CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-29-37

УДК 621.396.677

АНТЕННА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ИНТЕГРИРОВАННОЙ ФАЗОУПРАВЛЯЕМОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТЬЮ ДЛЯ АДАПТИВНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ B5G

И. А. ФАНЯЕВ, А. А. ТИМОШЕНКО, С. А. ХАХОМОВ

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (Гомель, Республика Беларусь)

Аннотация. Представлена конструкция антенны миллиметрового диапазона с интегрированной фазоуправляемой метаповерхностью для перспективных адаптивных систем беспроводной связи B5G. Антенная система сочетает планарную антенную решетку из 32 патч-антенн с активной метаповерхностью на основе микрорезонаторов со встроенными варикапами, что обеспечивает формирование узконаправленного луча и его электронное отклонение в различных направлениях. Питающая сеть обеспечивает синфазное возбуждение излучателей с разбросом фаз не более 16° и амплитудным разбалансом менее 3,8 дБ на частоте 25,7 ГГц. Элементарная ячейка метаповерхности реализует резонанс Гюйгенса, что дает коэффициент прохождения не хуже –3,5 дБ и отражение менее –15 дБ. За счет изменения напряжения смещения варикапов от 0 до 20 В достигается диапазон электронной перестройки фазы порядка 304°, позволяющий динамически управлять направлением луча. Численное моделирование подтвердило возможность формирования узконаправленного луча с электронным отклонением в широком диапазоне углов (до 40°). Предложенная конструкция обладает низким профилем, технологичностью и удовлетворяет требованиям адаптивных антенных систем перспективных стандартов связи для повышения энергоэффективности и пространственного мультиплексирования. Результаты демонстрируют высокую перспективность применения разработанной антенны в реконфигурируемых антенных системах миллиметрового диапазона.

Ключевые слова: B5G, Ка-диапазон, антенная система, метаповерхность, варикап, микрорезонатор, патч-антенна, диаграмма направленности, система питания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Фаняев, И. А. Антенна миллиметрового диапазона с интегрированной фазоуправляемой метаповерхностью для адаптивных приложений B5G / И. А. Фаняев, А. А. Тимошенко, С. А. Хахомов // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 4. С. 29–37. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-29-37.

MILLIMETRE-WAVE ANTENNA WITH INTEGRATED PHASE-CONTROLLED METASURFACE FOR ADAPTIVE B5G APPLICATIONS

IVAN FANYAEV, ALEXEY TIMOSHENKO, SERGEI KHAKHOMOV

Francisk Skorina Gomel State University (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. A millimeter-wave antenna design with an integrated phase-controlled metasurface for advanced B5G adaptive wireless communication systems is presented. The antenna system combines a planar antenna array of 32 patch antennas with an active metasurface based on microresonators with embedded varicaps, which provides a highly focused beam and its electronic deflection in various directions. The power supply network ensures in-phase excitation of the emitters with a phase spread of no more than 16° and an amplitude imbalance of less than 3.8 dB at a frequency of 25.7 GHz. The metasurface unit cell implements a Huygens resonance, resulting in a transmission coefficient no worse than –3.5 dB and a reflection coefficient of less than –15 dB. By varying the varicap bias voltage from 0 to 20 V, an electronic phase tuning range of approximately 304° is achieved, enabling dynamic beam direction control. Numerical simulation confirmed the feasibility of forming a narrow beam with electronic deflection over a wide range of angles (up to 40°). The proposed design has a low profile, is easy

to manufacture, and meets the requirements of adaptive antenna systems for advanced communication standards to improve energy efficiency and spatial multiplexing. The results demonstrate the high potential for using the developed antenna in reconfigurable millimeter-wave antenna systems.

Keywords: B5G, Ka-band, antenna system, metasurface, varicap, microresonator, patch antenna, radiation pattern, power supply system.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Fanyaev I., Timoshenko A., Khakhomov S. (2026) Millimeter-Wave Antenna with Integrated Phase-Controlled Metasurface for Adaptive B5G Applications. *Doklady BGUIR*. 24 (4), 29–37. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-29-37 (in Russian).

Введение

Современные системы беспроводной связи B5G ориентированы на увеличение скорости передачи данных, спектральной эффективности и плотности подключения устройств, что стимулирует использование миллиметрового диапазона частот [1]. Однако работа в данном диапазоне сопровождается высокими потерями распространения, чувствительностью к экранированию и необходимостью пространственной селекции пользователей. В связи с этим возрастают требования к антенным системам, которые должны обладать высоким коэффициентом усиления, узкой диаграммой направленности и возможностью динамического управления излучением [2]. Классические антенны с фиксированной диаграммой направленности не обеспечивают требуемой адаптивности, тогда как традиционные фазированные антенные решетки отличаются сложностью системы питания, высокими потерями и значительным энергопотреблением, особенно в миллиметровом диапазоне частот [3].

