

## АНТЕННЫ, ВОЛНОВОДНАЯ И КВАЗИОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

---

УДК 528.811; 537.87;  
621.396.67

PACS numbers: 41.20.Jb,  
84.40.Ba, 81.05.Xj

О. Н. РЫБИН, С. Н. ШУЛЬГА

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина  
E-mail: rybin.oleg@gmail.com

---

### АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ СВЧ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИНИАТЮРИЗИРОВАННЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН С МЕТАМАТЕРИАЛЬНЫМИ ПОДЛОЖКАМИ

*Предмет и цель работы: Выполнены численные эксперименты с целью проектирования миниатюризованных прямоугольных микрополосковых СВЧ антенн с метаматериальными подложками.*

*Методы и методология: Выполнено моделирование микрополосковых антенн с двумя видами метаматериальных подложек посредством использования электромагнитного симулятора PLANC FDTD.*

*Результаты: Получены дизайны антенн с метаматериальными подложками в гигагерцевом диапазоне. Проведен сравнительный анализ характеристик рассмотренных антенн с характеристиками микрополосковой антенны с диэлектрической подложкой с тем же самым значением относительной диэлектрической проницаемости.*

*Заключение: Предложенные метаматериальные подложки позволяют не только уменьшить объемный профиль микрополосковых антенн, но и улучшить такие параметры излучения, как коэффициент усиления по мощности и коэффициент полезного действия.*

*Ключевые слова:* микрополосковые антенны, метаматериалы, эффективные параметры, антенные подложки, миниатюризация антенн

#### 1. Введение

Метаматериалы, благодаря своим экзотическим свойствам [1], имеют целый спектр приложений. Одним из таких приложений является использование метаматериалов при изготовлении подложек микрополосковых антенн. Так, например, характеристики микрополосковых антенн могут быть улучшены при изготовлении подложек с использованием метаматериалов с малыми значениями эффективного коэффициента преломления (точнее его действительной части) [2, 3] или даже с отрицательными значениями коэффициента преломления [4, 5]. Это оказывается возможным прежде всего потому, что использование метаматериалов при создании подложек микрополосковых антенн позволяет уменьшить взаимодействие

между излучательным элементом антенны и экраном подложки, что, в свою очередь, позволяет уменьшить энергию поля, запасенного внутри самой подложки [6]. В то же время метаматериалы с приростом эффективных относительных проницаемостей все еще в недостаточной мере используются при проектировании подложек микрополосковых антенн, несмотря на то, что целесообразность такого использования для минимизации линейных размеров микрополосковых антенн и улучшения их параметров была предсказана достаточно давно [6, 7].

В настоящей статье микроволновая концепция миниатюризации прямоугольных микрополосковых антенн, предложенная в работе [8], используется для численного моделирования параметров микрополосковых антенн с метаматериальными подложками в виде диэлектрических матриц в форме параллелепипеда с однослойным

набором металлических включений, периодически внедренных в матрицу. В статье рассмотрены включения цилиндрической и сферической формы. Предложены дизайны микрополосковых антенн с метаматериальными подложками и резонансными частотами в гигагерцевом диапазоне частот. Выполнено численное моделирование основных характеристик этих антенн с помощью электромагнитного симулятора PLANC FDTD, созданного на основе метода конечных разностей во временной области. Проведен сравнительный анализ полученных характеристик метаматериальных антенн с аналогичными характеристиками микрополосковой антенны с диэлектрической подложкой, имеющей ту же самую резонансную частоту и то же самое значение относительной диэлектрической проницаемости, что и антенны с метаматериальными подложками.

