

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.32>

УДК: 621.372.57; 621.375

КОМПАКТНАЯ ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ С ПОЛЫМ ЭКРАНОМ

Е.Р. Гафаров, А.А. Ерохин, Р.О. Рязанцев, А.М. Александрин

Сибирский федеральный университет
660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 28

Статья поступила в редакцию 1 сентября 2025 г.

Аннотация. В представленной работе проведено теоретическое исследование антенны круговой поляризации с экраном в виде полости для решения задач, в которых требуется обеспечение качественных поляризационных характеристик в широком телесном угле. Выполнено моделирование отдельных узлов предложенной антенны в части компактного щелевого излучателя и компактной схемы питания в виде квадратурного делителя, а также антенны в сборе при помощи метода конечных элементов. Проведен анализ амплитудно-фазовых характеристик компактной схемы питания, а также характеристик направленности, поляризации и согласования щелевого излучателя в диапазоне рабочих длин волн. Отмечены преимущества предложенной антенны в виде компактности, простоты изготовления, а также формируемых радиотехнических характеристиках. Предложенная антенна позволяет получить высокие значения коэффициента эллиптичности более 0,96 в угловом диапазоне $\theta = [-50^\circ; 50^\circ]$, при этом размер антенны не превышает $0,4\lambda_0$.

Ключевые слова: щелевая антенна, полый экран, круговая поляризация, коэффициент эллиптичности, диаграмма направленности.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-19-20106, <https://rscf.ru/project/25-19-20106/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Автор для переписки: Ерохин Алексей Александрович, aerokhin@sfu-kras.ru

Введение

В настоящее время конструкции антенн круговой поляризации для спутниковых систем различного назначения, в том числе систем навигации, связи, телекоммуникации и др. [1, 2], стремительно совершенствуются благодаря развитию технологий изготовления. Антенны для приема сигналов с правой и/или левой круговой поляризацией зачастую используются в приемопередающих системах [3] для обеспечения поляризационной селекции и повышения развязки между каналами. Антенны круговой поляризации используются в качестве самостоятельных элементов в приемных системах позиционирования, навигации и времени [4, 5], либо они могут быть объединены в антенную решетку для повышения коэффициента усиления [6] или для противодействия преднамеренным и непреднамеренным помехам [7]. Реализация круговой поляризации путем последовательного поворота антенных элементов линейной поляризации в антенной решетке [8] подразумевает ее использование для направленных антенных устройств, т.к. круговая поляризация, созданная таким образом, как правило, обеспечивается в узком секторе углов. Для обеспечения круговой поляризации в широком секторе углов необходимо возбуждение двух ортогональных мод непосредственно в единичном антенном элементе, который может функционировать как самостоятельно, так и в составе антенной решетки, в зависимости от типа используемой системы. Следует отметить, что требования к обеспечению круговой поляризации в широком угловом диапазоне сейчас предъявляются не только к наземным антенным системам (например, приемные антенны базовых станций ГНСС) [9], но и к антеннам развивающихся систем космических аппаратов, расположенных на низкой околоземной орбите [10]. Другими

словами, малая высота орбиты накладывает требования в виде большой угловой ширины характеристики направленности и поляризации. Таким образом, исследование технологичных и компактных антенн круговой поляризации для работы в широком угловом секторе является актуальной задачей как для бортовых, так и для наземных систем различного назначения.

Этим требованиям удовлетворяет щелевая антенна с полым экраном. Известно множество антенн с полым экраном, выполненных по технологии плоских волноведущих структур (SIW – substrate integrated waveguide) [11]. Такие антенны позволяют получить широкоугольную диаграмму направленности [12] или, наоборот, относительно узкий луч при объединении в антенные решетки [13]. Кроме того, SIW-антенны могут быть согласованы с фидером в широком частотном диапазоне [14] либо в двух диапазонах с отношением частот до 30 [15]. Также известна перестраиваемая по частоте SIW-антенна с полым резонаторным экраном [16]. Перестройка коэффициента отражения достигается с помощью дискового элемента, апертурно связанного с излучающей щелью. Несмотря на преимущества, SIW-антенны обладают потерями на излучение, диэлектрическими и омическими потерями.

Для минимизации потерь применяют цельнометаллические антенны. Например, в работах [17, 18] авторы разработали такие антенны. Антенна из [17] является широкополосной, работает в диапазоне 10–16 ГГц и имеет высокий коэффициент усиления около 16 дБи. Антенна из [18] перестраивается по частоте с помощью металлического штыва: изменение его длины меняет индуктивность, что приводит к сдвигу резонансной частоты. Однако эти конструкции поддерживают только линейную поляризацию.

Для возбуждения волны с круговой поляризацией требуются два ортогональных в пространстве вектора электрического поля со сдвигом фаз 90° . Так, в [19] авторы разработали щелевые антенны с крестообразными щелями под углом 90° для обеспечения круговой поляризации. Эта конструкция позволяет перестраивать характеристики антенны аналогично [18]. Кроме того, можно использовать щели более сложной формы. В [20] авторы применили дуговые

щели для достижения высокого коэффициента эллиптичности в широком угловом диапазоне, но антенна работает в узкой полосе частот с относительной шириной полосы по уровню 3 дБ коэффициента эллиптичности около 0,4 %. Использование кольцевой щели [21] позволяет достичь относительной ширины полосы 9,5 % по уровню 3 дБ в широком угловом диапазоне. Однако эти конструкции имеют большие электрические размеры (около $0,7\lambda_0$, где λ_0 – центральная рабочая частота ~ 2 ГГц).

