

А. А. Жуков¹, д-р техн. наук, зав. кафедрой, and_zhukov@mail.ru,
А. А. Аджибеков³, аспирант, вед. инженер-исследователь, **М. А. Кудров**², канд. техн. наук, и. о. декана,
К. А. Зудов², науч. сотр., **А. В. Гелиев**², канд. физ.-мат. наук, ассистент, alexander.geliev@mail.ru,
В. Г. Веселаго², д-р физ.-мат. наук, проф.,

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва,

²Московский физико-технический институт (государственный университет),

г. Долгопрудный Московской обл.,

³АО "Российские космические системы", г. Москва

Метаматериалы в бортовых беспроводных системах приема и преобразования СВЧ энергии мобильных автономных устройств

Проведен анализ структурной схемы бортовой аппаратуры приема и преобразования СВЧ энергии мобильных автономных устройств. Показано, что элементами, в составе которых могут применяться метаматериалы в бортовой аппаратуре, являются антенна (ректенна) и фильтр высоких гармоник. Показана целесообразность применения метаматериалов в составе ректенн: число каналов передачи энергии сокращается до двух раз, что приводит к пропорциональному уменьшению массы приемной части. Проанализирована возможность применения в качестве фильтра высоких гармоник фильтров на основе интегрированных в подложку волноводов с метаматериалами, основным преимуществом которых являются небольшие размеры, стоимость, простота в изготовлении и возможность интеграции с другими элементами цепи, выполненными по планарной технологии. Уменьшение массогабаритных характеристик бортовой аппаратуры приема и преобразования СВЧ энергии связано с применением микроэлектронных, микромашинных технологий и технологией печатных плат, а также с реализацией излучателей ректенн, согласующих цепей и фильтров высоких гармоник в едином конструктивно-технологическом варианте.

Ключевые слова: метаматериал, ректенна, интегрированный в подложку волновод (SIW), мобильные автономные устройства, микроробот, беспилотный летательный аппарат, пико- и наноспутник

Введение

В настоящее время значительный прогресс достигнут в области разработки многочисленных автономных мобильных наземных, водных, воздушных и космических устройств — роботов, микророботов, беспилотных летательных и плавающих аппаратов, пико- и наноспутников, выполняющих разнообразные задачи без присутствия человека и управляемых им дистанционно [1, 2]. Одной из труднорешаемых проблем остается энерговооруженность таких мобильных автономных устройств, определяющая продолжительность функционирования служебных и функциональных бортовых информационных и исполнительных систем. Повышение энерговооруженности осуществляют двумя путями: с одной стороны, разрабатывают новые энергоемкие источники энергии, с другой — совершенствуют бортовые системы приема и преобразования энергии. Реализация последних возможна как в проводном, так и в беспроводном исполнении. Беспроводную передачу энергии реализуют на нескольких принципах — лазерным излучением, электромагнитной индукцией, СВЧ излучением. В настоящей работе рассмотрены пути совершенствования бортовых беспроводных систем приема и преобразования СВЧ энергии мобильных авто-

номных устройств за счет применения метаматериалов. Как известно, метаматериал — композитный диэлектрический материал, включающий регулярную периодическую структуру 2D или 3D, например кольцевых разрезных резонаторов (КРР), проявляющий электромагнитные свойства, отличные от изотропного материала той же природы (отрицательная относительная диэлектрическая и/или магнитная проницаемости) [17]. При этом геометрические размеры, а значит, и массогабаритные характеристики функциональных элементов, выполненных на основе метаматериала, меньше по сравнению с функциональными аналогами, выполненными по традиционным технологиям. В связи с этим применение новых технологий с использованием метаматериалов в бортовых беспроводных системах приема и преобразования СВЧ энергии мобильных автономных устройств позволяет надеяться на снижение массогабаритных характеристик без ухудшения их функциональных характеристик.

Целью работы является оценка возможностей совершенствования бортовых беспроводных систем приема и преобразования СВЧ энергии мобильных автономных устройств за счет применения метаматериалов.