В связи с этим особый интерес представляют адаптивные антенные системы [4], способные изменять пространственные характеристики излучения в реальном времени. Использование технологий формирования и электронного управления лучом позволяет повысить энергетическую эффективность радиоканала, уменьшить уровень помех и обеспечить пространственное разделение пользователей. Одним из наиболее перспективных направлений развития таких систем является применение метаповерхностей – искусственно сформированных электродинамических структур, обеспечивающих управление параметрами электромагнитной волны на субволновом уровне.

Метаповерхности обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными фазированными решетками, включая малую толщину конструкции, низкий профиль, технологическую совместимость с планарными технологиями изготовления и возможность локального управления фазой [5], амплитудой [6] и поляризацией [7] излучения. Особенно перспективными являются активные фазоуправляемые метаповерхности, содержащие перестраиваемые элементы, например, варикапы, позволяющие динамически изменять фазовый отклик отдельных микрорезонаторов. Такой подход обеспечивает электронное управление диаграммой направленности без использования сложных многоканальных фазовращателей и дает возможность создавать компактные антенные системы с адаптивными свойствами.

В статье предложена конструкция антенны миллиметрового диапазона с интегрированной фазоуправляемой метаповерхностью для перспективных приложений B5G. Антенная система сочетает планарную антенную решетку с активной метаповерхностью на основе микрорезонаторов со встроенными варикапами, что обеспечивает формирование узконаправленного луча и его электронное отклонение в различных направлениях. Проведено численное исследование характеристик системы питания, антенной структуры и активной метаповерхности с демонстрацией возможности динамического управления диаграммой направленности в Ка-диапазоне частот.

Т-образный делитель мощности

Наиболее технологически простым вариантом планарных передающих структур является несимметричная полосковая линия, которая широко используется в СВЧ- и миллиметровых диапазонах. Несимметричная линия имеет ряд достоинств, а именно – относительно низкие диэлектрические потери при малой толщине подложки и упрощенный способ возбуждения.

Начальным базовым элементом для построения системы питания для антенны с интегрированной фазоуправляемой метаповерхностью послужил Т-образный делитель мощности. В качестве диэлектрика брали полиимид толщиной h_1 = 0,3 мм с относительной диэлектрической проницаемостью ε = 3,2 и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,002. Первая планарная конструкция Т-образного делителя мощности [8] была образована разветвлением входного тракта с волновым сопротивлением 50 Ом на два выходных плеча с таким же волновым сопротивлением. Первый входной тракт содержал ступенчатый переход ширины, выполняющий функцию импедансного трансформатора с волновым сопротивлением 35 Ом. Длина трансформатора была подобрана 2 мм, что позволило обеспечить более низкий коэффициент отражения в широкой полосе частот. Вторая конструкция Т-делителя мощности состояла из сочленения полосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом и линии с сопротивлением 100 Ом, концы которой служат выходными плечами.

Исследования *S*-параметров показали, что Т-делитель настроен на равное деление мощности с коэффициентами передачи по –3,4 дБ, коэффициент отражения от 1-го входа достигал значения –28 дБ, коэффициенты отражения от 2-го и 3-го входов, а также коэффициент связи $S_{2,3}$ не превышали –6,5 дБ.

Система питания

На основе двух разновидностей Т-делителей мощности и отрезков полосковых линий была построена система питания типа «елочка» на 32 выхода (рис. 1). Расстояния между выходами по двум осям были одинаковыми (6,2 мм). Волновое сопротивление каждого выхода составляло 100 Ом. Такая система питания часто используется в фазированных антенных решетках. Основная задача предлагаемой топологии – обеспечить синфазное питание всех 32 патч-антенн. Благодаря симметрии («дерево» с равными ветвями) сигнал доходит до каждой антенны за одинаковое время и с одинаковым затуханием, что позволяет формировать узкий направленный луч. На поворотах линий используются фаски (скошенные углы под 45°) для минимизации паразитной емкости и отражений сигнала на резких поворотах под 90°.

