

## МАЛОГАБАРИТНЫЕ ПЕЧАТНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Е. В. Комиссарова, Г. А. Гальченков

**В** статье приведен обзор различных методов уменьшения размеров печатных излучателей метрового диапазона. Рассмотрены турникетный, дипольный, печатный патч и другие типы излучателей, а также подходы, позволившие провести оптимизацию массогабаритных характеристик в рамках конкретного приложения или применимые для этих целей. Отмечены преимущества способа с использованием метаматериалов как одного из самых современных решений проблемы минимизации габаритов антенных устройств и увеличения широкополосности. Обзор выполнен в рамках поиска информации по оптимизации продольных габаритов излучателя телекодовой системы связи с возможностью переключения поляризации. Приведены выводы, обосновывающие выбор излучателя для телекодовой системы с целью обеспечения требований по массогабаритным и энергетическим характеристикам, предъявляемым заказчиком.

**Ключевые слова:** метаматериалы, минимизация, турникетная антенна, диполь, печатный патч.

**Введение**

Метровый диапазон частот является хорошо освоенным, в нем работают радиолокационные станции (РЛС), различные системы связи, навигации и опознавания. Однако при создании мобильного оборудования в этом диапазоне возникают сложности с обеспечением заданных габаритов. В частности, излучающие элементы, сравнимые по величине с длиной волны, оказываются неудобными при транспортировке и развертывании, а также ограничивают возможности размещения передающего оборудования в непосредственной близости от излучателя. Поэтому появляются задачи уменьшения размеров в поперечном и продольном направлениях. Особый интерес для систем связи представляют также излучатели с возможностью переключения поляризации, что позволяет увеличить энергопотенциал системы и повысить устойчивость радиосвязи на различных видах пересеченной местности.

**Обзор излучателей и методов уменьшения их размеров**

В рассматриваемом частотном диапазоне, ввиду необходимости минимизации габаритов, наиболее актуальными являются турникетные, печатные, патч-и дипольные антенны.

Так в работе [1] перед авторами стояла задача уменьшения размеров дипольной антенной системы радиочастотной идентификации. На рис. 1 показан диполь с центральной частотой 920 МГц с плечами, расположенными на противоположных сторонах подложки. Применение зазубрин на концах плеч позволило получить уменьшение поперечных размеров почти на 40 мм.

Так как антенна является резонансным устройством, уменьшенная длина плеч увеличивает соответствующую резонансную частоту, на которой коэффициент стоячей волны (КСВ) удовлетворяет требованиям технического задания, в статье [1] меньше 2. Для сохранения характеристик неизменными авторы применяют вырезы, перпендикуляр-

ные плечам диполя, снижающие резонансную частоту. Тем не менее, из графиков, приведенных в работе, видно, что достичь первоначального уровня КСВ все же не удалось.

При исходном значении 1,25 уменьшенная версия антенны имеет КСВ, равный 1,5 на центральной частоте. Работа представляет интерес в плане уменьшения поперечных размеров, однако не решает задачу сокращения продольных габаритов. Кроме того, один излучатель такого типа нельзя использовать для переключения поляризации.

Разработке кросс-дипольной антенны уменьшенных размеров (рис. 2) посвящена также работа [2].

