

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДУЛИРОВАННОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНЫХ СПИРАЛЕЙ И ВАРИКАПОВ

И. В. Семченко¹, И. А. Фаняев², А. Л. Самофалов², М. Ю. Евсиевич¹,
С. А. Хахомов², А. А. Ковалев², П. В. Сомов², Цзихун Гу³, Даши Динг³

¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск

²Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины

³Нанкинский университет науки и технологии

DESIGN OF A SPATIOTEMPORAL MODULATED METASURFACE BASED ON PLANAR SPIRALS AND VARACTORS

I. V. Semchenko¹, I. A. Fanyaev², A. L. Samofalov², M. Yu. Yeusiyevich¹,
S. A. Khakhomov², A. A. Kavaliou², P. V. Somov², Jihong Gu³, Dazhi Ding³

¹SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk

²Francisk Skorina Gomel State University

³Nanjing University of Science and Technology

Аннотация. Представлены результаты проектирования и численного полноволнового моделирования пространственно-временной модулированной метаповерхности, предназначенной для имитации эффекта Доплера. Элементная база метаповерхности включает планарные одновитковые спирали, выполненные на диэлектрической подложке Arlon AD255C, и варикапы, встроенные в плечи спиралей для динамического управления электромагнитным откликом. Показано, что изменение ёмкости варикапов в диапазоне 0,03–0,24 пФ обеспечивает сдвиг резонансной частоты и линейное изменение фазы отражённой волны, что эквивалентно доплеровскому сдвигу частоты при физическом движении объекта.

Ключевые слова: метаповерхность, пространственно-временная модуляция, эффект Доплера, планарная спираль, варикап, динамическое управление.

Для цитирования: Проектирование пространственно-временной модулированной метаповерхности на основе планарных спиралей и варикапов / И. В. Семченко, И. А. Фаняев, А. Л. Самофалов, М. Ю. Евсиевич, С. А. Хахомов, А. А. Ковалев, П. В. Сомов, Цзихун Гу, Даши Динг // Проблемы физики, математики и техники. – 2026. – № 2 (67). – С. 40–45. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_40. – EDN: VNGTHH

Abstract. The results of the design and numerical full-wave simulation of a spatiotemporally modulated metasurface intended for simulating the Doppler effect are presented. The elemental base of the metasurface includes planar single-turn spirals fabricated on an Arlon AD255C dielectric substrate and varactors embedded into the spiral arms for dynamic control of the electromagnetic response. It is shown that a variation of the varactor capacitance in the range of 0.03–0.24 pF provides a shift in the resonant frequency and a linear change in the phase of the reflected wave, which is equivalent to the Doppler frequency shift under physical motion of the object.

Keywords: metasurface, spatiotemporal modulation, Doppler effect, planar spiral, varactor, dynamic control.

For citation: Design of a spatiotemporal modulated metasurface based on planar spirals and varactors / I. V. Semchenko, I. A. Fanyaev, A. L. Samofalov, M. Yu. Yeusiyevich, S. A. Khakhomov, A. A. Kavaliou, P. V. Somov, Jihong Gu, Dazhi Ding // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2026. – № 2 (67). – P. 40–45. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_40 (in Russian). – EDN: VNGTHH

Введение

В последние годы метаповерхности стали одним из наиболее перспективных инструментов для динамического управления электромагнитными волнами. В отличие от статических структур, пространственно-временные модулированные метаповерхности позволяют осуществлять не только пространственное формирование диаграммы рассеяния, но и преобразование частоты

отраженного сигнала. Данная способность открывает новые возможности в области радиолокации и систем радиоэлектронной борьбы, в частности для создания ложных движущихся целей за счет имитации эффекта Доплера.

Основными элементами таких устройств служат управляемые компоненты с нелинейным откликом, в частности варикапы. Их использование позволяет динамически изменять импеданс

ячеек метаповерхности за счет вариации емкости. Эффективная имитация доплеровского сдвига, однако, требует строгого согласования закона модуляции с требуемым преобразованием частоты, что обуславливает необходимость детального электродинамического анализа, выполненного, например, в работах [1]–[6].

Целью данной работы является проведение численного полноволнового моделирования пространственно-временной метаповерхности на планарных спиральных и варикапах и оптимизация её параметров для достижения целевого доплеровского сдвига частоты. В ходе исследования была разработана полномерная компьютерная модель устройства, что позволило подтвердить возможность управления спектром отраженного сигнала для имитации ложной движущейся цели.