Анализ структурной схемы бортовой аппаратуры приема и преобразования СВЧ энергии мобильных автономных устройств

Один из возможных вариантов структурной схемы бортовой аппаратуры приема и преобразования энергии представлен на рис. 1 [3, 6]. Бортовая аппаратура приема и преобразования энергии включает в себя приемные излучатели (И), согласующие цепи (СЦ), вентиляльные блоки (ВБ), фильтры гармоник (ФГ), сглаживающие фильтры (СФ) и сумматор (Σ). Приемные излучатели обычно представляют собой слабонаправленные антенны в полосковом исполнении и обеспечивают прием падающего СВЧ излучения. Для согласования выходных сопротивлений излучателей и входных сопротивлений последующих узлов используются согласующие цепи. СВЧ колебания с выходов согласующих цепей через фильтры гармоник подаются на вентиляльные блоки. Каждый вентиляльный блок, будучи нелинейным устройством, при попадании на его вход гармонических колебаний порождает высшие гармоники с частотами, кратными частоте поступающих колебаний. Для предотвращения переизлучения через излучатели отраженных от вентиляльных блоков волн, порождаемых высшими гармониками, в свободное пространство используются фильтры гармоник, представляющие собой полосовые СВЧ фильтры с полосой пропускания, обеспечивающей свободное прохождение СВЧ колебаний, подаваемых на вход вентиляльного блока, и препятствующей прохождению в сторону излучателей паразитных волн с кратными частотами. СВЧ колебания на входе вентиляльных блоков преобразуются в пульсирующее знакопостоянное напряжение. После сглаживания пульсаций в сглаживающих фильтрах токи на выходе каждого приемного канала суммируются в сумматоре и подаются в бортовую цепь питания.

Как видно из структурной схемы аппаратуры приема и преобразования энергии, линейными резонансными элементами, работающими на высокой частоте, в составе которых могут применяться метаматериалы, являются излучатели и фильтры гармоник. Как уже было упомянуто выше, метаматериал — композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами со-

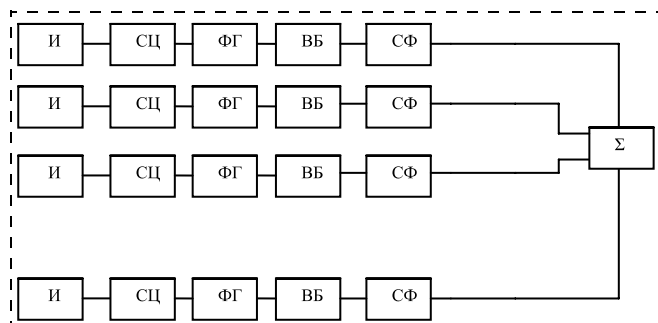


Рис. 1. Структурная схема аппаратуры приема и преобразователя энергии [3, 6]

ставляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой из макроскопических элементов, обладающих произвольными размерами и формой [17].

Ниже представлен анализ возможностей и эффективность применения метаматериалов для этих конструктивных элементов.

Антенна аппаратуры приема и преобразования СВЧ энергии

При дистанционной передаче энергии мощность сигнала, принятая приемной антенной, в отсутствие потерь определяется соотношением

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} S_{\text{пр}}}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

где $P_{\text{пер}}$ — мощность передатчика; $G_{\text{пер}}$ — коэффициент усиления передающей антенны; $S_{\text{пр}}$ — эффективная площадь приемной антенны; r — расстояние между антеннами [4]. При этом длина волны, коэффициент усиления и эффективная площадь антенны связаны следующим соотношением:

$$G = \frac{4\pi S}{\lambda^2}, \quad (2)$$

где λ — длина волны; S — эффективная площадь антенны [4].

Таким образом, для увеличения мощности, передаваемой дистанционно, необходимо повышать мощность передатчика, эффективную площадь приемной антенны (за счет увеличения габаритных размеров) и коэффициент усиления передающей антенны (за счет увеличения рабочей частоты и габаритных размеров). Рост частоты и мощности передатчика помимо увеличения передаваемой мощности ведет к увеличению его размеров и усложнению конструкции. С увеличением частоты растут поглощение радиоволн в атмосфере и дополнительное рассеивание в атмосферных осадках. В сильный дождь потери на частоте 30 ГГц на расстоянии 100 м оставляют около 0,5 дБ (11 %) [5]. Таким образом, рационально использовать для передачи энергии коротковолновую часть сантиметрового диапазона, т.е. частоту приблизительно 20 ГГц. На рис. 2 показана зависимость принимаемой мощности от отношения эффективной площади приемной антенны к длине волны, рассчитанной с помощью соотношения (1) на частоте 20 ГГц при расстоянии между приемной и передающей антеннами 100 м, коэффициенте усиления передающей антенны 50 дБ и мощности передатчика 1000 Вт. Как видно из рис. 2, для того чтобы передать при таких условиях приемнику мощность 20...200 Вт, эффективная площадь приемной антенны должна составлять 113...1117 квадратных длин волн. Эта площадь соответствует антенному полотну с поперечными размерами в десятки длин волн. В СВЧ энергетике для получения полотен таких размеров обычно ис-

