

# Перестраиваемая проходная антенная решетка для беспроводных систем связи

А.П. Верёвкин, В.В. Кириллов, И.В. Мунина, П.А. Туральчук

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** в настоящей работе представлена оригинальная конструкция проходной антенной решетки, состоящая из элементарных ячеек, расположенных в соответствии с определенным фазовым распределением. Каждая элементарная ячейка представляет собой приемо-передающую структуру со встроенным фазовращателем, с помощью которого реализуется два фазовых состояния  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . Возможность качания луча продемонстрирована на примере прототипа антенной решетки размерностью  $10 \times 10$  элементов, что результатами моделирования подтверждены результатами измерений.

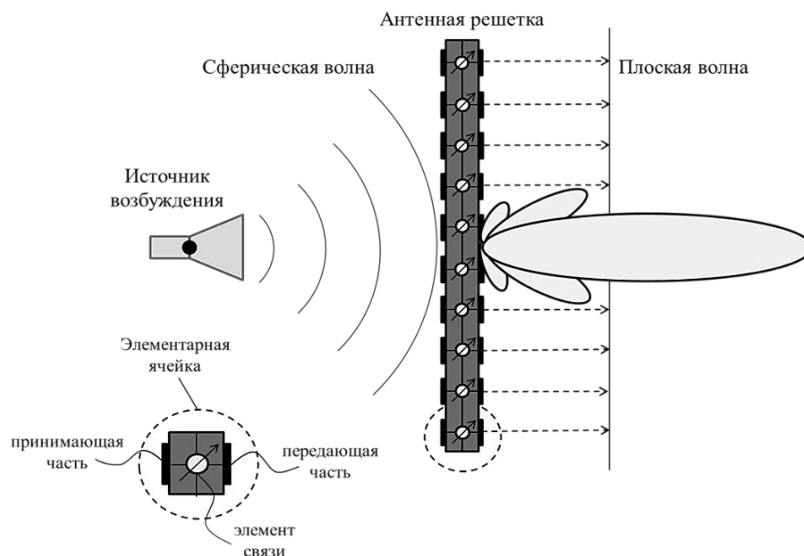
**Ключевые слова:** проходная антенная решетка, антенны, фазовое распределение, частотные характеристики, диаграммообразование, качание луча

## 1. Введение

Растущее число пользователей и увеличение объемов и скорости передачи информации формирует новые требования к антеннам, используемым в системах беспроводной связи. Переход к миллиметровому диапазону длин волн позволяет увеличить скорость передачи данных. При этом увеличиваются потери при распространении сигнала. Вследствие этого актуальной представляется задача разработки антенн с высоким коэффициентом направленного действия и возможностью управления положением луча в пространстве.

Уже известные системы на основе фазированных антенных решеток и параболических антенн позволяют удовлетворить данные требования, однако, их реализация связана с рядом трудностей. При разработке фазированных антенных решеток необходимо использовать большое количество аналоговых фазовращателей, что в свою очередь влечет за собой использование сложной системы питания и усложнения всей конструкции в целом. При использовании параболических антенн ограничено управление положением луча в угломестной плоскости. В последнее время одним из наиболее перспективных вариантов для реализации диаграммообразующих систем является проходная антенная решетка [1].

Проходная антенная решетка – устройство, состоящее из элементарных ячеек, размер которых варьируется от четверти длины волны до половины длины волны. Элементарная ячейка представляет собой структуру, состоящую из принимающей части, подключенной через элемент связи (переходное отверстие, фазовращатель, резонатор) к передающей части. В качестве источника возбуждения антенной решетки может выступать рупор или другой вид антенн, расположенный на фокусном расстоянии  $F$ . При этом фокусное расстояние выбирается исходя из размера апертуры проходной решетки и диаграммы направленности возбуждающей антенны. Фактически проходная антенная решетка и возбуждающий элемент представляют собой линзовую систему, в которой элементарные ячейки антенной решетки формируют требуемое фазовое распределение вдоль её апертуры и преобразуют сферический фронт волны в плоский. Поэтому в некоторых источниках можно иногда встретить и другое название проходных антенных решеток, а именно «линзовая антенна» [2-3].