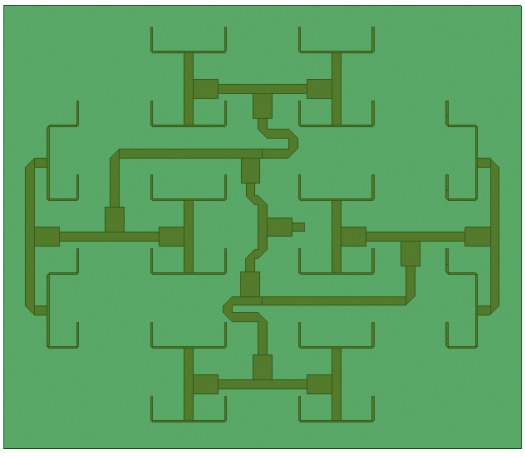


Рис. 1. Топология системы питания (вид сверху)
Fig. 1. Topology of the power supply system (top view)

В ходе численных расчетов предлагаемой топологии системы питания были получены частотные зависимости фаз и амплитуд на всех 32 выходах. Стоит отметить, что для рассматриваемой системы питания, построенной на несимметричной полосковой линии, разброс фаз на всех выходах составил не более 16°, а разбаланс амплитуд на центральной частоте 25,7 ГГц – не более 3,8 дБ.

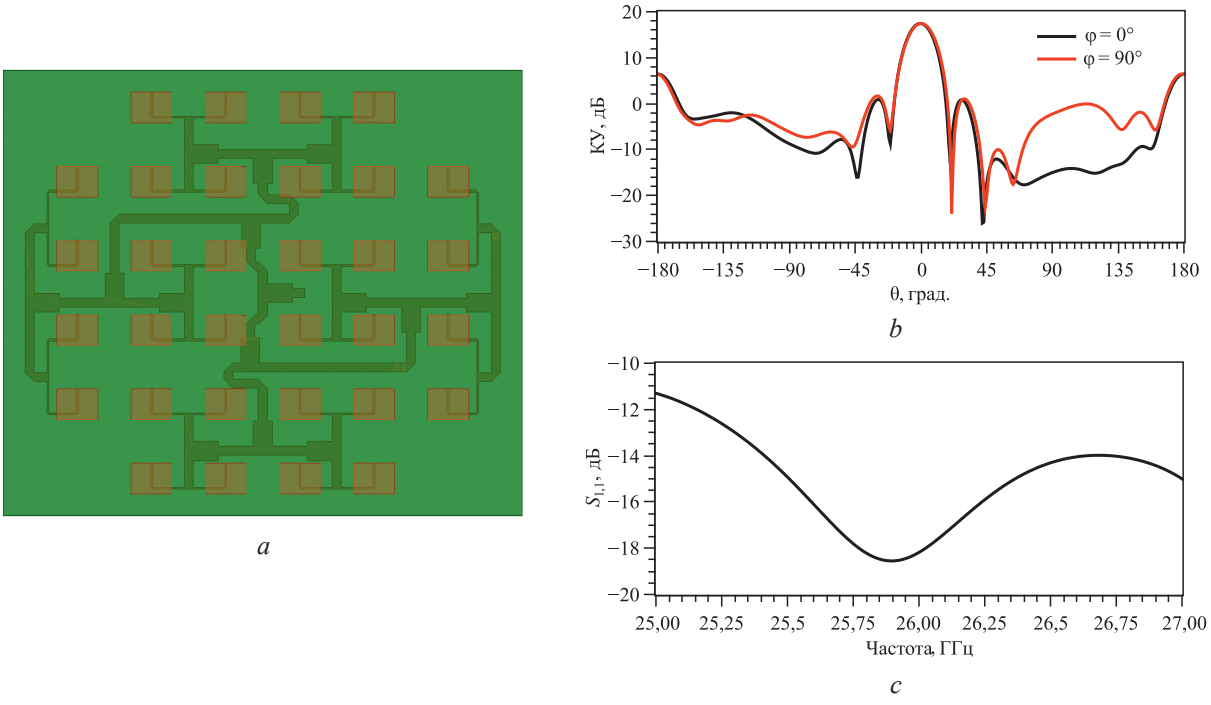
Патч-антенна

Следующим базовым элементом являлась патч-антенна, конструкция которой приведена в [8]. Антенна содержала прямоугольный металлический патч размерами 3,23×2,42 мм в качест-

ве излучающего элемента и полосковую линию питания. Передача мощности от линии питания к антенне осуществлялась через щель размерами 2,00×0,24 мм в заземляющей подложке. Толщина диэлектрического слоя полиимида между патчем и заземляющей подложкой – h_2 = 0,5 мм. В процессе оптимизации геометрических размеров антенна настраивалась на частоту 25,7 ГГц, при этом коэффициент отражения достигал величины –40 дБ. Ширина диаграммы направленности для антенны составила в двух главных плоскостях 100° и 90° соответственно, а коэффициент усиления (КУ) – 3,4 дБ.

