

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.6>

УДК: 621.372.57; 621.375

## **МНОГОЛУЧЕВАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВРАЩЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ**

**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 июля 2026 г.

**Аннотация.** В настоящей работе проведено теоретическое исследование антенной решетки с последовательным вращением ее элементов для получения четырех переключаемых лучей. Исследованы антенные элементы с экраном в виде полости для решения задач, в которых требуется обеспечение качественных поляризационных характеристик в широком телесном угле. Выполнено моделирование отдельных узлов предложенного решения в части щелевого излучателя и диаграммобразующей схемы, а также антенной решетки с учетом фазовой компенсации. Проведен анализ амплитудно-фазовых характеристик диаграммобразующей схемы, а также характеристик направленности, поляризации и согласования щелевого излучателя в диапазоне рабочих длин волн. Кроме того, произведен расчет радиотехнических характеристик антенной решетки, проведена оценка формируемых лучей. Отмечены преимущества предложенной антенны в виде компактности и простоты изготовления. Предложенная антенная решетка позволяет получить высокие значения коэффициента эллиптичности для каждого из четырех формируемых лучей в заданном секторе рабочих углов применительно к системам связи и радионавигации.

**Ключевые слова:** антенная решетка, диаграммобразующая схема, 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:** Гафаров Евгений Раисович, [Egafarov@sfu-kras.ru](mailto:Egafarov@sfu-kras.ru)

## Введение

В настоящее время конструкции антенн с круговой поляризацией для систем различного назначения, включая навигацию, спутниковую связь и телекоммуникации, стремительно совершенствуются. Это обусловлено не только развитием технологий изготовления, но и фундаментальными преимуществами, такими как устойчивость к эффекту Фарадея и снижение влияния многолучевости [1, 2]. Антенны для приема и излучения сигналов с правой и/или левой круговой поляризацией активно применяются в приемо-передающих и MIMO-системах [3], что обеспечивает высокую поляризационную развязку между каналами и позволяет реализовать полнодуплексную связь.

Такие антенны используются как самостоятельные элементы в приемных системах позиционирования, навигации и синхронизации времени (PNT) [4, 5], так и объединяются в фазированные антенные решетки (ФАР). Использование ФАР позволяет повысить коэффициент усиления [6], а также реализовать алгоритмы пространственной фильтрации для противодействия преднамеренным и непреднамеренным помехам [7]. Традиционный подход к формированию круговой поляризации в антенной решетке (АР), основанный на последовательном повороте линейно поляризованных излучателей [8], позволяет расширить полосу пропускания, однако формирование широкой диаграммы направленности с круговой поляризацией в таком случае достигается лишь в узком секторе углов из-за ограничений по уровню осевого отношения.

Для обеспечения стабильной круговой поляризации в широком угловом секторе необходимо возбуждение двух ортогональных мод с фазовым сдвигом непосредственно в единичном антенном элементе. Такой элемент может функционировать как самостоятельно, так и в составе ФАР, что критически важно для современных систем. Следует отметить, что жесткие требования к обеспечению широкоугольной круговой поляризации сегодня предъявляются не только к наземным антенным системам (например, антеннам базовых станций ГНСС и станциям мониторинга) [9], но и к антенным системам быстро развивающихся низкоорбитальных спутниковых группировок, беспилотных летательных аппаратов [10]. Таким образом, разработка технологичных, компактных и широкополосных антенн с круговой поляризацией, способных сохранять высокое качество круговой поляризации в широком угловом секторе, является актуальной задачей. Их применение востребовано как в бортовых, так и в наземных системах, в том числе в качестве базовых элементов для построения помехозащищенных АР.

Внимание настоящей статьи сосредоточено на цельнометаллической антенне с овальным щелевым излучателем и полостью-резонатором для работы в составе АР с последовательным вращением элементов с целью достижения высокого коэффициента эллиптичности (КЭ) в широком угловом диапазоне и минимизации потерь. Было проведено исследование отдельных узлов в виде излучающей щели, питающего фидера, АР и компактной диаграммобразующей схемы (ДОС) в виде четырех-лучевой матрицы Батлера.

## **1. Конструкция антенной решетки с последовательным вращением элементов**

В настоящей работе проведено исследование низкопрофильного щелевого антенного элемента с полым экраном в виде объемного резонатора и полосковой согласующей цепи, а также АР с последовательным вращением элементов для получения качественных поляризационных характеристик и микрополосковой ДОС для получения четырех переключаемых лучей в заданном секторе рабочих

углов. Моделирование антенны будет выполнено в САПР СВЧ устройств методом конечных элементов.

### 1.1 Антенный элемент

На рис. 1 показана конструкция щелевой антенны. Щелевой элемент (11) или щелевой излучатель, расположен на верхней стороне антенны и образован с одной стороны полым экраном (6) и эллиптическим диском (7) с другой. Щель в экране (11) имеет форму эллипса, как и полый экран антенны (6). Полый экран антенны (6) формирует электрически замкнутую полость. Проводящие части антенны выполнены из меди.