## 2. Миниатюризация антенны: основные соотношения и параметры

В основе концепции миниатюризации прямоугольных микрополосковых антенн, предложенной в работе [8], лежит использование подложек, изготавливаемых на основе металлодиэлектрических композитов или метаматериалов. При выборе таких искусственных материалов важна не только относительно простая практическая реализуемость материала, но и возможность численного моделирования приборов на его основе с помощью современных пакетов программ, предназначенных для электромагнитного моделирования. Так, например, в работе [8] для создания подложки антенны предлагается использовать композит, предложенный и исследованный в работе [9]. Несмотря на то, что данный материал относительно прост в создании, его крайне сложно моделировать графическими средствами современных электромагнитных симуляторов. В настоящей работе в качестве материала, предназначенного для создания подложки антенны, предложены метаматериалы, представляющие собой диэлектрические матрицы в форме параллелепипеда со встроенными в них медными включениями цилиндрической и сферической формы. Такие метаматериалы можно легко моделировать графическими средствами современных электромагнитных симуляторов и несложно реализовать на практике. Так, например, случай цилиндрических включений

был уже реализован на практике и представлен в работе [10] (рис. 1.)

Чтобы определить размеры элементов антенны, размеры элементарной ячейки предложенных метаматериалов и материальных параметров их составляющих, обратимся к основным результатам работы [8]. Согласно этим результатам максимально минимизированный профиль прямоугольной микрополосковой антенны, питаемой коаксиальной линией, (рис. 2) определяется следующими равенствами:

$$L = \frac{1}{16\sqrt{6\sqrt{2}}} \sqrt{\left(\frac{c}{f_r}\right)^3} \times \left(1 - \frac{1}{16\sqrt[4]{54\sqrt{2}}} \left(\frac{c}{f_r d}\right)^{3/4}\right) - bd,$$

$$W = \frac{1}{16\sqrt{6\sqrt{2}}} \sqrt{\left(\frac{c}{f_r}\right)^3},$$

$$\epsilon_r = \frac{768\sqrt{2}}{f_r} cd,$$
(1)

где  $L$  – оптимальная (минимизированная) длина полоска антенны,  $c$  – скорость света в вакууме,  $f_r$  – резонансная частота антенны,  $d$  – толщина подложки антенны, коэффициент  $b \approx 0.824$ ;  $W$  – оптимальная (минимизированная) ширина полоска антенны;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость подложки. Здесь и далее в статье подразумевается, что рассматриваемые подложки – немагнитные ( $\mu_r = 1$ ).

Пусть выбираемые метаматериальные подложки имеют квадратную элементарную ячейку со стороной, равной толщине подложки антенны.



Рис. 1. Образцы метаматериала: с пустыми отверстиями для включений (справа), с металлическими включениями в отверстиях (слева)

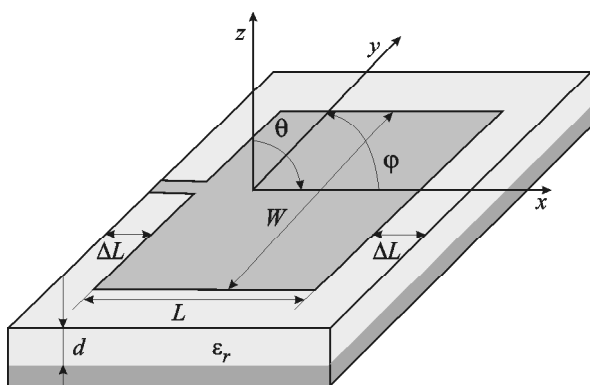


Рис. 2. Прямоугольная микрополосковая антенна, запитываемая коаксиальной линией

Длина  $L_a$  антенны и ее ширина  $W_a$  с учетом краевых эффектов на ребрах полоска могут быть вычислены по формулам [11, 12]:

$$L_a = L + 6\Delta L = L + 6bd,$$

$$W_a = W + 6\Delta W = W + 6d \frac{\ln 4}{\pi}, \quad (2)$$

где  $\Delta L$  и  $\Delta W$  определяют размеры зон краевых эффектов полоска по его длине и ширине соответственно.