1 Проектирование

Принцип имитации эффекта Доплера основан на временной модуляции свойств метаповерхности. При взаимодействии с такой модулированной структурой частота отраженной волны увеличивается или уменьшается относительно частоты падающей, что эквивалентно сдвигу частоты, наблюдаемому при физическом движении объекта.

Предлагаемый подход заключается в создании метаповерхности, управляющей фазой отраженной волны по заданному временному закону. Линейное во времени изменение фазы приводит к постоянному сдвигу частоты отраженного сигнала относительно частоты падающего на величину, пропорциональную скорости изменения этой фазы:

$$f_r = f_i + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}.$$

Таким образом, линейное изменение фазы во времени создает постоянный частотный сдвиг, имитируя равномерное движение объекта.

Элементарная ячейка метаповерхности построена на основе планарных одновитковых спиралей со встроенными в одно плечо варикапами. Термин «со-поляризационное отражение» означает, что отраженная волна имеет линейную поляризацию, совпадающую с поляризацией падающей волны. Использование варикапов позволяет осуществить пространственно-временную модуляцию рассеянного поля.

Преимущество использования такой структуры состоит в том, что под действием падающей плоской электромагнитной волны в такой одновитковой планарной спирали индуцируются дипольные моменты, которые можно выразить через компоненты тензоров электрических, магнитных, электромагнитных и магнитоэлектрических поляризуемостей. Равные по абсолютной величине амплитуды этих поляризуемостей означают

сбалансированный отклик от такого микро-резонатора. Для достижения сбалансированного электромагнитного отклика (равенства амплитуд поляризуемостей в резонансе) от спирального микро-резонатора было проведено численное моделирование одновитковой планарной спирали (с варикапом) с учетом планируемого к использованию диэлектрика, при этом все структурные параметры планарной спирали оптимизированы. Данная методика подробно описана в работах [7], [8].

Ранее, в работах [9]–[11] нами была продемонстрирована эффективность использования планарных спиралей (без варикапа) при проектировании метаповерхностей с функциями отражающего кросс-поляризатора, пропускающего кросс-поляризатора и не отражающего поглотителя в СВЧ диапазоне.

Оптимальное расположение планарных спиралей для данного преобразования поляризации может быть найдено, если известна требуемая ориентация электрического и магнитного дипольных моментов в элементарной ячейке. Для достижения полной со-поляризованной отражательной способности компоненты отраженных и прошедших полей должны быть равны следующим значениям:

$$E_r^y = 0, E_r^x = E_0 e^{j\phi_r^{\text{co}}}, E_t^y = 0, E_t^x = 0. \quad (1.1)$$

Здесь ϕ_r^{co} – начальная фаза отраженной волны, E_0 – амплитуда падающей волны, j – мнимая единица.

Подставив условие (1.1) в компоненты отраженного $E_r^{x,y}$ и прошедшего $E_t^{x,y}$ поля, получаем [9]–[11]:

$$\begin{aligned} E_r^x &= -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_x - \frac{1}{c} \hat{m}_y \right), \\ E_t^x &= E_0 - \frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_x + \frac{1}{c} \hat{m}_y \right), \\ E_r^y &= -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_y - \frac{1}{c} \hat{m}_x \right), \\ E_t^y &= -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_y + \frac{1}{c} \hat{m}_x \right). \end{aligned}$$

Здесь ω – угловая частота падающей волны, η_0 – волновое сопротивление свободного пространства, c – скорость света в вакууме, S – площадь элементарной ячейки метаповерхности, состоящей из четырех планарных спиралей, $\hat{p}_{x,y}$ и $\hat{m}_{x,y}$ – компоненты электрического дипольного момента и магнитного момента этой ячейки.

Можно получить конечные условия реализации со-поляризованного отражения, основанные на электрических и магнитных дипольных

моментах ячейки, которые записываются следующим образом:

$$\hat{p}_y = \frac{1}{c} \hat{m}_x = 0, \quad \hat{p}_x = -j \frac{SE_0}{\omega \eta_0} (1 - e^{j\phi_r^{\text{co}}}),$$

$$\frac{1}{c} \hat{m}_y = -j \frac{SE_0}{\omega \eta_0} (1 + e^{j\phi_r^{\text{co}}}).$$

Полученные условия показывают необходимую ориентацию и составляющие электрического и магнитного дипольных моментов. Это условие может быть применено к любым метаповерхностям с субволновыми поляризованными включениями для достижения требуемых сополяризованных коэффициентов отражения.