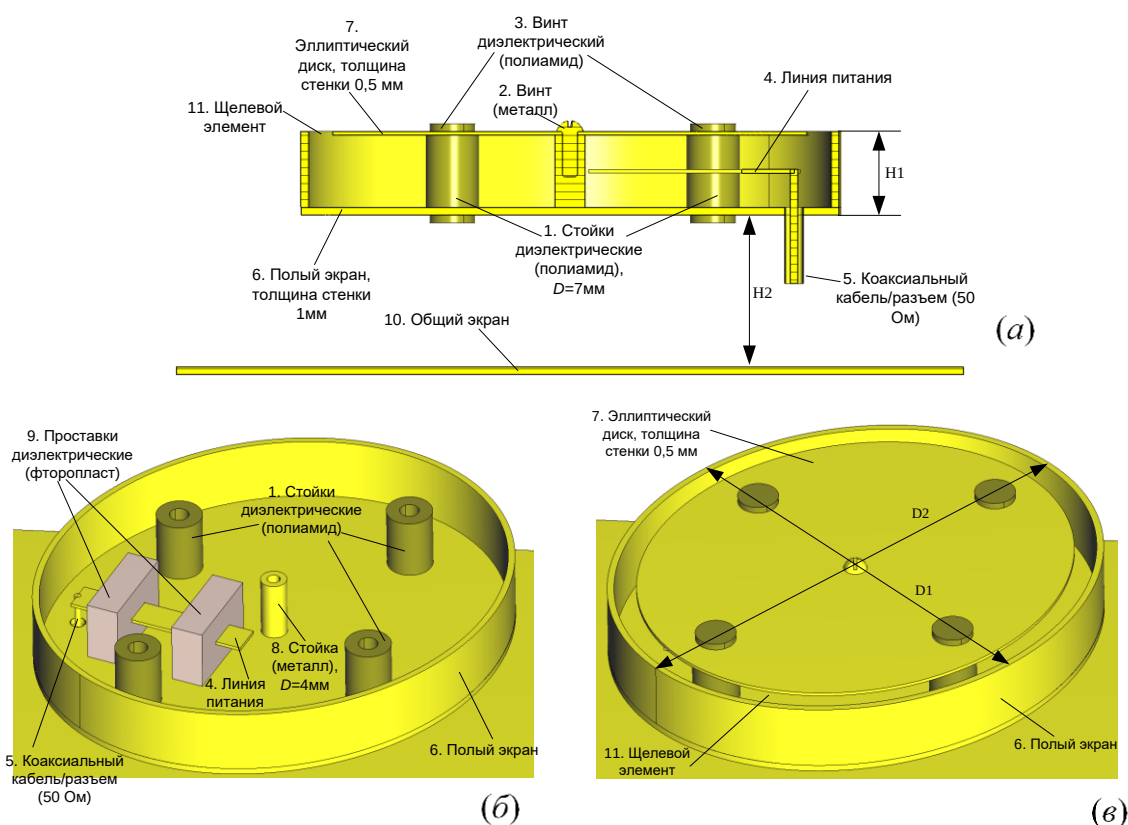


Рис. 1. Щелевая антенна с полым экраном в сборе (а). Вид на полый экран антенны (б). Вид на схему питания сверху и антенну в сборе в сечении (в).

Полосковая симметричная линия питания (4) имеет прямоугольную форму (рисунок 1) и возбуждается от центральной жилы коаксиального кабеля/разъема (5). Длина полосковой линии (4) составляют  $0,21\lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – длина волны на центральной частоте рабочего диапазона. Крепление линии питания (4) осуществляется при помощи диэлектрических проставок (9) из материала

Фторопласт-4. Возбуждение щелевого излучателя (11) выполнено при помощи апертурной связи с линией питания (4), т.е. не имеет электрического контакта. Для образования щелевого излучателя (11) эллиптический диск (7) закреплен на четырех диэлектрических стойках (1). Материал диэлектрических стоек (1) – Полиамид-6 с характеристиками  $\epsilon_r = 3,5$ ,  $\operatorname{tg}(\delta) = 0,02$ . Крепление эллиптического диска (7) к стойкам (1) выполнено при помощи диэлектрических винтов (3), исходный материал для изготовления – Полиамид-6. Основные геометрические параметры антенного элемента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры антенного элемента.

| Параметр | Значение         |
|----------|------------------|
| H1       | $0,073\lambda_0$ |
| H2       | $0,13\lambda_0$  |
| D1       | $0,44\lambda_0$  |
| D2       | $0,5\lambda_0$   |
| S        | $0,023\lambda_0$ |

Для обеспечения короткого замыкания по постоянному току, а также для укрепления конструкции, в геометрическом центре антенны реализована металлическая стойка (8), к которой при помощи металлического винта (2) закреплен эллиптический диск (7). Антенный элемент отстоит от общего экрана (10) на  $0,13\lambda_0$ . Форма антенны выбрана эллиптической для возбуждения круговой поляризации одной точкой питания. Толщина стенок полого экрана 1 мм. Толщина эллиптического диска и линии питания 0,5 мм.

## 1.2 Диаграммобразующая схема

Для формирования четырех лучей посредством ДОС рассмотрим реализацию матрицы Батлера на основе шлейфового ответвителя (квадратурный мост), реализованного при помощи микрополосковых несимметричных линий.

Если АР имеет квадратную форму, то необходимо применение структурной схемы ДОС, в которой отпадает необходимость в дополнительных фазовращателях. Такая схема показана на рис. 2. Как видно из данного рисунка, матрица Батлера состоит из четырех делителей мощности и одного пересечения линий передачи (кроссовера).