Для преемственности результатов работы [8] будем предполагать, что  $f_r = 15$  ГГц. Для определенности предположим также, что  $d = 0.0004$  м. Тогда согласно равенствам (1) будем иметь:  $L = 0.0014$  м,  $W = 0.0037$  м,  $\epsilon_r = 14.4816$ . Для того же самого значения  $\epsilon_r$  в случае диэлектрической подложки выражения для длины полоска  $L_d$  и его ширины  $W_d$  вычисляются с помощью равенств [13]:

$$L_d = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - bd \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3)(W_d/d + 0.264)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258)(W_d/d + 0.8)},$$

$$W_d = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{1 + \epsilon_r}}, \quad (3)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{d}{W_d}\right)^{-1/2},$$

и оказываются равными 0.0025 и 0.0036 м соответственно (здесь  $\epsilon_{\text{reff}}$  – эффективная относитель-

ная диэлектрическая проницаемость антенны). Чтобы оценить выигрыш объемного профиля полоска антенн с метаматериальными подложками в сравнении с антенной с диэлектрической подложкой (толщины подложек считаются равными), будем использовать параметр  $VPMGF$  (volume profile miniaturization gain factor, выражается в процентах), введенный в работе [14]:

$$VPMGF = \left(1 - \frac{WL}{W_d L_d}\right) \cdot 100. \quad (4)$$

Простые расчеты с помощью формулы (4) показывают, что искомый выигрыш в объемном профиле составляет 42.4 %.

В настоящей работе для моделирования параметров антенн с метаматериальными подложками используется электромагнитный симулятор PLANC FDTD (версия 6.2), разработанный в лаборатории Information and Mathematical Science Laboratory Incorporated. В качестве моделируемых параметров выбраны S11-спектры антенн, их диаграммы направленностей, коэффициенты усиления по мощности (КУМ) и коэффициенты полезного действия (КПД). Получению этих данных предшествовала оценка параметров элементарных ячеек метаматериалов: относительных диэлектрических проницаемостей матриц  $\epsilon_m$  и радиусов включений  $r$ . Для этой цели проводилось так называемое эффективное моделирование выбранных метаматериалов в свободном пространстве. Суть такого моделирования заключается в том, что в соответствие выбранным метаматериалам в форме параллелепипеда ставятся плоские бесконечные в двух направлениях метаматериальные слои с элементарными ячейками метаматериальных параллелепипедов. При этом ориентация волнового вектора и векторов напряженности электрического и магнитного полей первичной волны совпадает с ориентацией тех же самых векторов электромагнитной волны, излучаемой полоском антенны. Такое моделирование для выбранных выше значений  $f_r$ ,  $\epsilon_r$  и  $d$  показало, что в случае цилиндрических включений при  $r = 0.000025$  м будем иметь  $\epsilon_m = 13.6952$ , а в случае сферических включений того же самого радиуса –  $\epsilon_m = 14.0307$ . Такой радиус включений при заданных значениях  $f_r$  и  $d$  выбран с тем, чтобы в относительно широком диапазоне частот, близких к  $f_r$ , действительная

часть эффективной относительной магнитной проницаемости метаматериалов была равна (или близка) единице, что требуется при использовании формул (1)–(3). Эффективное моделирование в свободном пространстве показало также, что диэлектрические и магнитные потери метаматериалов в относительно широком диапазоне частот, близких к  $f_r$ , не превышают  $10^{-3}$ . Исходя из этого, далее в работе будем пренебрегать мнимыми частями эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериалов.

В качестве материала матрицы может быть выбрана конденсаторная керамика, изготавливаемая, например, по технологии, предложенной в работе [15].

