

УДК 621.396.6

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ФИЛЬТР-АНТЕННА С КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

A NEW DESIGN OF A WIDEBAND CIRCULARLY POLARIZED FILTER ANTENNA BASED ON A METASURFACE

**ФЕРАС ХАБИБ РАММАХ¹, М. С. МИХАЙЛОВ¹, В. Г. МЕЛКОНЯН²,
А. А. КОМАРОВ¹, В. А. ПЕРМЯКОВ¹**

¹ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

² *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*

**Feras Habib Rammah¹, M. S. Mikhailov¹, V. G. Melkonyan²,
A. A. Komarov¹, V. A. Permyakov¹**

¹ *National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia*

² *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

Аннотация. Предложена обновлённая новая архитектура фильтр-антенной структуры, обеспечивающая интеграцию полосового фильтра и патч-антенны с круговой поляризацией посредством применения метаповерхностей. Разработанная фильтр-антенна реализована в многослойной конфигурации и рассчитана на работу на частоте 6 ГГц. На втором слое размещён полосовой фильтр, который посредством металлизированного переходного отверстия (штыря) возбуждает патч-антенну, расположенную на первом слое. Для улучшения характеристик антенны введён третий слой – однородная метаповерхность, обеспечивающая расширение импедансной полосы пропускания и полосы осевого отношения 3 дБ. Проведено сравнение с вариантом на основе неоднородной метаповерхности, демонстрирующее преимущества предлагаемой конструкции. Кроме того, исследовано влияние размера ячейки метаповерхности на характеристики фильтр-антенны. Результаты экспериментального изготовления структуры с неоднородной метаповерхностью хорошо согласуются с данными моделирования.

Ключевые слова: патч-антенна, фильтр-антенна, полосовой фильтр, однородная метаповерхность, неоднородная метаповерхность.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00485 (URL: <https://rscf.ru/project/23-19-00485/>).

Для цитирования: Широкополосная фильтр-антенна с круговой поляризацией на основе метаповерхности новой конструкции / Ферас Хабиб Раммах [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2026. Т. 211. № 2. С. 57–66.

Annotation. An updated filter-antenna architecture is proposed, enabling the integration of a bandpass filter and a circularly polarized patch antenna through the use of metasurfaces. The developed filter-antenna is implemented in a multilayer configuration and designed to operate at 6 GHz. The bandpass filter is placed on the second layer and excites the patch antenna located on the first layer via a metallized via (probe feed). To enhance the antenna performance, a third layer consisting of a uniform metasurface is introduced, providing an extended impedance bandwidth and a wider 3 dB axial-ratio bandwidth. A comparison with a design employing a non-uniform metasurface is carried out, demonstrating the advantages of the proposed configuration. In addition, the influence of the metasurface unit-cell size on the filter-antenna characteristics is investigated. Experimental results of the fabricated structure with a non-uniform metasurface show good agreement with simulation results.

Key words: patch antenna, filter antenna, bandpass filter, uniform metasurface, non-uniform metasurface.

Financing: the study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-19-00485 (URL: <https://rscf.ru/en/project/23-19-00485/>).

For citation: A New Design of a Wideband Circularly Polarized Filter Antenna Based on a Metasurface / Feras Habib Rammah [et al.] // Electromechanical matters. VNIIEM studies. 2026. Vol. 211. № 2. Pp. 57–66.

Введение

Современные беспроводные системы требуют высокой надёжности передачи данных в условиях многолучевого распространения. Антенны с круговой поляризацией (КП) применяются всё чаще благодаря меньшей зависимости от ориентации устройств и повышенной устойчивости к замираниям сигнала [1–3]. В [4] предложена низкопрофильная правосторонняя КП-антенна для миллиметрового диапазона с интегрированным в подложку волноводом (*Substrate Integrated Waveguide* – SIW-структура) и зеркальными *L*-образными диполями, обеспечивающая широкую полосу частот, стабильную КП и простоту изго-

товления. В [5] представлена компактная низкопрофильная КП-антенна на основе двух модифицированных линейно-поляризованных элементов типа инвертированной *L*-образной формы с двойными загнутыми плечами, обеспечивающая улучшенное согласование, стабильную круговую поляризацию и широкую полосу импеданса.

Интеграция фильтрующих и излучающих функций в структуру антенны обеспечивает ряд преимуществ перед отдельными решениями: уменьшение занимаемого пространства, снижение сложности высокочастотного тракта и сокращение числа компонентов. Дополнительно снижаются вноси-

мые потери за счёт отсутствия соединительных линий и внешних согласующих цепей [6]. В [7] показана высокоэффективная фильтрующая патч-антенна на основе SIW с низкой кросс-поляризацией и улучшенной селективностью. В [8] представлена компактная однослойная патч-антенна с интегрированным инвертированным F -радиатором, обеспечивающим самосогласование и снижение взаимной связи, что придаёт конструкции выраженные фильтрующие свойства.

Метаповерхности стали мощным инструментом проектирования антенн, обеспечивая точное управление электромагнитными полями на субдлинноволновых масштабах. Они позволяют повышать усиление, контролировать круговую поляризацию, расширять полосу и уменьшать размеры антенн [9]. В [10] предложена компактная планарная антенна с реконфигурируемой поляризацией на основе вращаемой метаповерхности, обеспечивающая переключение между линейной, левой и правой круговой поляризациями. В [11] для снижения взаимной связи соседних излучателей использована импедансная метаповерхность.

В настоящей статье описывается новая методология проектирования многослойной фильтр-антенны с круговой поляризацией на основе метаповерхностей. Ключевым элементом предлагаемой структуры является третий слой – метаповерхность, которая позволяет улучшить характеристики фильтр-антенны, расширить импедансную полосу пропускания, полосу осевого отношения 3 дБ, а также повысить коэффициент направленного действия (КНД). При этом полосовой фильтр, размещённый на втором слое, посредством металлизированного переходного отверстия (штыря) возбуждает патч-антенну, расположенную на первом слое.

Конструкция фильтр-антенны

Проектирование фильтрующей антенны выполняется по каскадной методике: на первом этапе синтезируется полосовой фильтр, на втором – проектируется антенна, после чего осуществляется их интеграция в единую структуру.

Конструкция фильтра с короткозамкнутыми (К.З.) шлейфами длиной $\lambda_0/4$. Полосовые фильтры могут быть реализованы в конфигурации, представленной на рис. 1. Структура фильтра формируется набором короткозамкнутых шлейфов длиной $\lambda_0/4$, соединённых между собой участками линии передачи той же электрической длины. Здесь λ_0 обозначает длину волны в данной среде распространения на центральной частоте f_0 .

