

11.1

## Диаграммообразующие схемы многолучевой антенной решетки

© Р.О. Рязанцев, А.М. Александрин, А.А. Ерохин, Е.Р. Гафаров, С.В. Поленга,  
Ю.П. Саломатов, Е.А. Литинская

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия  
E-mail: ryazantsev@mail.ru

Поступило в Редакцию 20 июля 2022 г.

В окончательной редакции 4 октября 2022 г.

Принято к публикации 4 октября 2022 г.

Проведено исследование диаграммообразующих схем многолучевой антенной решетки на основе матрицы Батлера и линзы Ротмана для применения на борту космического аппарата. Осуществлена разработка топологий схем, исследованы частотные характеристики амплитуд и фаз прошедшей волны с учетом потерь в материалах. Выполнен расчет диаграмм направленности решеток для вариантов диаграммообразующих схем и проведена оценка уровней пересечения смежных лучей в заданном угловом секторе. Сделаны выводы о применимости предложенных типов диаграммообразующих схем.

**Ключевые слова:** диаграммообразующая схема, антенная решетка, матрица Батлера, линза Ротмана.

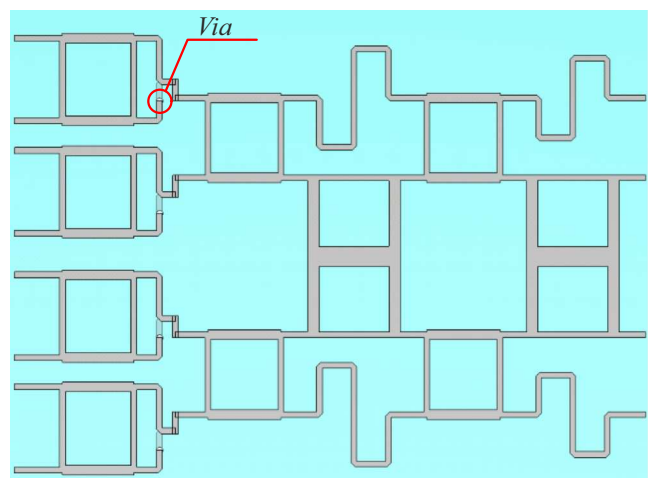
DOI: 10.21883/PJTF.2022.23.53942.19315

Общая тенденция к уменьшению размеров телекоммуникационных космических аппаратов (КА) [1] отражается в требованиях к более интенсивному использованию их поверхностей. В свою очередь с целью уменьшения массы и габаритов несколько простых антенн одного диапазона частот могут быть заменены одной многолучевой антенной решеткой (АР). Многолучевая АР включает в себя диаграммообразующую схему (ДОС), которая может быть построена с использованием различных структур [2,3]. В настоящей работе рассмотрено использование ДОС на основе матрицы Батлера и линзы Ротмана. Исследование проведено в рамках заданных параметров угловой зоны покрытия АР, количества лучей и с ограничением размера апертуры. В частности, рассмотрен случай с восемью фиксированными лучами в границе зоны обслуживания космических аппаратов (желательно с более равномерным покрытием углового диапазона по коэффициенту усиления). Таким образом, целью исследования является создание многолучевой АР в рамках единых требований с использованием различных подходов к построению ДОС.

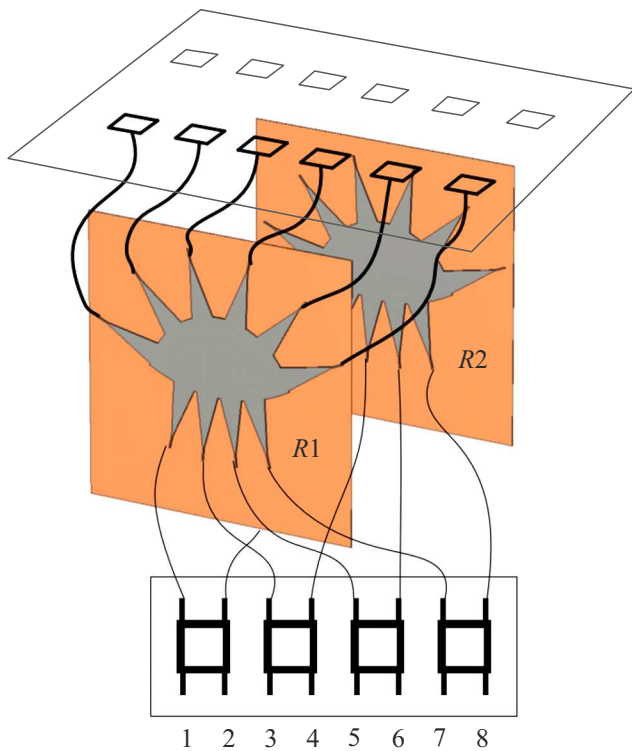
Единичным узлом ДОС с минимальным количеством излучающих элементов в одном ряду АР благодаря равномерному распределению амплитуды является четырехлучевая матрица Батлера [4]. Такая ДОС состоит из функциональных блоков, реализующих деление мощности с квадратурным фазовым сдвигом, двух пересечений линий передачи при реализации в планарном виде и двух фазовращателей на  $45^\circ$ . Реализация матриц Батлера может быть выполнена как в виде однослойной, так и в виде двухслойной микрополосковой топологии. В частности, делители мощности могут быть выполнены в виде микрополосковых квадратурных направленных ответвителей, пересечения линий передачи — в виде последовательного соединения двух направленных от-

ветвителей, фазовращатели — в виде отрезков линии передачи.