### 3. Результаты моделирования и дискуссия

На рис. 3 приведены результаты численного моделирования для  $S_{11}$ -спектров антенны с диэлектрической подложкой и метаматериальными антеннами, соответствующие выбранным значениям  $f_r$ ,  $\epsilon_r$  и  $d$ . Как видно из этого рисунка, первый пик каждого спектра соответствует резонансной частоте  $f_r$ . Будем называть такие пики главными резонансами или главными гармониками. Из рисунка видно, что основной пик каждой антенны смещен вправо относительно значения  $f_r$ , что обусловлено краевыми эффектами на ребрах полоска. Более

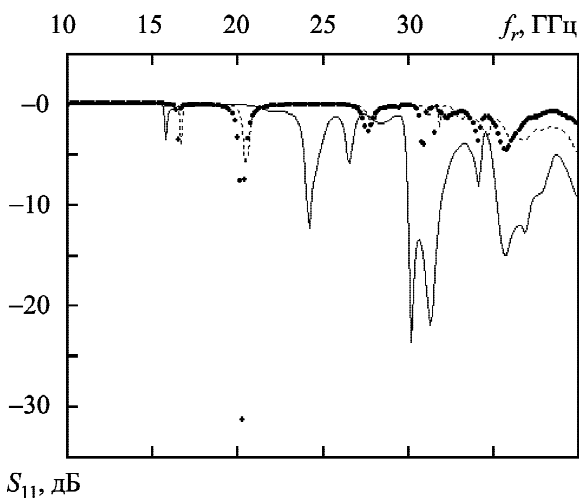


Рис. 3.  $S_{11}$ -спектры антенн с диэлектрической подложкой (сплошная линия), с метаматериальной подложкой с цилиндрическими включениями (штриховая линия) и с метаматериальной подложкой со сферическими включениями (пунктирная линия)

того, такое смещение частоты меньше для антенны с диэлектрической подложкой (15.84 ГГц), чем для антенн с метаматериальными подложками (16.78 ГГц в случае цилиндрических включений и 16.58 ГГц в случае сферических включений). Отметим, что кривые спектров антенн с метаматериальными подложками близки друг к другу, в особенности для первых двух гармоник.

На рис. 4 приведены диаграммы направленности (ДН) по напряженности электрического поля всех антенн, смоделированных на их главных гармониках. Здесь и далее на каждой ДН нулевой уровень соответствует  $-30$  дБ, а единичный уровень соответствует 0 дБ. Как видно из этого рисунка, ДН антенны с диэлектрической подложкой по форме достаточно схожа с ДН антенн с метаматериальными подложками. Принципиальным отличием ДН последних антенн от ДН первой является наличие боковых лепестков.

Как видно из рис. 4, разница в форме ДН для метаматериальных антенн минимальна. Численные эксперименты показали, что эта разница становится все более существенной при увеличении объемной доли металлических включений. Тем не менее заметное увеличение объемной доли металлических включений является нежелательным, т. к. при этом действительная часть

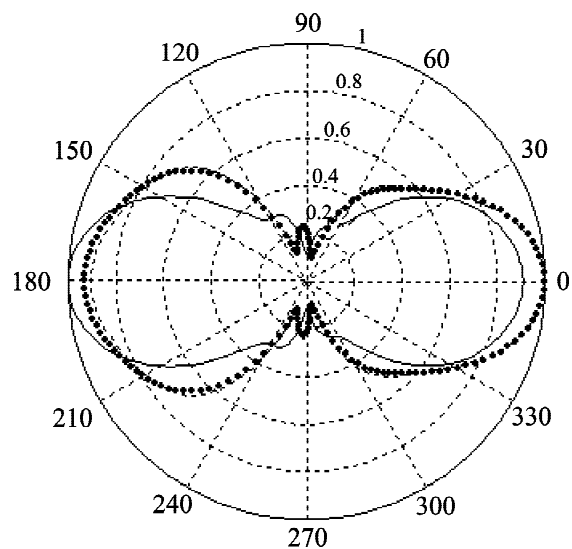


Рис. 4. Диаграммы направленностей по напряженности электрического поля главных гармоник антенн с диэлектрической подложкой (сплошная линия), с метаматериальной подложкой с цилиндрическими включениями (штриховая линия) и с метаматериальной подложкой со сферическими включениями (пунктирная линия)

эффективной относительной магнитной проницаемости подложки становится меньше единицы и продолжает уменьшаться [10]. А значит, концепция миниатюризации антенн, вообще говоря, перестает быть действительной [8], как и общая теория микрополосковых антенн [13].