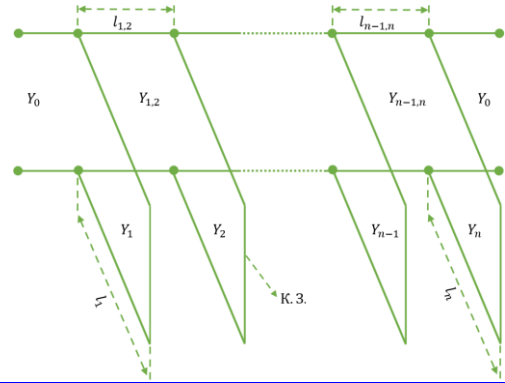


Рис. 1. Полосовой фильтр на линии передачи с короткозамкнутыми четвертьволновыми шлейфами

Для фильтра заданного порядка n формирование его частотных характеристик определяется параметрами резонаторных шлейфов и соединительных линий. Основными расчётными параметрами являются характеристические проводимости резонаторных шлейфов $Y_i (i = 1 \dots n)$ и соответствующие им физические длины $l_i (i = 1 \dots n)$, а также характеристические проводимости соединительных линий $Y_{i,i+1} (i = 1 \dots n-1)$ и их физические длины $l_{i,i+1} (i = 1 \dots n-1)$. Расчётные выражения для определения указанных проводимостей имеют следующий вид:

$$\theta = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{FBW}{2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{J_{1,2}}{Y_0} = g_0 \sqrt{\frac{hg_1}{g_2}}; \quad (2)$$

$$\frac{J_{n-1,n}}{Y_0} = g_0 \sqrt{\frac{hg_n g_{n+1}}{g_0 g_{n-1}}}; \quad (3)$$

$$N_{i,i+1} = \sqrt{\left(\frac{J_{i,i+1}}{Y_0} \right)^2 + \left(\frac{hg_0 g_1 \operatorname{tg} \theta}{2} \right)^2}, \quad i = 1 \dots n-1; \quad (4)$$

$$Y_1 = g_0 Y_0 \left(1 - \frac{h}{2} \right) g_1 \operatorname{tg} \theta + Y_0 \left(N_{1,2} - \frac{J_{1,2}}{Y_0} \right); \quad (5)$$

$$Y_n = Y_0 \left(g_n g_{n+1} - g_0 g_1 \frac{h}{2} \right) \operatorname{tg} \theta + Y_0 \left(N_{n-1,n} - \frac{J_{n-1,n}}{Y_0} \right); \quad (6)$$

$$Y_i = Y_0 \left(N_{i-1,i} + N_{i,i+1} - \frac{J_{i-1,i}}{Y_0} - \frac{J_{i,i+1}}{Y_0} \right), \quad i = 2 \dots n-1; \quad (7)$$

$$Y_{i,i+1} = Y_0 \left(\frac{J_{i,i+1}}{Y_0} \right), \quad i = 1 \dots n-1, \quad (8)$$

где g_i – значения элементов прототипа нижнечастотного фильтра лестничного типа (например, прототипа Чебышёва), заданные для нормированной частоты среза $\Omega_c = 1$; $J_{i,i+1}$ – инверторы проводимости. Параметр h представляет собой безразмерную константу, которая может быть выбрана для удобного задания уровня проводимости внутри фильтра. Вспомогательные параметры $N_{i,i+1}$ являются дополнительными проводимостями, используемыми при последующем преобразовании прототипа в полосовой фильтр [12].

Конструкция антенны с круговой поляризацией. Круговая поляризация возникает при возбуждении двух ортогональных мод с разницей фаз во времени 90° . В квадратной микрополосковой антенне с одним источником питания распространённым и эффективным способом достижения КП является внесение возмущения путём вырезов двух противоположных углов. В результате создаётся необходимый фазовый сдвиг между модами, обеспечивающий устойчивую круговую поляризацию без применения сложных схем питания. Для улучшения осевого отношения 3 дБ в центральной части патч-антенны формируется щель, как показано на рис. 2.

Геометрические размеры щели определяются следующим образом [13]:

$$a = W/27,2; \quad (4)$$

$$b = W/10, \quad (5)$$

где W – размер квадратной патч-антенны.

Конструкция фильтр-антенны с круговой поляризацией. На рис. 3 представлена конструкция предложенной фильтр-антенны. Её особенность заключается в многослойной архитектуре, которая позволяет расширить полосу пропускания по импедансу, а также увеличить полосу осевого отношения 3 дБ. В данной конструкции фильтр, расположенный на втором слое (рис. 3, б), возбуждает антенну первого слоя (рис. 3, а) посредством металлизированного отверстия (штыря).

Для улучшения характеристик фильтр-антенны вводится третий слой – однородная метаповерхность как видно на рис. 4, позволяющая расширить импедансную полосу пропускания и полосу осевого отношения 3 дБ.

Этот слой представляет собой периодическую структуру из одинаковых элементов, каждый из которых выполнен в виде небольшого квадратного патча. Расстояние между элементарными ячейками метаповерхности обычно выбирают меньше $d = \lambda/4$, что обеспечивает корректную гомогенизацию структуры и стабильный поверхностный

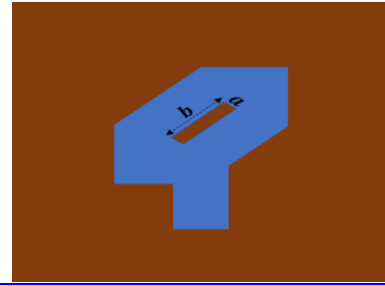


Рис. 2. Патч-антенна с круговой поляризацией с щелью в центральной части

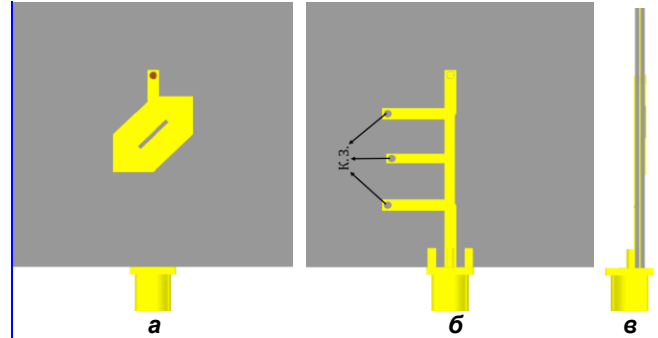


Рис. 3. Конструкция разработанной фильтр-антенны с круговой поляризацией: а – первый слой; б – второй слой; в – вид сбоку

