

АКТИВНАЯ ПЕРЕДАЮЩАЯ БИАНИЗОТРОПНАЯ МЕТАПОВЕРХНОСТЬ С ФУНКЦИЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОЙ ДЛЯ B5G/6G ПРИЛОЖЕНИЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

И.А. Фаняев¹, А.А. Тимошенко¹, А.Л. Самофалов¹, С.А. Хахомов¹, И.В. Семченко²,
Цзихун Гу³, Даши Динг³

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Государственное научно-производственное объединение
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск

³Нанкинский университет науки и технологии

ACTIVE TRANSMITTING BIANISOTROPIC METASURFACE WITH PHASE CONTROL FUNCTION FOR B5G/6G APPLICATIONS OF WIRELESS COMMUNICATIONS

I.A. Fanyaev¹, A.A. Timoshenko¹, A.L. Samofalov¹, S.A. Khahomov¹, I.V. Semchenko²,
Jihong Gu³, Dazhi Ding³

¹Francisk Skorina Gomel State University

²State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, Minsk

³Nanjing University of Science and Technology

Аннотация. Предложена конструкция активного микрорезонатора, предназначенного для реализации реконфигурируемой метаповерхности, применимой в системах беспроводной связи поколений B5G/6G. Разработанная структура обеспечивает управление фазой прошедшей электромагнитной волны и позволяет динамически изменять фазовый фронт. Проведено численное моделирование в Ка-диапазоне СВЧ волн, подтвердившее возможность широкодиапазонного управления фазой за счёт изменения электроёмкости варикапов. Полученные результаты демонстрируют потенциал использования разработанной метаповерхности в антенных новом поколения беспроводной связи B5G/6G для адаптивного управления диаграммой направленности.

Ключевые слова: принцип Гюйгенса, активная метаповерхность, варикап, приложения B5G, фаза прошедшей волны.

Для цитирования: Активная передающая бианизотропная метаповерхность с функцией управления фазой для B5G/6G приложений беспроводной связи / И.А. Фаняев, А.А. Тимошенко, А.Л. Самофалов, С.А. Хахомов, И.В. Семченко, Цзихун Гу, Даши Динг // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 4 (65). – С. 103–107. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_4_65_103. – EDN: EBZCMH

Abstract. A design of an active microresonator intended for the implementation of a reconfigurable metasurface applicable to B5G/6G wireless communication systems is proposed. The developed structure enables phase control of the transmitted electromagnetic wave and allows dynamic modification of the transmitted wavefront. The numerical simulations carried out in the Ka-band of microwave waves have confirmed the capability of wide-range phase tuning through the variation of varicap capacitance. The obtained results demonstrate the potential of employing the proposed metasurface in a new generation of wireless communications B5G/6G antennas for adaptive beam steering.

Keywords: Huygens principle, active metasurface, varicap, B5G applications, transmitted wave phase.

For citation: Active transmitting bianisotropic metasurface with phase control function for B5G/6G applications of wireless communications / I.A. Fanyaev, A.A. Timoshenko, A.L. Samofalov, S.A. Khahomov, I.V. Semchenko, Jihong Gu, Dazhi Ding // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2025. – № 4 (65). – Р. 103–107. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_4_65_103 (in Russian). – EDN: EBZCMH

Введение

В условиях стремительного развития высокоскоростной беспроводной связи [1] и радиолокационных систем наблюдается высокий спрос на динамическое управление диаграммами направленности антенн [2], [3]. Перенастраиваемые антенны с управляемым лучом являются эффективным решением для повышения адаптивности и производительности подобных систем [4].

Традиционные антенны с фиксированной диаграммой направленности не обеспечивают требуемого уровня управляемости излучением. Использование миллиметрового диапазона частот предоставляет значительные преимущества, включая более высокие скорости передачи данных, увеличенную пропускную способность и снижение уровня взаимных помех.

Фазированные антенные решётки широко применяются для формирования направленного излучения, однако их недостатком является высокая стоимость из-за сложной структуры питающей сети и необходимости использования большого числа передающих и приёмных модулей [5]. Фазовый сдвиг в таких системах обычно реализуется с помощью активных компонентов, таких как p-i-n диоды [6], ВЧ МЭМС-переключатели [7] и варакторные диоды [8], [9]. Ранние подходы к фазовой компенсации нередко требовали многослойных конфигураций с большим числом активных элементов, что приводило к усложнению конструкции и росту стоимости изготовления. Многослойные структуры на основе каскадных частотно-избирательных поверхностей (FSS) [10] также характеризуются сложностью и высокой стоимостью, особенно в миллиметровом диапазоне частот. В отличие от варакторов, обеспечивающих непрерывное управление фазой при низком энергопотреблении, p-i-n диоды из-за своей дискретной природы вносят фазовые ошибки, вызывают появление выраженных боковых лепестков и снижение усиления при сканировании.