Несмотря на заметную схожесть ДН антенн с разной формой металлических включений на их главных гармониках, значения КУМ и КПД этих антенн могут различаться существенно. Так, численное моделирование показало, что в случае цилиндрических включений максимальное значение КУМ достигается при  $\theta = 50^\circ$  и  $\varphi = 180^\circ$  и равно 4.6 дБ, а КПД = 47.92 %. В случае сферических включений максимальное значение КУМ достигается при тех же значениях углов  $\theta$  и  $\varphi$  и равно 5.7 дБ, а КПД = 62.9 %. Для сравнения важно отметить, что в случае антенны с диэлектрической подложкой максимальное значение КУМ достигается при  $\theta = 50^\circ$  и  $\varphi = 0^\circ$  и равно 4.6 дБ, а КПД = 42.18 %.

Как видно из последних данных, использование метаматериальных подложек при изготовлении микрополосковых антенн позволяет не только минимизировать линейные размеры антенн, но и улучшить такие их параметры, как КУМ и КПД. При этом ДН метаматериальных антенн незначительно отличается по форме от ДН антенны с диэлектрической подложкой. Дополнительным достоинством антенн с метаматериальными подложками является возможность использовать одну из дополнительных гармоник, что маловероятно в случае прямоугольных антенн с диэлектрической подложкой. Действительно, моделирование ДН предложенных выше метаматериальных антенн с использованием симулятора PLANC FDTD показало, что ДН второй гармоники метаматериальной антенны для случая цилиндрических включений (на частоте 20.56 ГГц) и третьей гармоники метаматериальной антенны для случая сферических включений (на частоте 27.69 ГГц) по форме схожи с ДН главной гармоники антенны с диэлектрической подложкой (см. рис. 5). Численное моделирование показало также, что максимальное значение КУМ второй гармоники метаматериальной антенны для случая цилиндрических включений достигается при  $\theta = 50^\circ$  и  $\varphi = 180^\circ$  и равно 5.4 дБ, а КПД = 78.21 %. А максимальное значение КУМ третьей гармоники метаматериальной антенны

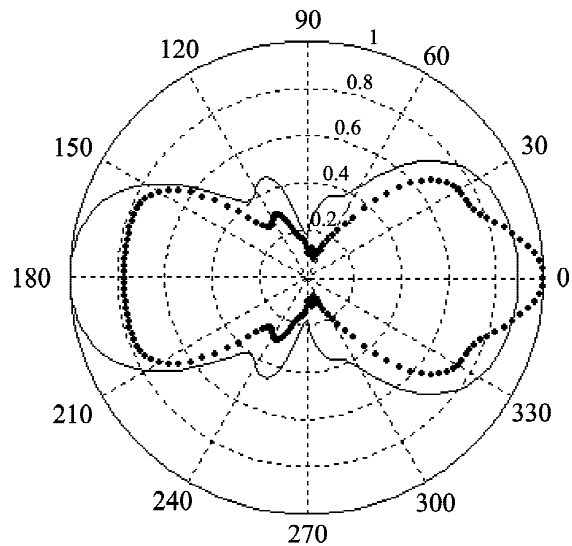


Рис. 5. Диаграммы направленностей по напряженности электрического поля второй гармоники метаматериальной антенны для случая цилиндрических включений (сплошная линия) и третьей гармоники метаматериальной антенны для случая сферических включений (пунктирная линия)

для случая сферических включений достигается при  $\theta = 50^\circ$  и  $\varphi = 0^\circ$  и равно 4.9 дБ, в то время как КПД = 52.45 %. Отметим, что ДН рассмотренных гармоник метаматериальных антенн отличаются направлением максимума – оно составляет  $180^\circ$  в  $\varphi$ -плоскости для второй гармоники антенны с цилиндрическими включениями и  $0^\circ$  в  $\varphi$ -плоскости для третьей гармоники антенны со сферическими включениями, как и в случае главной гармоники антенны с диэлектрической подложкой.