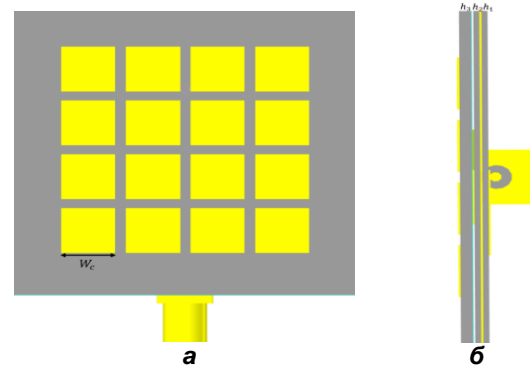


Рис. 4. Конструкция разработанной фильтр-антенны, выполненной на основе однородной метаповерхности: а – вид сверху; б – вид сбоку

импеданс. Благодаря этому метаповерхность сохраняет свои рабочие свойства в широком диапазоне частот. Чтобы минимизировать паразитные эффекты, связанные с дискретностью структуры, и обеспечить стабильные, воспроизводимые электромагнитные характеристики, размер элементарной ячейки W_c выбирают согласно условию [9]:

$$d/W_c < 0,3. \quad (6)$$

Различные конструкции квадратурных элементарных ячеек создают сдвинутые резонансы, что приводит к расширению и улучшению как импедансной полосы пропускания, так и полосы осе-

вого отношения (*Axial Ratio* – AR). Это является основой формирования неоднородных метаповерхностей. Вариации элементарных ячеек могут включать изменение их размеров, формы, геометрии, а также угла ориентации. Как видно на рис. 5 размеры квадратурных элементарных ячеек, расположенных в центральном слое метаповерхности, изменены для достижения требуемой частотной реакции.

Результаты и обсуждения

Разработка и исследование параметрических моделей фильтра, антенны и фильтр-антенны осуществлялись с применением электродинамического моделирования. В работе представлены результаты численного анализа характеристик фильтра, антенны и фильтр-антенны, реализованных на основе однородной метаповерхности, а также рассмотрено влияние геометрических параметров элементарных ячеек неоднородной метаповерхности на коэффициент отражения S_{11} и осевое отношение 3 дБ фильтр-антенны.

На рис. 6 представлены амплитудно-частотные характеристики модели третьего порядка полосового фильтра Чебышёва, рассчитанного на рабочую частоту 6 ГГц. Моделирование выполнялось для топологии на подложке WL-CT338 (толщина $h_2 = 0,813$ мм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 3,38$). Результаты электродинамического моделирования показывают, что фильтр обеспечивает относительную полосу пропускания около 4,7% при потерях менее 0,4 дБ.

На рис. 7 представлена частотная зависимость коэффициента отражения S_{11} антенны, конструкция которой приведена на рис. 2. Антенна спроектирована для работы на центральной частоте 6 ГГц и реализована на диэлектрической подложке WL-CT338 с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3,38$ и толщиной $h_2 = 0,813$ мм. Анализ результатов моделирования показывает, что относительная полоса согласования антенны по уровню -10 дБ составляет порядка 3,3%.

На рис. 8 приведена частотная характеристика осевого отношения 3 дБ. Из полученных данных следует, что антенна обеспечивает относительную полосу осевого отношения 3 дБ, равную приблизительно 1%.

На рис. 9 приведена частотная зависимость коэффициента отражения S_{11} фильтр-антенны, конструкция которой показана на рис. 3. Согласно полученным данным фильтр-антенна обеспечивает относительную полосу пропускания по уровню -10 дБ примерно 9%.

На рис. 10 показана частотная зависимость осевого отношения 3 дБ. Анализ результатов демонстрирует, что относительная полоса осевого отношения 3 дБ фильтр-антенны составляет примерно 1%.

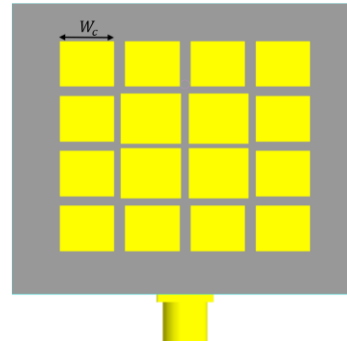


Рис. 5. Изменение размеров квадратурных элементарных ячеек в центральном слое метаповерхности разработанной фильтр-антенны (вид сверху)

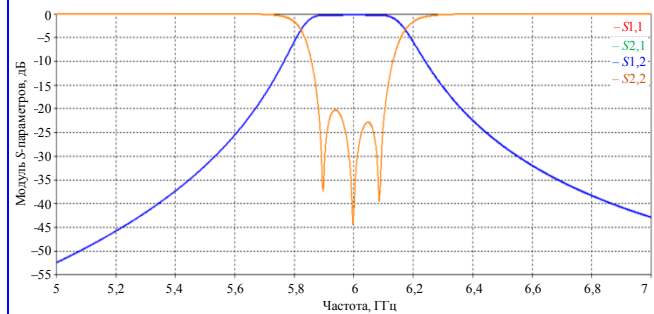


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра Чебышева третьего порядка

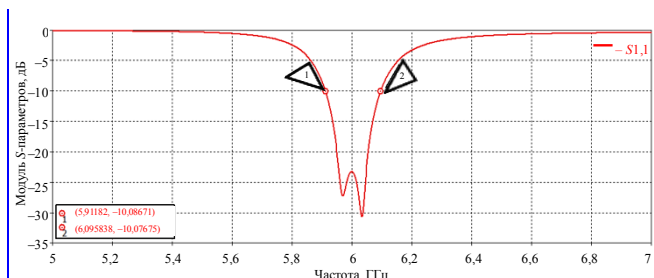


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения S_{11} антенны от частоты

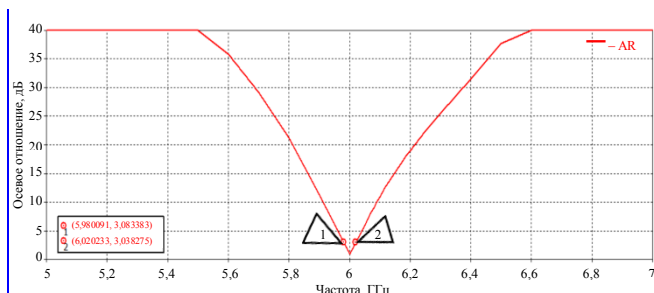


Рис. 8. Частотная зависимость осевого отношения антенны

На рис. 11 показаны диаграммы направленности разработанной фильтр-антенны, построенные в масштабе КНД для двух ортогональных плоскостей: $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$. Из анализа этих диаграмм видно, что максимальное значение КНД в рабочей полосе частот достигает 6,73 дБ.

