

## Проходная одноразрядная фазированная антенная решетка с пространственным возбуждением для систем беспроводной связи 6 ГГц

В. В. Кириллов<sup>✉</sup>, И. В. Мунина, П. А. Туральчук

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
"ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>✉</sup> [vvkirillov@etu.ru](mailto:vvkirillov@etu.ru)

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время пропускная способность канала является одним из важнейших параметров современных систем связи ввиду увеличения числа пользователей, высоких скоростей передачи данных и быстрого развития интернета вещей. В беспроводных системах связи ограничение пропускной способности возникает из-за низкого отношения сигнал/шум, и одной из причин этого являются высокие потери при распространении электромагнитных волн. Их можно компенсировать с помощью антенных систем с высоким коэффициентом усиления, таких, как метаповерхности, проходные или отражающие решетки.

**Цель работы.** Разработка и исследование проходной одноразрядной фазированной антенной решетки (ФАР) с пространственным возбуждением для использования в системах беспроводной связи для частот, близких к 6 ГГц. Обсуждается вопрос уменьшения вносимых потерь, связанных с геометрией ячейки и управляющих компонентов. Особое внимание уделяется учету паразитных параметров  $p-i-n$ -диодов, используемых в качестве управляющих элементов для установки фазы в составе единичной ячейки. Также исследуются способы подавления кроссполаризации в единичной ячейке с целью уменьшения вносимых потерь.

**Материалы и методы.** Основным методом исследования характеристик единичных ячеек проходной антенной решетки является численное электродинамическое моделирование в системе автоматизированного проектирования CST Microwave Studio. Полученные результаты подтверждены экспериментальным исследованием изготовленных образцов.

**Результаты.** Предложена уникальная конструкция единичной ячейки, являющейся основным элементом проходной ФАР. В результате была спроектирована и изготовлена ФАР, результаты измерений которой показывают уровень вносимых потерь в рабочей полосе частот 210 МГц (3.6 %) не более 1.5 дБ. Уровень кроссполаризации составляет не более 24 дБ в диапазоне отклонения луча от 45 до  $-45^\circ$ , ослабление коэффициента усиления не превышает 2.5 дБ.

**Заключение.** Простота конструкции, низкие потери и уровень кроссполаризации показывают, что разработанная проходная одноразрядная ФАР с пространственным возбуждением может быть успешно использована в современных системах связи.

**Ключевые слова:** антенная решетка, одноразрядная, потери, единичная ячейка, кроссполаризация

**Для цитирования:** Кириллов В. В., Мунина И. В., Туральчук П. А. Проходная одноразрядная фазированная антенная решетка с пространственным возбуждением для систем беспроводной связи 6 ГГц // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 5. С. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-5-6-17

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-70001.

Статья поступила в редакцию 15.02.2022; принята к публикации после рецензирования 29.06.2022;  
опубликована онлайн 29.11.2022

## A One-bit Transmit Phased Array with Spatial Excitation for Sub-6 GHz Wireless Systems

Vitalii V. Kirillov✉, Irina V. Munina, Pavel A. Turalchuk

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉vvkirillov@etu.ru

### Abstract

**Introduction.** Due to the increasing number of users, growing rates of data transmission, and rapid advancement of the Internet of Things, the parameter of channel capacity is acquiring greater importance in modern communication systems. In wireless communication systems, capacity limitation occurs due to a low signal-to-noise ratio, one reason for which consists in high losses associated with the propagation of electromagnetic waves. These losses can be compensated using high-gain antenna systems, such as metasurfaces, transmitarrays, or reflectarrays.

**Aim.** Development and research of a one-bit transmit phased antenna array with spatial excitation for use in wireless communication networks across sub-6 GHz frequencies. The issues of reducing the insertion losses associated with the cell geometry and control components are discussed. Account is taken of the parasitic parameters of  $p-i-n$  diodes used as control elements for phase adjustment in a unit cell. Methods for suppressing cross-polarization in a unit cell with the purpose of reducing insertion losses are studied.

**Materials and methods.** The characteristics of unit cells in a transmit antenna array were studied by numerical electrodynamic modeling in the CST Microwave Studio computer-aided design system. The obtained results were confirmed by an experimental study of samples.

**Results.** A unique design of a unit cell comprising the main element of a transmitarray was proposed. On its basis, a transmitarray was designed and manufactured, whose measurements proved the level of insertion losses to be lower than 1.5 dB in the operating frequency band of 210 MHz (3.6 %). The level of cross-polarization was found to be lower than 24 dB, and the gain attenuation did not exceed 2.5 dB in the range of beam deflection from  $45^\circ$  to  $-45^\circ$ .

**Conclusion.** The design simplicity, low losses, and acceptable cross-polarization levels of the developed one-bit transmit phased antenna array with spatial excitation confirm its feasibility for modern communication systems.

**Keywords:** antenna array, one-bit, loss, unit cell, cross-polarization

**For citation:** Kirillov V. V., Munina I. V., Turalchuk P. A. A One-bit Transmit Phased Array with Spatial Excitation for Sub-6 GHz Wireless Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 5, pp. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-5-6-17

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Acknowledgements.** The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-31-70001.

Submitted 15.02.2022; accepted 29.06.2022; published online 29.11.2022

**Введение.** Основной фундаментальной проблемой современных беспроводных средств связи является ограниченность пропускной способности канала связи, определяемой как максимальная скорость передачи данных за единицу времени. Пропускная способность является критическим параметром для современных средств связи, требования к которой из года в год повышаются вследствие роста числа пользователей и объема трафика.