Как видно из последних данных, значения КУМ и КПД приведенных на рис. 5 ДН больше значений этих же параметров ДН главной гармоники антенны с диэлектрической подложкой. Это позволяет заключить, что рассмотренные метаматериальные антенны – двухдиапазонные, что является еще одним достоинством микрополосковых антенн с метаматериальными подложками.

#### 4. Заключение

Предложенная в работе [8] концепция минимизации объемного профиля СВЧ микрополосковых антенн в настоящей работе используется для численного моделирования параметров прямоугольных микрополосковых антенн с подложками в виде диэлектрических матриц в форме параллелепипе-

да с периодически внедренными в них медными включениями цилиндрической и сферической формы. Такое моделирование показало, что при схожести форм ДН антенн с метаматериальными подложками и антенны с диэлектрической подложкой метаматериальные антенны имеют следующие преимущества перед антенной с диэлектрической подложкой: меньшие линейные размеры, большие значения коэффициента усиления по мощности и коэффициента полезного действия, а также наличие дополнительной рабочей частоты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sarychev A. K. and Shalaye V. M. *Electrodynamics of metamaterials*. – Singapore: World Scientific, 2007. – 247 p.
2. Lovat G., Burghignoli P., Capolino F., and Jackson D. R. High directivity in low-permittivity metamaterial slabs: ray-optic vs. leaky-wave models // *Microw. Opt. Techn. Lett.* – 2006. – Vol. 48, No. 12. – P. 2542–2548. DOI: 10.1002/mop.22004
3. Ullah M. H., Islam M. T., and Faruque M. R. I. A near-zero refractive index meta-surface structure for antenna performance improvement // *Materials*. – 2013. – Vol. 6, No. 11. – P. 5058–5068. DOI: 10.3390/ma6115058
4. Boubakri A. and Tahar J. B. H. Optimization of a patch antenna performances using a left handed metamaterial // *PIER Symp.: Proc. symp.*, 20-23 March 2011, Marrakesh, Morocco. – Cambridge, MA, USA: The Electromagnetics Academy. – 2011. – P. 419–421.
5. Inamdard K., Kosta Y. P., and Patnaik S. Criss-cross metamaterial-substrate microstrip antenna with enhanced gain and bandwidth // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2015. – Vol. 58, No. 2. – P. 69–74. DOI: 10.3103/S073527271502003X
6. Mosallaei H. and Sarabandi K. Engineered meta-substrates for antenna miniaturization // *URSI Symp.: Proc. Symp. on Electromagnetic Theory*, 23-27 May, 2004, Pisa, Italy. – Pisa, Italy: University of Pisa. – 2004. – P. 191–193.
7. Buell K., Mosallaei H., and Sarabandi K. A substrate for small patch antennas providing tunable miniaturization factors // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* – 2006. – Vol. 54, No. 1. – P. 135–146. DOI: 10.1109/TMTT.2005.860329
8. Rybin O. Microwave miniaturization concept for narrow band rectangular patch antenna structures // *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* – 2015. – Vol. 48, No. 1. – P. 69–75. DOI: 10.3233/JAE-140197
9. Krupka J., Parka J., Łoś P., Harnett J. G., and Naguszevska K. Silver-gelatine metal-dielectric composites made from developed X-ray films // *IEEE Trans. Antennas Wireless Propag. Lett.* – 2011. – Vol. 10. – P. 1602–1604. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2182491
10. Rybin O. and Zouganelis G. Enhancement of the dielectric constant in magneto-dielectric metamaterial substrates // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2009. – Vol. 68, No. 9. – P. 835–840.
11. Wheeler H. A. Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet // *IEEE Trans. Microw.*