В этом разделе приведены результаты электродинамического моделирования фильтр-антенны, выполненной на основе однородной метаповерхности. Моделирование проводилось для структуры на подложке WL-CT338 толщиной $h_3 = 1,524$ мм с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 3,38$. На рис. 12 показана частотная зависимость коэффициента отражения S_{11} фильтр-антенны (конструкция приведена на рис. 4). Согласно результатам электродинамического моделирования относительная полоса согласования по уровню -10 дБ достигает примерно 31%.

Рис. 13 демонстрирует частотную зависимость осевого отношения 3 дБ. Анализ данных показывает, что относительная полоса по осевому отношению составляет около 15%.

На рис. 14 представлены диаграммы направленности разработанной фильтр-антенны на однородной метаповерхности, построенные в масштабе КНД для двух ортогональных плоскостей $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$. Как следует из анализа представленных диаграмм, максимальное значение КНД в рабочей полосе частот достигает 7,81 дБ.

Сравнение с фильтр-антенной, показанной на рис. 3, указывает на увеличение относительной полосы пропускания на 26%, а относительной полосы осевого отношения 3 дБ – примерно на 14%, а КНД возрастает на 1,1 дБ.

На рис. 15 приведены результаты параметрического анализа коэффициента отражения S_{11} фильтр-антенны на основе неоднородной метаповерхности (конструкция представлена на рис. 5). Частотные характеристики получены при варьировании линейного размера квадратурных элементарных ячеек W_c . Анализ зависимостей показывает, что увеличение параметра W_c приводит к смещению резонансных частот влево по частотной оси при практически неизменной ширине полосы пропускания.

На рис. 16 показана частотная характеристика осевого отношения 3 дБ. Анализ результатов указывает на сдвиг полосы осевого отношения в низкочастотную область при незначительном изменении ее ширины.

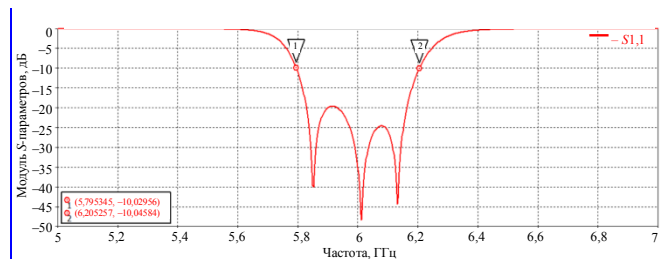


Рис. 9. Коэффициент отражения S_{11} разработанной фильтр-антенны

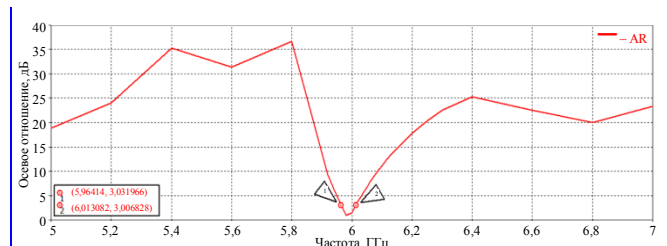


Рис. 10. Частотная зависимость осевого отношения фильтр-антенны

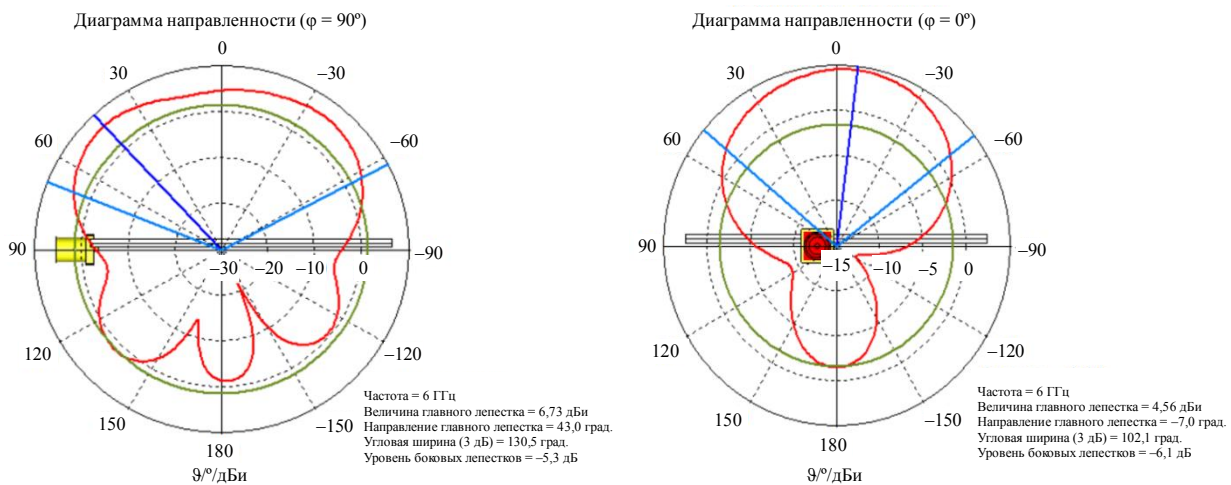


Рис. 11. Результаты моделирования диаграмм направленности разработанной фильтр-антенны в двух ортогональных плоскостях: а – $\varphi = 90^\circ$; б – $\varphi = 0^\circ$

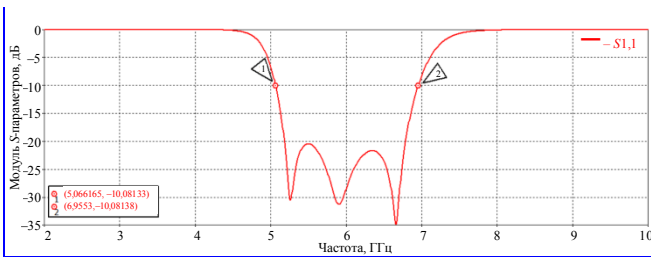


Рис. 12. Частотная характеристика коэффициента отражения S_{11} разработанной фильтр-антенны на однородной метаповерхности

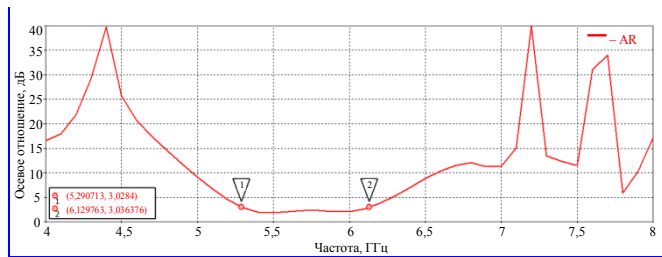


Рис. 13. Частотная зависимость осевого отношения фильтр-антенны, выполненной на основе однородной метаповерхности