Антенные системы, являющиеся одним из главных элементов беспроводных систем связи,

непосредственно влияют на ее пропускную способность. Высокий коэффициент усиления (КУ) антенных систем, возможность управления формой диаграммы направленности, рабочая полоса частот – одни из критических параметров антенных систем современных средств связи. Традиционные фазированные антенные решетки (ФАР) способны формировать узконаправленные лучи с высокими КУ и обеспечивать возможность электронного управления [1]. Однако массогабаритные характеристики ФАР и большие потери в цепях питания являются их

главными недостатками. Кроме того, существенным недостатком является значительное усложнение архитектуры диаграммообразующей системы, заключающееся в формировании многолучевой диаграммы направленности, для реализации технологии ММО, которая позволяет увеличить пропускную способность за счет пропорционального роста количества используемых антенных элементов. В свою очередь, от подобных недостатков свободна технология антенных решеток с пространственным способом возбуждения, где антенная решетка возбуждается через свободное пространство волной, генерируемой облучателем. Пространственный способ распределения мощности может быть реализован в виде метаповерхностей [2, 3], отражательных решеток [4, 5] или проходных решеток [6–8]. В ФАР с пространственной системой возбуждения элементы излучающей апертуры собирают мощность облучателя и переизлучают ее в заданном направлении после фазирования с помощью фазовращателей, фазовый сдвиг которых задается устройством управления фазовым распределением. Изменение фазовых состояний элементарных ячеек может быть реализовано как непрерывным, так и дискретным способом. Дискретное изменение фазы – наиболее простой с точки зрения реализации способ. В то же время одноразрядное фазовое квантование наиболее часто встречается среди представленных в литературе антенных решеток с пространственным возбуждением [9–11]. Одноразрядное фазовое распределение с двумя фазовыми состояниями 0 и  $180^\circ$  позволяет уменьшить количество управляющих элементов, что в результате снижает уровень вносимых потерь, а также энергозатраты на управление фазовым распределением антенной решетки.

В связи с тенденцией к освоению более высоких частотных диапазонов системами связи нового поколения повышаются и требования к вносимым потерям, ширине рабочей полосы частот, уровню кроссполяризации, возможности электронного сканирования, энергоэффективности и т. д. Важным аспектом является выбор управляющего элемента для электронного управления формой диаграммы направленно-

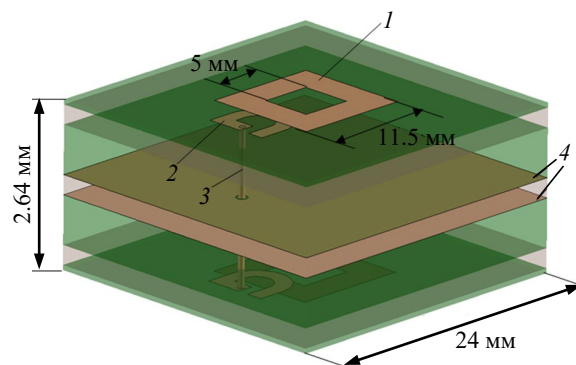


Рис. 1. Структура единичной ячейки антенной решетки  
Fig. 1. Structure of a transmitarray unit cell

сти, от характеристик которого зависят и основные характеристики антенной решетки.

В данной статье обсуждаются вопросы разработки одноразрядной ФАР с пространственным возбуждением, в качестве управляющего элемента в которой используются полупроводниковые  $p-i-n$ -диоды для работы на частоте 5.8 ГГц. Для подтверждения результатов электродинамического моделирования антенная решетка была изготовлена с использованием технологии производства печатных плат и исследована экспериментально.

**Конструкция единичной ячейки проходной антенной решетки** представлена на рис. 1. Элементарная ячейка проходной антенной решетки состоит из приемной и передающей печатных патч-антенн с квадратным вырезом в центре, размещенных на противоположных сторонах многослойной структуры 1, состоящей из семи диэлектрических слоев. Для обеспечения связи между двумя патч-антеннами используется элемент, содержащий два разомкнутых кольцевых резонатора 2, соединенных между собой сквозным металлизированным отверстием 3. Две плоскости заземления 4 в середине стека устраняют паразитную связь между патч-антеннами. Наличие двух плоскостей заземления вместо одной обусловлено требованиями процесса изготовления печатных плат и обеспечивает симметрию структуры. Металлические слои сформированы на четырех диэлектрических слоях материала Rogers RO4003 толщиной 0.508 мм ( $\epsilon_r = 3.55$ ;  $\tan \delta = 0.0027$ ). Три слоя препрега Rogers RO4450B толщиной 0.204 мм ( $\epsilon_r = 3.3$ ;

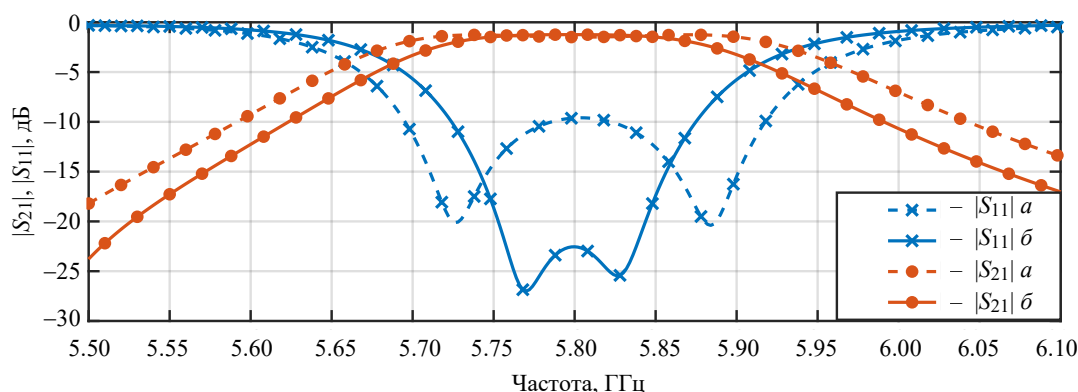


Рис. 2. Результаты моделирования коэффициентов передачи и отражения для разных коэффициентов связи:  $a$  – уменьшенного;  $b$  – увеличенного

Fig. 2. Results of modeling the transmission and reflection coefficients for different coupling coefficients:  $a$  – reduced;  $b$  – increased

$\text{tg } \delta = 0.004$ ) используются для соединения слоев RO4003. Поперечный размер единичной ячейки составляет  $24 \times 24$  мм ( $\approx 0.46 \lambda_0$ ), а толщина – 2.64 мм, что менее  $0.045 \lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве на частоте 5.8 ГГц. Вырез в антенном элементе позволяет уменьшить его габаритные размеры на 20 % по сравнению со стандартной патч-антенной.

Переключение фазовых состояний в предлагаемой конструкции достигается за счет изменения места соединения кольцевого резонатора со сквозным металлизированным отверстием [12]. Состояние, в котором резонаторы на обеих сторонах ячейки соединены таким образом, что токи, протекающие в антенных элементах, являются сонаправленными, называется фазовым состоянием I (или состоянием  $0^\circ$ ). В обратном фазовом состоянии II резонаторы соединены на противоположных сторонах ячейки таким образом, что токи в антенных элементах противоположны, обеспечивая тем самым разность фаз  $180^\circ$ .