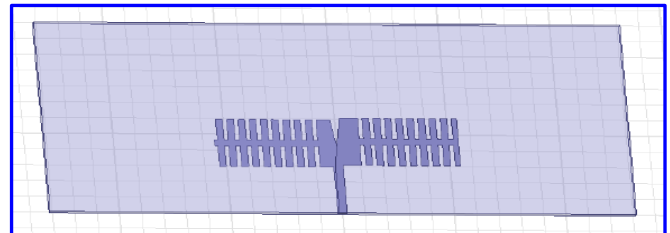


Рис. 1. Модель диполя после применения вырезов к его плечам

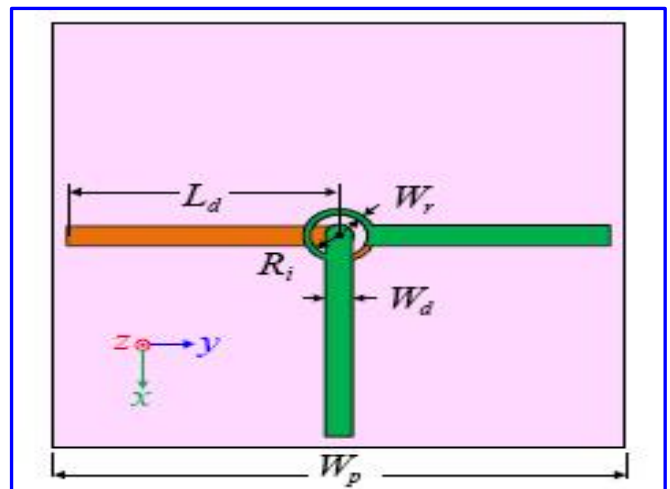


Рис. 2. Геометрия излучателя кросс-дипольной антенны Т-формы

Авторы предлагают использовать антенну Т-формы, которая отличается от традиционной тем, что ее половина повернута на  $90^\circ$ . Такой поворот уменьшает занимаемую площадь более чем в половину, при этом сохраняя характеристики близкие к исходному варианту и позволяя формировать излучение с круговой поляризацией. Питание, однако, осуществляется единственной коаксиальной линией, а сдвиг фазы для формирования круговой поляризации получают с помощью четвертьволновой линии, что исключает возможность переключения поляризации.

Вопросам уменьшения продольных размеров посвящена работа [3]. В ней рассматривается модернизация комбинированной антенны из электрического и магнитного диполей путем уменьшения ее продольных размеров с сохранением широкополосности и ширины диаграммы направленности (ДН). Обычно расстояние между такими антеннами составляет четверть длины волны. Авторам удалось добиться уменьшения расстояния менее  $1/8\lambda$  и, как утверждается в работе, возможно дальнейшее уменьшение. Суть предлагаемого метода заключается в преобразовании временной и пространственной фаз. Требуемый фазовый сдвиг достигается введением меандровой линии, форма которой определяет величину уменьшения продольных габаритов. Тем не менее, рассмотренный излучатель также не позволяет производить переключения поляризации, однако такой метод интересен и может быть перенесен на другие типы излучателей.

Реализовать переключение поляризации и малые продольные размеры позволяют печатные патч-антенны с ортогональной запиткой. Так в работе [4] обосновывается метод создания печатной антенны с управляемой поляризацией, при этом авторы делают вывод, что оптимальной конструкцией для такой антенны будет двухканальный печатный излучатель с коммутируемыми каналами. Интересной особенностью конструкции, предлагаемой в работе, является применение пассивного элемента перед излучателем, который позволяет согласовать антенну с питающим фидером. Хотя указанный тип излучателя действительно обладает необходимыми свойствами в виде малых продольных и поперечных габаритов, а также возможностью переключения поляризации, ДН такой антенны получится искаженной вследствие смещения точек питания для обеспечения переключения поляризации.

Такого рода недостатков лишены антенны турникетного типа. В запатентованном методе [5] решается проблема расширения частотного диапазона и уменьшения габаритов. Однако антенна не лишена недостатков. Например, относительно

высокий уровень КСВ в центральной части заявленного частотного диапазона.

В другом патенте [6] описана турникетная антенна с уменьшенными продольными габаритами, способная работать в метровом и дециметровом диапазонах. Недостатком указанного устройства является невозможность переключения поляризации – антенна формирует круговую поляризацию в направлении оси.

Среди работ по излучателям с круговой поляризацией интересно рассмотреть, например [7]. Компактный двухполяризационный гофрированный рупор включает ортогональный преобразователь и гофрированную структуру. Предлагаемый компактный дизайн использует только десять гофрированных слотов для формирования симметричной ДН в диапазоне 10,2 – 15 ГГц с КСВ < 1,5. Недостатком такого типа излучателей, как говорилось ранее, являются большие размеры при переносе в метровый диапазон.