Полная ДОС исследуемого типа для сканирования в двух плоскостях на основе матрицы Батлера имеет восемь входных и восемь выходных портов. При этом два узла матриц Батлера  $4 \times 4$  выполнены на отдельных слоях подложки по микрополосковой технологии. Узлы совмещаются в одну печатную плату с экраном в промежуточном слое металлизации. Подключение матриц  $4 \times 4$  для сканирования в ортогональной плоскости реализуется через узел с мостовыми квадратурными делителями, которые выполнены на одной из внешних сторон подложки, с использованием сквозного межслойного перехода при помощи металлизированного отверстия (рис. 1). При использовании материала с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 3.55$ , толщиной



**Рис. 1.** Сдвоенная матрица Батлера с восемью входными (слева) и восемью выходными портами в двух слоях подложки (по четыре в каждом) (справа).



**Рис. 2.** Иллюстрация построения многолучевой АР с использованием в ДОС линзы Ротмана.

0.8 mm, волновым сопротивлением основной линии  $50 \Omega$  размеры матрицы Батлера составляют  $120 \times 200$  mm для расчетной частоты 2 GHz.

Другим вариантом решения задачи построения ДОС для многолучевой АР является линза Ротмана [5]. Преимущество линзы Ротмана в предлагаемом применении состоит в том, что на этапе проектирования фазовые соотношения входов и выходов не являются жестко заданными, а количество входов и выходов узлов ДОС может быть неравным и подлежит выбору.

Представленный вариант имеет в основе микрополосковую структуру, т. е. с одним сплошным металлическим слоем. В данном случае топология размещена на диэлектрическом материале с  $\epsilon = 10$ , а размер подложки составляет  $220 \times 220$  mm для расчетной частоты 2 GHz. Предполагается два узла непосредственно с линзами Ротмана в печатном исполнении с четырьмя входами каждый и один узел с мостовыми квадратурными делителями. Все узлы объединяются в одну печатную плату аналогично описанной выше ДОС на основе матрицы Батлера. Структурная схема АР с ДОС приведена на рис. 2. Для лучшего понимания узлы с линзами Ротмана на рисунке разнесены и обозначены как R1 и R2.

Спадающий характер амплитудного распределения в ДОС с линзами Ротмана, а также необходимость поддержания высокого КПД ДОС обусловили увеличение количества излучателей по сравнению с ДОС с матрицей Батлера. Исследование показало, что минимальным

количеством излучателей в одном ряду для обеспечения сходных характеристик АР с описанной выше ДОС с матрицей Батлера стало количество излучателей, равное шести. Также с целью максимизации КПД размеры линзы были минимизированы, а модель построена без присутствующих обычно балластных портов [6,7].

Для расчета диаграмм направленности (ДН) АР с предлагаемыми вариантами ДОС использованы следующие модели:

- электродинамические модели матрицы Батлера и линзы Ротмана с учетом потерь в диэлектрическом материале;
- математическая аппроксимация ДН электродинамической модели широкоугольного микрополоскового излучателя с учетом потерь (КПД излучателя 90%).

Таким образом, на основе материалов предварительного электродинамического моделирования узлов ДОС и электродинамического моделирования микрополосковых излучателей были рассчитаны ДН АР.

Количество излучателей в ряду для линзы Ротмана равно шести, для матрицы Батлера — четырем. Расстояние между излучателями было подобрано для размещения в пределах ограниченной апертуры ( $150 \times 300$  mm) и составило в направлении наибольшего размера 0.5 длины волны для АР на основе ДОС с матрицами Батлера и 0.35 длины волны для АР на основе ДОС с линзами Ротмана.

На рис. 3 замкнутыми кривыми показаны уровни равного коэффициента усиления (КУ) ДН АР (от 7 до 10 dBi) со всех восьми входов для АР исследуемых типов. Большая округлость соответствует границам зоны обслуживания космических аппаратов. Вследствие необходимости получения наиболее равномерного покрытия сигналом зоны обслуживания максимальные уровни КУ на графиках избыточны и не приводятся.

Сравнение ДН двух исследуемых ДОС показывает, что лучшая равномерность покрытия углового сектора обеспечивается ДОС на основе линзы Ротмана. В частности, минимальный уровень пересечения смежных ДН происходит на уровне КУ, равном 7 dBi (по сравнению с минимальным уровнем пересечения ДН на уровне КУ, равном 4.8 dBi, для АР с использованием матрицы Батлера).