Особое внимание в последние годы уделяется метаповерхностям, способным управлять фазой [11], амплитудой [12] и поляризацией [13] электромагнитного излучения. Такие структуры позволяют реализовать динамическую адаптацию диаграммы направленности и эффективное формирование луча без применения механических приводов [14].

Настоящая работа посвящена разработке и численному исследованию активной бианизотропной метаповерхности с функцией управления фазой прошёлшей электромагнитной волны для приложений 5G/6G беспроводной связи. Предлагаемая метаповерхность предназначена для динамической манипуляции фазовым фронтом прошёлшей волны за счёт использования в каждом элементе активного компонента, такого как варикап, с последующим включением её в состав антенны перспективных систем связи стандарта 5G.

1 Структура и принцип действия элементарной ячейки Гюйгенса

Элементарная ячейка состоит из пары анти-sимметричных П-образных проводников (рисунок 1.1), расположенных на верхней и нижней поверхностях диэлектрической подложки F4B (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2,2$, тангенс угла потерь 0,002). Период ячейки составляет $p = 7,2$ мм. Элемент на нижней стороне является зеркальным отражением элемента на верхней стороне в плоскости, ортогональной оси Y. Численные значения геометрических параметров микрорезонатора: $n = 5$ мм, $g = 3,7$ мм, $d = 0,7$ мм, $w = 0,35$ мм, $wp = 0,2$ мм, $d = 0,7$ мм. Толщина медного слоя $t = 18$ мкм, диэлектрическая подложка толщиной $h = 2,1$ мм. Варикапы показаны на рисунке в виде квадратов серого и зелёного цвета.

Активная метаповерхность основана на использовании активных микрорезонаторов для фазового управления прошёлшей волны. Предлагаемая конструкция активного микрорезонатора включает П-образный проводящий элемент и варикап MAVR-011020-1411, подключённый в его центральной части (рисунок 1.1, a). Также имеются две медные полоски питания варикапов по обе стороны диэлектрического слоя, на которые будет подаваться постоянное напряжение от 0 до 20 В. При описании модели метаповерхности были использованы граничные условия, позволяющие анализировать ее по одной элементарной ячейке.

Возбуждение колебаний в таком элементе осуществляется за счет энергии электромагнитной волны при её нормальном падении. Вектор напряженности электрического поля падающей волны был направлен вдоль оси X. Предлагаемая структура вследствие использования варикапа позволяет путём изменения напряжения на нем менять электрическую емкость, и как следствие – реактивное сопротивление. Это дает возможность изменять фазу прошёлшей электромагнитной волны в некоторых пределах.

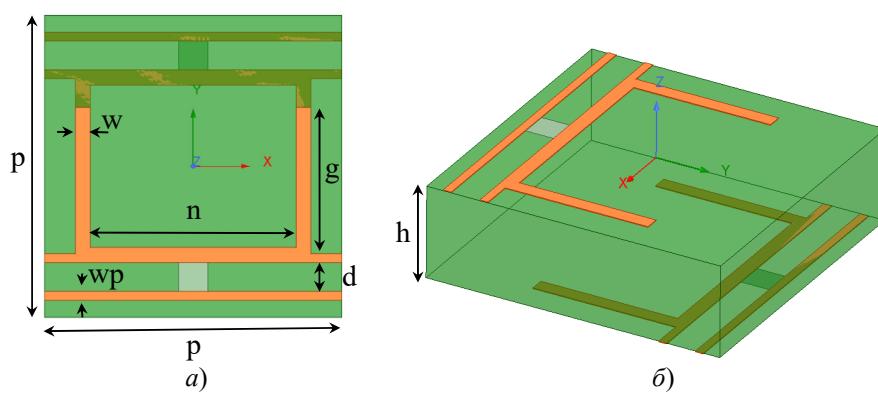


Рисунок 1.1 – Конструкция активного микрорезонатора с варикапами как элементарной ячейки метаповерхности (a) вид сверху и (б) вид под углом

Физический механизм работы структуры основан на возбуждении так называемого резонанса Гюйгенса, при котором отраженная от метаповерхности волна отсутствует. То есть метаповерхность ведёт себя аналогично поверхности Гюйгенса, создающей проходящую волну при отсутствии обратной волны. В рассматриваемом нами случае антисимметричное расположение элементов приводит к тому, что поверхностные токи на верхней и нижней сторонах подложки проходят в противоположных направлениях. Это формирует замкнутый контур тока, индуцирующий искусственный магнетизм, характеризуемый магнитным моментом элементарной ячейки. Одновременное существование в элементарной ячейке ортогональных электрических и магнитных моментов при выполнении условия их баланса приводит к возникновению резонанса Гюйгенса. Рассматривая метаповерхность является бианизотропной, поскольку одновременно проявляет как диэлектрические, так и магнитные свойства.