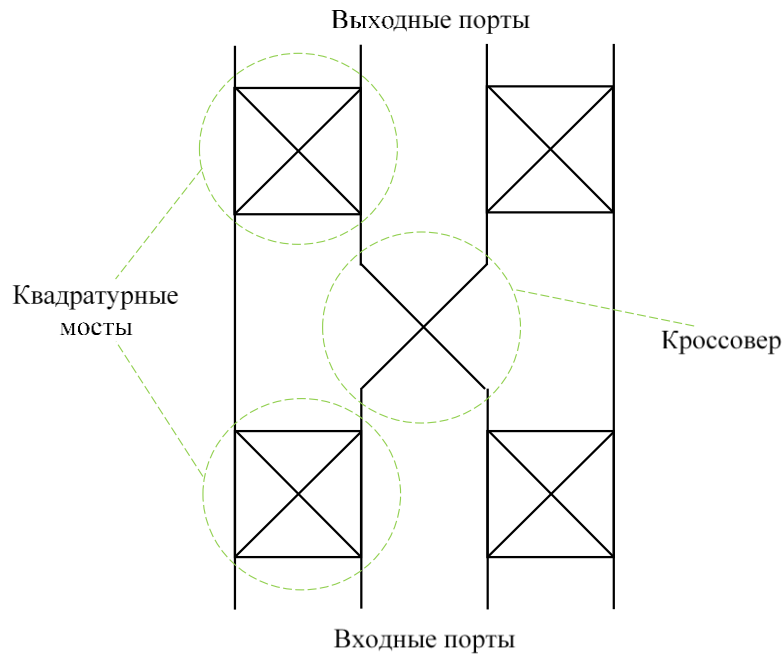


Рис. 2. Четырех-лучевая матрица Батлера для квадратной АР.

Далее было проведено электродинамическое моделирование такой структуры, при этом одной из основных задач было уменьшение габаритов печатной платы ДОС.

Для минимизации размеров ДОС целесообразно применение микрополосковых линий с изгибом. При моделировании, в качестве подложки, использован материал ФД-СВЧ ( $\epsilon_r = 3,4$ ,  $\text{tg}(\delta) = 0,005$ ), толщина диэлектрической подложки 0,8 мм, толщина медного покрытия 18 мкм. На рис. 3 показана топология четырех-лучевой матрицы Батлера, дополнительно на рис. 3 пронумерованы входы (порты М1-М4) и выходы (порты М5-М8) ДОС.

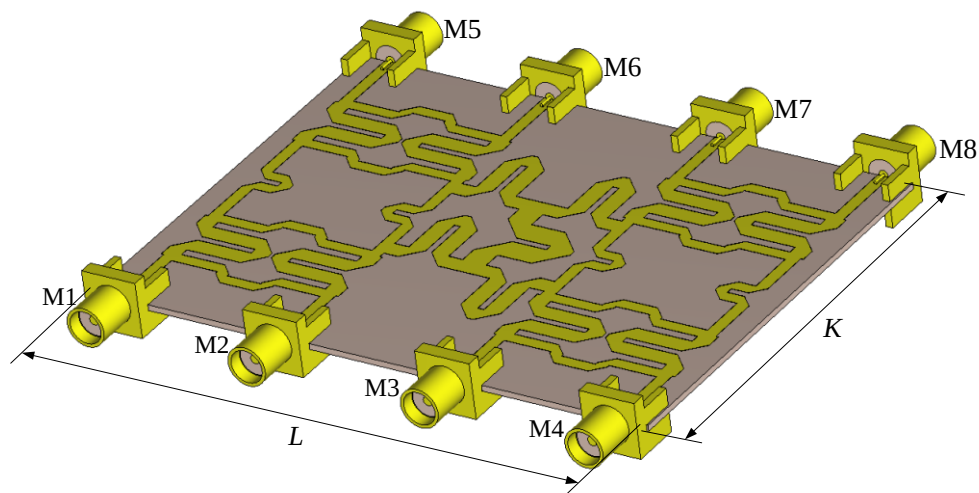


Рис. 3. Печатная плата компактной ДОС по типу матрицы Батлера.

Как видно из рис. 3, размеры печатной платы составляют  $L = 0,54\lambda_0$ ,  $K = 0,41\lambda_0$ . Без использования изгибов микрополосковых линий размеры печатной платы составляли бы  $0,81\lambda_0 \times 0,62\lambda_0$ . Таким образом, компактная реализация шлейфовых ответвителей ДОС позволяет уменьшить площадь на 55 % по сравнению с классическим вариантом без изгибов линий передачи. Для возбуждения ДОС предусмотрены разъёмы типа SMA.

### 1.3 Четырехэлементная антенная решетка

На основе одиночного антенного элемента (АЭ), конструкция которого рассмотрена выше, составлена четырехэлементная АР для формирования четырех-лучевой системы. Внешний вид АР показан на рис. 4.