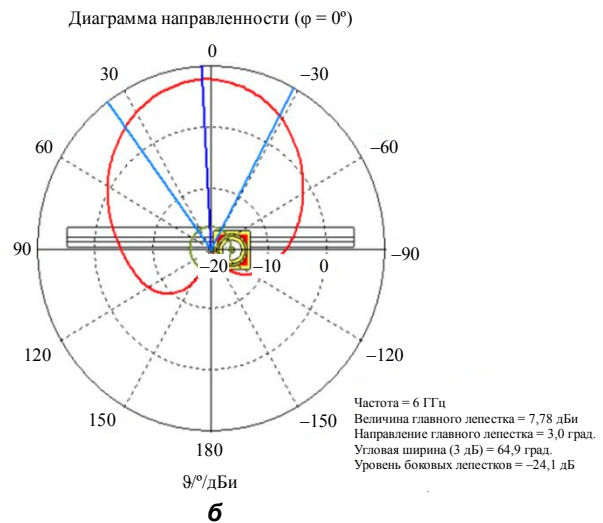
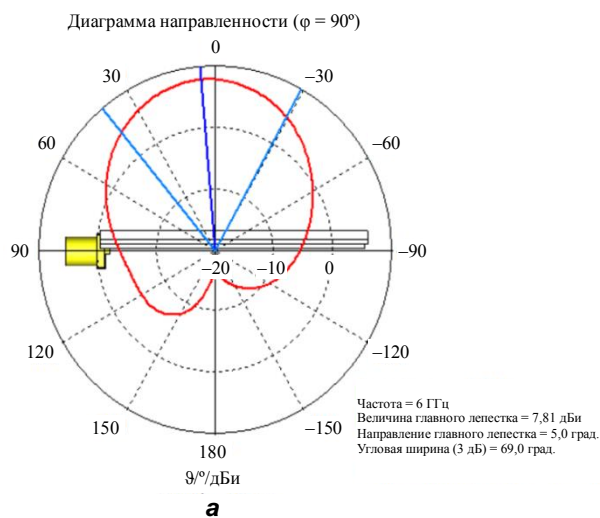


Рис. 14. Результаты моделирования направленности фильтр-антенны, выполненной на основе однородной метаповерхности, в двух ортогональных плоскостях: а – $\varphi = 90^\circ$; б – $\varphi = 0^\circ$

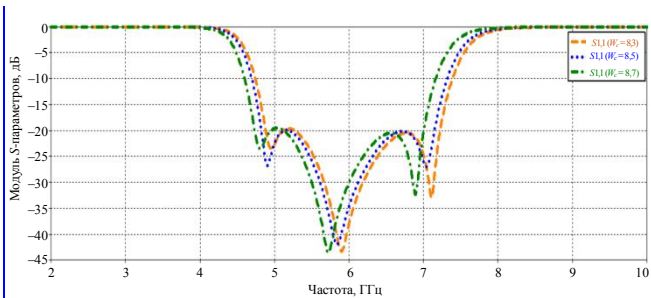


Рис. 15. Частотная зависимость коэффициента отражения S_{11} разработанной фильтр-антенны на неоднородной метаповерхности для разных размеров квадратных элементарных ячеек W_c : 8,3; 8,5 и 8,7 мм

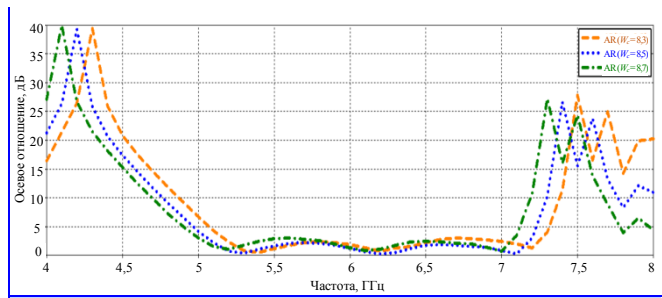


Рис. 16. Частотная зависимость осевого отношения фильтр-антенны на неоднородной метаповерхности для различных размеров квадратных элементарных ячеек W_c : 8,3; 8,5 и 8,7 мм

Далее представлены результаты электродинамического моделирования фильтр-антенны, выполненной на основе неоднородной метаповерхности. На рис. 17 показана частотная зависимость коэффициента отражения S_{11} данной фильтр-антенны (конструкция приведена на рис. 5). По результатам моделирования, относительная полоса согласования по уровню -10 дБ составляет примерно 44,6%.

Рис. 18 показывает частотную характеристику осевого отношения 3 дБ, из которой следует, что относительная полоса по этому параметру составляет примерно 33,8%.

На рис. 19 приведены диаграммы направленности разработанной фильтр-антенны на основе неоднородной метаповерхности, представленные в масштабе КНД для двух ортогональных плоскостей:

$\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$. Анализ диаграмм показывает, что максимальное значение КНД в рабочей полосе частот достигает 8,56 дБ.

Сравнение с фильтр-антенной на основе однородной метаповерхности (рис. 4) показывает, что относительная полоса пропускания увеличивается на 13,6%, а полоса по осевому отношению 3 дБ – примерно на 19%, а КНД возрастает на 0,75 дБ.

На рис. 20 представлен изготовленный прототип разработанной фильтр-антенны с неоднородной метаповерхностью.

На рис. 21 представлены частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} , полученные в результате измерений изготовленного прототипа и электродинамического моделирования разработанной фильтр-антенны с неоднородной метаповерхностью. Из рис. 21 видно, что расхождения между экспериментальными и расчётными результатами являются незначительными.

На рис. 22 приведены результаты экспериментальных измерений и электродинамического моделирования частотной зависимости осевого отношения разработанной фильтр-антенны с неоднородной метаповерхностью. Как следует из рис. 22 экспериментальные и расчётные данные хорошо согласуются.

На рис. 23 приведены диаграммы направленности изготовленного прототипа и результаты электродинамического моделирования разработанной фильтр-антенны с неоднородной метаповерхностью в масштабе (КНД) в двух ортогональных плоскостях $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 0^\circ$. Как видно из рис. 23 максимальное значение КНД фильтр-антенны в рабочей полосе частот составляет около 8 дБ. Отме-

чается хорошее согласование между экспериментальными и расчётными данными.

В таблице выполнено сравнение характеристик разработанной фильтр-антенны и аналогичных фильтр-антенн, представленных в работах [14 – 17].