Возникновение магнитных моментов в близкорасположенных элементарных ячейках позволяет ввести в рассмотрение, для метаповерхности в целом, так называемые магнитные токи, выражаемые через поверхностную плотность магнитных моментов. Рассмотрение таких магнитных токов в совокупности с поверхностными электрическими токами облегчает расчёты [15].

При падении плоской электромагнитной волны на метаповерхность Гюйгенса по обе стороны подложки возникают эквивалентные поверхностные электрические и магнитные токи. Эти токи можно охарактеризовать тензором электрической поверхностной проводимости η_{Yes} и тензором магнитного поверхностного импеданса Z_{ms} [16].

Исходя из теории электромагнетизма и граничных условий, нормированные на импеданс свободного пространства поверхностная проводимость η_{Yes} и магнитный импеданс $\frac{Z_{ms}}{\eta}$

удовлетворяют следующим уравнениям [17]:

$$\eta_{Yes} = 2 \cdot \frac{1 - T - R}{1 + T + R}, \quad (1.1)$$

$$\frac{Z_{ms}}{\eta} = 2 \cdot \frac{1 - T + R}{1 + T - R}, \quad (1.2)$$

где T – коэффициент прохождения, R – коэффициент отражения, вычисленные для амплитуд волн, η – импеданс свободного пространства.

Исследования показали [17], что когда нормированные электрическая поверхностная проводимость и магнитное поверхностное сопротивление равны и являются чисто мнимыми, т. е.

$\text{Im}(\eta_{Yes}) = \text{Im}\left(\frac{Z_{ms}}{\eta}\right)$, может быть возбужден резонанс Гюйгенса, что приводит к полному прохождению электромагнитной волны и близкому к нулю отражению от метаповерхности.

2 Численное исследование метаповерхности

Проведено численное моделирование метаповерхности, в ходе которого построены частотные зависимости нормированных поверхностной проводимости η_{Yes} и магнитного импеданса $\frac{Z_{ms}}{\eta}$ (рисунок 2.1). Исследования выполнялись в диапазоне частот от 24 до 26 ГГц.

По результатам моделирования, как и предполагалось, наблюдается резонанс Гюйгенса предлагаемой структуры на частоте 25,2 ГГц. Это следует из равенства мнимых частей

$$\text{Im}(\eta_{Yes}) = \text{Im}\left(\frac{Z_{ms}}{\eta}\right) = -1,$$

а действительные части этих величин близки к нулю, $\text{Re}(\eta_{Yes}) = 0,055$ и $\text{Re}\left(\frac{Z_{ms}}{\eta}\right) = 0,22$ соответственно.

Также в ходе численного моделирования активной метаповерхности были построены частотные зависимости коэффициентов отражения, прохождения и фазы прошедшей электромагнитной волны (рисунки 2.2 и 2.3) при различных значениях электроемкости варикапа (0,04 пФ; 0,07 пФ; 0,09 пФ; 0,2 пФ).

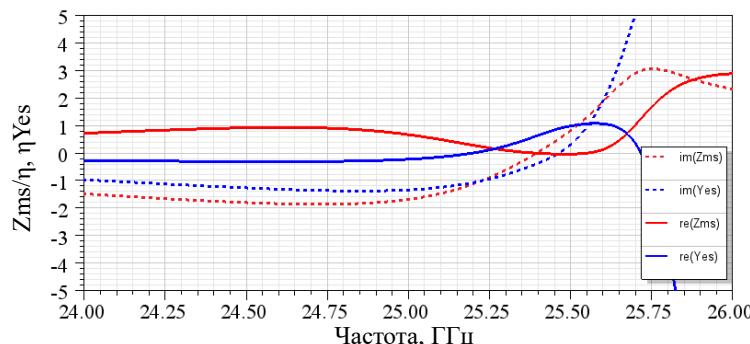


Рисунок 2.1 – Частотная зависимость нормированных электрической поверхностной проводимости и магнитного поверхностного импеданса элементарной ячейки