Использование разомкнутых кольцевых резонаторов в качестве элементов связи также позволяет управлять связью между антенными элементами, расположенными на разных сторонах единичной ячейки, в более широких пределах. Изменение индуктивной связи между антеннами позволяет управлять шириной полосы пропускания, сохраняя при этом размер сквозных металлизированных отверстий и параметры подложки постоянными. Однако в процессе из-

менения полосы меняются также и вносимые потери. В соответствии с результатами электродинамического моделирования (рис. 2) уменьшение площади перекрытия между резонаторами и антеннами приводит к расширению полосы пропускания с 220 (3.5 %) до 300 МГц (5 %), при этом вносимые потери увеличиваются с 0.8 до 1.04 дБ. Увеличение максимальных потерь для случая расширенной полосы пропускания обусловлено рассогласованием на центральной частоте.

Отклик единичной ячейки соответствует характеристикам двухполюсного полосно-пропускающего фильтра с чебышевской характеристикой. Таким образом, вносимые потери можно оценить используя следующее уравнение [13]:

$$L = 4.34 \frac{f_0}{\Delta f Q} \sum_{i=1}^N g_i, \quad (1)$$

где  $f_0$  – центральная частота;  $\Delta f$  – полоса пропускания по уровню –3 дБ;  $Q$  – ненагруженная добротность резонаторов;  $N$  – порядок фильтра;  $g_i$  – нормализованное значение фильтрующего элемента для данного прототипа фильтра. В (1) нагруженная добротность антенн оценена как ширина полосы частот модуля коэффициента отражения по уровню –3 дБ для одиночного антенного элемента. Согласно (1) рассчитанные вносимые потери соответствуют 0.84 и 1.15 дБ для случаев увеличенной и уменьшенной связи соответственно, что хорошо согласуется с результатами электродинамического моделирования (рис. 2).

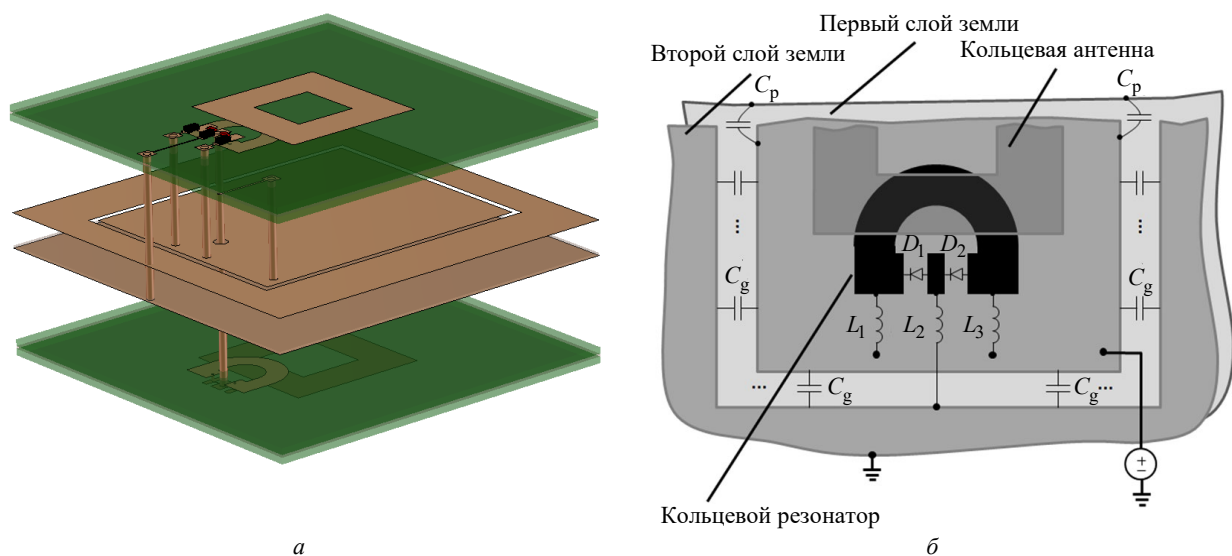


Рис. 3. Конструкция реконфигурируемой ячейки с  $p-i-n$ -диодами (а); реализация цепей управления диодами (б)  
 Fig. 3. Design of a reconfigurable unit cell with  $p-i-n$ -diodes (a); implementation of diodes control circuit (b)

Для электронного управления фазовыми состояниями используются 2 полупроводниковых  $p-i-n$ -диода Масом МА4AGP907 (рис. 3, а). Так, фазовый сдвиг на  $180^\circ$  достигается переключением точки возбуждения резонатора элемента связи на одной из сторон единичной ячейки посредством изменения состояний  $p-i-n$ -диодов. Диоды соединены встречно-параллельно для постоянного тока, как показано на эквивалентной схеме (рис. 4), чтобы обеспечить их работу в противоположных состояниях с помощью одного управляющего напряжения. Положительное напряжение обеспечивает прямое смещение для диода  $D_2$ , в то время как отрицательное напряжение переводит во включенное состояние диод  $D_1$ .

В закрытом состоянии  $p-i-n$ -диоды характеризуются емкостью 0.02 пФ, в открытом – сопротивлением 4.2 Ом [14]. Для развязки постоянного и сверхвысокочастотного токов используются индуктивности  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  (15 нГн). Собственные резонансные частоты этих индуктивностей совпадают с рабочей частотой ячейки, что дополнительно улучшает развязку для цепей питания. Параллельная емкость в цепи подачи смещения была реализована в виде плоскопараллельного конденсатора, образованного двумя металлизированными слоями (рис. 3, б). Суммарное значение емкости с учетом емкости

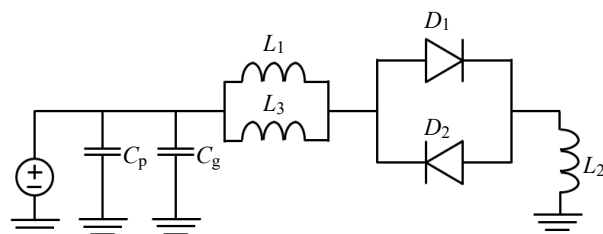


Рис. 4. Схема цепей питания диода на нулевой частоте  
 Fig. 4. Diode supply circuit diagram at zero frequency

параллельных пластин  $C_p$  и емкости зазора  $C_g$  соответствует 60 пФ.