Получить переключаемую поляризацию в совокупности с широкой полосой позволяет излучатель, описываемый в [8]. Авторы предлагают конструкцию излучателя в виде широкополосного двухполяризационного открытого конца волновода, который упрощает конструирование антенных решеток. Решение предполагает применение наслаивающихся друг на друга схем питания для обоих типов поляризации (рис. 3).

Недостаток такой конструкции аналогичен предыдущему решению – сравнительно большие габариты в метровом диапазоне и недостаточно симметричная ДН.

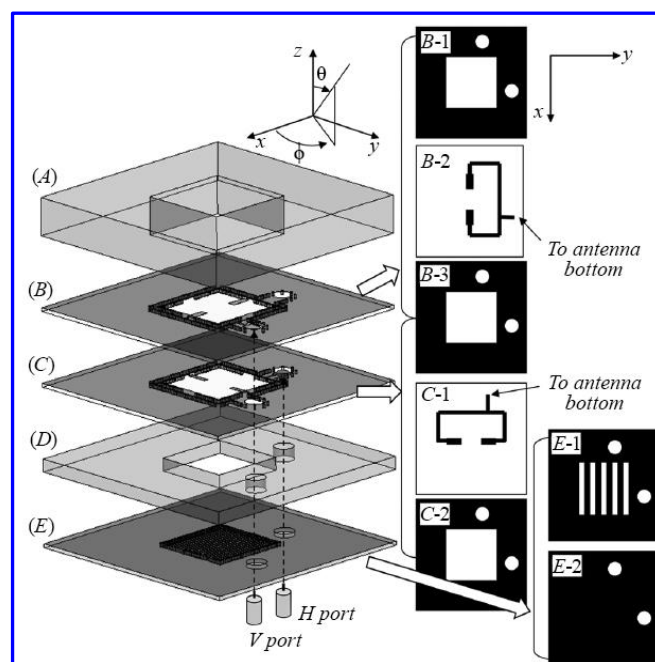


Рис. 3. Структура антенны

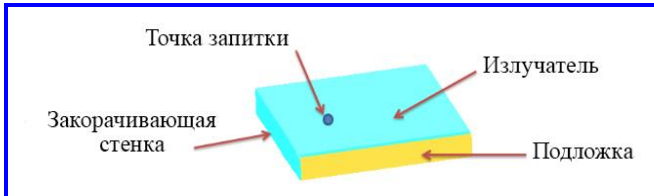


Рис. 4. Модель бортовой микрополосковой антенны

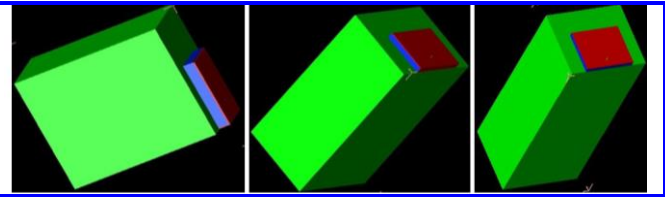


Рис. 5. Модели бортовой микрополосковой антенны на поверхности космического аппарата трех форматов