- Theory Techn.* – 1965. – Vol. 13, No. 2. – P. 172–185. DOI: 10.1109/TMTT.1965.1125962
12. Dwivedi S., Mishra V., and Kosta Y. P. Metamaterial inspired patch antenna miniaturization technique for satellite // *IEEE Conf.: Proc. Int. Conf. on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking*, 19-21 Dec. 2012, Surat, Gujarat, India. – 2012 – P. 1–6. DOI: 10.1109/ET2ECN.2012.6470082
  13. Balanis C. A. *Antenna theory. Analysis and design*. 2nd ed. – New York: John Wiley & Sons, 1997. – 940 p.
  14. Rybin O. and Shulga S. Profile miniaturization and performance improvement of a rectangular patch antenna by using magnetic metamaterial substrates // *Int. J. RF Microw. Comput. Aid. Eng.* – 2016. – Vol. 26, No. 3. – P. 254–261. DOI: 10.1002/mmce.20961
  15. Thirumalai S. and Shanmugavel B. P. Microwave Assisted Synthesis and Characterization of Barium Titanate Nanoparticles for Multi Layered Ceramic Capacitor Applications // *J. Microw. Power Electromagn. Energy*. – 2011. – Vol. 45, No. 3. – P. 121–127.

## REFERENCES

1. SARYCHEV, A. K. and SHALAYEV, V. M., 2007. *Electrodynamics of metamaterials*. Singapore: World Scientific Publ.
2. LOVAT, G., BURGHIGNOLI, P., CAPOLINO, F. and JACKSON, D. R., 2006. High directivity in low-permittivity metamaterial slabs: ray-optic vs. leaky-wave models. *Microw. Opt. Techn. Lett.* vol. 48, no. 12, pp. 2542–2548. DOI: 10.1002/mop.22004
3. ULLAH, M. H., ISLAM, M. T. and FARUQUE, M. R. I., 2013. A near-zero refractive index meta-surface structure for antenna performance improvement. *Materials*. vol. 6, no. 11, pp. 5058–5068. DOI: 10.3390/ma6115058
4. BOUKARI, A. and TAHAR, J. B. H., 2011. Optimization of a patch antenna performances using a left handed metamaterial. In: *PIER Symposium Proceedings*. Marrakesh, Morocco, 20-23 March 2011. Cambridge, MA, USA: The Electromagnetics Academy, pp. 419–421.
5. INAMDAR K., KOSTA Y. P. and PATNAIK, S., 2015. Criss-cross metamaterial-substrate microstrip antenna with enhanced gain and bandwidth. *Radioelectronics and Communications Systems*. vol. 58, no. 2, pp. 69–74. DOI: 10.3103/S073527271502003X
6. MOSALLAEI, H. and SARABANDI, K., 2004. Engineered meta-substrates for antenna miniaturization. In: *URSI International Symposium Proceedings*. Pisa, Italy, 23-27 May 2004. Pisa, Italy: University of Pisa, pp. 191–193.
7. BUELL, K., MOSALLAEI, H. and SARABANDI, K., 2006. A substrate for small patch antennas providing tunable miniaturization factors. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* vol. 54, no. 1, pp. 135–146. DOI: 10.1109/TMTT.2005.860329
8. RYBIN, O., 2015. Microwave miniaturization concept for narrow band rectangular patch antenna structures. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* vol. 48, no. 1, pp. 69–75. DOI: 10.3233/JAE-140197
9. KRUPKA, J., PARKA, J., ŁOŚ, P., HARNETT, J. G. and NAGUSZEWSKA, K., 2011. Silver-gelatine metal-dielectric composites made from developed X-ray films. *IEEE Trans. Antennas Wireless Propag. Lett.* vol. 10, pp. 1602–1604. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2182491