2 Моделирование

При моделировании в качестве диэлектрика взят материал Arlon AD255C с относительно невысокой стоимостью и соответствующими нашим расчетам относительной диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 2,55$) и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,0014. Толщина медного слоя составила $t = 35$ мкм, толщина диэлектрика $h = 3,175$ мм.

Баланс электромагнитных свойств планарной спирали реализован на резонансной частоте 4,71 ГГц. Параметры одновитковой планарной спирали без варикапа (рисунок 2.1) приведены в таблице 2.1, где l – расстояние между планарными спиралями.

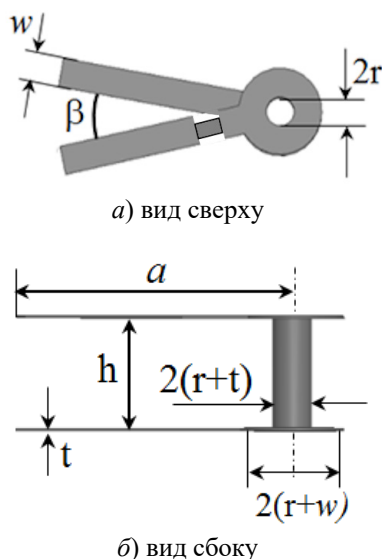


Рисунок 2.1 – Параметры одновитковой планарной спирали

Для динамического управления использовался варикап MV3903-P2010-STD с сопротивлением R_s около 2 Ом, изменением емкости C в диапазоне 0,03–0,25 пФ, изменением напряжения питания U_p в пределах от 0 до 17 В.

Таблица 2.1 – Значения параметров одновитковой планарной спирали как сополяризационного отражателя на подложке Arlon AD255C

Параметр	Значение
β , град	16
a , мм	14,2
r , мм	0,75
w , мм	1
l , мм	12

На рисунке 2.2 показана модель элементарной ячейки предлагаемой метаповерхности.

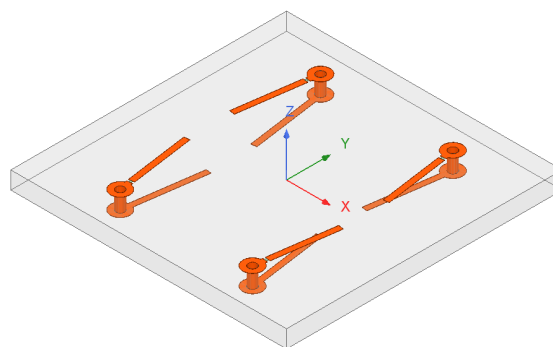


Рисунок 2.2 – Модель элементарной ячейки метаповерхности, реализующей сополяризационное отражение. Варикапы смонтированы на полосках планарных спиралей на верхней стороне метаматериала

Проведен электродинамический расчет модели, в ходе которого получены частотные зависимости коэффициентов отражения, прохождения и поглощения (рисунок 2.3) в диапазоне частот от 3,8 ГГц до 5,8 ГГц, емкость варикапа составляла 0,24 пФ.

Для подтверждения сформулированной ранее идеи о том, что метаповерхность должна управлять фазой отраженной волны, было проведено численное моделирование с изменением емкости варикапа в диапазоне от 0,03 до 0,24 пФ. На рисунках 2.4 и 2.5 приведены графики частотной зависимости фазы отраженной волны и коэффициентов отражения, прохождения и поглощения при различных значениях электроемкости варикапа.

Из рисунка 2.5 видно, что резонансная частота отраженной волны за счет изменения электроемкости варикапа может линейно сдвигаться, и тем самым осуществляется имитация движений объекта в пространстве с соответствующим доплеровским сдвигом частоты. Расчеты показывают, что при частоте падающей волны $\nu_0 = 4,75 \text{ ГГц}$ и частоте отраженной волны $\nu_1 = 5,25 \text{ ГГц}$ имитируемая скорость движения объекта составляет $v = 5,3 \cdot 10^{-2} c$.