**Рисунок 1.** Схема проходной антенной решетки.

От амплитудно-фазового распределения, формируемого поверхностью антенной решетки, зависит положение луча в пространстве [4]. При этом существует несколько вариантов качания лучом антенной решетки:

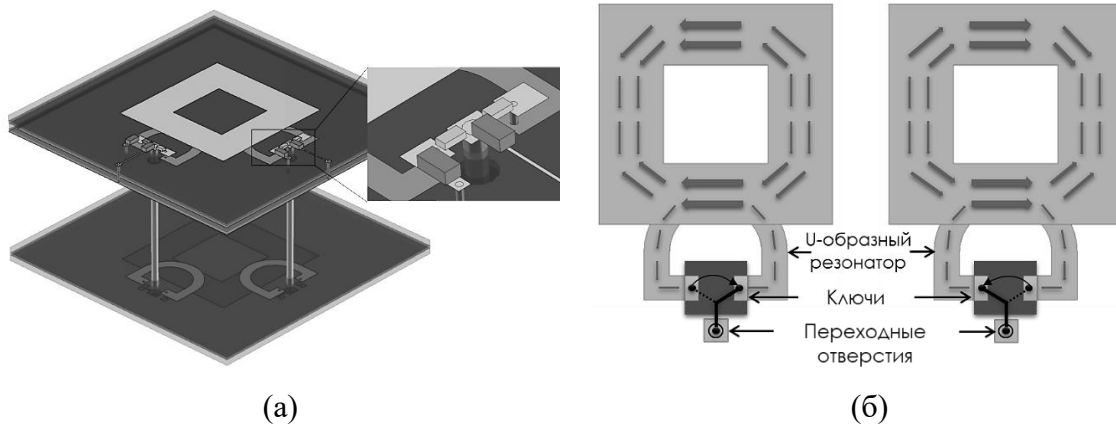
- изменение положения элемента возбуждения решетки;
- изменение амплитудно-фазового распределения вдоль апертуры решетки.

Для первого варианта, как правило, характерно наличие в качестве элемента возбуждения одномерной или двумерной решетки излучателей, переключение между элементами которой вызывает изменение положения луча в пространстве. Вторым вариантом управления лучом антенной решетки может быть реализован с помощью перестраиваемых элементов, интегрированных в конструкцию элементарных ячеек, таких как МЭМС переключатели, варакторные диоды, жидкие кристаллы, рпн-диоды [5-7].

В настоящей работе предложена конструкция 1-битной ячейки проходной антенной решетки. Представлены результаты моделирования и измерения диаграмм направленности антенной решетки при её облучении патч-антенной с линейной поляризацией при различных наборах фазового распределения.

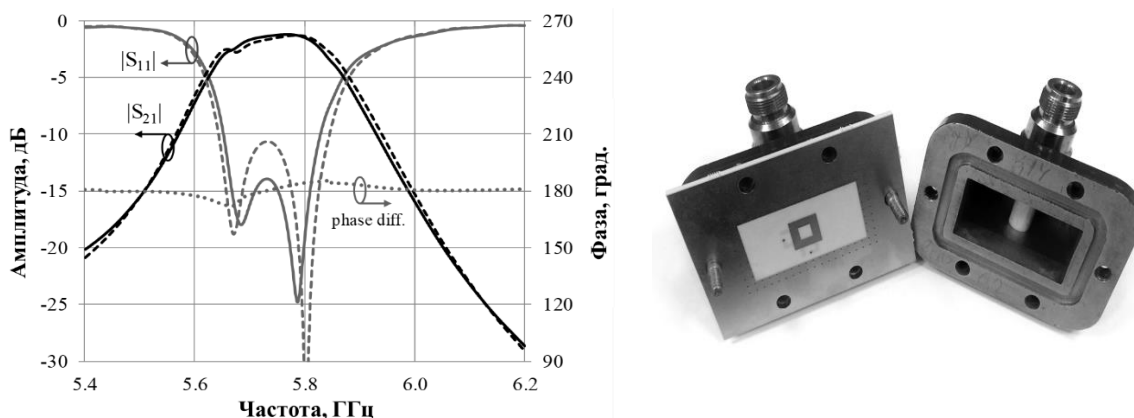
## 2. Элементарная ячейка проходной антенной решетки

Предложенная конструкция элементарной ячейки проходной антенной решетки представлена на рисунке 2-а. Ячейка состоит из шести проводящих слоев, расположены на четырех диэлектрических подложках RO4003C ( $h_s = 0,508$  мм,  $\epsilon = 3,38$ ,  $\text{tg}(\delta) = 0,0027$ ). Структура представляет собой патчи с квадратными дефектами, расположенными на внешних проводящих слоях. Добавление вырезов увеличивает длину пути протекания токов, что приводит к уменьшению размеров излучателей при сохранении центральной рабочей частоты. Каждый из двух патчей индуктивно связан с двумя полуволновыми U-образными резонаторами, соединенными переходным отверстием друг с другом. Приемная и передающая части элементарной ячейки разделены друг от друга экраном. Размер ячейки составляет  $24 \times 24$  мм<sup>2</sup>.