Управляемая единичная ячейка была изготовлена и экспериментально исследована в волноводе. Результаты электродинамического моделирования и экспериментального исследования модулей коэффициентов отражения и передачи для обоих фазовых состояний, а также разности фаз единичной ячейки в волноводных граничных условиях представлены на рис. 5, а и б соответственно. По результатам измерений вносимые потери составляют 1.3 дБ на центральной частоте 5.8 ГГц, в то время как вносимые потери по результатам электродинамического моделирования не превышают 0.8 дБ. Разница в 0.5 дБ может быть объяснена неучтенными потерями на пайку диодов, а также погрешностью в калибровке. Рабочая полоса частот по уровню  $-3$  дБ коэффициента передачи составляет 200 МГц (3.4 %), при этом фазовая ошибка не превышает  $\pm 3^\circ$ . Для пере-



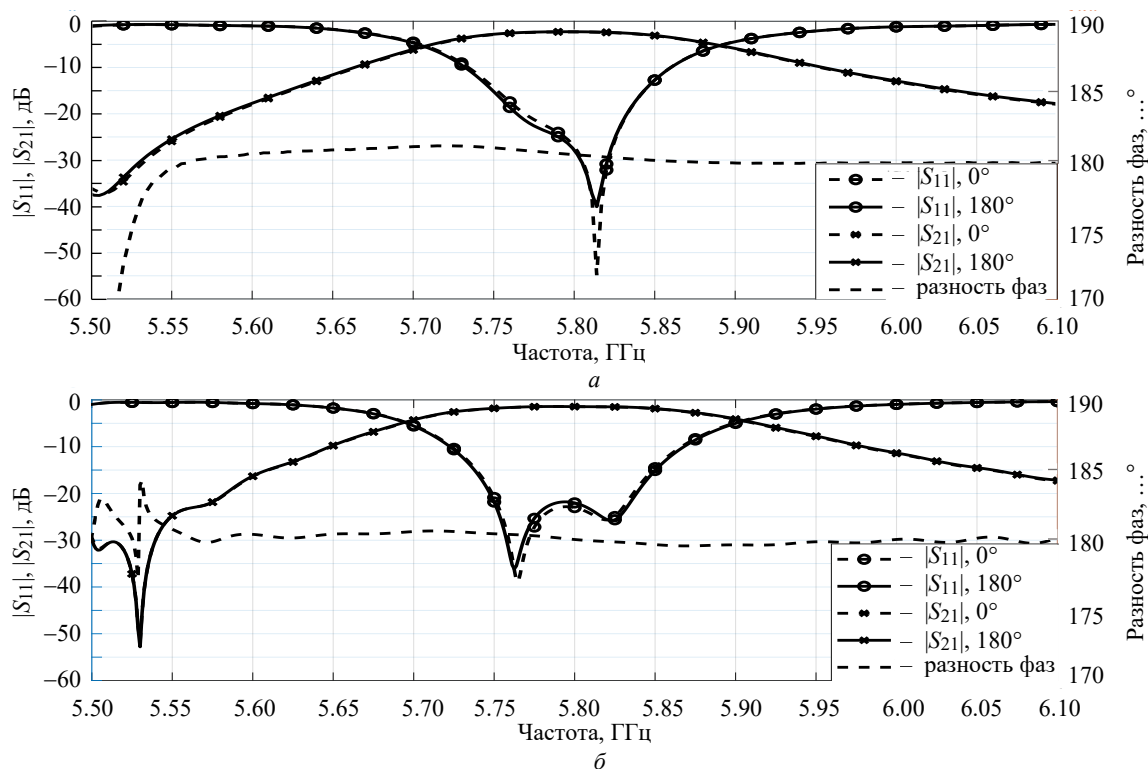


Рис. 5. Результаты экспериментального исследования (а) и электродинамического моделирования (б) характеристик параметров матрицы рассеяния единичной ячейки в волноводных граничных условиях

Fig. 5. Results of an experimental study (a) and electrodynamic simulation (б) of the characteristics of the scattering matrix parameters of a unit cell under waveguide boundary conditions

ключения фазового состояния использовалось напряжение смещения  $\pm 1.35$  В.

**Подавление кроссполаризации в единичной ячейке.** Граничные условия при моделировании единичной ячейки существенно влияют на ее характеристики передачи. Следовательно, характеристики ячейки, находящейся в волноводе, могут отличаться от таковых при ее размещении в составе решетки, что соответствует периодическим граничным условиям. Так, на рис. 6, а представлены результаты электродинамического моделирования параметров матрицы рассеяния единичной ячейки при периодических граничных условиях. В соответствии с результатами моделирования наблюдается увеличение вносимых потерь в полосе рабочих частот за счет высокого уровня кроссполаризации. При моделировании единичной ячейки с использованием волноводных граничных условий распространение ортогональной поляризации становится невозможным.

Для подавления кроссполаризации были рассмотрены следующие подходы [15]: нару-

шение симметрии антенного элемента введением неоднородности внутри выреза (рис. 7, а) или к внешним краям антенного элемента (рис. 7, б); введение металлизированных сквозных отверстий, связывающих плоскость заземления и антенный элемент в местах минимума распределения электрического поля (рис. 7, в).

Результаты электродинамического моделирования единичных ячеек с предложенными изменениями при периодических граничных условиях представлены на рис. 6, б–г. Можно наблюдать примерно одинаковую эффективность в подавлении кроссполаризации, составляющую 15 дБ, для случаев изменения геометрии патч-антенны (рис. 7, а и б). В то же время добавление металлизированных отверстий (рис. 7, в) показывает наилучший результат 25 дБ во всей рабочей полосе. Добавление металлизированных сквозных отверстий не только обеспечивает наибольшее подавление кроссполаризации, но и значительно уменьшает вносимые потери (таблица).