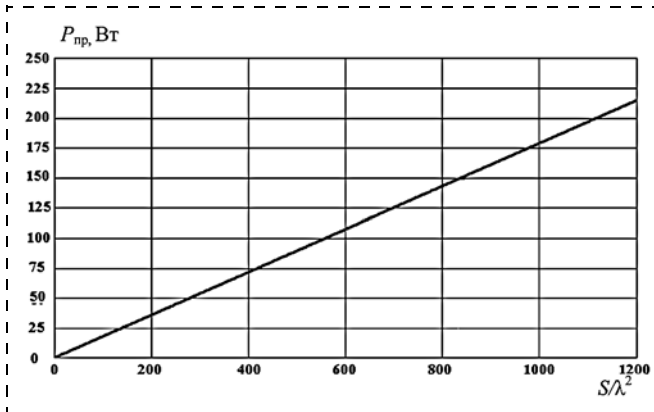


Рис. 2. Зависимость принимаемой мощности от отношения эффективной площади приемной антенны к квадрату длины волны

пользуются решетки ректенн (рис. 3) — массивы слаборазлученных излучателей, нагруженных на выпрямители, т.е. ректенна представляет собой антенну, конструктивно совмещенную с выпрямительным блоком [6].

Каждая ректенна принимает энергию независимо, при этом суммирование энергии после приема осуществляется по постоянному току после выпрямления. Помимо увеличения принимаемой мощности такая схема также обеспечивает слабую зависимость эффективности приемника от угла падающего излучения.

Для снижения массы бортовой аппаратуры приема и преобразования энергии возможно применение метаматериалов в приемной антенне. Как показано в работах [7, 8], размещение метаматериалов над антенной позволяет увеличить ее направленность. На рис. 4 показаны излучатели в виде полосковой антенны и полосковой антенны с расположенным над ней метаматериалом [8].

Поле антенны, представленной на рис. 3, должно удовлетворять системе уравнений Максвелла (3)—(6):

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t}; \quad (3)$$

$$\text{rot}H = \frac{\partial D}{\partial t}; \quad (4)$$

$$\text{div}D = 0; \quad (5)$$

$$\text{div}B = 0, \quad (6)$$

где E — вектор напряженности электрического поля; H — вектор напряженности магнитного поля; B — вектор магнитной индукции; D — вектор электрической индукции.

Источником возбуждения является коаксиальная линия с волновым сопротивлением 50 Ом. Кроме того, искомые поля должны удовлетворять граничным условиям: на поверхности диэлектриков тангенциальные составляющие векторов E и H должны быть непрерывны, на поверхности металлов должно выполняться условие равенства тангенциальных составляющих вектора E нулю, условие конечности энергии в области острых кромок, а также условие излучения

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R \left(\frac{\partial u}{\partial R} + iku \right) = 0, \quad (7)$$

где $u = E$ или $u = H$; i — мнимая единица; k — волновое число; R — расстояние от антенны до точки наблюдения.

Решение поставленной задачи выполняли методом конечных разностей в частотной области в среде CST MWS [18]. Получены диаграммы направленности, отображающие нормированную мощность:

$$F_{\Pi}(\theta) = \frac{F(\theta)}{F_{\max}},$$

где $F(\theta)$ — зависимость мощности излучения от углового направления ($\theta, ^\circ$); F_{\max} — максимум излучаемой мощности.