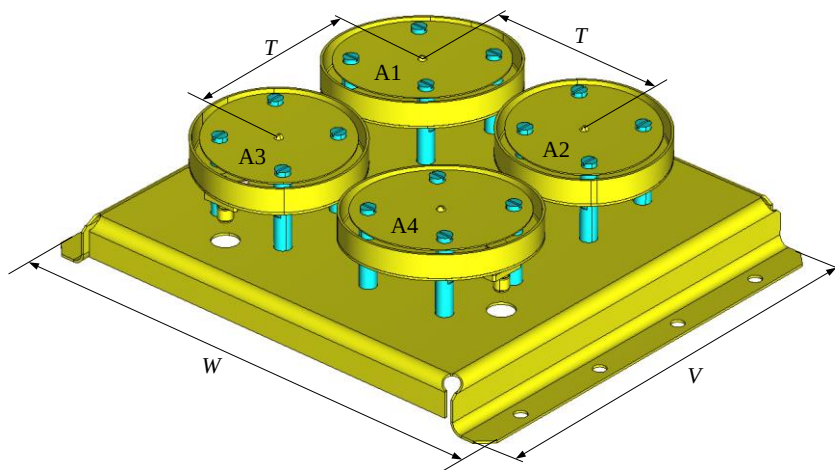


Рис. 4. АР с последовательным вращением антенных элементов.

Четыре элемента АР расположены над общим металлическим экраном квадратной формы, шаг между элементами АР  $T = 0,53\lambda_0$ . Габаритный размер экрана  $W = 1,4\lambda_0$ ,  $V = 1,2\lambda_0$ . Экран имеет несимметричную форму из-за наличия монтажных отверстий для крепления, также в экране имеются отверстия для подвода коаксиальных кабелей к антенным элементам от ДОС.

Следует отметить, что каждый последующий элемент АР развернут на угол  $90^\circ$  относительно предыдущего (т.н. последовательное вращение) с целью получения качественных характеристик поляризации. Такая конструкция потребует фазовой компенсации в виде коаксиальных кабелей разной длины между ДОС и АР, подробнее об этом будет изложено ниже.

## 2. Анализ радиотехнических характеристик

В данном разделе приведены радиотехнические характеристики антенного элемента, АР и ДОС по результатам электродинамического моделирования.

### 2.1 Электродинамические характеристики антенного элемента

Ниже приведены основные радиотехнические характеристики щелевого антенного элемента (рис. 5-6).

Антенна согласована в полосе рабочих частот на волновое сопротивление 50 Ом, модуль коэффициента отражения составляет менее минус 15 дБ в полосе частот  $(0,97-1,03)f_0$  (рис. 5а). При этом потери на рассеяние наблюдаются в основном в металлических проводниках антенны и составляют около 4 % (рис. 5б).

Диаграмма направленности практически не имеет азимутальной неравномерности, что можно увидеть при анализе двух ортогональных сечений характеристики направленности (рис. 6а).

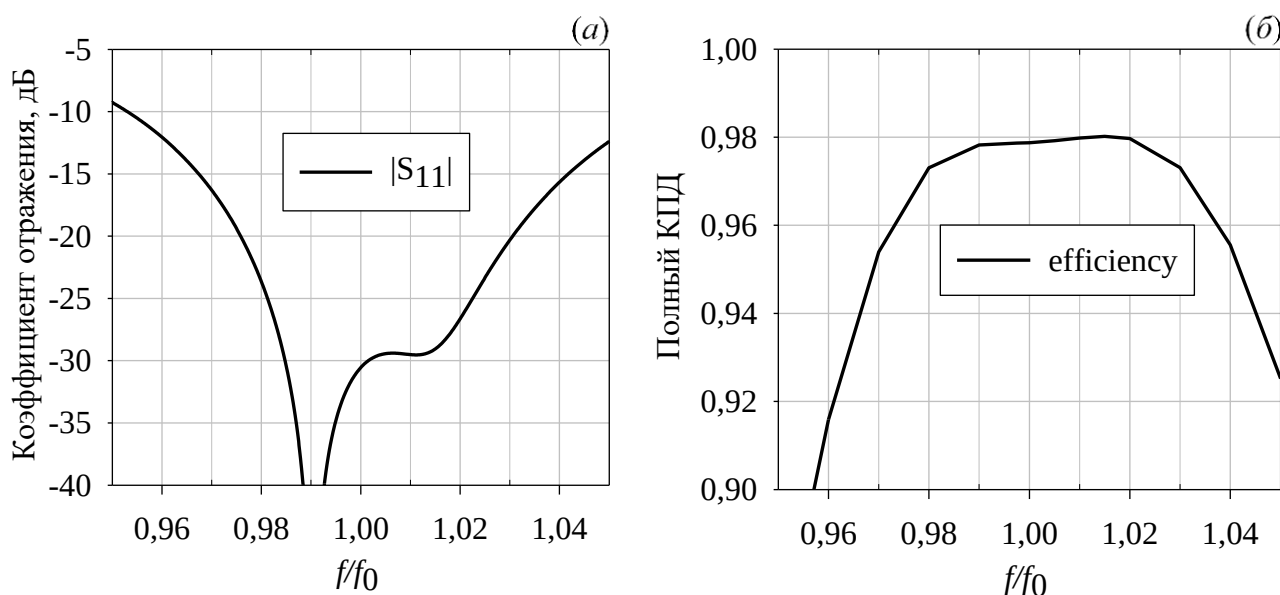


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента отражения (а) и полного КПД (б) антенного элемента.