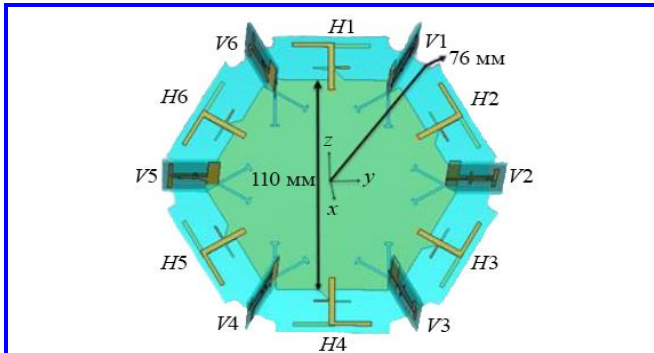


Рис. 6. Двухдиапазонная двухполяризованная антенная решетка

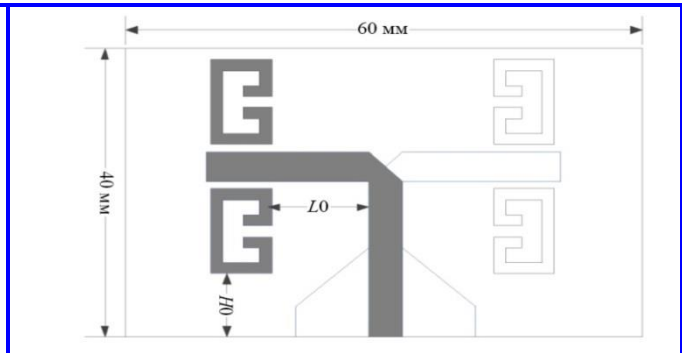


Рис. 7. Двухдиапазонный диполь, нагруженный структурой, основанной на метаматериалах

Другой пример антенны подобного типа можно найти в работе [9]. Авторы рассматривают преимущества печатных технологий для проектирования малогабаритных бортовых антенных систем, а также способы миниатюризации микрополосковых антенн УКВ-диапазона. Используя закороченную конструкцию и металлизированный диэлектрик, удалось разработать микрополосковую антенну с размерами меньше аналогов в 2 – 2,5 раза (рис. 4).

Электродинамическое моделирование (рис. 5.) такого метода миниатюризации рассмотрено в работах [10, 11]. С помощью средств автоматического проектирования, используя метод конечных элементов, авторы показали преимущества применения закороченной конструкции и подложки из фольгированного листового ариллокса наполненного [12], а именно: малые габариты, более простая и надежная конструкция.

Кроме того, авторами был разработан макет и использован метод электродинамического подобию для измерения характеристик направленности указанной антенны. Результаты соответствовали техническому заданию, а по рассмотренной конструкции получен патент [13].

Интересно рассмотреть также работу [14], в которой описывается широкополосная сегментированная дипольная антенна. Согласно результатам моделирования разработанная конфигурация имеет широкий рабочий диапазон: 2,16 – 3,5 ГГц. В сравнении с традиционным диполем соответствующих размеров предлагаемая антенна показывает более стабильные характеристики ДН в сечении  $E$ -плоскостью.

В работе [15] рассматривается двухдиапазонная двухполяризованная решетка, состоящая из 12-ти логопериодических дипольных излучателей (рис. 6).

Наличие вертикальных и горизонтальных элементов обеспечивает переключение поляризации, а 6 пар Т-образных разрезов уменьшают взаимное влияние элементов. Предлагаемая авторами конструкция была произведена и показала усиление 5, 6 дБи в диапазонах 2,4 и 5 ГГц. Такая конструкция может быть использована для заявленной системы связи, однако необходимость увеличения числа излучателей для переключения поляризации является существенным недостатком.

Большое развитие в последнее время получило направление разработки и применения в антенной технике метаматериалов [16 – 18]. Под таковыми можно понимать структуры, чьи электромагнитные свойства оказываются более широкими в сравнении с образующими компонентами. Их применение в антенной технике включает в себя изготовления подложек, излучателей широкополосных печатных антенн, компенсации реактивности в широкой полосе частот электрически малых антенн, уменьшение взаимного влияния элементов антенных решеток и т. д.

Так в работе [19] авторы предлагают конструкцию двухдиапазонного диполя, нагруженного структурой, основанной на метаматериалах, применяемого в сотовой связи и медицинских системах. До добавления указанной структуры такая антенна могла эффективно работать только на одной частоте 2,5 ГГц. Применение метаматериала позволило расширить рабочие частоты диапазоном 4,2 – 4,75 ГГц, не усложняя питания, производства и сохранив малый вес. Структура излучателя показана на рис. 7.