Диаграммы направленности одиночной полосковой антенны и полосковой антенны под метаматериалом представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

При этом происходит сужение главного максимума диаграммы направленности в 2,2 раза и увеличение коэффициента усиления на 3 дБ (при этом площадь эквивалентной апертуры антенны увеличивается в два раза). Асимметрия диаграммы направленности на рис. 6 объясняется влиянием асимметрии запитки полосковой антенны. При размещении таких антенн в составе полотна возможно увеличение шага решетки по аналогии с антенными решетками направленных излучателей, применяемых в радиосвязи. Применение полотна ректенн с метаматериалами не позволяет добиться сокращения линейных размеров полотна при со-

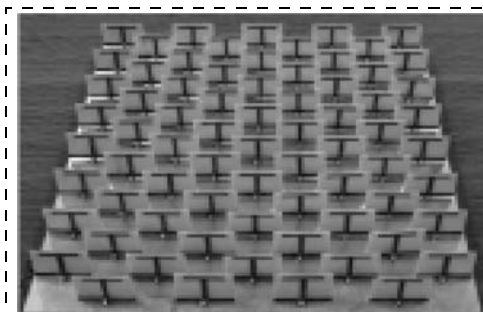


Рис. 3. Приемная антенна в виде полотна ректенн [6]

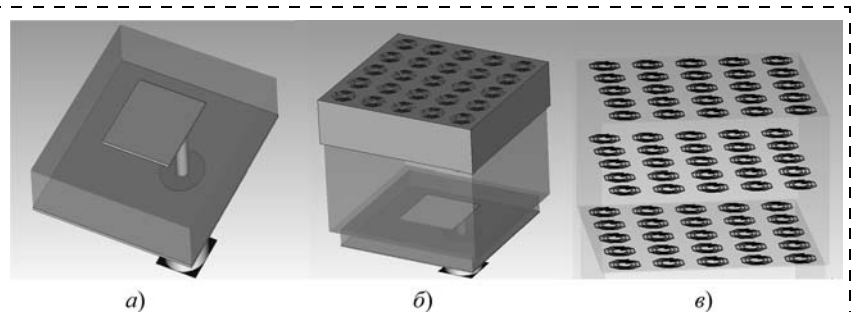


Рис. 4. Полосковая антенна (а), полосковая антенна с метаматериалом (б), метаматериал на основе КРР (в)

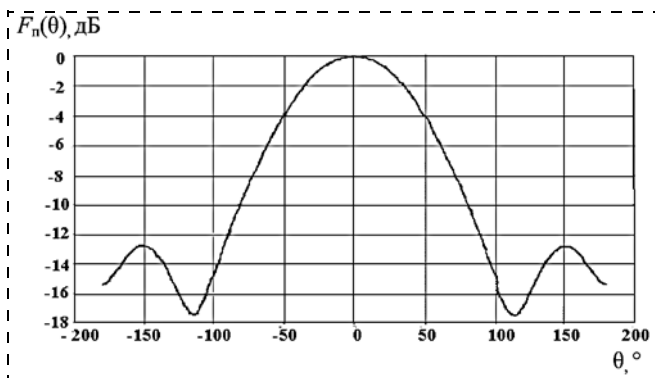


Рис. 5. Расчетная диаграмма направленности одиночной полосковой антенны [6]

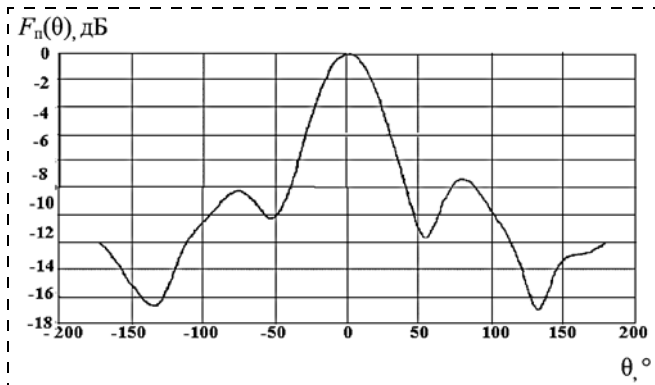


Рис. 6. Расчетная диаграмма направленности полосковой антенны под метаматериалом [7]

хранении принимаемой мощности, однако общее число ректенн и, соответственно, приемных каналов уменьшится приблизительно до двух раз. Таким образом, при применении метаматериалов в составе ректенн возможно уменьшение числа каналов до двух раз, что приводит к пропорциональному уменьшению массы приемной части.