В данной работе внимание сосредоточено на цельнометаллической антенне с кольцевой щелью для достижения высокого коэффициента эллиптичности в широком угловом диапазоне и минимизации потерь. Будет проведено исследование отдельных узлов антенны в виде излучающей щели и ее схемы питания и антенна в сборе.

1. Конструкция антенны

В настоящей работе будет проведено исследование низкопрофильной щелевой антенны с полым экраном. Моделирование антенны будет выполнено в САПР СВЧ устройств методом конечных элементов.

1.1. Антенна в сборе

Внешний вид антенны в сборе представлен на рисунке 1а. Вид на полый экран антенны изнутри показан на рисунке 1б. Щелевой элемент («щель» на рисунке 1с), прорезанная в экране, расположена на верхней стороне антенны. Для уменьшения поперечного размера антенны щель имеет форму зубчатого колеса. Полый экран антенны («полость») формирует электрически замкнутую цилиндрическую полость, заполненную диэлектрическим материалом Акримид-Т (аналог материала Rohacell – конструкционный пенопласт на основе полиметакрилимида) с параметрами $\epsilon_r = 1,05$, $\text{tg}(\delta) = 0,0002$. Заполнение полости формируется при помощи двух слоев материала Акримид-Т, толщина каждого слоя 4 мм. Это необходимо для формирования подвешенной подложки для симметричной полосковой линии, образующей схему питания в виде

квадратурного моста («схема питания»). Для обеспечения компактности и повышения плотности упаковки полосковые линии квадратурного моста выполнены в виде множественных изгибов.

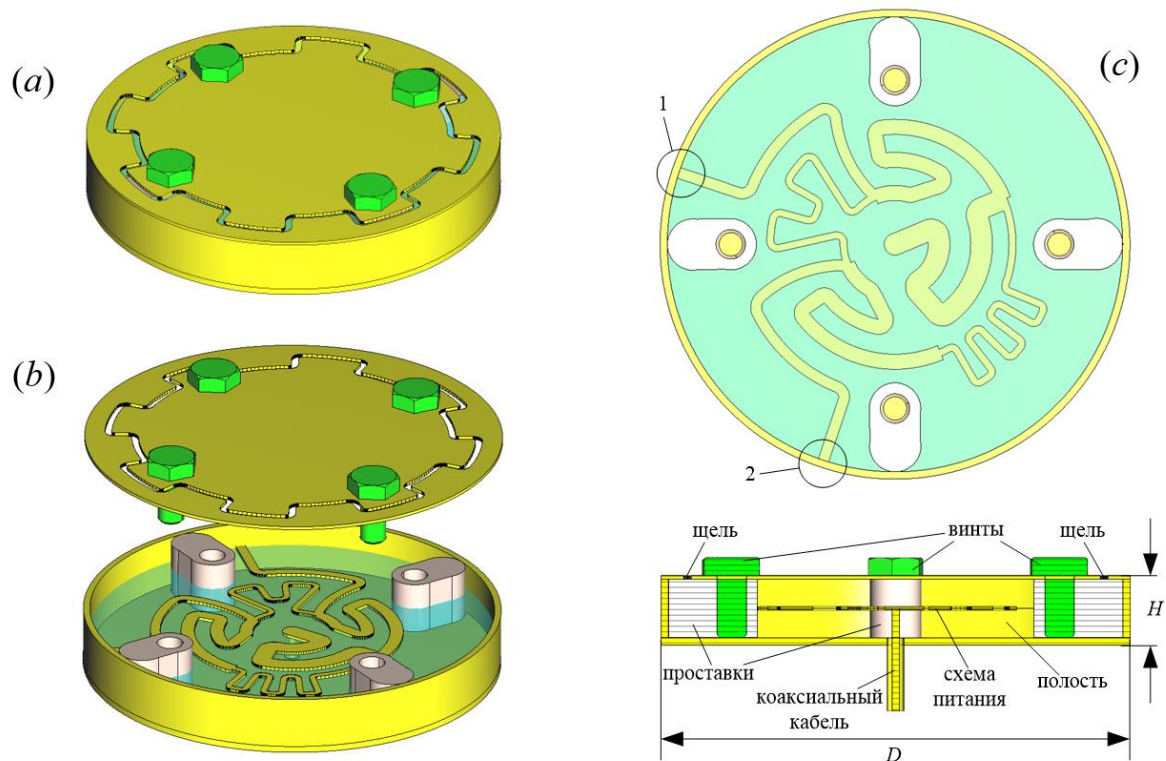


Рис. 1. Щелевая антенна с полым экраном в сборе (а). Вид на полый экран антенны (b). Вид на схему питания сверху и антенну в сборе в сечении (с).

Схема питания возбуждается от центральной жилы коаксиального кабеля («коаксиальный кабель») в геометрическом центре антенны. Два выхода схемы питания закорочены на экран в области «1» и «2» на периферии полости как показано на рисунке 1с, сверху. Короткозамкнутые на экран выходы схемы питания обеспечивают таким образом передачу энергии в щелевой излучатель («щель»). Важно отметить, что такой способ питания щелевого излучателя справедлив только для полосковой линии, в которой концентрация электрического поля наблюдается как сверху, так и снизу полоска.

Для обеспечения плоскостности щелевого излучателя («щель») центральная часть верхнего экрана антенны закреплена на четырех диэлектрических проставках («проставки»). Материал проставок – фторопласт-4 с характеристиками $\epsilon_r = 2.1$, $\text{tg}(\delta) = 0.0002$. Крепление верхней части экрана к проставкам выполнено при помощи метрического крепежа из

диэлектрика («винты»), исходный материал для изготовления – фторопласт-4. Высота антенны составляет $H = \lambda_0/16$ (где λ_0 – длина волны в свободном пространстве), диаметр антенны $D = 0.4\lambda_0$.