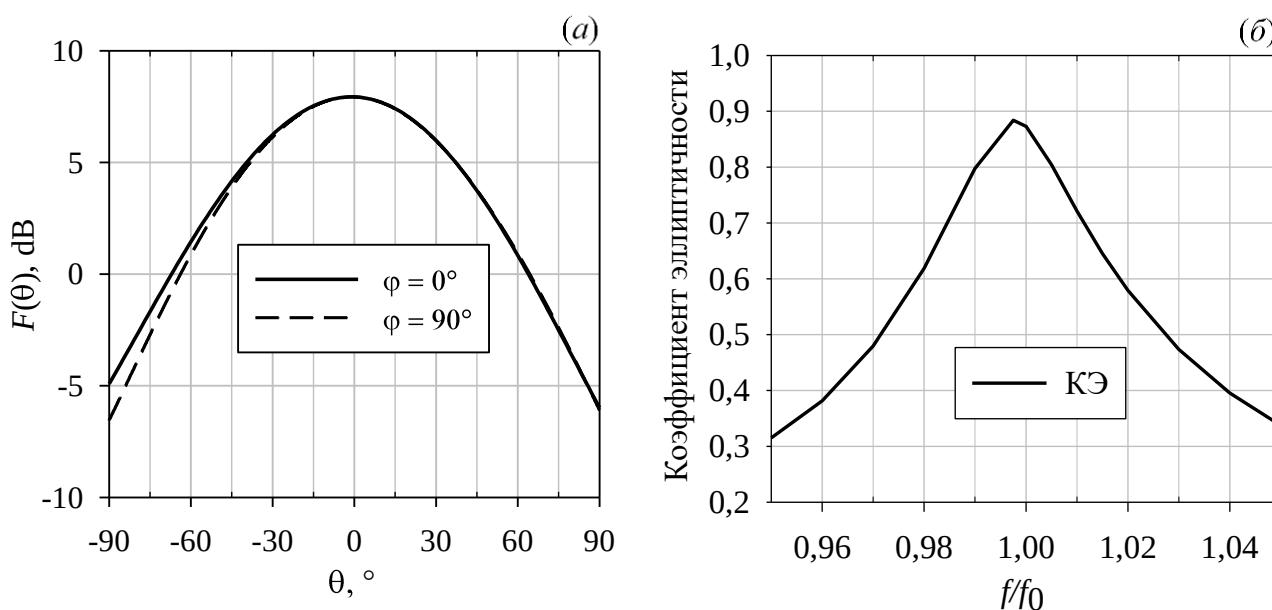


Рис. 6. Диаграмма направленности (а) и частотная зависимость КЭ (б) антенного элемента.

Частотная зависимость среднего КЭ (рис. 6б), рассчитанного в секторе углов  $100^\circ$  ( $\theta = [-50^\circ; 50^\circ]$ ) для предлагаемой щелевой антенны, имеет выраженный резонансный характер из-за использования одной точки питания и эллиптической формы излучателя. Для устранения этого эффекта будет использован последовательный поворот элементов в АР и с применением фазовой компенсации возможно увеличение полосы рабочих частот с высоким КЭ, как будет показано ниже.

## 2.2 Электродинамические характеристики ДОС

На рис. 7, приведены радиотехнические характеристики ДОС в виде коэффициентов отражения входных портов М1-М4 и коэффициентов передачи с входного порта М1 на четыре выходных порта М5-М8.

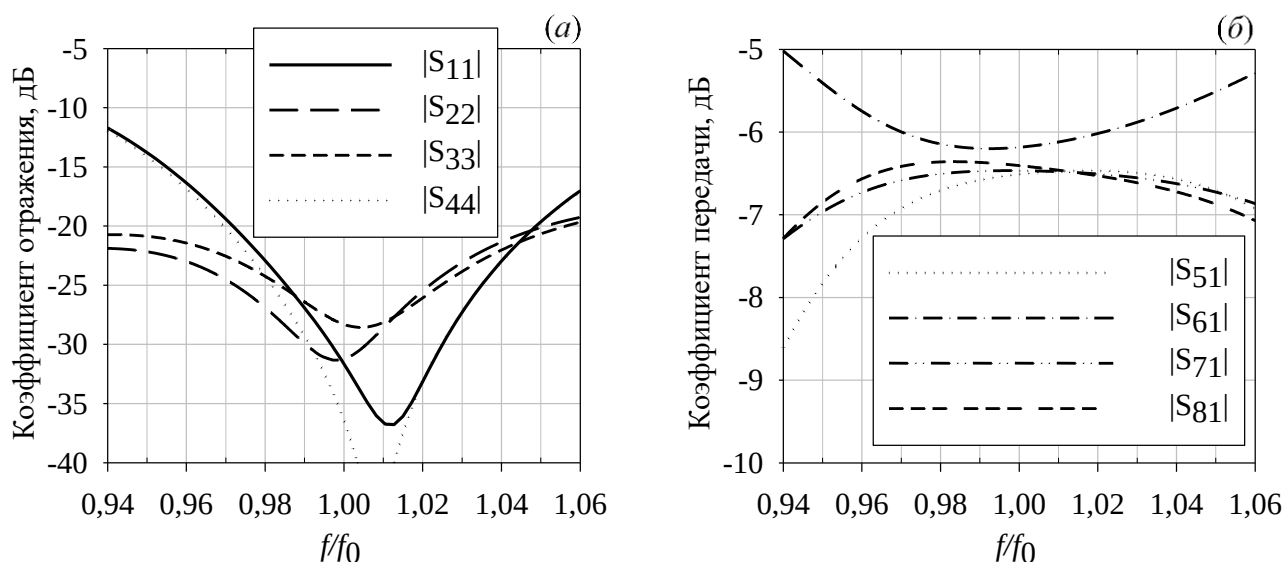


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициентов отражения (а) и коэффициентов передачи (б) схемы питания.