**Рисунок 2.** Элементарная ячейка проходной антенной решетки: (а) конструкция ячейки; (б) направление движения токов

В рассматриваемой ячейке при изменении точки подключения двух U-образных резонаторов друг с другом наблюдается изменение направления движения токов в патчах с вырезом на противоположное, и, как следствие, изменение фазового набега на  $180^\circ$  (рисунок 2 б). Таким образом, ячейка является 1-битной, так в ней реализуется два фазовых состояния  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . На рисунке 3 представлены результаты измерений прототипа элементарной ячейки, выполненной в виде волноводной вставки в двух вариантах, соответствующих фазовым состояниям  $0^\circ$  и  $180^\circ$ .



**Рисунок 3.** Результаты измерений параметров рассеяния элементарной ячейки антенной решетки, выполненной в виде волноводной вставки (сплошные линии соответствуют  $0^\circ$  фазового состояния, и штриховые линии соответствуют  $180^\circ$  фазового состояния)

Анализируя полученные характеристики, можно убедиться, что ячейка обладает полосой пропускания 200 МГц по уровню -10 дБ коэффициента отражения. Разность фаз для двух состояний составила  $180^\circ$  с фазовой ошибкой не более  $7^\circ$  в рабочей полосе частот.

### 3. Результаты моделирования и измерения характеристик проходной антенной решетки

В традиционных вариантах фазированных антенных решеток возможность управления положением луча достигается за счет изменения фазового распределения вдоль их апертуры. При этом фазовое распределение может меняться непрерывно или дискретно. В предложенном варианте антенной решетки фазовое распределение меняется дискретно относительно идеального фазового распределения с учетом квантования фазы элементарной ячейки  $0^\circ$  и  $180^\circ$  по следующему правилу [4]:

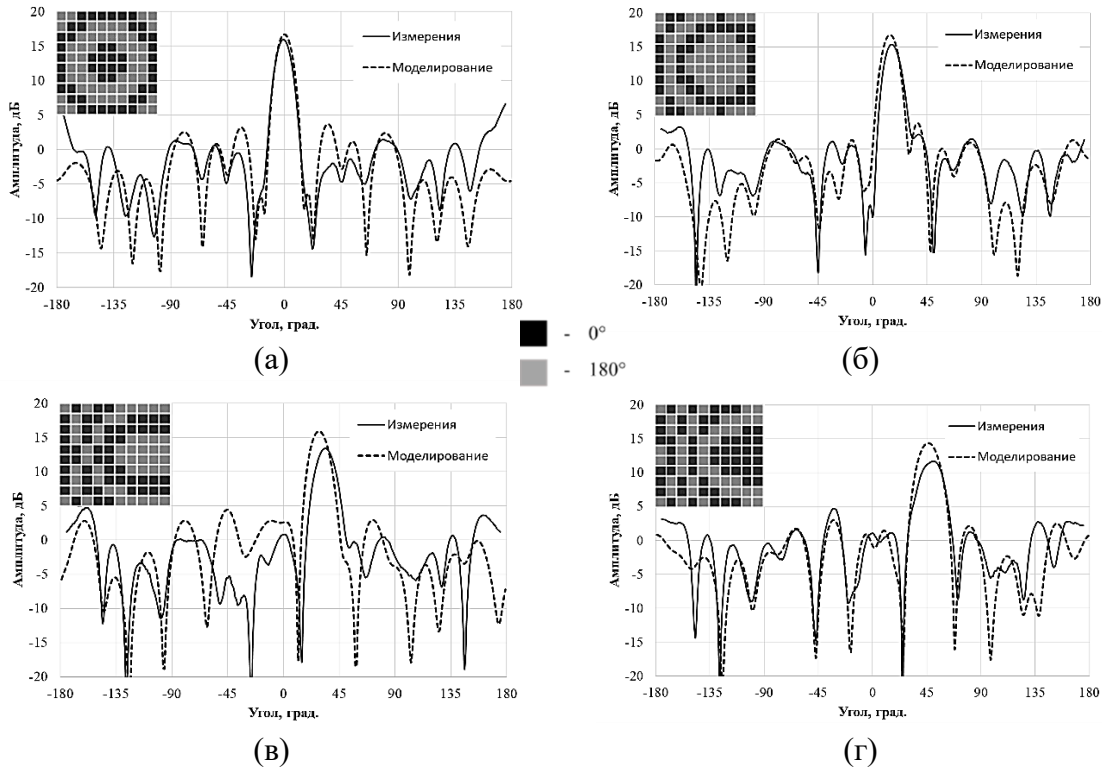
$$\arg(\mathbf{T}_{mn}^i) = \begin{cases} 0^\circ \forall |\arg(\mathbf{T}_{mn}^i)| \leq 90^\circ \\ 180^\circ \text{ otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\arg(\mathbf{T}_{mn})$  – фаза комплексного коэффициента передачи каждой элементарной ячейки, которая требуется для формирования идеального распределения на передающей стороне поверхности антенной решетки.