Резонансная частота предложенной антенны определяется, во-первых, длиной щелевого излучателя, во-вторых, объемом полого экрана, выступающего в роли объемного резонатора [22]. Частота, при которой коэффициент эллиптичности будет иметь максимальное значение определяется схемой питания в виде квадратурного делителя [23].

1.2. Щелевая антенна с полым экраном

Ниже будет рассмотрена такая антенна с возбуждением двух низших ортогональных мод в квадратуре.

На рисунке 2 показана антенна с компактным щелевым излучателем в виде шестеренки, с малым $D1 = 47,5$ мм и большим $D2 = 57,5$ мм диаметрами. $D = 64$ мм – внешний диаметр полости резонатора соответствующий $0,4\lambda_0$. Длина щели составляет порядка $1,5\lambda_0$. Ширина щели $S = 1$ мм.

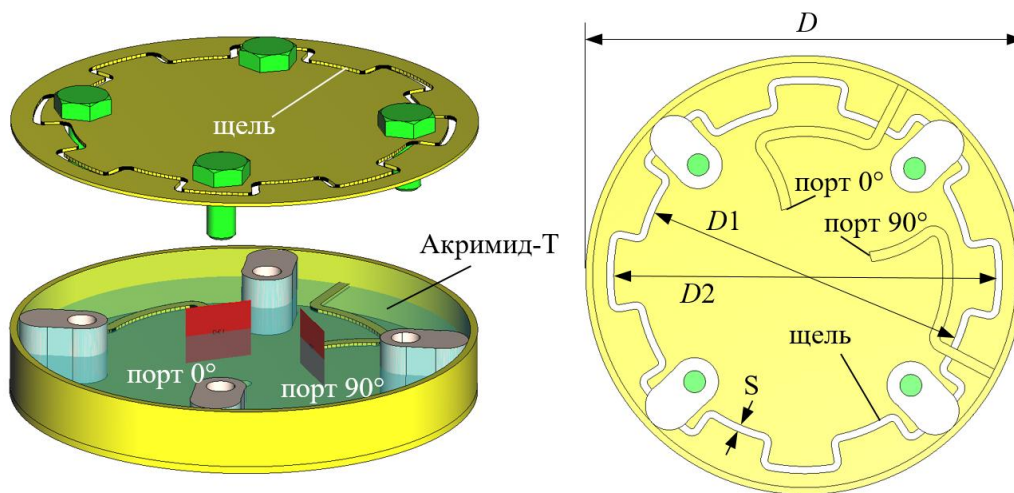


Рис. 2. Щелевой антенный элемент в форме зубчатого колеса с квадратурным возбуждением при помощи полосковых линий.

Возбуждение антенны было реализовано при помощи двух полосковых линий, повернутых друг относительно друга на угол 90° . Амплитуда на выходах равна, задержка по фазе составляет 90° .

Коэффициент полезного действия (КПД) с учетом потерь на отражение и диссипативных потерь составляет более 0,9 в полосе частот $f/f_0 = 0,99-1,02$ (рисунок 3a). Частотная зависимость коэффициента эллиптичности (рисунок 3b) показывает, что антенна имеет хорошие поляризационные свойства за пределами рабочей полосы по КПД. Следует отметить, что коэффициент эллиптичности (КЭ) антенны в сборе будет определяться так же ее схемой питания и согласованием щелевого излучателя, которое является узкополосным для антенн такого типа.

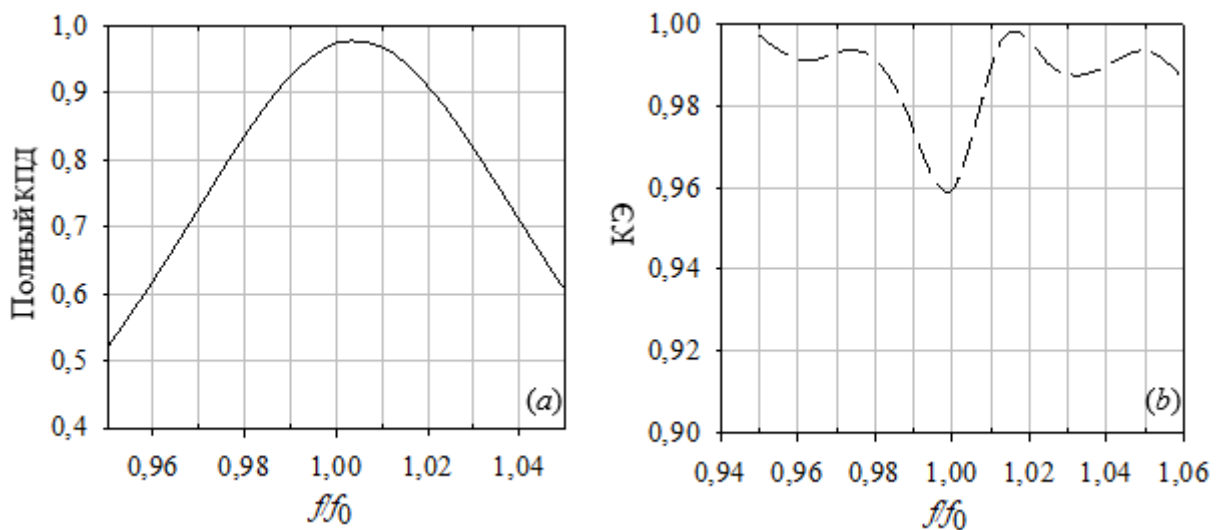


Рис. 3. Частотная зависимость полного коэффициента полезного действия (a) и коэффициента эллиптичности, усредненного в диапазоне углов $\theta = [-50^\circ; 50^\circ]$ (b).