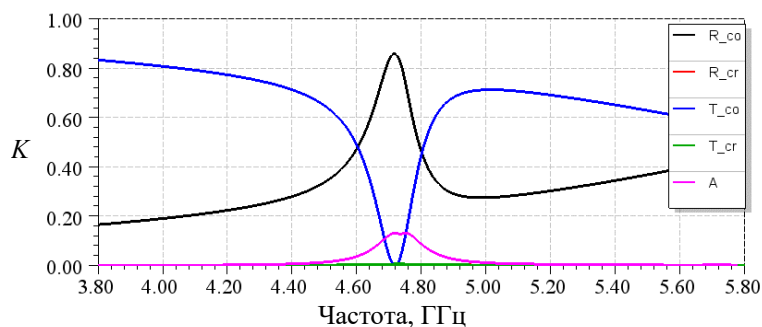


Рисунок 2.3 – График частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения (R_{co}) и прохождения (T_{co}), коэффициентов кросс-поляризованного отражения (R_{cr}) и прохождения (T_{cr}), коэффициента поглощения (A)

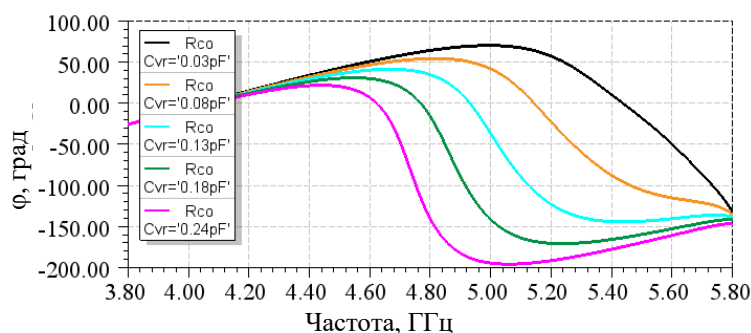


Рисунок 2.4 – Частотная зависимость фазы отраженной волны при различных значениях емкости варикапа

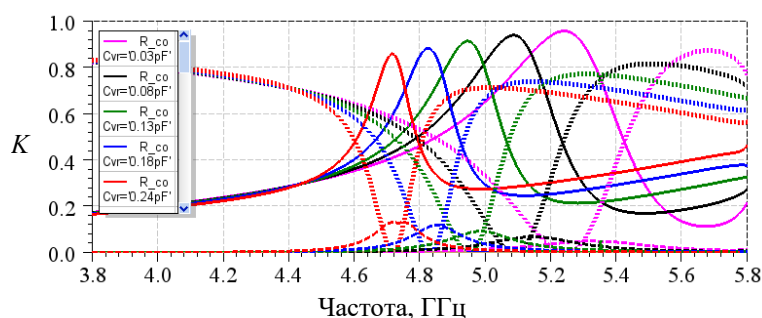


Рисунок 2.5 – Частотная зависимость коэффициентов отражения, прохождения и поглощения при различных значениях емкости варикапа

Поскольку баланс электромагнитных свойств был изначально достигнут для одиночной спирали без варикапа, топология цепей питания разрабатывалась исходя из минимизации их паразитного влияния. Однако предварительное применение полной модели с интегрированными линиями питания выявило их существенное воздействие на характеристики метаповерхности. В частности, наблюдался значительный сдвиг резонансной частоты вверх и возникновение побочных резонансов, что было обусловлено увеличением эффективной электрической длины спирального элемента.

Для компенсации этого влияния в линии питания были интегрированы фильтры в виде секторов круга (рисунок 2.6). Последующая параметрическая оптимизация геометрии фильтров и всей элементарной ячейки позволила подавить

паразитные резонансы и восстановить требуемые спектральные характеристики в рабочей полосе частот (рисунок 2.6).

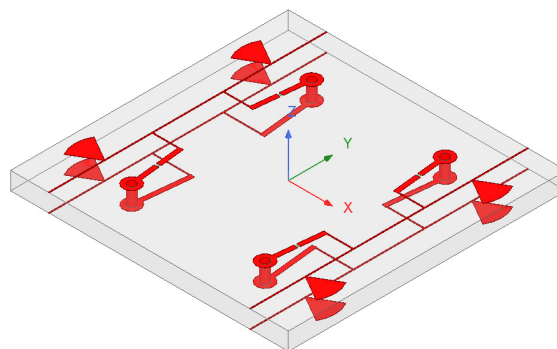


Рисунок 2.6 – Модель элементарной ячейки метаповерхности с предлагаемыми линиями питания и фильтрами