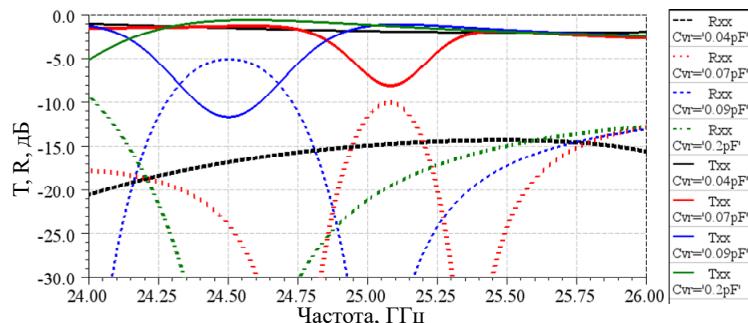


Рисунок 2.2 – Частотная зависимость коэффициентов прохождения T и отражения R электромагнитных волн при различных значениях емкости варикапа. Индексы xx у всех величин показывают, что векторы напряженности электрического поля падающей и отраженной волн направлены вдоль оси X

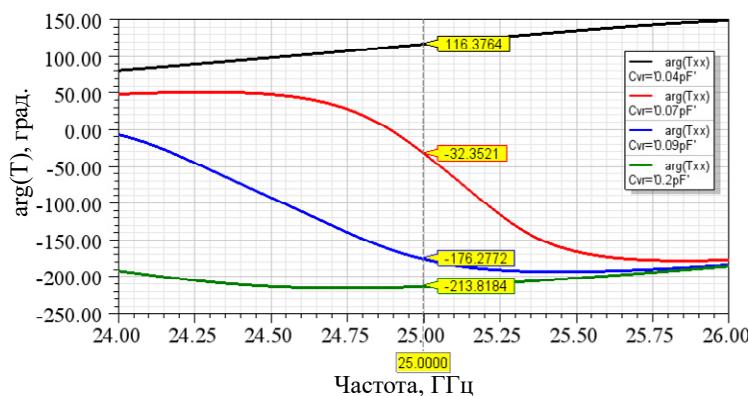


Рисунок 2.3 – Частотная зависимость фазы прошедшей волны при различных значениях емкости варикапа. Индексы xx у всех величин показывают, что векторы напряженности электрического поля падающей и отраженной волн направлены вдоль оси X

Резонанс Гюйгенса обеспечивает практически полное прохождение электромагнитной волны (коэффициент передачи близок к 0 дБ) и низкий уровень отражения в широкой полосе частот. На резонансной частоте при разных значениях ёмкости варикапа коэффициент прохождения T не превышает -4 дБ, а коэффициент отражения R остаётся ниже -15 дБ.

Как видно из рисунка 2.3, изменение ёмкости варикапа существенно влияет на фазу прошедшей волны, при этом наблюдается её выраженная зависимость от частоты. Моделирование показало, что изменение управляющего напряжения на варикапе в пределах от 0 до 20 В позволяет динамически варьировать фазу прошедшей волны в диапазоне около 330° . Это свойство обеспечивает возможность интеграции предложенной активной метаповерхности в антенные структуры для динамического управления диаграммой направленности, что делает её перспективной для приложений B5G/6G беспроводной связи.

Предложенный подход отличается тем, что приводит к формированию искусственного магнитного отклика, характеризуемого магнитным моментом элементарной ячейки, который создается исключительно за счёт геометрии асимметричных электрических диполей без необходимости

введения отдельных магнитных резонансных элементов. Это обеспечивает компактность элементарной ячейки и упрощает технологию её изготовления. В ходе численных исследований также установлено, что толщина подложки $h = 2,1$ мм является критически важным параметром для эффективного возбуждения резонанса.

Заключение

В работе представлена и численно исследована конструкция активной передающей бианизотропной метаповерхности на основе элементарных ячеек, обладающих сбалансированными электрическим и магнитным моментами, с интегрированными варикапами, предназначенная для применения в перспективных системах беспроводной связи B5G/6G.

Результаты моделирования подтвердили существование эффекта, при котором активная метаповерхность с варикапами ведёт себя аналогично поверхности Гюйгенса, создающей проходящую волну при отсутствии обратной волны. Имеет место возбуждение так называемого резонанса Гюйгенса на частоте 25,2 ГГц, при котором достигается прохождение волны, близкое к полному (коэффициент передачи ≥ -4 дБ) и подавление отражения (коэффициент отражения ≤ -15 дБ). Благодаря динамической настройке

ёмкости варикапа удалось реализовать фазовый сдвиг прошёлшей волны до $\sim 330^\circ$, что открывает возможности для адаптивного формирования и сканирования диаграммы направленности антенн без использования механических или сложных многослойных конструкций.