Фильтр высоких гармоник

В последние годы активно развивается технология интегрированных в подложку волноводов Substrate Integrated Waveguide (SIW), основанная на приемах планарной и микромашинной технологий, технологий многослойных печатных плат и функциональных СВЧ устройств. Исследованиями и разработками фильтров занимаются в университетах Китая (Sichuan University), Ирана (Iran University of Science and Technology), Канады (University of Victoria), Индии (Arni University), Алжира (Université de Tlemcen), США (Texas A & M University), агрессивную патентную политику проводит Sony Corp. В России систематическими разработками и исследованиями в области фильтров занимается группа В. В. Землякова (ЮФУ) [9]. К настоящему времени SIW-компоненты применяют в различных СВЧ цепях [10]. Успешно реализованы множество пассивных СВЧ компонентов и устройств, таких как антенны [11], направленные ответвители [12], диплексеры [13], фазовращатели [14].

Конструктивно интегрированный в подложку волновод представляет собой металлизированную с обеих сторон диэлектрическую подложку, со сформированными в ней расположенными в заданном порядке металлическими цилиндрами заданного диаметра с низким электрическим сопротивлением, при этом на одной из поверхностей подложки выполнен топологический рисунок, обеспечивающий вход и выход СВЧ сигнала. От заданных частотных характеристик и добротности зависят как конфигурация топологического рисунка, взаимное расположение металлизированных сквозных отверстий, их поперечные размеры, шаг, отклонение от цилиндрической формы, так и выбор материала подложки (рис. 7).

Рассматриваемые интегрированные в подложку волноводы можно с некоторым допущением отнести к метаматериалам, поскольку это безусловно пространственно-неоднородные композиционные 3D-структуры, проявляющие резонансные свойства за счет инкорпированных в тело диэлектрика металлизированных сквозных отверстий, расположенных с определенным шагом. Вряд ли следует ждать проявления свойств отрицательных относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей от такой структуры. В большинстве случаев моделирование базируется на хорошо известных моделях прохождения электромагнитного излучения через плоский волновод, ограниченный резонансной областью.

В работе [15] представлены результаты численного моделирования фильтров, функционирующих на частоте 8...13 ГГц и содержащих сформированные КРР на подложках RT/Duroid 5880. Показано, что полоса пропускания фильтра, содержащего пару КРР, составляет приблизительно 456 МГц на резонансной частоте 9,17 ГГц. Показано влияние числа и конфигурации КРР в топологии фильтра на S-параметры фильтра (рис. 8).

Примером может также служить фильтр, предложенный в работе [16] для Ку-диапазона, который может быть реализован для различных СВЧ частот на подложках с низкими потерями. Размеры фильтра составляют 50 × 10 мм, потери — менее 2 дБ в полосе. Фильтр рассчитан для ламината RT/Duroid 5880 и демонстрирует добротность приблизительно 150 на частоте 18,3 ГГц.

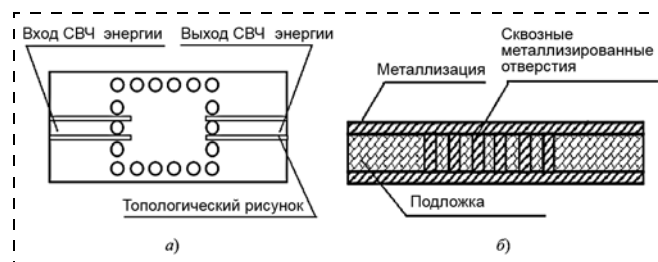


Рис. 7. Типичная конструкция фильтра на основе интегрированного в подложку волновода:

а — вид сверху на топологический рисунок; б — поперечное сечение

Таким образом, основным преимуществом конструкции фильтров на основе интегрированных в подложку волноводов являются низкие размеры и стоимость, простота в изготовлении и возможность интеграции с другими элементами цепи. Реалистичной представляется реализация излучателей ректенн, согласующих цепей и фильтров высоких гармоник в едином конструктивно-технологическом варианте, выполненном по совмещенным планарным технологиям микроэлектроники, микромашиным технологиям и технологиям печатных плат.