Антенная система Ка-диапазона с сетью питания

С учетом всех представленных выше конструкций была построена антенная система с сетью питания на базе несимметричной полосковой линии. На рис. 2 представлена конструкция антенной системы и ее основные характеристики. Общие размеры печатной платы составили 43,4×37,2 мм с толщиной 0,817 мм.



a

b

c

Рис. 2. Конструкция и характеристики антенной системы: *a* – топология антенной системы; *b* – угловая зависимость коэффициента усиления в двух главных плоскостях; *c* – частотная зависимость коэффициента отражения на входе антенной системы

Fig. 2. Design and characteristics of the antenna system: *a* – topology of the antenna system; *b* – angular dependence of the gain in two principal planes; *c* – frequency dependence of the reflection coefficient at the input of the antenna system

При подаче сигнала на вход системы питания типа «елочка» все 32 патч-антенны возбуждались с почти одинаковой амплитудой и фазой. Это позволило, во-первых, сформировать узкий направленный луч, который более подходит под современные перенастраиваемые адаптивные антенные системы с высокой производительностью. Во-вторых, создавался равномерный волновой фронт, который падал на фазоуправляемую метаповерхность для дальнейшего управления направлением луча.

Анализ рис. 2, *b* показал, что предлагаемая антенная система обладает высоким коэффициентом усиления (максимум порядка 17,4 дБ). Однако открытая структура линии питания приводит к тому, что сам фидер начинает работать как паразитный излучатель. Это вызывает интерференцию полей, искажение диаграммы направленности и, самое главное, – значительный рост уровня заднего лепестка, который достигает 6,5 дБ. Ширина диаграммы направленности в двух главных плоскостях составила примерно по 17°. Коэффициент отражения на центральной частоте 25,7 ГГц – около –18 дБ.

Активный микрорезонатор с варикапами элементарной ячейки метаповерхности

Предлагаемая метаповерхность предназначена для динамической манипуляции фазовым фронтом прошедшей волны за счет использования в каждом элементе активного компонента, такого как варикап, с последующим включением ее в состав антенны перспективных систем связи стандарта B5G. Элементарная ячейка состояла из пары антисимметричных П-образных проводников [9], расположенных на верхней и нижней поверхностях диэлектрической подложки (рис. 3, *a*, *b*). Период ячейки – p = 6,2 мм. Элемент на нижней стороне являлся зеркальным отражением элемента на верхней стороне в плоскости, ортогональной оси *Y*. Численные значения геометрических параметров микрорезонатора (рис. 3, *a*, *b*): n = 3,8 мм, g = 3,2 мм, d = 0,22 мм, w = 0,3 мм, wp = 0,2 мм. Толщина медного слоя t = 18 мкм, диэлектрическая подложка толщиной h_3 = 1,8 мм. Варикапы MV3903-P2010-STD показаны на рис. 3 в виде квадратов серого и зеленого цветов. Предлагаемая структура за счет использования варикапа позволяет путем изменения напряжения от 0 до 20 В на нем менять электрическую емкость (от 0,24 до 0,04 пФ) и, как следствие, – реактивное сопротивление. Это дает возможность изменять фазу прошедшей электромагнитной волны в некоторых пределах. При построении модели метаповерхности были использованы граничные условия, позволяющие анализировать ее по одной элементарной ячейке. Физический механизм работы структуры основывался на возбуждении так называемого резонанса Гюйгенса, при котором отраженная от метаповерхности волна отсутствует. Более подробная информация по работе предлагаемого микрорезонатора приведена в [9].