Особенностью предложенной метаповерхности является компактность и технологическая простота элементарной ячейки, основанной на антисимметричных П-образных проводниках, формирующих искусственный магнитный отклик без отдельных магнитных резонаторов. Полученные результаты демонстрируют значительный потенциал разработанной структуры для интеграции в антенные системы следующих поколений с функцией программного управления лучом, однако для практического внедрения необходима дальнейшая оптимизация как геометрии ячейки, так и схемы управления активными элементами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Selvaraj, M. Reflective metasurface for 5G & beyond Wireless communications / M. Selvaraj, R. Vijay, R. Anbazhagan // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 126.
2. 1-bit transmission-type digital programmable coding metasurface with multi-functional beam-shaping capability for ka-band applications / A.H. Naqvi [et al.] // Micromachines. – 2023. – Vol. 14, № 6. – P. 1250.
3. Naqvi, A.H. Low-profile electronic beam-scanning metasurface antenna for Ka-band applications / A.H. Naqvi, S. Lim // Waves in Random and Complex Media. – 2023. – P. 1–16.
4. Mailloux, R.J. Phased array antenna handbook. 2nd ed. / R.J. Mailloux. – Norwood: Artech house, 2017. – 654 p.
5. 1 bit electronically reconfigurable folded reflectarray antenna based on pin diodes for wide-angle beam-scanning applications / Z. Wang [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68, № 9. – P. 6806–6810.
6. Nguyen, B.D. Unit-cell loaded with PIN diodes for 1-bit linearly polarized reconfigurable transmitarrays / B.D. Nguyen, C. Pichot // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2018. – Vol. 18, № 1. – P. 98–102.
7. Cheng, C.C. A programmable lens-array antenna with monolithically integrated MEMS switches / C.C. Cheng, B. Lakshminarayanan, A. Abbaspour-Tamijani // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2009. – Vol. 57, № 8. – P. 1874–1884.
8. Frank, M. Design of a 24 GHz reconfigurable transmitarray element with continuous phase range / M. Frank, R. Weigel, A. Koelpin // 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). – IEEE. – 2017. – P. 2400–2404.
9. Electronically reconfigurable 6×6 element transmitarray at K-band based on unit cells with continuous phase range / M. Frank [et al.] // IEEE antennas and wireless propagation letters. – 2019. – Vol. 18, № 4. – P. 796–800.
10. A reconfigurable planar Fresnel lens for millimeter-wave 5G frontends / Q. Xi [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2020. – Vol. 68, № 11. – P. 4579–4588.
11. Verho, S. Design of a compact and minimalist intermediate phase shifting feed network for Ka-band electrical beam steering / S. Verho, J.Y. Chung // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 4. – P. 1235.
12. Dynamic metasurface reflectors based on coupled resonators for simultaneous magnitude and phase control / M.K. Emara [et al.] // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 129552–129565.
13. Ge, Y. Broadband folded transmitarray antenna based on an ultrathin transmission polarizer / Y. Ge, C. Lin, Y. Liu // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66, № 11. – P. 5974–5981.
14. Активная 5×5-элементная метаповерхность с функцией управления фазой для приложений в Ка-диапазоне частот / И.А. Фаняев, А.А. Тимошенко, А.Л. Самофалов, С.А. Хахомов, И.В. Семченко // IX Международная конференция «Информационные технологии и технические средства управления» (ICCT-2025). – 2025, 7–11 октября, Гомель. – С. 1–3.
15. Asadchy, V.S. Bianisotropic metasurfaces: physics and applications / V.S. Asadchy, A. Díaz-Rubio, S.A. Tretyakov // Nanophotonics. – 2018. – Vol. 7, № 6. – P. 1069–1094.
16. Ultra-compact active induced-magnetism Huygens' metasurfaces: design and application / C. Qiu [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2023. – Vol. 56, № 13. – P. 135101.
17. Ultrathin dual-polarized Huygens' metasurface: design and application / C. Xue [et al.] // Annalen der Physik. – 2020. – Vol. 532, № 7. – P. 2000151.

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

Поступила в редакцию 08.10.2025.

Информация об авторах

Фаняев Иван Александрович – к.т.н., доцент
Тимошенко Алексей Анатольевич – студент
Самофалов Андрей Леонидович – к.ф.-м.н., доцент
Хахомов Сергей Анатольевич – д.ф.-м.н., доцент
Семченко Игорь Валентинович – д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. НАН Беларуси
Цзихун Гу – к.ф.-м.н., доцент
Даши Динг – д.т.н., профессор