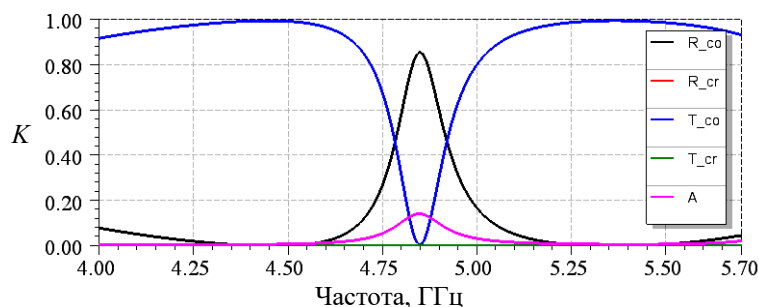


Рисунок 2.7 – Частотная зависимость коэффициентов отражения, прохождения и поглощения (при $C = 0,24$ пФ) для метаповерхности с фильтрами и линиями питания

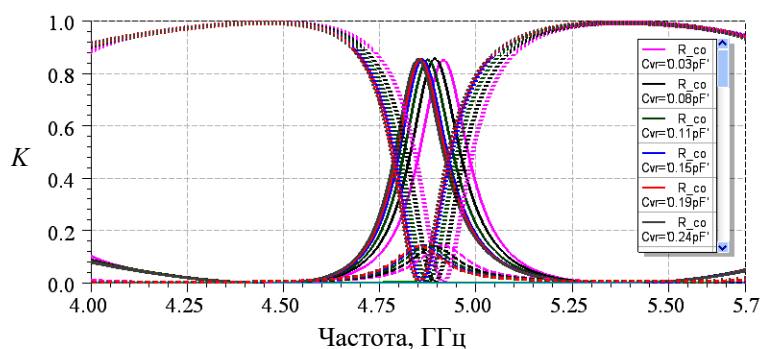


Рисунок 2.8 – Частотная зависимость коэффициентов отражения, прохождения и поглощения при различных значениях емкости варикапа с фильтрами в линиях питания

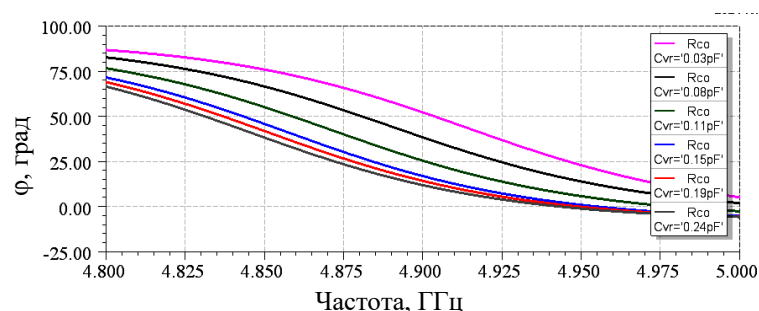


Рисунок 2.9 – Частотная зависимость фазы отраженной волны от метаповерхности с линиями питания и фильтрами при различных значениях емкости варикапа

Результаты численных расчетов предлагаемой метаповерхности, реализующей со-поляризационное отражение, приведены на рисунках 2.7–2.9.

За счет применения фильтров в линиях питания и оптимизации линейных параметров метаповерхности были получены приемлемые результаты. Были убраны побочные резонансы в исследуемой полосе частот.

Результаты моделирования подтверждают возможность управления спектром отраженного сигнала для имитации ложной движущейся цели.

Полномерная компьютерная модель устройства показана на рисунке 2.10.

На концах линий питания имеются контактные площадки для припаивания проводов от платы управления напряжением к метаповерхности.

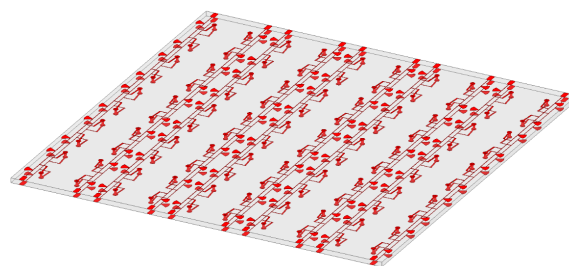


Рисунок 2.10 – Полномерная компьютерная модель метаповерхности на основе планарных спиралей и варикапов с линиями электрического питания, реализующей со-поляризационное отражение волн с измененной частотой

Следующим этапом работы является изготовление экспериментального образца метаповерхности и проведение экспериментальных исследований.