10. RYBIN, O. and ZOUGANELIS, G., 2009. Enhancement of the dielectric constant in magneto-dielectric metamaterial substrates. *Telecommunications and Radio Engineering*. vol. 68, no. 9, pp. 835–840.
11. WHEELER, H. A., 1965. Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* vol. 13, no. 2, pp. 172–185. DOI: 10.1109/TMTT.1965.1125962
12. DWIVEDI, S., MISHRA, V. and KOSTA Y. P., 2012. Metamaterial inspired patch antenna miniaturization technique for satellite. In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking*. Surat, Gujarat, India, 19-21 December 2012, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ET2ECN.2012.6470082
13. BALANIS, C. A., 1997. *Antenna theory. Analysis and design*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
14. RYBIN, O. and SHULGA, S., 2016. Profile miniaturization and performance improvement of a rectangular patch antenna by using magnetic metamaterial substrates. *Int. J. RF Microw. Comput. Aid. Eng.* vol. 26, no. 3, pp. 254–261. DOI: 10.1002/mmce.20961
15. THIRUMALAI, S. and SHANMUGAVEL, B. P., 2011. Microwave Assisted Synthesis and Characterization of Barium Titanate Nanoparticles for Multi Layered Ceramic Capacitor Applications. *J. Microw. Power Electromagn. Energy*. vol. 45, no. 3, pp. 121–127.

O. M. Rybin and S. M. Shulga

V. N. Karazin Kharkiv National University,  
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

#### MICROWAVE CAD FOR MINIATURIZED RECTANGULAR PATCH ANTENNAS WITH METAMATERIAL SUBSTRATES

*Purpose:* Numerical experiments are made to design miniaturized microwave rectangular patch antennas with metamaterial substrates.

*Design/methodology/approach:* The simulations for patch antennas with two different kinds of metamaterial substrates are made by the use of electromagnetic simulator PLANC FDTD.

*Findings:* The designs for antennas with the above metamaterial substrates are obtained for the gigahertz frequencies. The comparative analysis of parameters of the metamaterial antennas and those of the patch antenna with the dielectric substrate parameters of the same relative permittivity value is made.

*Conclusions:* The proposed metamaterial substrates enable not only to minimize the antenna profile but to improve such parameters as the power gain and the efficiency as well.

*Key words:* patch antennas, metamaterials, effective parameters, antenna substrates, antenna miniaturization

O. M. Рибін, С. М. Шульга

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

#### АВТОМАТИЗОВАНЕ НВЧ ПРОЕКТУВАННЯ МІНІАТЮРИЗОВАНИХ ПРЯМОКУТНИХ МІКРОСМУЖКОВИХ АНТЕН З МЕТАМАТЕРІАЛЬНИМИ ПІДКЛАДКАМИ

*Предмет і мета роботи:* Виконано числові експерименти з метою проектування мініатюризованих прямокутних мікросмужкових НВЧ антен з метаматеріальними підкладками.

*Методи та методологія:* Виконано моделювання мікросмужкових антен з двома різновидами метаматеріальних підкладок із використанням електромагнітного симулятора PLANC FDTD.

*Результати:* Отримано дизайни антен з метаматеріальними підкладками у гігагерцевому діапазоні. Виконано порівняльний аналіз характеристик цих антен з характеристиками мікросмужкової антени з діелектричною підкладкою з таким же самим значенням відносної діелектричної проникності.

*Висновок:* Запропоновані метаматеріальні підкладки дозволяють не лише зменшити об'ємний профіль мікросмужкових антен, але й покращити такі параметри випромінювання, як коефіцієнт підсилення потужності та коефіцієнт корисної дії.

*Ключові слова:* мікросмужкові антени, метаматеріали, ефективні параметри, антенні підкладки, мініатюризація антен

Статья поступила в редакцию 16.02.2016