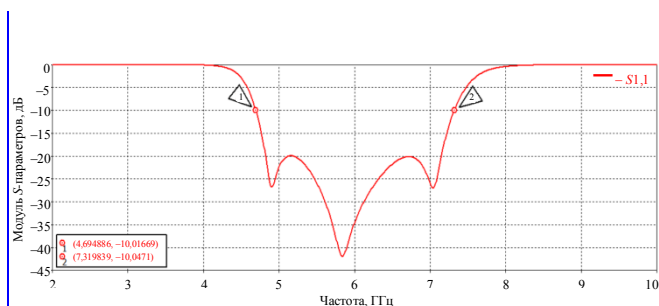


Рис. 17. Частотная зависимость коэффициента отражения S_{11} разработанной фильтр-антенны на неоднородной метаповерхности

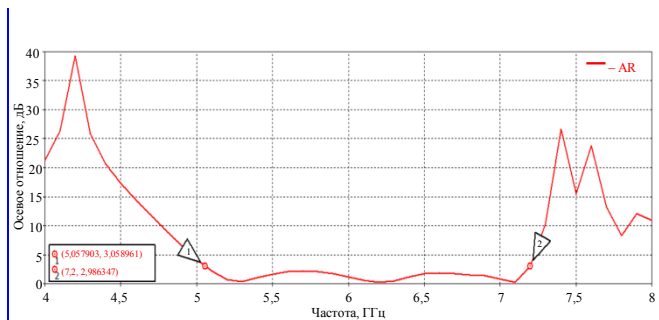


Рис. 18. Частотная зависимость осевого отношения фильтр-антенны на неоднородной метаповерхности

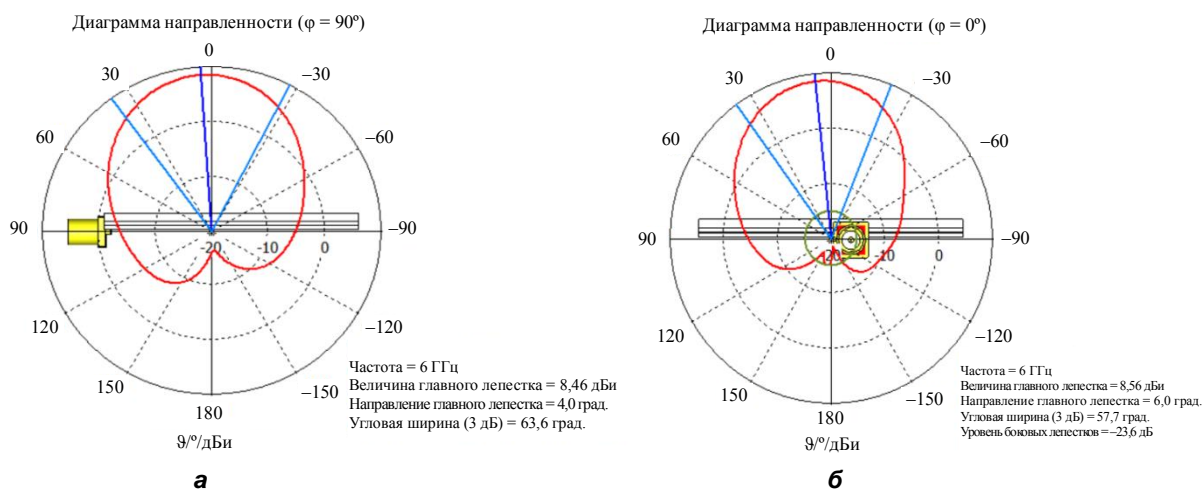


Рис. 19. Результаты моделирования диаграмм направленности фильтр-антенны на неоднородной метаповерхности в двух ортогональных плоскостях: а – $\varphi = 90^\circ$; б – $\varphi = 0^\circ$

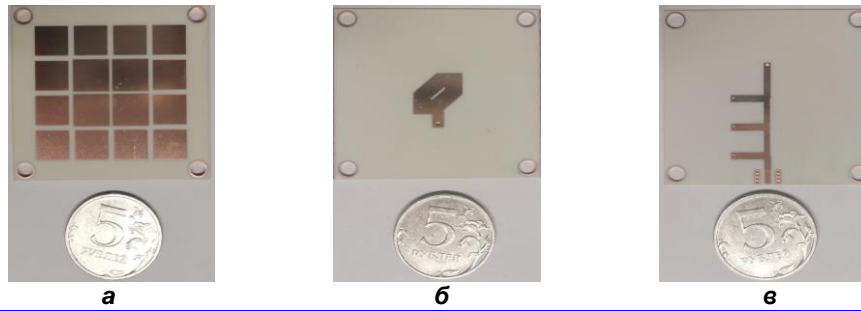


Рис. 20. Изготовленная разработанная фильтр-антенна с неоднородной метаповерхностью: а – вид сверху первого слоя; б – вид сверху второго слоя; в – вид снизу третьего слоя

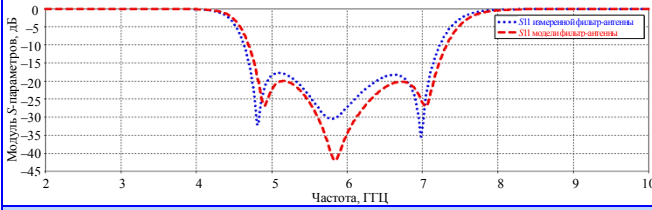


Рис. 21. Сравнение коэффициента отражения S_{11} измеренного прототипа и результатов электродинамического моделирования разработанной фильтр-антенны на основе неоднородной метаповерхности

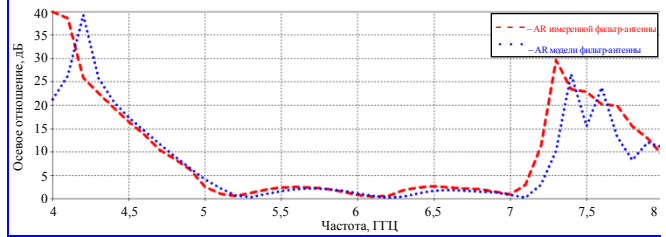
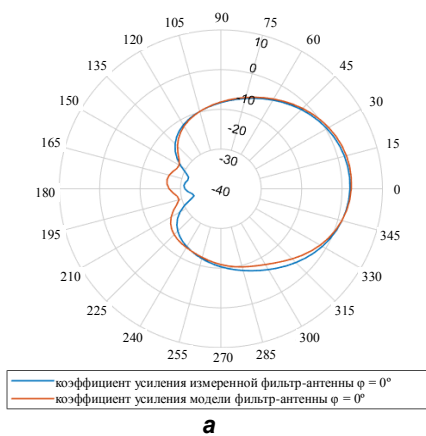
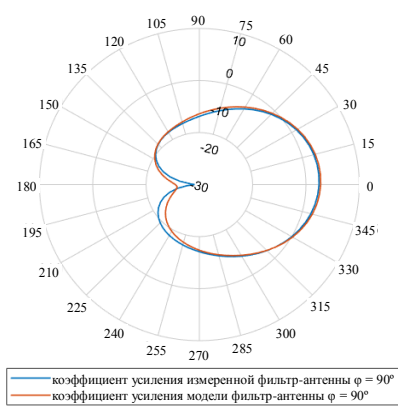