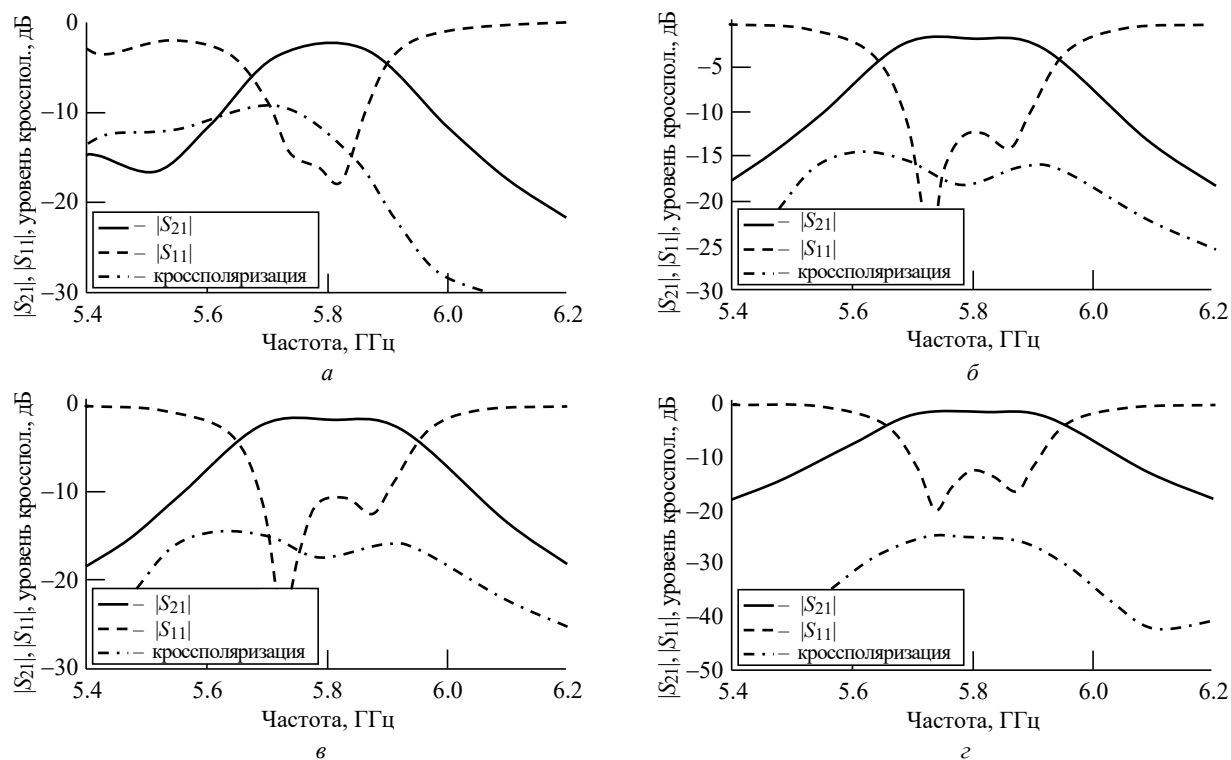


Рис. 6. Результаты моделирования реконфигурируемой единичной ячейки в периодических граничных условиях:

а – топология без изменений; б – топология с усеченными краями;  
в – топология с неоднородностью в центральном вырезе; г – топология с заземленным патчем

Fig. 6. Simulation results of a reconfigurable unit cell with periodic boundary conditions:

а – topology unchanged; б – topology with cut edges;  
в – topology with inhomogeneity in the central notch; г – ground patch topology

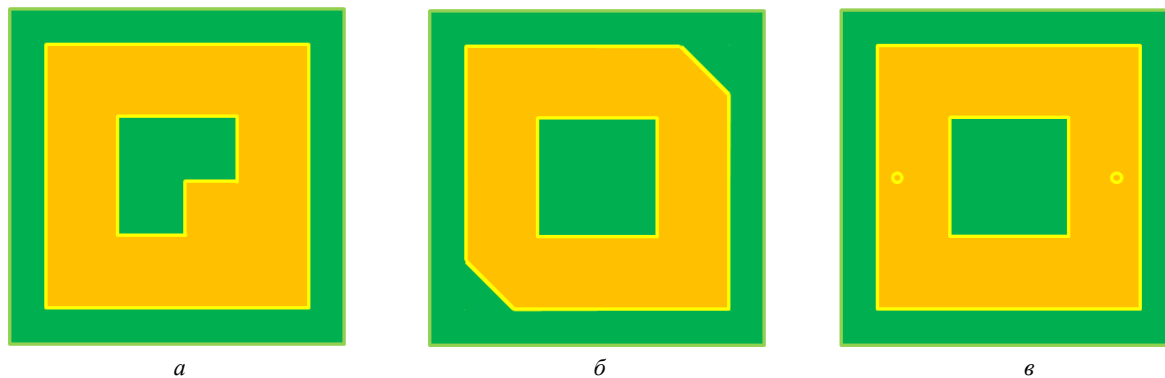


Рис. 7. Топология: а – с обрезанными краями; б – с неоднородностью в центральном вырезе; в – с заземленным патчем

Fig. 7. Topology: а – with cut edges; б – with inhomogeneity in the central notch; в – ground patch topology

#### Результаты подавления кроссполяризации различными способами

#### Results of cross-polarization suppression by various methods

Конструкция ячейки	Вносимые потери, дБ	Уровень кроссполяризации, дБ	Согласование, дБ
Ячейка без подавления	2.4	9	15
Неоднородность во внутреннем вырезе антенны	1.56	17	12
Усеченная антенна	1.7	16	10
Использование металлизированных отверстий	1.5	25	13

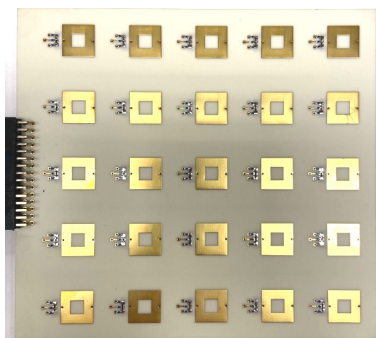


Рис. 8. Экспериментальный образец подрешетки с установленными элементами управления

Fig. 8. Experimental sample of the subarray with installed control elements

Для экспериментального исследования эффективности металлизированных отверстий была разработана и изготовлена подрешетка, состоящая из  $5 \times 5$ -массива элементарных ячеек с подавленной кроссполяризацией (рис. 8). Цепи подачи смещения, расположенные во внутренних слоях печатной платы, обеспечивают независимое управление каждым элементом массива. Расстояние между центрами антенных элементов составляет 25 мм, что соответствует  $\lambda_0/2$  на частоте 6 ГГц.

Параметры матрицы рассеяния единичной ячейки были экспериментально исследованы с помощью векторного анализатора цепей R&S ZNB20 в составе подрешетки, при этом подрешетка облучалась рупорной антенной на расстоянии 3 м, а с другой стороны подрешетки использовалась открытая секция коаксиально-волноводного перехода.