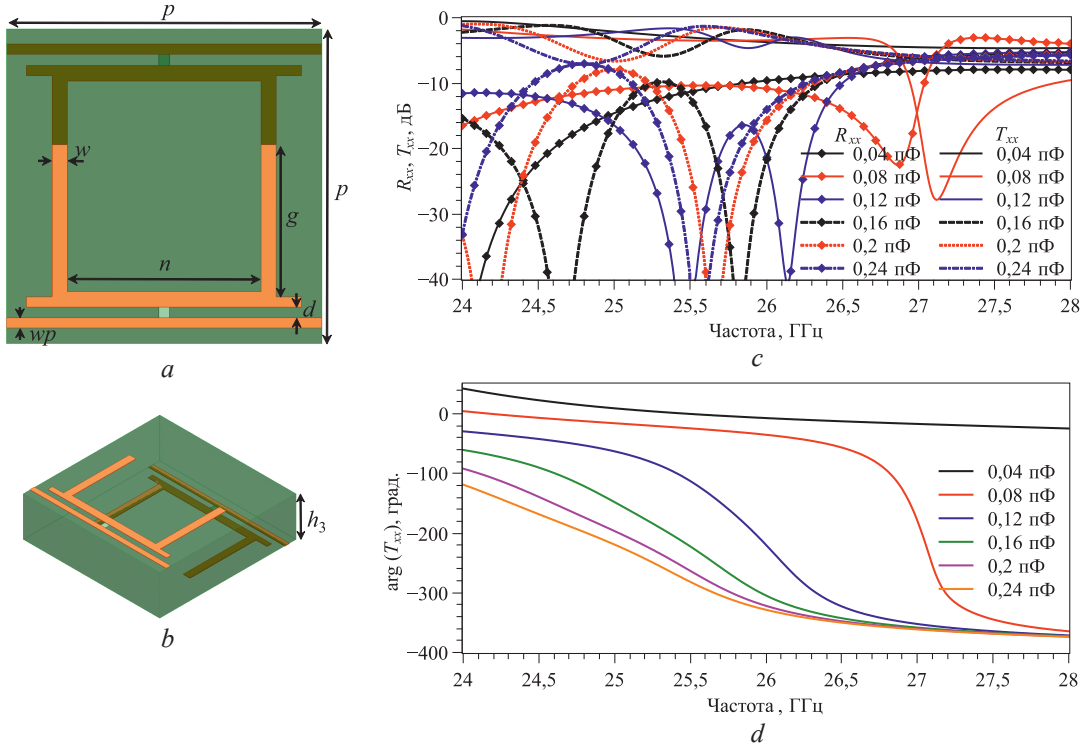


Рис. 3. Активный микрорезонатор с варикапами и его характеристики: *a*, *b* – топология элементарной ячейки метаповерхности – вид сверху и вид под углом соответственно; *c* – частотная зависимость *T* и *R* при различных значениях емкости варикапа; *d* – частотная зависимость фазы прошедшей волны при различных значениях емкости варикапа

Fig. 3. Active microresonator with varicaps and its characteristics: *a*, *b* – topology of the unit cell of the metasurface – top view and oblique view, respectively; *c* – frequency dependence of *T* and *R* for different values of the varicap capacitance; *d* – frequency dependence of the phase of the transmitted wave for different values of the varicap capacitance

Выполнено численное моделирование параметров микрорезонатора и найдена частотная зависимость относительной амплитуды и фазы электромагнитной волны, излучаемой таким микрорезонатором при различных значениях электроемкости варикапа (рис. 3, *c*, *d*). На рис. 3, *c* представлены численные значения коэффициентов прохождения *T* и отражения *R* электромаг-

нитных волн при различной емкости варикапа (от 0,04 до 0,24 пФ с шагом 0,04 пФ). Индексы *xx* у всех величин показывают, что векторы напряженности электрического поля падающей и отраженной волн направлены вдоль оси *X*. Исследования проводились в выбранном диапазоне частот 24–28 ГГц. Также в ходе численного моделирования активной метаповерхности была построена частотная зависимость фазы прошедшей волны при различной емкости варикапа.

Результаты численного моделирования демонстрируют высокий коэффициент прохождения и низкий уровень отражения. На центральной частоте 25,7 ГГц при разных значениях емкости варикапа коэффициент прохождения *T* не превышал –3,5 дБ, а коэффициент отражения *R* оставался менее –15 дБ. Лишь при некоторых значениях емкости отражение может достигать –10 дБ.

Антенна с интегрированной фазоуправляемой метаповерхностью

Собирая воедино все части системы, была спроектирована электродинамическая модель антенны с интегрированной фазоуправляемой метаповерхностью для систем связи стандарта B5G Ка-диапазона (рис. 4, *a*). Расстояние между антенной системой и метаповерхностью составляло 4,6 мм. Основой для расчета распределения фаз послужило условие согласования фронта волны, обеспечивающего интерференционное сложение излучения всех ячеек метаповерхности в направлении целевого угла отклонения. Для плоской метаповерхности фазовое распределение возможно описать линейным законом. Такое распределение обеспечивает формирование плоского волнового фронта, направленного под углом, при условии дискретизации непрерывной фазы на уровне отдельных микрорезонаторов.