Заключение

Проведен анализ структурной схемы бортовой аппаратуры приема и преобразования СВЧ энергии. Показано, что элементами, в качестве которых могут применяться метаматериалы в бортовой аппаратуре, являются излучатели ректенн и фильтры высоких гармоник. При применении метаматериалов в составе ректенн возможно сокращение числа каналов передачи энергии до двух раз, что приводит к пропорциональному уменьшению массы приемной части. Проанализирована возможность применения в качестве фильтра высоких гармоник фильтра на основе интегрированного в подложку волновода, основным преимуществом которого являются низкие размеры и стоимость, простота в изготовлении и возможность интеграции с другими элементами цепи, выполненными по планарной технологии. Показано, что уменьшение массогабаритных характеристик бортовой аппаратуры приема и преобразования СВЧ энергии напрямую связано с реализацией излучателей ректенн, согласующих цепей и фильтров высоких гармоник в едином конструктивно-технологическом варианте, выполненном по совмещенным планарным технологиям микроэлектроники, микромашиным технологиям и технологиям печатных плат.

Список литературы

1. ICINCO 2015 // Proc. of 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. France. 2015.
2. Макриденко Л. А., Волков С. Н., Ходненко В. П. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2010. Т. 114. С. 15–26.
3. Suh Y.-Ho., Chang K. A High-Efficiency Dual-Frequency Rectenna for 2,45 — and 5,8 GHz Wireless Power Transmission // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. V. 50, N. 7. P. 1784–1789.
4. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.
5. Никольский В. Н. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, Гл. ред. физматлит, 1973. 609 с.
6. Huang W., Zhang B., Huang X. C. K., Liu C. Study on an S-Band Rectenna Arrey for Wireless Microwave Power Transmis-

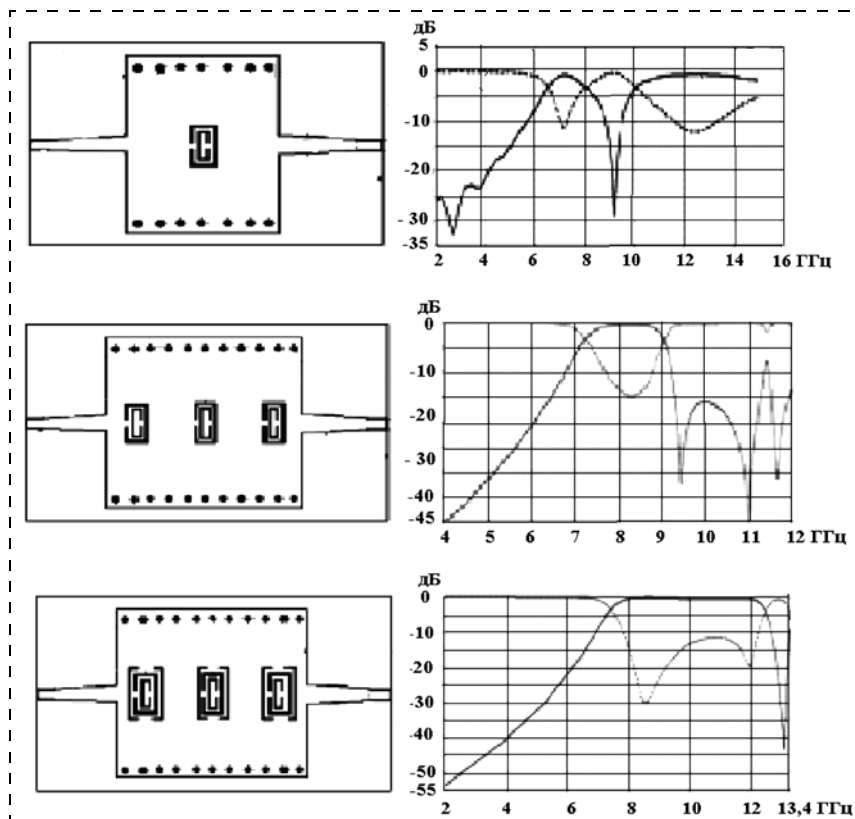


Рис. 8. Топологии фильтров с метаматериалами, варьируемой геометрией КРР и результаты моделирования S -параметров [15]

sion // Progress In Electromagnetics Research. 2013. V. 135. P. 747–758.

7. Аджибеков А. А., Бредихин И. Ю., Веселаго В. Г., Жуков А. А., Капустян А. В., Корпухин А. С. Малогабаритная узконаправленная антенна на основе слоистого 3D-метаматериала // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 1. С. 93.