Далее было проведено исследование влияния высоты полости щелевой антенны на ширину диаграммы направленности. На рисунке 4 приведен график частотной зависимости ширины ДН при различных H от 5 мм до 40 мм с шагом 5 мм.

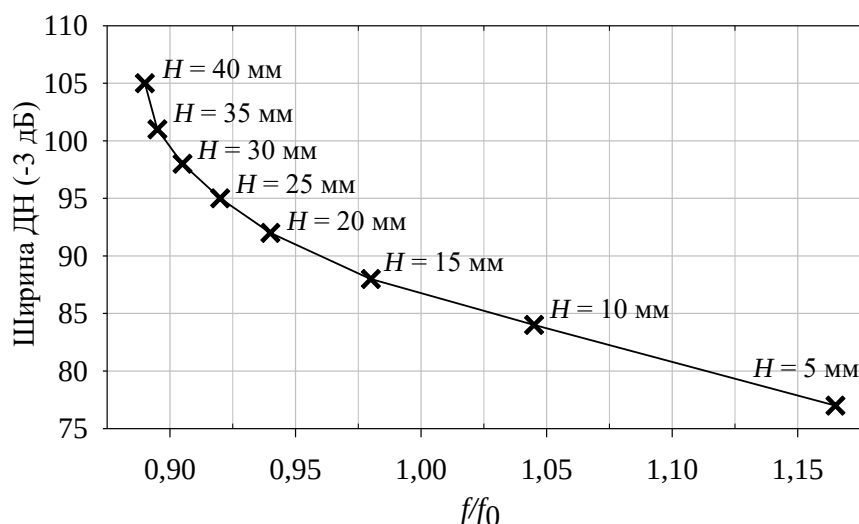


Рис. 4. Частотная зависимость ширины диаграммы направленности при различных высотах полости резонатора H .

Из графика следует, что по мере увеличения высоты H наблюдается увеличение ширины ДН. При этом, сначала, до высоты $H = 20$ мм наблюдается линейный рост характеристики, а затем ШДН резко возрастает. Это может быть связано с тем, что распределения токов на поверхности проводника таковы, что антенна с полостью вырождается в ненаправленную антенну типа монополь над экраном.

Следует добавить, что полученная вариативность ширины ДН от H с 77° до 105° для предложенной компактной антенны позволяет выбрать ту или иную конфигурацию для решения широкого круга задач как наземных, так и спутниковых систем различного назначения.

Далее будет рассмотрена конфигурация компактной схемы питания для возбуждения щелевой антенны в квадратуре.

1.3. Компактная схема питания

Ключевым узлом при разработке антенны круговой поляризации является схема питания. Правильно разработанная схема будет обеспечивать высокие значения коэффициента эллиптичности в заданной полосе рабочих частот. Была предложена реализация схемы питания с двумя точками. Схемы возбуждения с тремя и более точками хоть и могут обеспечить лучшие поляризационные

характеристики, но потребует больше пространства и не являются пригодными для предложенной конструкции антенны.

Для компактной реализации антенны даже схема питания в виде квадратурного делителя в классическом исполнении не является подходящей, т.к. габариты ее топологии могут превышать внутренний диаметр щелевого излучателя ($D1$ на рисунке 2, рисунок 5 слева). В этом случае возможно спонтанное возбуждение щелевого излучателя и ухудшение поляризационных характеристик.

Для реализации компактного решения схемы питания предложен свернутый квадратурный делитель на основе полосковой линии, при этом опорное волновое сопротивление делителя составляет $Z_0 = 110 \text{ Ом}$. Внешний вид представлен на рисунке 5.

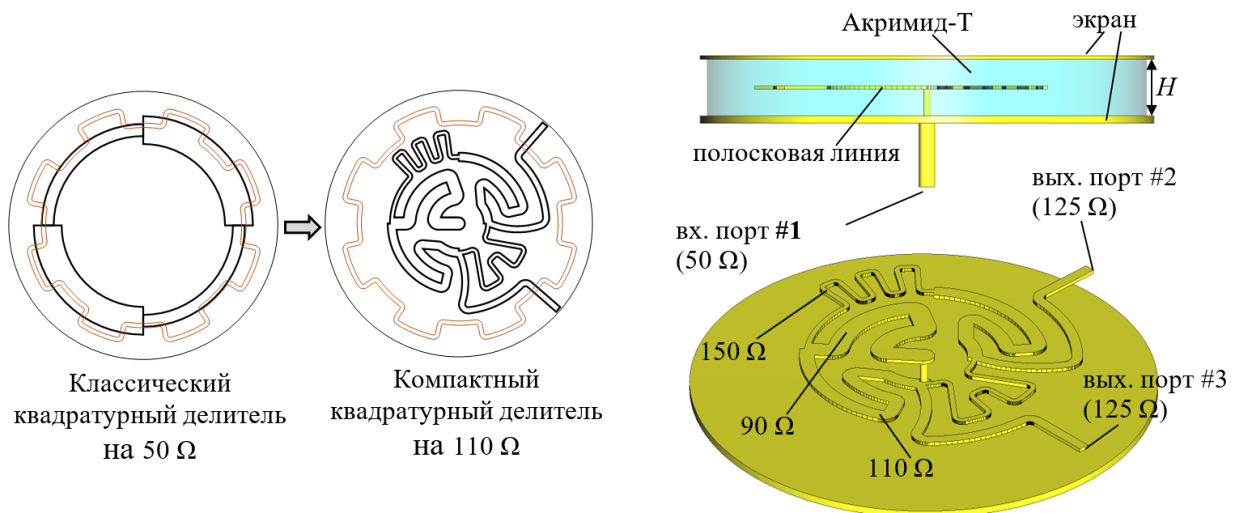


Рис. 5. Схема питания на основе полосковой симметричной линии – компактный квадратурный делитель с опорным сопротивлением $Z_0 = 110 \text{ Ом}$.