Достижение такого результата оказывается возможным благодаря большей гибкости задания параметров для линзы Ротмана, а именно, регулируя положение „входных“ портов, можно независимо подстраивать угол отклонения ДН для соответствующего порта. Однако в связи с квазиоптическим принципом работы такой ДОС даже на подложке со значительно большей диэлектрической проницаемостью ДОС на основе линзы Ротмана имеет большие размеры. Нельзя не сказать о возникающих дополнительных требованиях к антенным элементам в АР, так как в связи с ограниченными габаритами АР элемент должен быть меньше половины длины волны, а это не всегда просто реализовать.

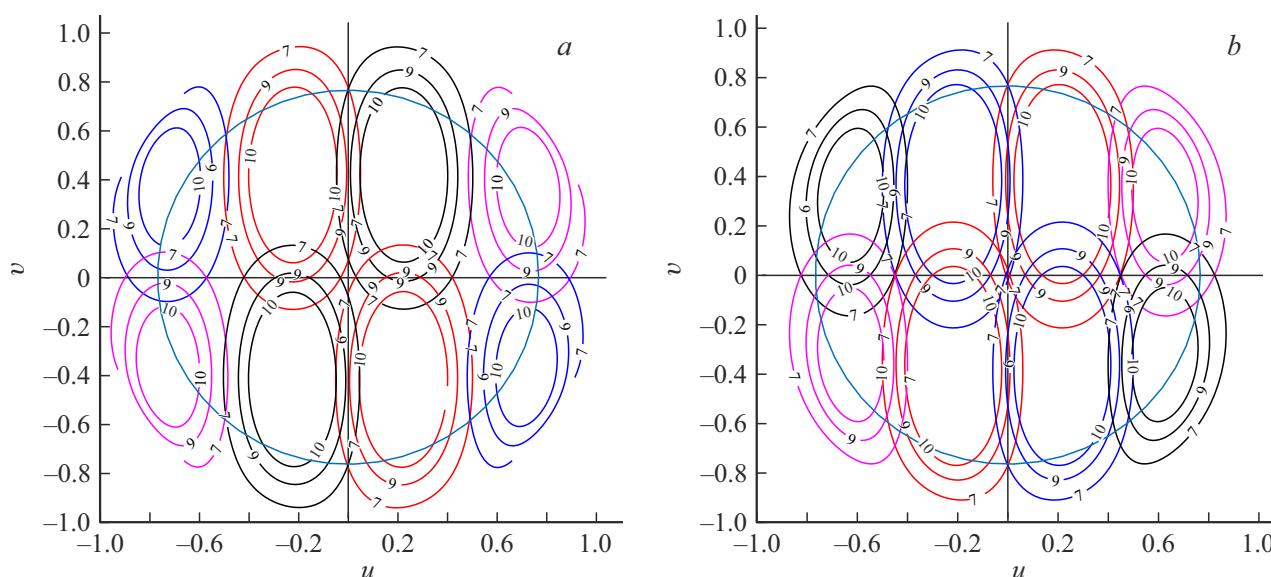


Рис. 3. Диаграммы направленности АР с использованием матриц Батлера  $4 \times 4$  (а) и линз Ротмана (б).

Полученные результаты и их анализ позволяют говорить о возможности достижения цели создания многолучевой АР в рамках единых требований, но с использованием различных подходов. Выявленные отличительные особенности при использовании описанных структур ДОО позволяют направить усилия инженеров и исследователей в наиболее соответствующем частным требованиям направлении.

В качестве дальнейших исследований возможно рассмотрение использования в ДОО шестизлементной матрицы Батлера [8] с подключением шести излучателей, но только четырьмя используемыми входами, что позволит уменьшить угловой разнос направлений лучей ДН. В качестве гипотезы возможно использование мостовых делителей с величиной фазового сдвига меньше  $90^\circ$  [9] с той же целью в матрице Батлера  $4 \times 4$ .

### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-47-240003.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

[1] S. Abulgasem, F. Tubbal, R. Raad, P.I. Theoharis, S. Lu, S. Iranmanesh, *IEEE Access*, **9**, 45289 (2021). DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3066632

[2] С.Н. Панычев, Ю.Г. Пастернак, А.Г. Рыжиков, С.М. Фёдоров, *Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та*, **8** (7-1), 126 (2012).  
 [3] J.R. Sanford, in *2019 IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting* (IEEE, 2019), p. 1357. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888916  
 [4] J. Butler, R. Howe, *Electron. Des.*, **9**, 170 (1961).  
 [5] W. Rotman, R. Turner, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **11** (6), 623 (1963). DOI: 10.1109/TAP.1963.1138114  
 [6] И.А. Зеленин, А.Г. Рыжиков, С.М. Фёдоров, *Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та*, **8** (11), 102 (2012).  
 [7] Д.Ю. Крюков, Ю.С. Курьян, Ю.Г. Пастернак, *Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та*, **10** (3-1), 63 (2014).  
 [8] L.P. Shen, H. Wang, D. Bromley, M. Gavrilovic, in *2015 IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting* (IEEE, 2015), p. 1544. DOI: 10.1109/APS.2015.7305161  
 [9] Y.S. Wong, S.Y. Zheng, W.S. Chan, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **60** (6), 1530 (2012). DOI: 10.1109/TMTT.2012.2187918