Результаты измерений параметров матрицы рассеяния, кроссполяризации и разности фаз показаны на рис. 9. Измеренные  $S$ -параметры

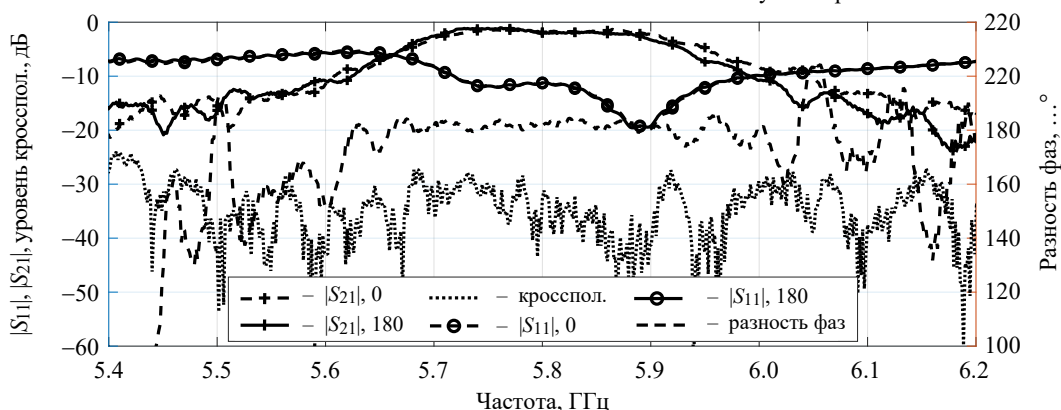


Рис. 9. Результаты измерения ко- и кроссполяризации для изготовленной подрешетки

Fig. 9. The results of measuring co- and cross-polarization for the manufactured subarray

идентичны для обоих состояний; вносимые потери составляют 2 дБ на частоте 5.8 ГГц. Ширина полосы с коэффициентом передачи 3 дБ составляет 250 МГц (4.3 %). Фазовая ошибка не превышает  $5^\circ$ . Уровень подавления кроссполяризации составляет более 28 дБ в рабочей полосе частот, что хорошо согласуется с результатами моделирования.

#### Экспериментальное исследование ФАР.

Пропускная антенная решетка состоит из четырех одинаковых подрешеток, объединенных пластиковым держателем (рис. 10). Облучателем пропускной решетки является патч-антенна с КУ 6 дБи, расположенная на фокусном расстоянии 90 мм. Каждая подрешетка подключена к блоку управления фазовым распределением. Диаграмма направленности измерялась с использованием векторного анализатора цепей R&S ZNB20 и рупорной антенны с КУ 19 дБи,



Рис. 10. Экспериментальный прототип пропускной фазированной антенной решетки с пространственным возбуждением

Fig. 10. Experimental prototype of a phased transmit antenna array with spatial excitation



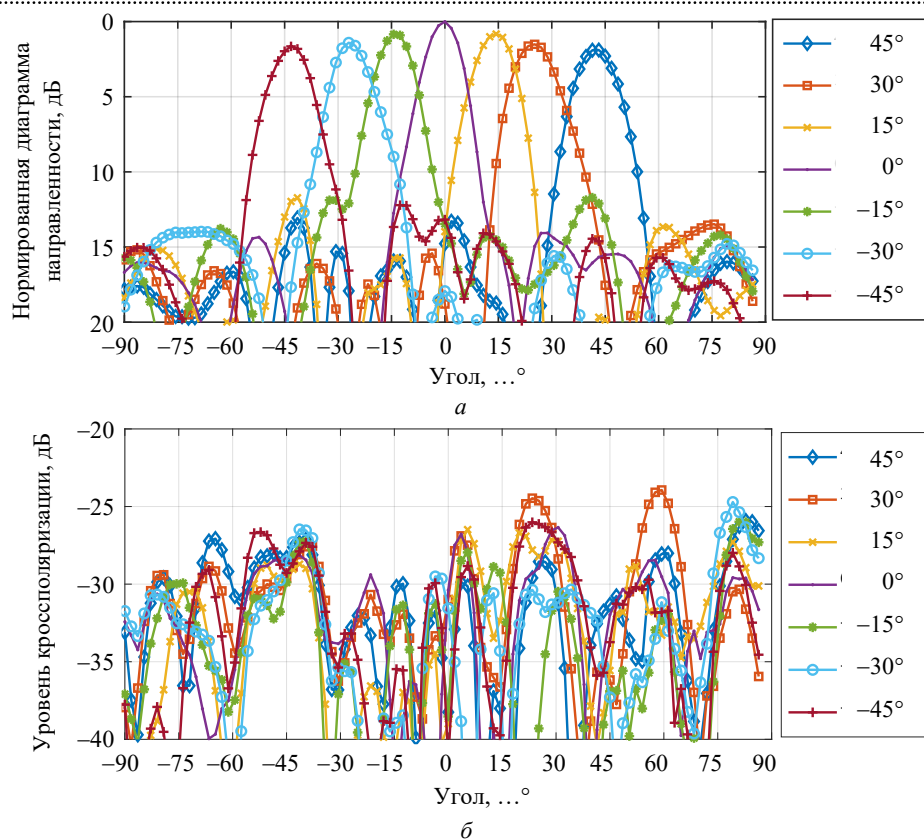


Рис. 11. Результаты измерения диаграммы направленности в  $H$ -плоскости для нескольких положений главного луча:  $a$  – кополяризация;  $b$  – кроссполяризация

Fig. 11. The results of measuring the radiation pattern in the  $H$ -plane for several positions of the main beam:  $a$  – co-polarization;  $b$  – cross-polarization

расположенной на расстоянии 3 м от исследуемой фазированной решетки. Нормированная диаграмма направленности в  $H$ -плоскости, измеренная на частоте 5.8 ГГц для нескольких положений главного луча, показана на рис. 11,  $a$ . Результаты измерений нормированы к значению максимума центрального луча. Проходная антенная решетка демонстрирует прирост КУ по сравнению с патч-антенной на 11 дБ. Совокупный КУ антенной системы составляет 16 дБи. В соответствии с результатами экспериментального

исследования проходная ФАР обеспечивает возможность качания лучом в диапазоне от  $-45^\circ$  до  $45^\circ$  с ослаблением КУ не более, чем 2.5 дБ.

Полученные зависимости уровня кроссполяризации в диапазоне углов от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$  (рис. 11,  $b$ ), также нормированные к уровню КУ, не превышают  $-24$  дБ, что соответствует результатам, полученным для единичной ячейки.