За основу принята полосковая линия схемы питания с высотой $H = 8 \text{ мм}$, т.к. в отличие от микрополосковой, электрическое поле в ней распространяется симметрично между верхним и нижним экранами и нет необходимости подводить питающий кабель непосредственно к месту возбуждения антенны. Волновое сопротивление $Z_0 = 110 \text{ Ом}$ позволило уменьшить ширину проводников схемы питания, освободив пространство для реализации изгибов квадратурного делителя, при этом на входе потребовалось установить полосковый

трансформатор с сопротивлением 95Ω . Входное сопротивление схемы питания при этом 50Ω . Соответственно высокоомные участки схемы питания имеют сопротивление $Z_1 = \sqrt{2}Z_0 \approx 150 \Omega$. Выходные порты схемы питания имеют сопротивление 125Ω для обеспечения наилучшего согласования щелевого излучателя и фидера.

Ниже, на рисунках 6а и 6б, приведены амплитудные и фазовые характеристики компактной схемы питания на основе квадратурного делителя. Компактная реализация схемы питания характеризуется равным делением мощности на два и имеет разность фаз между выходами около 90° , так же, как и полноразмерная схема питания (классический квадратурный делитель на 50Ω).

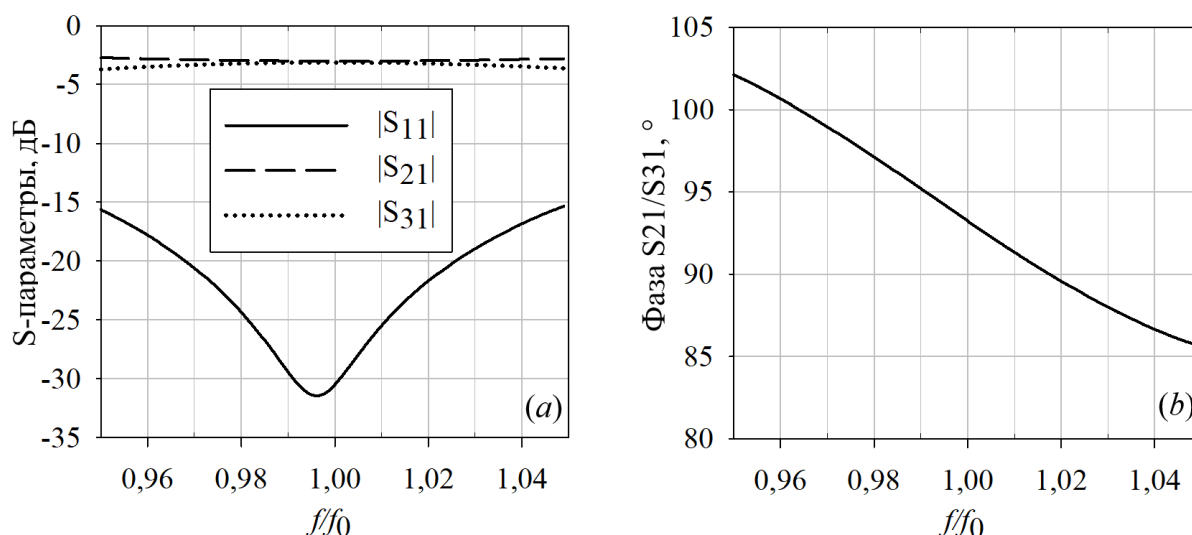


Рис. 6. Частотная зависимость амплитудных (а) и фазовых (б) характеристик компактного квадратурного делителя.

2. Анализ радиотехнических характеристик предложенной антенны

Для анализа щелевой антенны с полым экраном проведен расчет характеристик согласования, а также свойств направленности и поляризации. На рисунке 7а приведена зависимость модуля коэффициента отражения от относительной полосы частот f/f_0 , где f_0 – центральная рабочая частота антенны, например, в L -диапазоне для систем позиционирования навигации и времени. Антенна имеет низкий коэффициент отражения, по уровню -10 дБ полоса частот антенны составляет около 10 %, по уровню -15 дБ около 8 %. Однако полоса рабочих частот по коэффициенту эллиптичности $> 0,7$ составляет около 4 %,

полоса частот отмечена заштрихованной областью на рисунке 7*b*. Эту полосу частот определим как рабочую.

На рисунке 7*b* на частотной зависимости КЭ близок к единице только на частоте $f/f_0 \approx 1$, этот факт можно объяснить резонансным характером щелевого излучателя несмотря на то, что схема питания обеспечивает равноамплитудное возбуждение в квадратуре в полосе частот около 10 % [23].