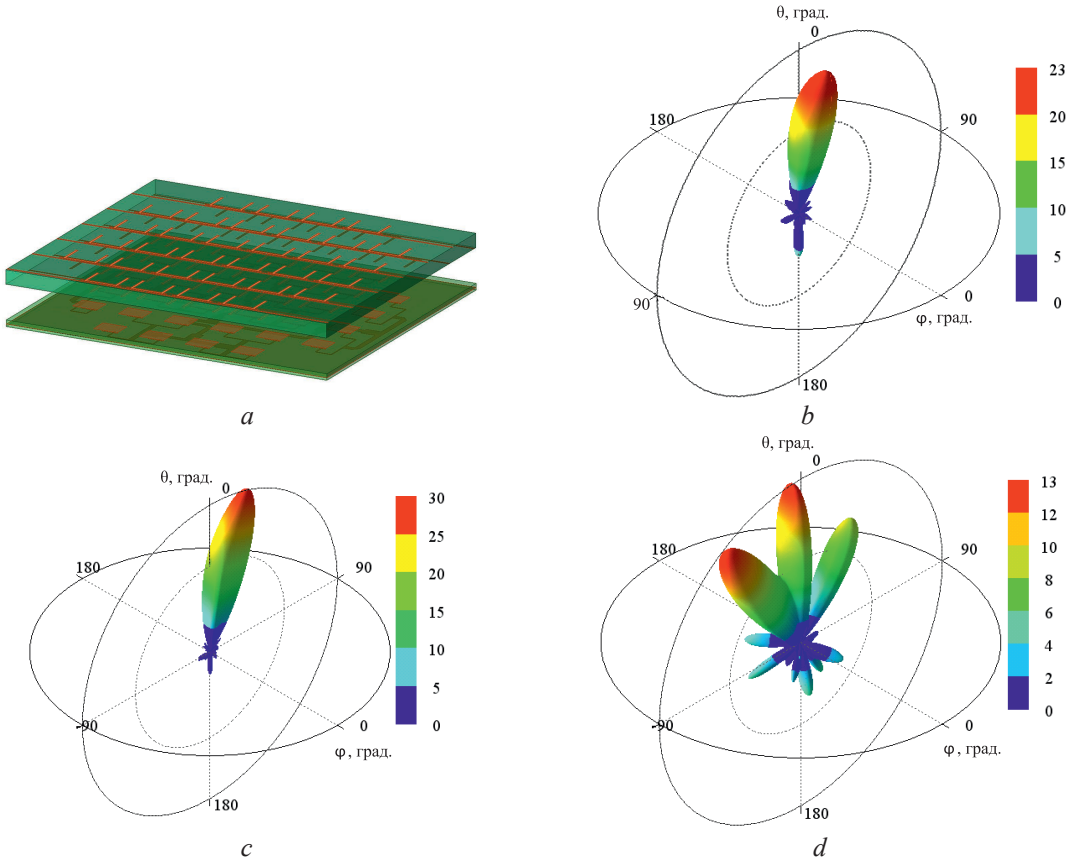


Рис. 4. Антенна с интегрированной фазоуправляемой метаповерхностью и угловые характеристики:
a – конструкция антенны; *b* – распределение коэффициента направленности
в сферической системе координат при отклонении луча θ = 15° и φ = 0°;
c, *d* – распределение коэффициента направленности
при отклонении луча θ = 20°, φ = 90° и θ = 40°, φ = –90° соответственно

Fig. 4. Antenna with an integrated phased metasurface and its angular characteristics: *a* – antenna configuration;
b – directivity pattern distribution in spherical coordinates for beam steering at θ = 15° and φ = 0°;
c, *d* – distribution of the directivity coefficient for beam deflection θ = 20°, φ = 90°
and θ = 40°, φ = –90°, respectively

В ходе численных исследований были построены распределения коэффициента направленности при отклонении луча под разными углами. Для демонстрации работоспособности антенны с интегрированной фазоуправляемой метаповерхностью выбирали три варианта углов. В первом случае (рис. 4, *b*) на каждом микрорезонаторе устанавливались емкости варикапов, которые, создав требуемое фазовое распределение, отклоняли луч в азимутальной плоскости на 0°, а в угломестной плоскости – на 15°. На рис. 4, *c* показано распределение коэффициента направленности при отклонении луча $\theta = 20°$ и $\varphi = 90°$. Главный луч в одной плоскости получился чуть шире, чем в другой. На рис. 4, *d* изображено распределение коэффициента направленности при отклонении луча $\theta = 40°$ и $\varphi = -90°$. В этом случае видно, что имеются достаточно большие два боковых лепестка.