С целью исследования характеристик решетки были изготовлены элементарные ячейки в двух вариантах фазового набега  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . Затем данные ячейки помещались в специальный держатель, выполненный по технологии 3D печати, в соответствии с формируемой диаграммой направленности. На рисунке 5 показаны результаты измерений диаграммы направленности решетки при различных наборах фазового распределения, соответствующих углам наклона луча в пространстве  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ .

В качестве источника возбуждения проходной антенной решетки использовалась одиночная патч-антенна с линейной поляризацией, описанная в [4], с коэффициентом усиления 5,8 дБ и шириной главного лепестка  $90^\circ$  по уровню половинной мощности на частоте 5,8 ГГц. Расстояние между антенной и проходной антенной решеткой составляет 90 мм, что соответствует наибольшей эффективности облучения её поверхности.

Коэффициент усиления решетки составил 16 дБ при угле наклона луча  $0^\circ$  с уровнем боковых лепестков -13 дБ. При качании лучом наблюдается уменьшение коэффициента усиления антенной решетки, но уровень боковых лепестков сохраняется и не превышает -13 дБ вплоть до  $30^\circ$ . Результаты измерений повторяют результаты полноволнового электродинамического моделирования.



**Рисунок 5.** Характеристики проходной антенной решетки при различных наборах фазового распределения (черный цвет -  $0^\circ$  фазовый набег; серый цвет -  $180^\circ$  фазовый набег): (а) угол наклона луча  $0^\circ$ ; (б) угол наклона луча  $15^\circ$ ; (в) угол наклона луча  $30^\circ$ ; (г) угол наклона луча  $45^\circ$

#### 4. Заключение

В результате выполнения работы была предложена конструкция 1-битной перестраиваемой элементарной ячейки С-диапазона с полосой пропускания 200 МГц по уровню -10 дБ коэффициента отражения. Структура ячейки отличается относительной простотой и малыми вносимыми потерями. Изготовлен и экспериментально исследован прототип проходной антенной решетки, представляющий собой массив элементарных ячеек с фазовыми набегам  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . Результаты измерений проходной антенной решетки при различных фазовых распределениях продемонстрировали возможность управления положением луча в пространстве, а также хорошее соответствие результатам электродинамического моделирования. Дальнейшая работа будет направлена на разработку перестраиваемой элементарной ячейки с целью реализации проходной антенной решетки с электронным управлением положением луча в пространстве.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20374)**.

#### Список литературы

1. Di Palma, L. Reconfigurable transmitarray antennas at millimeter-wave frequencies. Signal and Image processing / L. Di Palma, [at al.] // University of Rennes. — 2015. — 256 p.
2. Papovic, D. Multibeam planar lens antenna arrays / D. Papovic [at al.]. — Colorado, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Univ. of Colorado, Boulder, 2003. — P. 57 – 60.
3. Moy-Li, H.C. Dual-polarized planar lens antenna designed with a quadridged frequency selective surface / H.C. Moy-Li, [at al.] // Mircow. Opt. Technol. Lett. — 2018. — P. 1 – 6.
4. Munina I. A Study of C-Band 1-Bit Reconfigurable Dual-Polarized Transmitarray / I. Munina, [at al.] // 13-th European Conf. on Ant. And Prop. — 2019. — 5 p.
5. Hum, J. Reconfigurable Reflectarrays and Array Lenses for Dynamic Antenna Beam Control: A Review / S. V. Hum, J. Perruisseau-Carrier // IEEE Transactions on Antennas and Propagation — Jan. 2014. — Vol. 62. — No. 1. — P. 183 – 198.
6. Turpin J., J.P. Reconfigurable and tunable metamaterials: A review of the theory and applications / J. P. Turpin J., [at al.] // Int. J. Antennas Propag. — 2014. — Vol. 2014.
7. Tunable terahertz metamaterial based on resonant dielectric inclusions with disturbed Mie resonance / D. S. Kozlov, [at al.] // Applied Phys. A. — 2012. — Vol. 106. — No. 3. — P. 465 – 470.
8. Верёвкин А.П. Планарные антенны микроволнового диапазона частот с линейной и круговой поляризацией / А.П. Верёвкин, [и др.] // сборник докладов всероссийской науч.-тех. конф. по АРР. — Октябрь 2018. — 4 с.