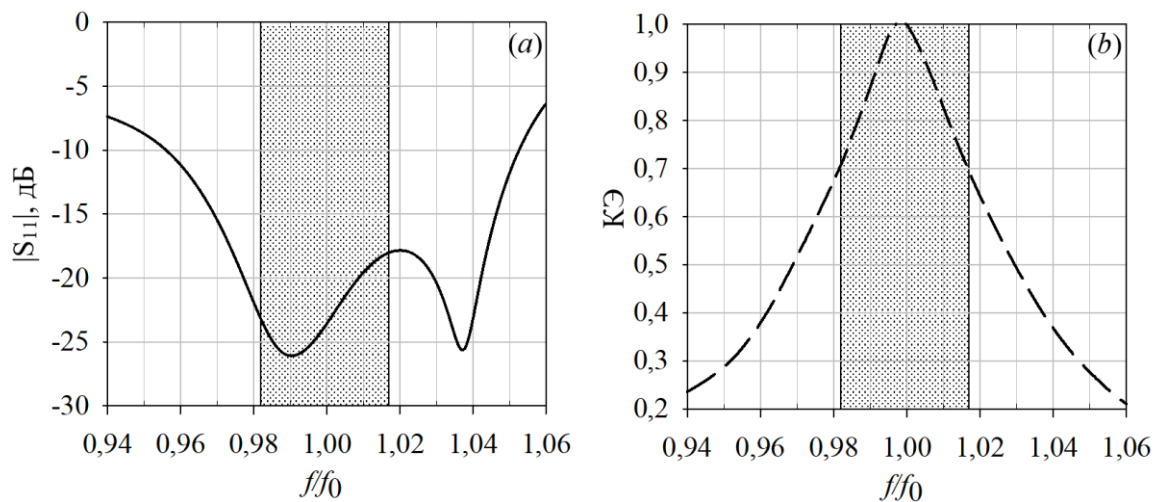


Рис. 7. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения (а) и коэффициента эллиптичности в зените (b).

На рисунке 8 приведены диаграммы направленности для правой и левой круговой поляризации на центральной частоте $f/f_0 = 1$, нижней частоте $f/f_0 = 0.98$ и верхней частоте $f/f_0 = 0.98$ рабочего диапазона. Выбор сечения диаграммы направленности (рисунок 8) не имеет критического значения т.к. благодаря симметричной конструкции излучателя азимутальная неравномерность ДН близка к нулю.

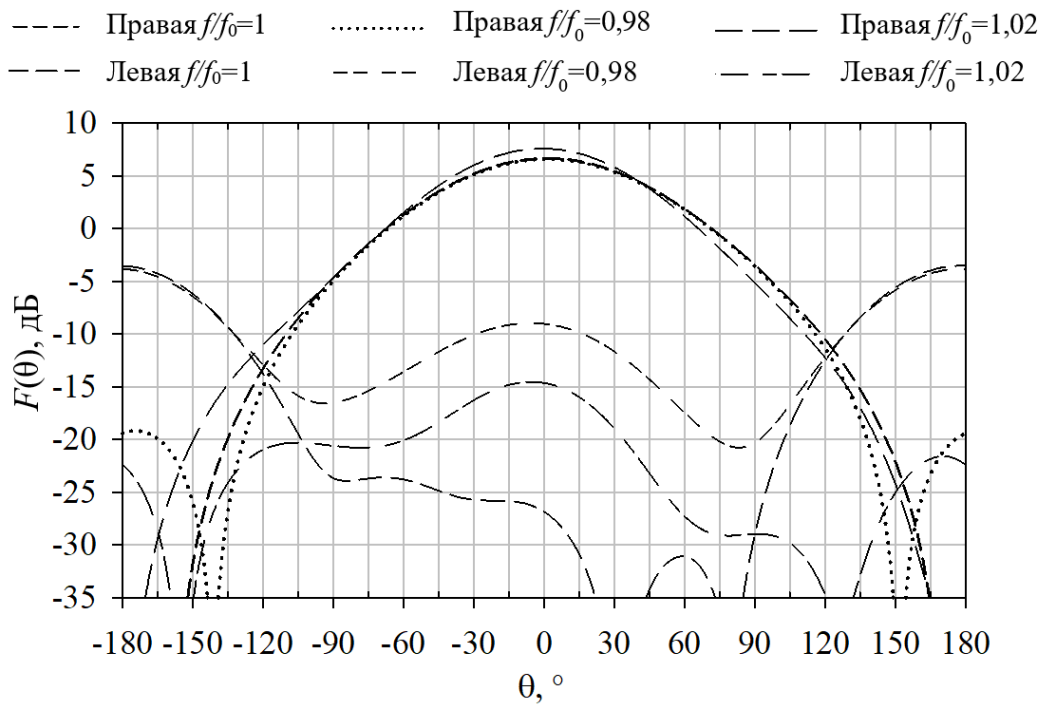


Рис. 8. Диаграммы направленности для левой и правой круговой поляризации для частот $f/f_0 = 1$, $f/f_0 = 0,98$ и $f/f_0 = 1,02$.

Коэффициент усиления антенны составляет 6,5 дБи, ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности соответствует 90° . Помимо прочего из рисунка 8 следует, что антенна имеет хорошую поляризационную развязку и коэффициент эллиптичности для правой круговой поляризации (RHCP/LHCP на рисунке 8) принимает значения более 0,8 в секторе углов $\theta = [-90^\circ; 90^\circ]$ на центральной частоте и $КЭ > 0,65$ на крайней частоте диапазона. Высокие значения КЭ в широком угловом диапазоне определяются тем фактором, что ортогональные компоненты электрического поля щелевого излучателя возбуждаются в верхней плоскости антенны [24].