Другим вариантом применения метаматериала может быть использование его в качестве экрана, что при правильном подборе параметров позволит компенсировать уменьшение электрической длины антенны. Такой вариант применения рассматривается, например, в [20]. Авторы разработали модель и провели сравнительный анализ применения экрана из метаматериала и меди. В результате удалось получить увеличенный коэффициент усиления, применяя двухслойный метаматериал со значениями  $\epsilon = -2$  для первого слоя и  $\epsilon = -4$  для второго слоя.

### Заключение

На основании рассмотренных излучателей и подходов, применяемых для уменьшения их продольных габаритов, можно сделать вывод, что требованию малых продольных размеров и возможности управления поляризацией наилучшим образом удовлетворяет печатная патч-антенна с ортогональной запиткой, однако наличие неизбежно искажаемой ДН снижает эффективность ее применения, и потому турникетная антенна, не обладающая указанным недостатком, оказывается предпочтительней при условии снижения ее продольных габаритов, что может быть достигнуто за счет применения метаматериалов.

### Литература

1. Microstrip dipole antenna with reduced dimensions with cutouts / H. L. Quang, T. N. Dinh, R. V. Van [et al.] // 2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), September 2018. – IEEE, 2018. – P. 2190–2192. – DOI : 10.1109/ICACCI.2018.8554927.
2. Design of a reduced-size crossed-dipole antenna / K. E. Kedze, H. Wang, Y. Kim [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – IEEE, 2020. – Vol. 69. – Issue 2. – P. 689–697.
3. Low Profile Loop-Dipole Combined Antenna / J. Y. Wang, W. L. Zhang, W. J. Lu // 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 20–23 September 2020, Shanghai, China. – IEEE, 2020. – P. 1–3. – DOI: 10.1109/ICMMT49418.2020.9386626.
4. Лукьянчиков А. В. Антенна с управляемой поляризацией / А. В. Лукьянчиков, А. С. Ткачишин // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018), 9–15 сентября 2018 года, Севастополь : Материалы конференции. – Севастополь : Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2018. – Т. 3. – С. 666–672.
5. Патент на изобретение RU2643700C1 Российская Федерация, МПК H01Q 21/00 (2006.01). Турникетная антенна : № 2016145561 : заявл. 21.11.2016; опубл. 05.02.2018 / Орлов В. А., Скибин С. Э., Бирюкова Т. С., Сулимова Г. А. – Бюл. № 4.
6. Патент на изобретение RU2236733C2 Российская Федерация, МПК H01Q 21/26 (2000.01). Турникетная антенна : № 2001135694/09 : заявл. 24.14.2001; опубл. 20.09.2004 / Ионова С. П., Помазков А. П., Каламзина Е. В. – Бюл. № 26.
7. Manshari S. Compact dual-polarized corrugated horn antenna for satellite communications / S. Manshari, S. Koziel, L. Leifsson // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68. – No. 7. – P. 5122–5129. – DOI:10.1109/TAP.2020.2980337.
8. Design and fabrication of wideband and dual polarized open-ended waveguide / T. Maruyama, S. Yamaguchi, T. Takahashi [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2014. – Vol. 62. – No. 9. – P. 4872–4876.
9. Бочаров В. С. Разработка макета микрополосковой антенны метрового диапазона для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера» / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – № 4(16). – С. 20–27.
10. Генералов А. Г. Миниатюрные бортовые антенны / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2017. – Т. 159, № 4. – С. 31–41.
11. Генералов А. Г. Миниатюрные антенны для малых космических аппаратов CubeSat / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Сибирский журнал науки и технологий. – 2018. – Т. 19. – № 2. – С. 259–270. – DOI: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-259-270.
12. Бочаров В. С. Выбор диэлектрика подложки микрополосковой антенны при построении миниатюрной антенны / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Антенны. – 2014. – № 12(211). – С. 38–44.
13. Патент № 2583334 C2 Российская Федерация, МПК H01Q 1/38. Способ создания микрополосковых антенн метрового диапазона и устройство, реализующее этот способ : № 2014137527/28 : заявл. 16.09.2014 : опубл. 10.05.2016 / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев ; заявитель Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электромеханики» (АО «НИИЭМ»).
14. Jia X. A wideband segmented line dipole antenna with stable radiation patterns / X. Jia, D. Piao // 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), 18–21 October 2016, Guilin, China. – IEEE, 2017. – P. 22–24. – DOI: 10.1109/ISAPE.2016.7833914.
15. Dual-band dual-polarized compact log-periodic dipole array for MIMO WLAN applications / J. J. Liang, J.-S. Hong, J.-B. Zhou [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2014. – Vol. 14. – P. 751–754.
16. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. Last Mile (Приложение к журналу «Электроника: Наука, Технология, Бизнес»). – 2010. – Т. 18. – № 3–4. – С. 44–60.
17. Авдюшин А. С. Применение метаматериалов в антенной технике / А. С. Авдюшин, М. Ю. Власов, Ю. Г. Пастернак // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9. – № 3-1. – С. 132–135.
18. Vendik I. B. Metamaterials and their application in microwaves: A review / I. B. Vendik, O. G. Vendik // Technical physics. – 2013. – Vol. 58. – P. 1–24. – DOI:10.1134/S1063784213010234.