Характеристики ДОС при возбуждении других входных портов М2-М4 не приведены, так как поведение этих кривых имеет идентичный характер как на отражение, так и на передачу.

## 2.3 Коммутация АР и ДОС с фазовой компенсацией

При коммутации с фазовой компенсацией из-за последовательного поворота антенных элементов в АР следует учитывать, что кабели между ДОС и АР имеют разную длину для эффективного создания круговой поляризации.

На рис. 8 показана схема коммутации АР и ДОС со следующими обозначениями:

- М1, М2, М3, М4 – входы ДОС матрицы Батлера;
- М5, М6, М7, М8 – выходы ДОС матрицы Батлера;
- А1, А2, А3, А4 – номера элементов АР;
- Л1, Л2, Л3, Л4 – номера формируемых лучей.

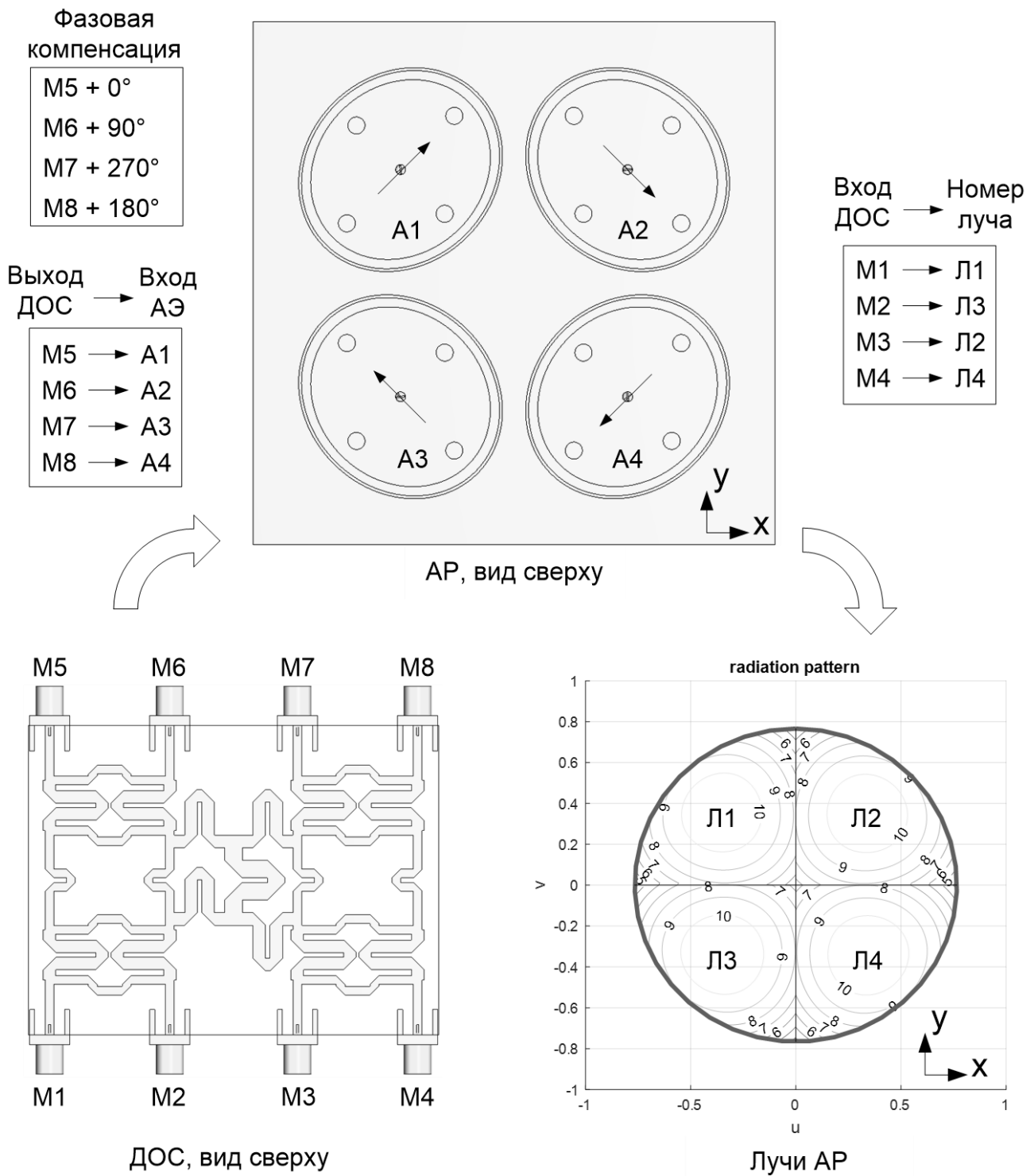


Рис. 8. Коммутация АР и ДОС с последовательным вращением АЭ и фазовой компенсацией.

Крайние выходы ДОС питают диагональные АЭ АР, а центральные выходы ДОС питают элементы «побочной диагонали». Порядок запитки элементов АР может отличаться от представленного на рис.8, при этом будет изменена нумерация лучей антенной системы.