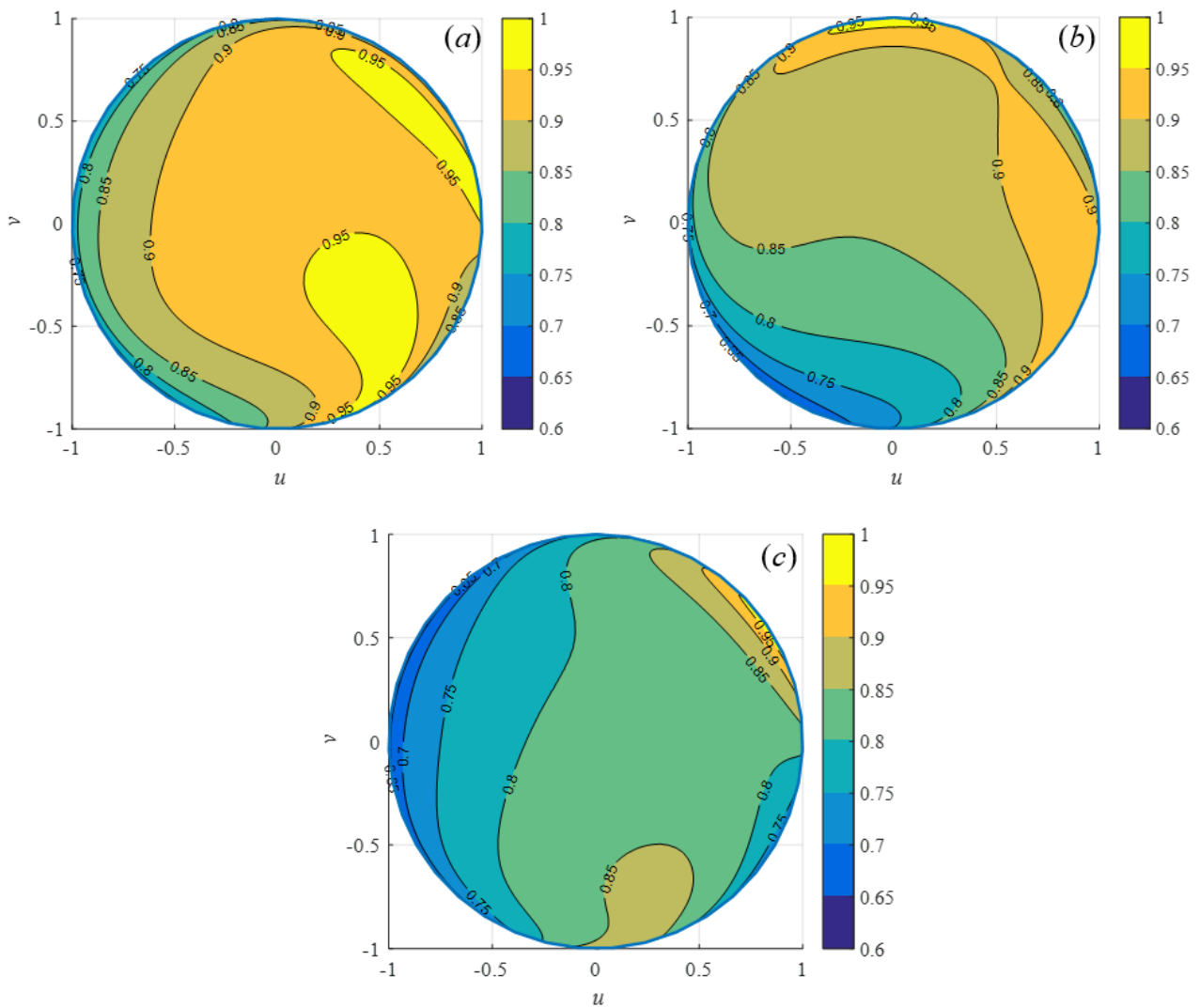


Рис. 9. Коэффициент эллиптичности в нормированных координатах u/v для частот $f/f_0 = 1$ (a), $f/f_0 = 0,98$ (b) и $f/f_0 = 1,02$ (c).

На рисунке 9 представлены диаграммы коэффициента эллиптичности в нормированных координатах u/v . Угол места изменяется от -90° до 90° . Высокие значения коэффициента эллиптичности наблюдаются как в зенитном направлении, так и на периферии вплоть до края пространственной полусферы. Следует отметить, что высокие значения КЭ в широком угловом диапазоне определяются конструкцией предложенной антенны с воздушным заполнением полости. Аналогичные низкопрофильные антенны, например, патч антенны [25] выполненные также на воздушной подложке имеют вдвое меньший сектор углов с высокими значениями КЭ, благодаря сосредоточению электрического поля между экраном и излучателем такой антенны.

Заключение

Щелевые антенны обладают широким сектором углов с круговой поляризацией ($\pm 50^\circ$ и более) благодаря полости резонатора, который улучшает стабильность поляризации за счет экранирования от паразитных излучений и более равномерного распределения тока. Таким образом, было проведено исследование компактной низкопрофильной антенны с продольным размером $0,4\lambda_0$, обеспечивающей коэффициент эллиптичности в широком угловом секторе $[-90^\circ; 90^\circ]$. Антенна имеет простую конструкцию с квадратурной схемой возбуждения круговой поляризации и может быть изготовлена по современным технологиям, в том числе по методу аддитивной технологии 3D печати металлических конструкций.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-19-20106, <https://rscf.ru/project/25-19-20106/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Литература

1. Hadas T., Kazmierski K., Kudłacik I., Marut G. and Madraszek S. Galileo High Accuracy Service in Real-Time PNT, Geoscience and Monitoring Applications // in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 21, pp. 1-5, 2024.
2. Boni E., Giannetti G., Maddio S. and Pelosi G. A Circular Polarized Antenna for GPS and Iridium Applications // 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI), Portland, OR, USA, 2023, pp. 195-196.
3. Krzysztofik W.J. Coplanar-square-patch antenna for Iridium satellite reception // 2006 First European Conference on Antennas and Propagation, Nice, France, 2006, pp. 1-4.
4. Leick A., Rapoport L., and Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. Wiley, 2015, ISBN: 9781118675571.