19. Wang L. Dual-band dipole antenna loaded with metamaterial based structure / L. Wang, Y. Zhang, P. Dong // 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), 14 – 17 October 2016, Chengdu. – IEEE, 2017. – P. 1728–1731. – DOI: 10.1109/CompComm.2016.7924997.
20. Metamaterials applied in half-wave dipole antenna / C. Meng, X. Zheng-hui, R. Wu [et al.] // 2013 IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics, August 2013. – IEEE, 2013. – С. 220–223.

Поступила в редакцию 01.12.2023

*Елена Владимировна Комиссарова, кандидат технических наук, доцент кафедры РЛП, заместитель декана, т. 8 (499) 263-69-83, e-mail: komissarovaev@bmstu.ru.*

*Григорий Александрович Гальченко, аспирант, т. +7 (909) 957-71-24, e-mail: GregorGall50@gmail.com. (Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана).*

## SMALL-SIZED PRINTED EMITTERS OF METER RANGE

**E. V. Komissarova, G. A. Galchenkov**

*The article gives an overview of various methods for reducing the size of printed transmitters of the meter range. Turnstile, dipole, printed patch and other types of radiators are considered, as well as approaches that allowed to optimize the mass-size characteristics of the particular application. The advantages provided by the application of metamaterials as one of the modern ways of solving the problem of minimizing the dimensions of antenna devices and increasing the broadband are noted.*