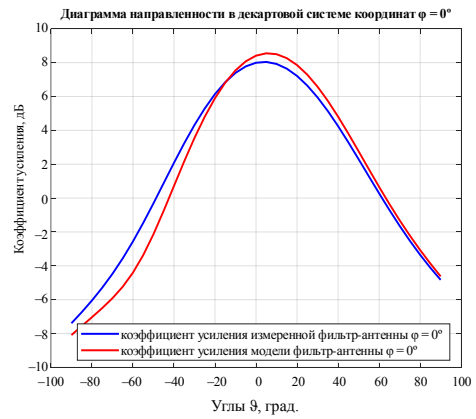
Рис. 22. Сравнение осевого отношения измеренного прототипа и результатов электродинамического моделирования разработанной фильтр-антенны на неоднородной метаповерхности



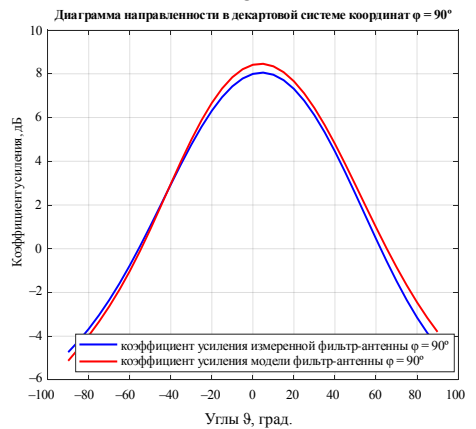
а



в



б



г

Рис. 23. Сравнение диаграмм направленности в масштабе коэффициента направленного действия измеренного прототипа и результатов электродинамического моделирования разработанной фильтр-антенны на неоднородной метаповерхности в двух плоскостях: а, б – $\varphi = 0^\circ$; в, г – $\varphi = 90^\circ$

Таблица

Сравнение характеристик фильтр-антенн с круговой поляризацией

Номер источника	Резонансная частота, ГГц	Ширина рабочей полосы частот, ГГц	Ширина полосы осевого отношения 3 дБ	Усиление
[14]	3,1	24,1%	8,4%	9
[15]	4	12,5%	12,5%	5,2
[16]	2,4	3,8%	3,8%	6,1
[17]	4	10,3%	8,8%	5,8
Разработанная фильтр-антенна	6	44,6%	33,8%	8,35

Из данных, приведённых в таблице, следует, что разработанная фильтр-антенна на основе неоднородной метаповерхности обеспечивает более широкую рабочую полосу частот, а также расширенную полосу осевого отношения 3 дБ. Таким образом, совокупность полученных характеристик позволяет рассматривать предложенную фильтр-антенну на неоднородной метаповерхности как перспективное техническое решение для современных систем беспроводной связи.

Заключение

Предложена новая конструкция широкополосной фильтр-антенны круговой поляризации на ос-

нове многослойной структуры для систем беспроводной связи. Исследовано влияние параметров неоднородной метаповерхности, в частности размеров квадратных ячеек, на электродинамические характеристики устройства, что позволило определить их оптимальные значения. Изготовлен и испытан экспериментальный образец. Результаты измерений демонстрируют хорошее согласование с данными электродинамического моделирования. Таким образом, разработанная фильтр-антенна удовлетворяет заданным требованиям и является перспективным решением для применения в современных системах беспроводной связи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Left-Hand Circularly Polarized Antenna Array for Unmanned Aerial Vehicle Systems / Feras Habib Rammah [et al.] // 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). IEEE, 2024. Pp. 303–307.
2. Lau K. L., Wong H., Luk K. M. A full-wavelength circularly polarized slot antenna // IEEE transactions on antennas and propagation. 2006. Vol. 54. № 2. Pp. 741–743.
3. Eskandari A. R., Moghaddasi M. N., Honarvar M. A. Design of a novel circularly polarized microstrip patch antenna using EBG structure // 2009 mediterranean microwave symposium (MMS). IEEE, 2009. Pp. 1–4.
4. Wang Yanfang, Fuguo Zhu, Gao Steven. Design of a simple circularly polarized antenna for millimeter-wave applications // 2020 13th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). IEEE, 2020. Pp. 1–3. DOI : 10.1109/UCMMT49983.2020.9296109.
5. Low-profile, small circularly polarized inverted-L antenna with double-folded arms / Xi Yang [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2010. Vol. 9. Pp. 767–770. DOI : 10.1109/lawp.2010.2063011.
6. A 3-D millimeter-wave filtering antenna with high selectivity and low cross-polarization / Hui Chu [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63. Iss. 5. Pp. 2375–2380. DOI : 10.1109/TAP.2015.2411282.
7. High-gain SIW filtering antenna with low H-plane cross polarization and controllable radiation nulls / Chi Fan [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2020. Vol. 69. Iss. 4. Pp. 2336–2340. DOI : 10.1109/TAP.2020.3018595.
8. A Compact Self-Decoupled Filtering Microstrip Patch Antenna / Sijie Tian [et al.] // 2021 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). IEEE, 2021. Pp. 346–348. DOI : 10.1109/IMWS-AMP53428.2021.9643884.
9. Mencagli Mario Junior. Manipulation of surface waves through metasurfaces. Springer, 2019. 106 p. DOI : 10.1007/978-3-030-14034-2.
10. Design of polarization reconfigurable antenna using metasurface / H. L. Zhu [et al.] // IEEE transactions on antennas and propagation. 2014. Vol. 62. Iss. 6. Pp. 2891–2898. DOI : 10.1109/TAP.2014.2310209.
11. Liu Sihao, Deqiang Yang, Jin Pan. A low-profile circularly polarized metasurface antenna with wide axial-ratio beamwidth // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. Vol. 18. Iss. 7. Pp. 1438–1442. DOI : 10.1109/LAWP.2019.2919533.
12. Hong Jia-Shen G., Michael J. Lancaster. Microstrip filters for RF/microwave applications. [б. м.] : John Wiley & Sons, 2001. 460 p. DOI : 10.1002/0471221619.
13. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. [б. м.] : John Wiley & Sons, 2016. 1104 p.
14. A Novel Reconfigurable Aperture-Coupled Filtering Antenna With Circular Polarization Diversity / Hua Changzhou [et al.] // 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2019. DOI : 10.1109/ICMMT45702.2019.8992092.
15. Jiang Zhi Hao, Douglas H. Werner. A compact, wideband circularly polarized co-designed filtering antenna and its application for wearable devices with low SAR // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63. Iss. 9. Pp. 3808–3818. DOI : 10.1109/TAP.2015.2452942.
16. Circularly polarized patch antenna with filtering performance using polarization isolation and dispersive delay line / Wenwei Wang [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2020. Vol. 19. Iss. 8. Pp. 1457–1461. DOI : 10.1109/LAWP.2020.3005709.
17. Wu Qiong-Sen, Xiao Zhang, Lei Zhu. Co-design of a wideband circularly polarized filtering patch antenna with three minima in axial ratio response // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66. Iss. 10. Pp. 5022–5030. DOI : 10.1109/TAP.2018.2856104.