5. Teunissen P.J. and Montenbruck O. Springer handbook of global navigation satellite systems. Springer International Publishing, 2017, ISBN: 9783030731724.
6. Gafarov E.R., Erokhin A.A., Salomatov Y.P., Strigova Y.A., Aleksandrin A.M. and Vereshagin A.N. The Circular Polarized Antenna Array for Cube Satellites // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russian Federation, 2023, pp. 388-391.
7. McMichael I.T., Lundberg E., Hanna D. and Best S. Horizon nulling helix antennas for GPS timing // 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 2495-2495.
8. Tian G., Lizhang L. and Li G. A Broadband Circularly Polarized Antenna Array Based on Sequential Rotation Feeding // 2024 IEEE International Workshop on Radio Frequency and Antenna Technologies (iWRF&AT), Shenzhen, China, 2024, pp. 395-397.
9. Rahul G. and Srinivasan D. 11m L&S Band Ground Station Antenna for Indian Navigation Satellite Signal Monitoring // 2021 International Conference on Intelligent Technologies (CONIT), Hubli, India, 2021, pp. 1-4.
10. Zhong Z. -P. et al. A Compact Dual-Band Circularly Polarized Antenna With Wide Axial-Ratio Beamwidth for Vehicle GPS Satellite Navigation Application // IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 9, pp. 8683-8692, Sept. 2019.
11. Aparna E., Ram G. and Kumar G.A. Review on Substrate Integrated Waveguide Cavity Backed Slot Antennas // IEEE Access, vol. 10, pp. 133504-133525, 2022.
12. Kumar A. Substrate integrated waveguide cavity-backed slot antenna with low cross-polarization over the full bandwidth // Microwave and Optical Technology Letters, vol. 66, no. 1, Jan. 2024.
13. Zhang W., Han K., Jiang Z. and Yan Z. Bandwidth-Enhanced Design of Compact High-Order-Mode Cavity-Backed Slot Antenna // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 23, no. 12, pp. 4338-4342, Dec. 2024.

14. Sultan K. and Abbosh A. On-Body Cavity-Backed Slot Antenna with Pattern and Polarization Diversity for Medical Imaging // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 72, no. 11, pp. 8239-8250, Nov. 2024.
15. Deng Q.J., Pan Y.M., Liu X.Y. and Leung K.W. A Singly-Fed Dual-Band Aperture-Sharing SIW Cavity-Backed Slot Antenna with Large Frequency Ratio // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 71, no. 2, pp. 1971-1976, Feb. 2023.
16. Agasti R., Blosser C.G., Ruyle J.E. and Sigmarsson H.H. Tunable SIW-Based Evanescent-Mode Cavity-Backed Slot Antenna with Contactless Tuning // IEEE Access, vol. 11, pp. 42670-42678, 2023.
17. Asci Y. Wideband and Stable-Gain Cavity-Backed Slot Antenna with Inner Cavity Walls and Baffle for X- and Ku-Band Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 71, no. 4, pp. 3689-3694, April 2023.
18. Chen R. -S. et al. Novel Reconfigurable Full-Metal Cavity-Backed Slot Antennas Using Movable Metal Posts // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 69, no. 10, pp. 6154-6164, Oct. 2021.
19. Chen R. -S. et al. Reconfigurable Full-Metal Circularly-Polarized Cavity-Backed Slot Antenna and Array with Frequency and Polarization Agility // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 70, no. 2, pp. 531-535, Feb. 2023.
20. Xu Y., Wang Z. and Dong Y. Circularly Polarized Slot Antennas with Dual-Mode Elliptic Cavity // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 19, no. 4, pp. 715-719, April 2020.
21. Chen R. -S. et al. S-Band Full-Metal Circularly Polarized Cavity-Backed Slot Antenna with Wide Bandwidth and wide Beamwidth // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 69, no. 9, pp. 5963-5968, Sept. 2021.
22. Qin X. -X., Liu N. -W. and Chen J. Wideband Cavity-Backed Slot Antenna Based on Multi-Resonant Modes,” 2021 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM), Guangzhou, China, 2021, pp. 1-3.

23. Sinchangreed V., Uthansakul M. and Uthansakul P. Design of tri-Band quadrature hybrid coupler for WiMAX applications // 2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS), Chiang Mai, Thailand, 2011, pp. 1-4.
24. Xu Y., Wang Z. and Dong Y. Circularly Polarized Slot Antennas with Dual-Mode Elliptic Cavity // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 19, no. 4, pp. 715-719, April 2020.
25. Gafarov E.R., Erokhin A.A., Stankovsky A.V. and Salomatov Y.P. Multiband Three-Layer GNSS Microstrip Antenna // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russia, 2019, pp. 1-4.

Для цитирования:

Гафаров Е.Р., Ерохин А.А., Рязанцев Р.О., Александрин А.М. Компактная щелевая антенна круговой поляризации с полым экраном // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.32>