Полученные характеристики свидетельствуют о возможности использования предложенной конструкции в реконфигурируемых антенных системах миллиметрового диапазона, где необходимо электронное управление направлением излучения. Современные стандарты требуют направленного формирования луча, высокой помехоустойчивости, гибкости в управлении диаграммой направленности и возможности динамической адаптации в условиях изменяющейся радиосреды. Реализованный механизм фазовой реконфигурации на уровне микрорезонаторов обеспечивает быстрое и многоступенчатое управление траекторией луча, что является ключевым функциональным элементом для современных протоколов пространственного мультиплексирования, маршрутизации лучей и повышения энергоэффективности сети. Компактная конструкция, низкий профиль и совместимость с планарными технологиями производства делают предложенную антенну пригодной для интеграции в пользовательские устройства, малогабаритные терминалы и маломощные базовые станции.

Таким образом, разработанная конструкция антенны с активной метаповерхностью в дальнейшем может найти применение в практических системах для повышения эффективности радиосвязи, адаптивного формирования луча и улучшения пространственного распределения ресурсов сети.

Заключение

1. Предложена конструкция антенны с интегрированной активной метаповерхностью, обеспечивающей формирование одиночного узконаправленного луча с электронным управлением его направлением. Динамическое сканирование луча реализуется за счет активной метаповерхности на основе микрорезонаторов с варикапами, позволяющей управлять фазой проходящей электромагнитной волны. Результаты моделирования показали возможность достижения диапазона перестройки фазы порядка 304°, что достаточно для формирования заданного фазового распределения и существенного изменения направления излучения.

2. Разработанная антенна демонстрирует возможность применения в перспективных реконфигурируемых антенных системах миллиметрового диапазона и может быть применена в практических системах для повышения энергоэффективности радиосвязи, реализации адаптивного пространственного формирования луча и оптимизации распределения сетевых ресурсов. Полученные данные подтверждают целесообразность использования предложенного подхода при создании антенных систем перспективных стандартов B5G.

3. Спроектированная антенна демонстрирует высокий потенциал для возможного применения в адаптивных системах связи нового поколения B5G. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию фазового профиля метаповерхности с целью повышения точности наведения луча и подавления боковых лепестков, а также на учет влияния линий питания варикапов.

4. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Ф24КИТГ-005.

Список литературы

1. On Challenges of Sixth-Generation (6G) Wireless Networks: A Comprehensive Survey of Requirements, Applications, and Security Issues / M. S. Akbar [et al.] // Journal of Network and Computer Applications. 2025. Vol. 233.

2. Pourgholamhossein, Z. Reconfigurable Huygens' Metasurface-Based Unit-Cell and Electronically Steerable Active Flat-Lens Antenna at the Ka-Band / Z. Pourgholamhossein, T. A. Denidni // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2024. Vol. 73, No 5. P. 2791–2803.
3. 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, No 9. P. 6806–6810.
4. Rotshild, D. Realization and Validation of Continuous Tunable Metasurface for High Resolution Beam Steering Reflector at K-Band Frequency / D. Rotshild, A. Abramovich // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2021. Vol. 31, No 4.
5. Verho, S. Design of a Compact and Minimalistic Intermediate Phase Shifting Feed Network for Ka-Band Electrical Beam Steering / S. Verho, J. Y. Chung // Sensors. 2024. Vol. 24, No 4.
6. 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.
7. 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, No 11. P. 5974–5981.
8. Сравнительный анализ антенных систем Ка-диапазона с сетью питания на основе несимметричной и симметричной полосковых линий / И. А. Фаняев [и др.] // Известия Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины. 2026. № 3. С. 117–122.
9. Активная передающая бианизотропная метаповерхность с функцией управления фазой для B5G/6G приложений беспроводной связи / И. А. Фаняев [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. 2025. Т. 65, № 4. С. 103–107.