8. Аджибеков А. А., Бредихин И. Ю., Капустян А. В., Жуков А. А. Экспериментальная оценка характеристик малогабаритной антенны на основе метаматериала // Антенны. 2013. № 6. С. 28.

9. Заргано Г. Ф., Земляков В. В., Крутиев С. В. Полосно-пропускающие фильтры на индуктивных диафрагмах в гребневых волноводах, реализованных по SIW-технологии // Электромеханические волны и электронные системы. 2015. № 6. С. 33–37.

10. Deslandes D., Wu K. Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form // IEEE Microwave Wireless Components Letter, 2001. V. 11. P. 68–70.

11. Henry M., Free C. E., Izquierdo B. S., Batchelor J., Young P. Millimeter wave sub strate integrated waveguide antennas: Design and fabrication analysis // IEEE Transactions on Advanced Packaging. February 2009. V. 32, № 1.

12. Wang Y.-T., Zhu X.-W., Tian L. Design of crossed-SIW directional couplers with different angles // APMC. 16–20 December 2008. P. 1–4.

13. Tang H.-J., Hong W., Chen J.-X., Luo G.-Q., Wu K. Development of millimeter-wave planar duplexers based on complementary characters of dual-mode substrate integrated waveguide filters with circular and elliptic cavities // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. April 2007. V. 55. P. 776–782.

14. Chen Y. J., Hong W., Wu K. Novel substrate integrated waveguide xed phase shifter for 180-degree directional coupler // Proc. of IEEE MTT-S. June 2007. P. 189–192.

15. Mehdi D., Keltouma N., Bouazza T. H. C., Feham M. Design of Substrat Integrated Waveguide Bandpass Filter of SCRRs in the Microstrip Line // International Journal of Engineering Research and General Science. April–May 2014. V. 2. Iss. 3. P. 302–314.

16. Sotoodeh Z., Biglarbegian B., Kashani F. H., Ameri H. A Novel Bandpass Waveguide Filter // Progress In Electromagnetics Research Letters. 2008. V. 2. P. 141–148.

17. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. Вып. 1. С. 4–28.

18. URL: www.cst.com.

Metamaterials in the Onboard Wireless Reception Systems and Conversion of the Microwave Energy of the Mobile Autonomous Devices

A. A. Zhukov, and_zhukov@mail.ru✉,

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation,

A. A. Adzhibekov, Leading Research Engineer, shah-mursa@mail.ru,

Russian Space Systems, Moscow, 111250, Russian Federation,

M. A. Kudrov, mkudrov@mail.ru, K. A. Zudov, xzudov@mail.ru, A. V. Geliev, alexander.geliev@mail.ru,

V. G. Veselago, MIPT, Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation

Corresponding author: Zhukov Andrew A., D. Sc.,
Head of Department, MAI, e-mail: and_zhukov@mail.ru

Received on May 17, 2016

Accepted on May 25, 2016

Significant progress has been recently achieved in the field of development of numerous autonomous mobile ground, water, air and space device-robots, micro robots, unmanned aerial and floating vehicles, pico- and nanosatellites, which perform diverse tasks without human presence and are remote controlled by people. The power loading of such mobile autonomous devices determining the duration of functioning of the service and functional onboard informational and control systems remains one of the intractable problems. The work analyzes the structure scheme of the onboard equipment for reception and conversion of the microwave energy of the mobile autonomous devices. It demonstrates that the elements, which as metamaterials can be used in the onboard equipment, are emitters of rectenna and high harmonic filters. The use of the microelectronic and micro-machinery technologies, metamaterials as a part of rectenna and filters based on the substrate waveguides integrated, allows us to halve the amount of the energy transfer canals and dramatically decrease the mass characteristic of the reception equipment and conversion of the microwave energy mobile autonomous devices in comparison with the analogues.

Keywords: metamaterial, rectenna, substrate integrated waveguide (SIW), portable independent devices, micro robot, unmanned aerial vehicle, nano- and picosatellite

For citation:

Zhukov A. A., Adzhibekov A. A., Kudrov M. A., Zudov K. A., Geliev A. V., Veselago V. G. Metamaterials in the Onboard Wireless Reception Systems and Conversion of the Microwave Energy of the Mobile Autonomous Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 9, pp. 615–620.