Заключение

Разработана полномерная компьютерная модель пространственно-временной модулированной метаповерхности на основе планарных спиралей и варикапов и проведено её численное полноволновое моделирование. Исследование включало проектирование элементарной ячейки в виде планарной одновитковой спирали на диэлектрической подложке Arlon AD255C, а также оптимизацию параметров для обеспечения сопляризационного отражения. В процессе моделирования было выявлено существенное влияние линий питания варикапов на резонансные характеристики структуры, выражающееся в сдвиге резонансной частоты и появлении побочных резонансов, что было устранено путем внедрения фильтров в линии питания и геометрической оптимизации элементов. В результате удалось обеспечить линейное управление фазой отраженной волны посредством изменения емкости варикапа в диапазоне от 0,03 до 0,24 пФ, что подтверждает возможность достижения целевого доплеровского сдвига частоты. Таким образом, практическая значимость работы заключается в подтверждении возможности использования спроектированной метаповерхности для имитации ложных движущихся целей за счет управления спектром отраженного сигнала для потенциального применения в системах радиолокации и радиоэлектронной борьбы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Smart Doppler cloak operating in broad band and full polarizations* / X. G. Zhang, Y. L. Sun, Q. Yu [et al.] // *Advanced Materials*. – 2021. – Vol. 33, № 17. – P. 2007966.
2. *Scattering Center Model Inspired Micro-Motion False Target Generation Using Time-Modulated Metasurface* / Y. Hou, Y. Zhu, M. Li [et al.] // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2024. – Vol. 23, № 12. – P. 4273–4277.
3. *Experimental demonstration of a time-domain digital-coding metasurface for a Doppler cloak* / B. Liu, Y. Zhu, M. Li [et al.] // *Optics Express*. – 2021. – Vol. 29, № 2. – P. 740–750.
4. *Wu, Z. Space-time-modulated metasurfaces with spatial discretization: Free-space N-path systems* / Z. Wu, C. Scarborough, A. Grbic // *Physical Review Applied*. – 2020. – Vol. 14, № 6. – P. 064060.
5. *Time-varying metasurface driven broadband radar jamming and deceptions* / W. Zhou, S. Zhu, Z. Zhang [et al.] // *Optics Express*. – 2024. – Vol. 32, № 10. – P. 17911–17921.

6. *Metasurface Doppler Cloak for Broadband Radar Stealth* / T. Lopez, T. Lepetit, B. Ratni [et al.] // *Advanced Physics Research*. – 2025. – Vol. 4, № 10. – e00064.

7. *Generalized constitutive relations for metamaterials based on the quasi-static Lorentz theory* / A. Ishimaru, S. W. Lee, Y. Kuga [et al.] // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2003. – Vol. 51 – P. 2550–2557.

8. *Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer* / V. S. Asadchy, I. A. Faniayev, Y. Ra'di, [et al.] // *Photonics and Nano-structures – Fundamentals and Applications*. – 2014. – Vol. 12, № 4. – P. 298–304.

9. *Расчет параметров метаматериала для получения кросс-поляризационного полного отражения при отсутствии прохождения и поглощения электромагнитных волн* / С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов, И. А. Фаняев [и др.] // *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. – 2023. – № 3 (138). – С. 106–110.

10. *Метаповерхность с функцией пропускающего кросс-поляризатора на основе одновитковых планарных спиралей* / И. А. Фаняев, А. Л. Самофалов, А. Ю. Кравченко [и др.] // *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. – 2023. – № 6 (141). – С. 117–122.

11. *Метаповерхность на основе одновитковых планарных спиралей со свойством не отражающего поглотителя в СВЧ диапазоне* / И. А. Фаняев, А. Л. Самофалов, И. В. Семченко [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2024. – № 3 (60). – С. 38–43.

12. *Selective Manipulation of Microwaves by a Cascade of Independent Metasurfaces Based on Planar Spirals* / I. Fanyayev, A. Samofalov, A. Kravchenko [et al.] // *International Journal of RF and Microwave Computer – Aided Engineering*. – 2025. – Vol. 2025. – № 1. – P. 2346639.

Работа выполнена в рамках проектов БРФФИ №Ф24КИТГ-005 и Ф25КИ-034.

Поступила в редакцию 16.03.2026.

Информация об авторах

Семченко Игорь Валентинович – д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. НАН Беларуси
 Фаняев Иван Александрович – к.т.н., доцент
 Самофалов Андрей Леонидович – к.ф.-м.н., доцент
 Евсеевич Михаил Юрьевич – младший научный сотрудник
 Хахомов Сергей Анатольевич – д.ф.-м.н., доцент
 Ковалев Андрей Алесандрович – старший преподаватель
 Сомов Павел Владиславович – старший преподаватель
 Цзихун Гу – доктор инженерии, профессор
 Даши Динг – доктор инженерии, профессор