Для реализации фазовой компенсации необходимо к базовой длине добавить отрезок кабеля длиной:

- $\lambda_0/4$  ( $90^\circ$ ) для кабеля  $M6 \rightarrow A2$ ;
- $\lambda_0/2$  ( $180^\circ$ ) для кабеля  $M8 \rightarrow A4$ ;
- $3\lambda_0/4$  ( $270^\circ$ ) для кабеля  $M7 \rightarrow A3$ .

Для кабеля  $M5 \rightarrow A1$  к базовой длине добавлять ничего не требуется ( $0^\circ$ ).

## 2.4 Электродинамические характеристики антенной решетки

В данном разделе приведены результаты по расчету лучей, формируемых ДОС в комбинации с антенными элементами и коммутационными кабелями фазовой компенсации последовательного поворота АЭ в АР. На входных портах антенн устанавливались значения фаз и амплитуд, формируемые ДОС с кабелями. При этом учтена проводимость и тангенс диэлектрических потерь материалов, из которых выполнены АЭ, ДОС и кабели.

Последующие рисунки контурных ДН и КЭ приведены в нормированных  $uv$ -координатах. Голубая окружность на рисунках – ЗО  $100^\circ$ . Числами на контурных ДН отмечен уровень КУ или КЭ.

Также приняты следующие обозначения для частот рабочего диапазона:

- $f_{\min} = 0,97f/f_0$ ;
- $f_{\text{mid}} = f/f_0$ ;
- $f_{\max} = 1,03f/f_0$ .

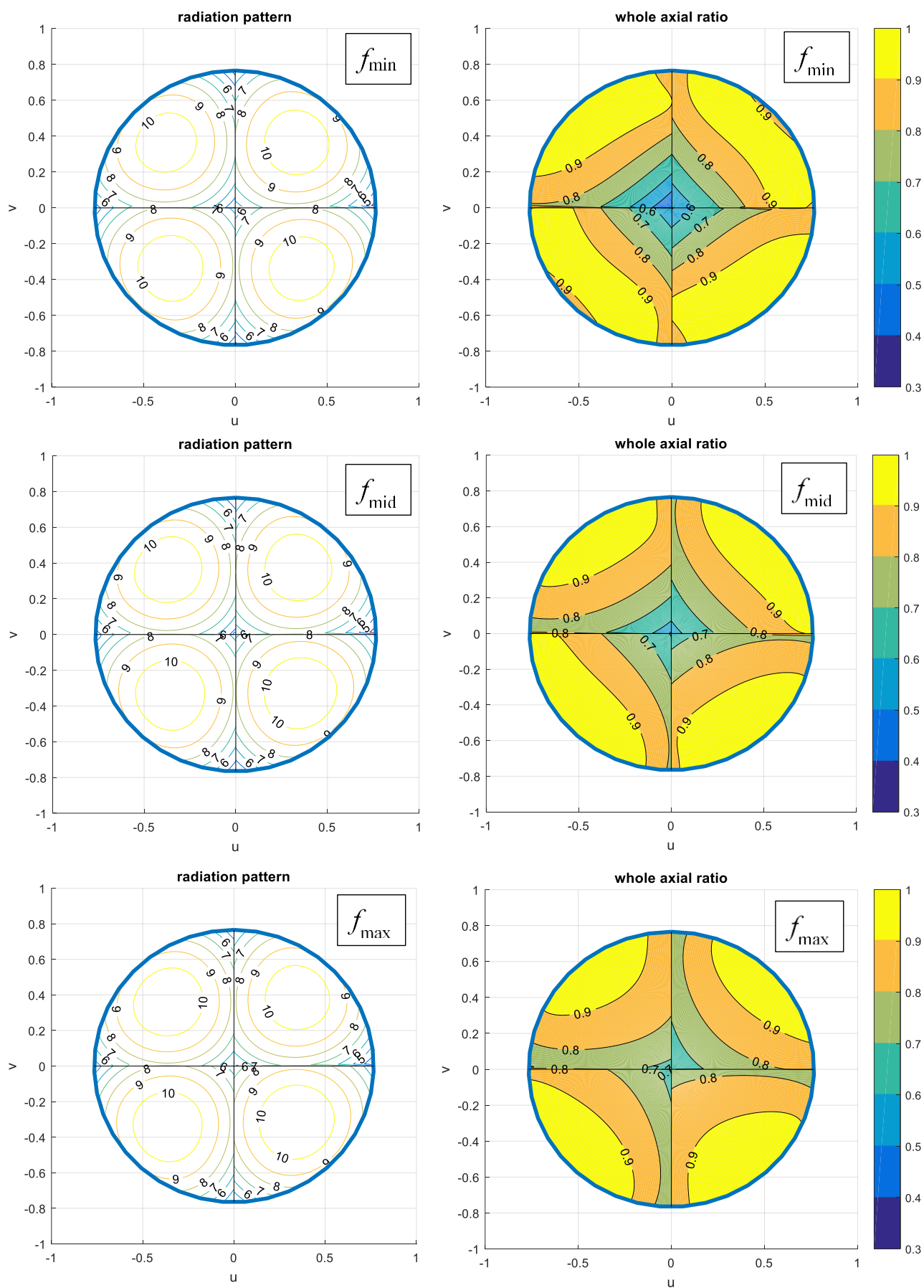


Рис. 9. ДН формируемых лучей (слева) и КЭ (справа) в нормированных  $uv$ -координатах для нижней, средней и верхней частоты.