Результаты измерений частотной зависимости диаграммы направленности решетки в  $H$ -плоскости для центрального луча показаны на рис. 12. Как следует из рисунка, полоса ра-

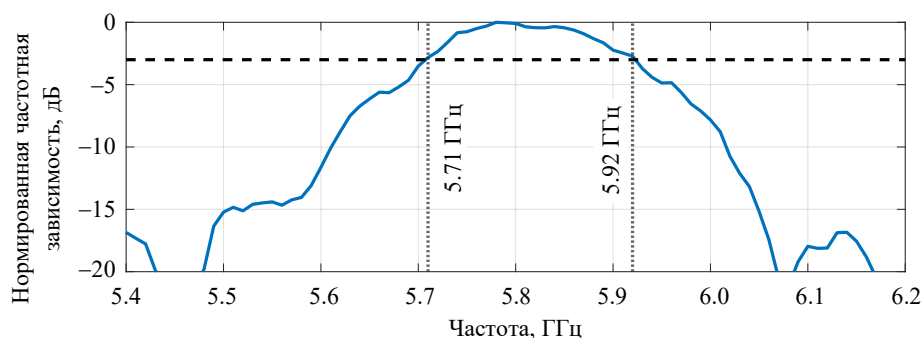


Рис. 12. Измеренная частотная зависимость нормированного КУ антенны для направления луча  $0^\circ$

Fig. 12. Measured frequency dependence of the normalized antenna gain for a beam direction of  $0^\circ$

бочих частот по относительному уровню КУ –3 дБ составляет 210 МГц (от 5.71 до 5.92 ГГц).

**Заключение.** В настоящей статье представлена одноразрядная ФАР, разработанная на основе оригинальной конструкции единичной ячейки, предназначенная для работы на частоте 5.8 ГГц. Представлен анализ вклада вносимых потерь единичной ячейки, который позволяет оптимизировать конструкцию. Показано, что наличие связывающего кольцевого резонатора позволяет расширить полосу пропускания, что, однако, приводит к дополнительным потерям. В то же время высокий уровень кроссполяризации также приводит к нежелательным уровням потерь. В результате проведенного исследования по подавлению кроссполяризации в единичной

ячейке удалось добиться низкого уровня кроссполяризации 24 дБ для всей фазированной решетки, что также позволило достичь низкого уровня вносимых потерь.

Диаграммы направленности изготовленной проходной ФАР были измерены для различных углов сканирования. Таким образом показана возможность качания лучом в диапазоне углов от –45 до 45° с падением КУ на 2.5 дБ. Уровень боковых лепестков составляет –13 дБ. Ширина полосы пропускания – 210 МГц (от 5.71 до 5.92 ГГц). В совокупности с низким уровнем кроссполяризации полученные результаты делают эту структуру перспективным кандидатом для использования в составе систем связи нового поколения.

### Список литературы

1. Mailloux R. J. Phased array antenna handbook. Norwood: Artech house, 2017. 506 p.
2. Low-DC voltage-controlled steering-antenna radome utilizing tunable active metamaterial / T. Jiang, Z. Wang, D. Li, J. Pan, B. Zhang, J. Huangfu, Y. Salamin, C. Li, L. Ran // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012. Vol. 60, № 1. P. 170–178. doi: 10.1109/TMTT.2011.2171981
3. New steerable antenna with controllable metamaterial / Y. Sun, Z. Li, W. Zhu, Z. Ji, Q. Wang // 42<sup>nd</sup> European Microwave Conf., Amsterdam, Netherlands, 29 Oct. – 01 Nov. 2012. IEEE, 2013. P. 610–613. doi: 10.23919/EuMC.2012.6459398
4. Hardware-efficient hybrid precoding for millimeter wave systems with multi-feed reflectarrays / Z. Zhou, N. Ge, Z. Wang, S. Chen // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 6795–6806. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793223
5. Pozar D. M., Targonski S. D., Syrigos H. D. Design of millimeter wave microstrip reflectarrays // IEEE transactions on antennas and propagation. 1997. Vol. 45, № 2. P. 287–296. doi: 10.1109/8.560348
6. Cheng C. C., Abbaspour-Tamijani A. Study of 2-bit antenna-filter-antenna elements for reconfigurable millimeter-wave lens arrays // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2006. Vol. 54, № 12. P. 4498–4506. doi: 10.1109/TMTT.2006.885993
7. Using reconfigurable transmitarray to achieve beam-steering and polarization manipulation applications / C. Huang, W. Pan, X. Ma, B. Zhao, J. Cui, X. Lio // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63, № 11. P. 4801–4810. doi: 10.1109/TAP.2015.2479648
8. Synthesis of shaped beam radiation patterns at mm-waves using transmit-arrays / C. C. Cruz, C. A. Fernandez, S. A. Matos, J. R. Costa // IEEE Trans. on Antenn. Propag. 2018. Vol. 66, iss. 8. P. 4017–4024. doi: 10.1109/TAP.2018.2836383
9. 1-Bit Reconfigurable Unit Cell Based on PIN Diodes for Transmit-Array Applications in X-Band / A. Clemente, L. Dussort, R. Sauleau, P. Potier, P. Pouliguen // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60, № 5. P. 2260–2269. doi: 10.1109/TAP.2012.2189716
10. A novel 1 bit wide-angle beam scanning reconfigurable transmitarray antenna using an equivalent magnetic dipole element / Y. Wang, S. Xu, F. Yang, M. Li // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2020. Vol. 68, № 7. P. 5691–5695. doi: 10.1109/TAP.2020.2964954
11. Kaouach H., Kabashi A. Simple tri-layer linearly polarized discrete lens antenna with high-efficiency for mmWave applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Let. 2015. Vol. 15, № 1. P. 259–262. doi: 10.1109/LAWP.2015.2440321
12. Characterization of tiled architecture for C-band 1-bit beam-steering transmitarray / D. Kozlov, I. Munina, P. Turalchuk, V. Kirillov // Sensors. 2021. Vol. 21, № 4. P. 1259. doi: 10.3390/s21041259
13. Enhancement of inductance Q-factor for LTCC filter design / A. Simine, D. Kholodnyak, P. Turalchuk, V. Pianitsa, H. Jantunen, I. Vendik // 2005 European Microwave Conf., Paris, France, 4–6 Oct. 2005. IEEE, 2005. doi: 10.1109/EUMC.2005.1610178
14. Wideband 400-Element Electronically Reconfigurable Transmitarray in X Band / A. Clemente, L. Dussort, R. Sauleau, P. Potier, P. Pouliguen // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. Vol. 61, № 10. P. 5017–5027. doi: 10.1109/TAP.2013.2271493
15. Kirillov V. V., Turalchuk P. A., Munina I. V. Cross-Polarization Reduction in Reconfigurable Transmitarray Unit Cell // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Moscow, St Petersburg, Russia, 26–29 Jan. 2021. IEEE, 2021. P. 137–140. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396603