References

1. Left-Hand Circularly Polarized Antenna Array for Unmanned Aerial Vehicle Systems / Feras Habib Rammah [et al.] // 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). IEEE, 2024. Pp. 303–307.
2. Lau K. L., Wong H., Luk K. M. A full-wavelength circularly polarized slot antenna // IEEE transactions on antennas and propagation. 2006. Vol. 54. № 2. Pp. 741–743.
3. Eskandari A. R., Moghaddasi M. N., Honarvar M. A. Design of a novel circularly polarized microstrip patch antenna using EBG structure // 2009 mediterranean microwave symposium (MMS). IEEE, 2009. Pp. 1–4.
4. Wang Yanfang, Fuguo Zhu, Gao Steven. Design of a simple circularly polarized antenna for millimeter-wave applications // 2020 13th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). IEEE, 2020. Pp. 1–3. DOI : 10.1109/UCMMT49983.2020.9296109.
5. Low-profile, small circularly polarized inverted-L antenna with double-folded arms / Xi Yang [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2010. Vol. 9. Pp. 767–770. DOI : 10.1109/lawp.2010.2063011.
6. A 3-D millimeter-wave filtering antenna with high selectivity and low cross-polarization / Hui Chu [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63. Iss. 5. Pp. 2375–2380. DOI : 10.1109/TAP.2015.2411282.
7. High-gain SIW filtering antenna with low H-plane cross polarization and controllable radiation nulls / Chi Fan [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2020. Vol. 69. Iss. 4. Pp. 2336–2340. DOI : 10.1109/TAP.2020.3018595.
8. A Compact Self-Decoupled Filtering Microstrip Patch Antenna / Sijie Tian [et al.] // 2021 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). IEEE, 2021. Pp. 346–348. DOI : 10.1109/IMWS-AMP53428.2021.9643884.
9. Mencagli Mario Junior. Manipulation of surface waves through metasurfaces. Springer, 2019. 106 p. DOI : 10.1007/978-3-030-14034-2.
10. Design of polarization reconfigurable antenna using metasurface / H. L. Zhu [et al.] // IEEE transactions on antennas and propagation. 2014. Vol. 62. Iss. 6. Pp. 2891–2898. DOI : 10.1109/TAP.2014.2310209.
11. Liu Sihao, Deqiang Yang, Jin Pan. A low-profile circularly polarized metasurface antenna with wide axial-ratio beamwidth // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. Vol. 18. Iss. 7. Pp. 1438–1442. DOI : 10.1109/LAWP.2019.2919533.
12. Hong Jia-Shen G., Michael J. Lancaster. Microstrip filters for RF/microwave applications. [n. p.] : John Wiley & Sons, 2001. 460 p. DOI : 10.1002/0471221619.
13. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. [n. p.] : John Wiley & Sons, 2016. 1104 p.
14. A Novel Reconfigurable Aperture-Coupled Filtering Antenna With Circular Polarization Diversity / Hua, Changzhou [et al.] // 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2019. DOI : 10.1109/ICMMT45702.2019.8992092.
15. Jiang Zhi Hao, Douglas H. Werner. A compact, wideband circularly polarized co-designed filtering antenna and its application for wearable devices with low SAR // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63. Iss. 9. Pp. 3808–3818. DOI : 10.1109/TAP.2015.2452942.
16. Circularly polarized patch antenna with filtering performance using polarization isolation and dispersive delay line / Wenwei Wang [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2020. Vol. 19. Iss. 8. Pp. 1457–1461. DOI : 10.1109/LAWP.2020.3005709.
17. Wu Qiong-Sen, Xiao Zhang, Lei Zhu. Co-design of a wideband circularly polarized filtering patch antenna with three minima in axial ratio response // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66. Iss. 10. Pp. 5022–5030. DOI : 10.1109/TAP.2018.2856104.

Поступила в редакцию 26.12.2025

The article was submitted 26.12.2025

Информация об авторах

Ферас Хабиб Раммах – аспирант, т. +7 (977) 038-22-62, e-mail: firmas.rammah90@gmail.com;

Михаил Сергеевич Михайлов – кандидат технических наук, доцент, т. +7 (926) 431-21-83, e-mail: mikhailovms@mpei.ru;

Владимир Гарриевич Мелконян – инженер, т. +7 (925) 705-22-23, e-mail: melkonyan1016@mail.ru;

Алексей Александрович Комаров – кандидат технических наук, доцент, т. +7 (910) 455-84-29, e-mail: komarovAIA@mpei.ru;

Валерий Александрович Пермяков – доктор технических наук, профессор, т. +7 (910) 404-36-97, e-mail: permyackovvalery@yandex.ru.

Information about the authors

Feras Habib Rammah – Postgraduate Student, t. +7 (977) 038-22-62, e-mail: firmas.rammah90@gmail.com;

Mikhail Sergeevich Mikhailov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, t. +7 (926) 431-21-83, e-mail: mikhailovms@mpei.ru;

Vladimir Garrievich Melkonyan – Engineer, t. +7 (925) 705-22-23, e-mail: melkonyan1016@mail.ru;

Alexey Alexandrovich Komarov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, t. +7 (910) 455-84-29, e-mail: komarovAIA@mpei.ru;

Valery Alexandrovich Permyakov – Doctor of Technical Sciences, Professor, t. +7 (910) 404-36-97, e-mail: permyackovvalery@yandex.ru.