Поступила 20.05.2026 Принята в печать 01.07.2026

References

1. Akbar M. S., Hussain Z., Ikram M., Sheng Q. Z., Mukhopadhyay S. C. (2025) On Challenges of Sixth-Generation (6G) Wireless Networks: A Comprehensive Survey of Requirements, Applications, and Security Issues. *Journal of Network and Computer Applications*. (233).
2. Pourgholamhossein Z., Denidni T. A. (2024) Reconfigurable Huygens' Metasurface-Based Unit-Cell and Electronically Steerable Active Flat-Lens Antenna at the Ka-Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 73 (5), 2791–2803.
3. Wang Z., Ge Y., Pu J., Chen X., Li G., Wang Y., et al. (2020) 1 Bit Electronically Reconfigurable Folded Reflectarray Antenna Based on Pin Diodes for Wide-Angle Beam-Scanning Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 68 (9), 6806–6810.
4. Rotshild D., Abramovich A. (2021) Realization and Validation of Continuous Tunable Metasurface for High Resolution Beam Steering Reflector at K-Band Frequency. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 31 (4).
5. Verho S., Chung J. Y. (2024) Design of a Compact and Minimalistic Intermediate Phase Shifting Feed Network for Ka-Band Electrical Beam Steering. *Sensors*. 24 (4).
6. Emara M. K., Kundu D., Macdonell K., Rufail L. M., Gupta S. (2023) Dynamic Metasurface Reflectors Based on Coupled Resonators for Simultaneous Magnitude and Phase Control. *IEEE Access*. 11, 129552–129565.
7. Ge Y., Lin C., Liu Y. (2018) Broadband Folded Transmitarray Antenna Based on an Ultrathin Transmission Polarizer. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 66 (11), 5974–5981.
8. Fanyaev I. A., Timoshenko A. A., Samofalov A. L., Semchenko I. V., Khakhomov S. A. (2026) Comparative Analysis of Ka-Band Antenna Systems with a Feed Network Based on Asymmetric and Symmetric Striplines. *Proceedings of Francisk Skorina Gomel State University*. (3), 117–122 (in Russian).
9. Fanyaev I. A., Timoshenko A. A., Samofalov A. L., Khakhomov S. A., Semchenko I. V., Jihong Gu, et al. (2025) Active Transmitting Bianisotropic Metasurface with Phase Control Function for B5G/6G Applications of Wireless Communications. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 65 (4), 103–107 (in Russian).

Received: 20 May 2026 Accepted: 1 July 2026

Вклад авторов

Фаняев И. А. выработал общую идею и концепцию, предложил конструкции Т-образных делителей мощности, систему питания, заложил основы электродинамической модели антенны и активной метаповерхности, участвовал в обсуждении результатов.

Тимошенко А. А. выполнил компьютерное моделирование топологий, расчеты и оптимизацию геометрических параметров патч-антенн и активной метаповерхности, провел анализ S-параметров и диаграмм направленности, участвовал в обсуждении результатов.

Хахомов С. А. осуществил научное руководство проектом, контролировал соответствие результатов требованиям стандартов B5G, координировал этапы исследования и участвовал в обсуждении полученных результатов, формулировал выводы.

Authors' contribution

Fanyaev I. developed the general idea and concept, proposed the design of T-shaped power dividers, a power supply system, laid the foundations of an electrodynamic model of an antenna and an active metasurface, and participated in the discussion of the results.

Timoshenko A. performed computer simulations of the topologies, conducted calculations and optimization of the geometric parameters for the patch antennas and active metasurface, and analyzed the S-parameters and radiation patterns. Participated in the discussion of the results.

Khakhomov S. provided scientific guidance for the project, monitored the compliance of the results with the requirements of B5G standards, coordinated the stages of the research and participated in the discussion of the results obtained, and formulated conclusions.

Сведения об авторах

Фаняев И. А., канд. техн. наук, доц. каф. радиофизики и электроники, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (ГГУ им. Ф. Скорины)

Тимошенко А. А., студ., ГГУ им. Ф. Скорины

Хахомов С. А., д-р физ.-мат. наук, доц. каф. оптики, ГГУ им. Ф. Скорины

Адрес для корреспонденции

246028, Республика Беларусь,
Гомель, ул. Советская, 104
Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины
Тел.: +375 44 754-01-57
E-mail: fanyaev@gmail.com
Фаняев Иван Александрович

Information about the authors

Fanyaev I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Radiophysics and Electronics, Francisk Skorina Gomel State University (FS GSU)

Timoshenko A., Student, FS GSU

Khakhomov S., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor of the Department of Optics, FS GSU

Address for correspondence

246028, Republic of Belarus,
Gomel, Sovetskaya St., 104
Francisk Skorina
Gomel State University
Tel.: +375 44 754-01-57
E-mail: fanyaev@gmail.com
Fanyaev Ivan