DOI: 10.17587/mau.17.615-620

References

1. ICINCO 2015, Proc. of 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 12, France, 2015.
2. Makridenko L. A., Volkov S. N., Khodnenko V. P. *Kontseptual'nye voprosy sozdaniya i primeneniya malykh kosmicheskikh apparatov. Voprosy elektromekhaniki* (The conceptual question of creation and application small spacecrafts. The question of Electro mechanics), *Trudy VNIIEM*, 2010, vol. 114, P. 15–26 (in Russian).
3. Suh Y.-Ho., Chang K. A High-Efficiency Dual-Frequency Rectenna for 2.45- and 5.8 GHz Wireless Power Transmission, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, vol. 50, no. 7. P. 1784–1789.
4. Voskresenskii D. I., Gostyukhin V. L., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. *Pod red. D. I. Boskrecenkogo. Ustroistva SVCh i anteny* (The devices of microwave and antennas), Moscow, Radio-tekhnika, 2006, 376 p. (in Russian).
5. Nikol'skii V. N. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* (Electrodynamics and radio wave propagation), Moscow, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury izdatel'stva "Nauka", 1973, 609 p. (in Russian).
6. Huang W., Zhang B., Huang X. C.K., Liu C. Study on an S-Band Rectenna Arrey for Wireless Microwave Power Transmission, *Progress In Electromagnetics Research*, 2013, vol. 135. P. 747–758.
7. Adzhibekov A. A., Bredikhin I. Yu., Veselago V. G., Zhukov A. A., Kapustyan A. V., Korpukhin A. S. *Malogabaritnaya uzkonapravlenaya antenna na osnove sloistogo 3D-metamateriala* (Compact single-minded focus antenna on the basis of layered 3D-metamaterial), *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2013, no. 1, p. 93. (in Russian).
8. Adzhibekov A. A., Bredikhin I. Yu., Kapustyan A. V., Zhukov A. A. *Eksperimental'naya otsenka kharakteristik malogabaritnoi*

antenny na osnove metamateriala (The experimental mark of characteristics compact antennas on the basis of metamaterial), *Antenny*, 2013, no. 6, p. 28. (in Russian).

9. Zargano G. F., Zemlyakov V. V., Krutiev S. V. *Polosno-propuskayushchie fil'try na induktivnykh diafragmakh v grebnykh volnovodakh, realizovannykh po SIW-tehnologii* (Bandpass filters inductive diaphragms in the ridge waveguides realized on SIW-technology.), *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2015, no. 6, p. 33–37. (in Russian).

10. Deslandes D., Wu K. Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form, *IEEE Microwave Wireless Components Letter*, 2001, vol. 11, P. 68–70.

11. Henry M., Free C. E., Izqueirdo B. S., Batchelor J., Young P. Millimeter wave substrate integrated waveguide antennas: Design and fabrication analysis, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, February 2009, vol. 32, no. 1.

12. Wang Y.-T., Zhu X.-W., Tian L. Design of crossed-SIW directional couplers with different angles, *APMC*, 16–20 December 2008. P. 1–4.

13. Tang H.-J., Hong W., Chen J.-X., Luo G.-Q., Wu K. Development of millimeter-wave planar duplexers based on complementary characters of dualmode substrate integrated waveguide filters with circular and elliptic cavities, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, April 2007, vol. 55, P. 776–782.

14. Chen Y. J., Hong W., Wu K. Novel substrate integrated waveguide xed phase shifter for 180-degree directional coupler, *Proceedings of IEEE MTT-S*, June 2007. P. 189–192.

15. Mehdi D., Keltouma N., Bouazza T. H.C., Feham M. Design of Substrat Integerated Waveguide Bandpass Filter of SCRRs in the Microstrip Line, *International Journal of Engineering Research and General Science*, April–May 2014, vol. 2, no. 3. P. 302–314.

16. Sotoodeh Z., Biglarbegian B., Kashani F. H., Ameri H. A Novel Bandpass Waveguide Filter, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2008, vol. 2. P. 141–148.

17. Vendik I. B., Vendik O. G. *Metamaterialy i ikh primeneniye v tekhnike sverkhvysokikh chastot (Obzor)* (Metamaterials and their application in the technique of microwave (Review)), *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2013, vol. 83, no. 1. P. 4–28. (in Russian).

18. Available at: www.cst.com.