Как видно из рис. 9 на рабочих частотах сформировано 4 луча с идентичными характеристиками, КУ каждого луча составляет около 11 дБи с учетом диссипативных потерь в элементах АР и ДОС. КЭ, благодаря последовательному повороту АЭ в АР и применению фазовой компенсации, близок к единице на периферии ЗО, в центре ЗО КЭ может снижаться до 0,7. Без последовательного поворота элементов характеристики АР эквивалентны КЭ одиночного излучателя. Из-за одноточечного возбуждения этот показатель имеет частотную зависимость, что в итоге ухудшает КЭ лучей.

## Заключение

Во-первых, установлено, что применение резонаторной полости в конструкции асимметричной щелевой антенны с полостью-резонатором позволяет существенно расширить угловой сектор с круговой поляризацией (до  $\pm 50^\circ$ ). Стабилизация поляризационных характеристик достигается за счет экранирования паразитных излучений и формирования более равномерного распределения поверхностного тока. На основе полученных результатов исследована компактная низкопрофильная антенна с продольным габаритом  $0,5\lambda_0$ , обеспечивающая заданные значения КЭ в широком угловом диапазоне. Предложенная антенна отличается технологичной конструкцией с одной точкой возбуждения посредством согласующей полосковой линии, что допускает ее изготовление с применением современных аддитивных методов, в частности 3D-печати металлами.

Во-вторых, было проведено исследование компактной двухслойной ДОС по типу матрицы Батлера для формирования четырех лучевой антенной системы. Конструктивная особенность в виде микрополоскового пересечения линий ДОС реализована без дополнительных межслойных переходов. Было уделено особое внимание массогабаритным характеристикам схемы питания и использованы изгибы микрополосковых линий, что позволило уменьшить общую площадь подложки на 55 % с сохранением радиотехнических характеристик в рабочем диапазоне длин волн.

В-третьих, проведен расчет квадратной АР с последовательным вращением элементов и применением фазовой компенсации к амплитудно-фазовому распределению ДОС для получения четырех лучей с высокими значениями КЭ в заданном секторе рабочих углов. Как показал анализ радиотехнических характеристик, антенная система обеспечивает формирование четырех ортогональных лучей с равным коэффициентом усиления.

Таким образом, последовательная оптимизация конструкции излучателя, миниатюризация ДОС и применение метода последовательного вращения позволили синтезировать компактную многолучевую антенную систему с заданными поляризационными характеристиками. Предложенный комплекс технических решений обеспечивает высокие радиотехнические показатели в секторе рабочих углов, сохраняя при этом технологичность и конструктивную простоту изготовления устройства.

**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. Y. Liu, C. Wang, and X. Zhang, "Broadband Circularly Polarized Antennas for GNSS Applications: A Comprehensive Review," in IEEE Access, vol. 11, pp. 45123-45140, 2023.
2. M. A. Alsunaidi, S. F. Mahmoud, and A. R. Sebak, "A Circularly Polarized Antenna for LEO Satellite Communications and Navigation," 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI), Portland, OR, USA, 2023, pp. 1102-1103.
3. S. Gao, Y. Qin, and J. Li, "Circularly Polarized MIMO Antennas for 5G and Satellite Communications: Isolation and Pattern Diversity," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 8, pp. 6543-6554, 2022.

4. C. T. Rizos, A. G. Dempster, and P. J. G. Teunissen, “Modern Multi-GNSS PNT Services and Antenna Requirements for High-Accuracy Applications,” in *GPS Solutions*, vol. 27, no. 2, art. no. 85, 2023.
5. A. F. Morabito, L. Lucci, and G. Macchiarella, “Advanced Multi-Frequency GNSS Antennas for Precise Point Positioning and Timing,” in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 4, pp. 3210-3222, 2022.
6. J. Wang, H. Liu, and Y. Zhang, “A Compact Circularly Polarized Antenna Array with High Gain for CubeSat and LEO Communications,” in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 1156-1160, 2023.
7. D. Borio, C. O'Driscoll, and G. Lachapelle, “Anti-Jamming Controlled Reception Pattern Antennas for GNSS: Architectures, Algorithms, and Recent Advances,” in *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 38, no. 3, pp. 42-57, 2023.
8. X. Zhang, L. Ge, and Y. Li, “A Sequentially Rotated Circularly Polarized Antenna Array with Wide Axial-Ratio Beamwidth,” 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting, Washington, DC, USA, 2024, pp. 894-895.
9. R. K. Sharma, S. K. Mishra, and P. C. Pandey, “Design of a Multi-Band Ground Station Antenna for NavIC and GPS Signal Monitoring,” 2023 International Conference on Intelligent Technologies (CONIT), Hubli, India, 2023, pp. 1-5.
10. L. Ge, X. Zhang, and J. Wang, “A Wide-Angle Circularly Polarized Antenna With Low Profile for LEO Satellite and Vehicular Applications,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 7, pp. 8512-8521, 2023.

**Для цитирования:**

Гафаров Е.Р., Ерохин А.А., Рязанцев Р.О., Александрин А.М. Многолучевая антенная решетка с последовательным вращением элементов. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.6>