).  
(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University))).*