### Информация об авторах

**Кириллов Виталий Витальевич** – магистр техники и технологии по направлению "Конструирование и технология электронных средств" (2018), аспирант кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 31 научной работы. Сфера научных интересов – СВЧ-электроника; антенные системы сантиметрового и миллиметрового диапазонов и их составные элементы; усилители мощности. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: vvkirillov@etu.ru

**Мунина Ирина Владимировна** – кандидат технических наук (2015), доцент кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – пассивные СВЧ-устройства; антенная техника. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: ivmunina@etu.ru

**Туральчук Павел Анатольевич** – кандидат физико-математических наук (2010), доцент кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – пассивные и активные СВЧ-устройства с использованием планарной и многослойных технологий; физическая акустика; антенная техника. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: paturalchuk@etu.ru

### References

1. Mailloux R. J. Phased Array Antenna Handbook. Norwood, Artech house, 2017, 506 p.
2. Jiang T., Wang Z., Li D., Pan J., Zhang B., Huangfu J., Salamin Y., Li C., Ran L. Low-DC Voltage-Controlled Steering-Antenna Radome Utilizing Tunable Active Metamaterial. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012, vol. 60, no. 1, pp. 170–178. doi: 10.1109/TMTT.2011.2171981
3. Sun Y., Li Z., Zhu W., Ji Z., Wang Q. New Steerable Antenna with Controllable Metamaterial. 42<sup>nd</sup> European Microwave Conf., Amsterdam, Netherlands, 29 Oct. – 01 Nov. 2012. IEEE, 2012, pp. 610–613. doi: 10.23919/EuMC.2012.6459398
4. Zhou Z., Ge N., Wang Z., Chen S. Hardware-Efficient Hybrid Precoding for Millimeter Wave Systems with Multi-Feed Reflectarrays. IEEE Access. 2018, vol. 6, pp. 6795–6806. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793223
5. Pozar D. M., Targonski S. D., Syrigos H. D. Design of Millimeter Wave Microstrip Reflectarrays. IEEE transactions on antennas and propagation. 1997, vol. 45, no. 2, pp. 287–296. doi: 10.1109/8.560348
6. Cheng C. C., Abbaspour-Tamijani A. Study of 2-Bit Antenna-Filter-Antenna Elements for Reconfigurable Millimeter-Wave Lens Arrays. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006, vol. 54, no. 12, pp. 4498–4506. doi: 10.1109/TMTT.2006.885993
7. Huang C., Pan W., Ma X., Zhao B., Cui J., Lio X. Using Reconfigurable Transmitarray to Achieve Beam-Steering and Polarization Manipulation Applications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015, vol. 63, no. 11, pp. 4801–4810. doi: 10.1109/TAP.2015.2479648
8. Cruz C. C., Fernandez C. A., Matos S. A., Costa J. R. Synthesis of Shaped Beam Radiation Patterns at mm-Waves Using Transmit-Arrays. IEEE Trans. on Anten. Propag. 2018, vol. 66, iss. 8, pp. 4017–4024. doi: 10.1109/TAP.2018.2836383
9. Clemente A., Dussport L., Sauleau R., Potier P., Pouliguen P. 1-Bit Reconfigurable Unit Cell Based on PIN Diodes for Transmit-Array Applications in X-Band. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012, vol. 60, no. 5, pp. 2260–2269. doi: 10.1109/TAP.2012.2189716
10. Wang Y., Xu S., Yang F., Li M. A Novel 1 Bit Wide-Angle Beam Scanning Reconfigurable Transmitarray Antenna Using an Equivalent Magnetic Dipole Element. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2020, vol. 68, no. 7, pp. 5691–5695. doi: 10.1109/TAP.2020.2964954
11. Kaouach H., Kabashi A. Simple Tri-Layer Linearly Polarized Discrete Lens Antenna with High-Efficiency for mmWave Applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Let. 2015, vol. 15, no. 1, pp. 259–262. doi: 10.1109/LAWP.2015.2440321
12. Kozlov D., Munina I., Turalchuk P., Kirillov V. Characterization of Tiled Architecture for C-band 1-bit Beam-Steering Transmitarray. Sensors. 2021, vol. 21, no. 4, p. 1259. doi: 10.3390/s21041259
13. Simine A., Kholodnyak D., Turalchuk P., Piantisa V., Jantunen H., Vendik I. Enhancement of Inductance Q-factor for LTCC Filter Design. 2005 European Microwave Conf., Paris, France, 4–6 Oct. 2005. IEEE, 2005. doi: 10.1109/EUMC.2005.1610178

14. Clemente A., Dussopt L., Sauleau R., Potier P., Pouliguen P. Wideband 400-Element Electronically Reconfigurable Transmitarray in X Band. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013, vol. 61, no. 10, pp. 5017–5027. doi: 10.1109/TAP.2013.2271493

15. Kirillov V. V., Turalchuk P. A., Munina I. V. Cross-Polarization Reduction in Reconfigurable Transmitarray Unit Cell. IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Moscow, St Petersburg, Russia, 26–29 Jan. 2021. IEEE, 2021, pp. 137–140. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396603

### Information about the authors

**Vitalii V. Kirillov**, Master in Design and technology of electronic means (2018), Postgraduate student of the Department of Microradioelectronics and Technology of Radio Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University. The author and co-author of 31 scientific publications. Area of expertise: microwave electronics, antenna systems for centimeter and millimeter range and their components, power amplifiers.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: vvkirillov@etu.ru

**Irina V. Munina**, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor of the Department of Microradioelectronics and Technology of Radio Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: passive microwave devices, antenna technology.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: ivmunina@etu.ru

**Pavel A. Turalchuk**, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2010), Associate Professor of the Department of Microradioelectronics and Technology of Radio Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: passive and active microwave devices using planar and multilayer technologies, physical acoustics, antenna technology.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: paturalchuk@etu.ru

---