**Key words:** metamaterials, minimization, turnstile, dipole, printed patch.

### References

1. Microstrip dipole antenna with reduced dimensions with cutouts / H. L. Quang, T. N. Dinh, R. V. Van [et al.] // 2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), September 2018. – IEEE, 2018. – P. 2190–2192. – DOI: 10.1109/ICACCI.2018.8554927.
2. Design of a reduced-size crossed-dipole antenna / K. E. Kedze, H. Wang, Y. Kim [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – IEEE, 2020. – Vol. 69. – Issue 2. – P. 689–697.
3. Low Profile Loop-Dipole Combined Antenna / J. Y. Wang, W. L. Zhang, W. J. Lu // 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 20 – 23 September 2020, Shanghai, China. – IEEE, 2020. – P. 1–3. – DOI: 10.1109/ICMMT49418.2020.9386626.
4. Lukianchikov A. V. Antenna with controlled polarization / A. V. Lukianchikov, A. S. Tkachishin // 28 International Crimea Conference ‘Microwave Engineering and Telecommunication Technology’ (CrimeaIntCo 2018), 9 – 15 September 2018, Sevastopol: Proceedings of Conference. – Sevastopol: Sevastopol State University, 2018. – Vol. 3. – P. 666–672.
5. Patent for invention RU2643700C1, Russian Federation, МПК H01Q 21/00 (2006.01). Turnstile antenna: No. 2016145561: application 21.11.2016; published 05.02.2018 / Orlov V. A., Skibin S. E., Birukova T. S., Sulimova G. A. – Bull. No. 4.Ion
6. Patent for invention RU2236733C2, Russian Federation, МПК H01Q 21/26 (2006.01). Turnstile antenna: No. 2001135694/ 09: application 24.11.2001; published 20.09.2004 / Ionova S. P., Pomazkov A. P., Kalamzina E. V. – Bull. No. 26.
7. Manshari S. Compact dual-polarized corrugated horn antenna for satellite communications / S. Manshari, S. Koziel, L. Leifsson // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68. – No. 7. – P. 5122–5129. – DOI: 10.1109/TAP.2020.2980337.
8. Design and fabrication of wideband and dual polarized open-ended waveguide / T. Maruyama, S. Yamaguchi, T. Takahashi [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2014. – Vol. 62. – No. 9. – P. 4872–4876.
9. Bocharov V. S. Development of model of VHF band microstrip antenna for perspective use on Ionosphere spacecraft / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Radio Engineering and Telecommunications Systems. – 2014. – No. 4 (16). – P. 20–27.
10. Generalov A. G. Miniature on-board antennas / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Matters of Electromechanics. VNIIEM proceedings. – 2017. – Vol. 159. – No. 4. – P. 31–41.
11. Generalov A. G. Miniature antennas for CubeSat small spacecrafts / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // The Siberian Aerospace Journal. – 2018. – Vol. 19. – No. 2. – P. 259–270. – DOI: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-259-270.
12. Bocharov V. S. Selection of dielectric substrate of microstrip antenna in the designing of a miniature antenna / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Antennas. – 2014. – No. 12 (211). – P. 38–44.
13. Patent No. № 2583334 C2 Russian Federation, МПК H01Q 1/38. Method of creation of the VHF band microstrip antenna and the device implementing the present method: No. 2014137527/28: application 16.09.2014; published 10.05.2016 / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev, applicant: Scientific and Research Institute of Electromechanics (JSC NIEM).

14. Jia X. A wideband segmented line dipole antenna with stable radiation patterns / X. Jia, D. Piao // 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), 18 – 21 October 2016, Guilin, China. – IEEE, 2017. – P. 22–24. – DOI: 10.1109/ISAPE.2016.7833914.
15. Dual-band dual-polarized compact log-periodic dipole array for MIMO WLAN applications / J. J. Liang, J.-S. Hong, J.-B. Zhou [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2014. – Vol. 14. – P. 751–754.
16. Slusar V. Metamaterials in antenna devices: main principles and results // First Mile. Last Mile (Supplement to the Journal Electronics: Science, Technology, Business). – 2010. – Vol. 18. – No. 3 – 4. – P. 44–60.
17. Avdushin A. S. Use of metamaterials in antenna devices / A. S. Avdushin, M. Iu. Vlasov, Iu. G. Pasternak // Vestnik of Voronezh State Technical University, 2013. – Vol. 9. – No 3 – 4. – P. 132–135.
18. Vendik I. B. Metamaterials and their application in microwaves: A review / I. B. Vendik, O. G. Vendik // Technical physics. – 2013. – Vol. 58. – P. 1–24. – DOI: 10.1134/S1063784213010234.
19. Wang L. Dual-band dipole antenna loaded with metamaterial based structure / L. Wang, Y. Zhang, P. Dong // 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), 14 – 17 October 2016, Chengdu. – IEEE, 2017. – P. 1728–1731. – DOI: 10.1109/CompComm. 2016.7924997.
20. Metamaterials applied in half-wave dipole antenna / C. Meng, X. Zheng-hui, R. Wu [et al.] // 2013 IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics, August 2013. – IEEE, 2013. – P. 220–223.

*Elena Vladimirovna Komissarova, Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of RLI Department, Associate Dean,  
t. 8 (499) 263-69-83, e-mail: komissarovaev@bmstu.ru.  
Grigoriy Alexandrovich Galchenkov, Postgraduate student,  
t. +7 (909) 957-71-24, e-mail: GregorGall50@gmail.com.  
(Bauman Moscow State Technical University).*