

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.396.67.012.12

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-37-47>

## Разборная отражательная антенная решетка Ку-диапазона частот на основе микрополоскового элемента в виде мальтийского креста

С. В. Поленга<sup>✉</sup>, Р. О. Рязанцев, А. Д. Полигина,  
Р. М. Крылов, Е. А. Литинская, Ю. П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>✉</sup> [twinlive@gmail.com](mailto:twinlive@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Отражательные антенные решетки (ОАР) обладают рядом конструктивных и функциональных преимуществ относительно ближайшего аналога – зеркальных антенн (ЗА). Наиболее предпочтительными элементами ОАР являются микрополосковые, однако однослойные микрополосковые элементы зачастую не позволяют точно скорректировать фазу в ОАР из-за ограниченного диапазона фазовой регулировки и высокой крутизны фазовой кривой. Использование многослойных элементов заметно усложняет и удорожает конструкцию антенны. В связи с этим актуален поиск однослойных элементов, обеспечивающих фазовую регулировку более  $360^\circ$  с малой крутизной фазовой кривой.

**Цель работы.** Разработка однослойного микрополоскового фазокорректирующего элемента отражательного типа с диапазоном регулировки более  $360^\circ$  и создание на его основе ОАР для работы в сетях спутниковой связи.

**Материалы и методы.** Численные исследования проведены методом конечных элементов и методом конечных разностей во временной области. Характеристики направленности измерялись сканированием ближнего поля в безэховой камере.

**Результаты.** Разработан фазокорректирующий элемент на основе однослойного микрополоскового резонатора в виде мальтийского креста с близкой к линейной зависимостью фазы отраженной волны от размера элемента, обеспечивающий диапазон фазовой регулировки более  $360^\circ$ . На основе исследованного элемента разработана и изготовлена разборная конструкция ОАР, в которой рефлектор состоит из четырех подрешеток, что обеспечивает компактное свертывание ОАР для транспортировки. Результаты экспериментальных исследований показали высокую эффективность ОАР, коэффициент усиления (КУ) которой на 1.5 дБ ниже КУ ЗА идентичных габаритных размеров в относительной полосе рабочих частот (ОПРЧ) 7 %. ОПРЧ ОАР по уровню снижения КУ на 1 дБ составила 11 %.

**Заключение.** На основе элемента в виде мальтийского креста возможна реализация однослойных ОАР с ОПРЧ более 10 %. Разработанный макет показал возможность создания высокоэффективных сворачиваемых ОАР для работы в составе терминалов спутниковой связи и телевидения.

**Ключевые слова:** отражательная антенная решетка, ячейка Флоке, микрополосковый элемент

**Для цитирования:** Разборная отражательная антенная решетка Ку-диапазона частот на основе микрополоскового элемента в виде мальтийского креста / С. В. Поленга, Р. О. Рязанцев, А. Д. Полигина, Р. М. Крылов, Е. А. Литинская, Ю. П. Саломатов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 37–47. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-37-47

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

**Источник финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-47-240003.

Статья поступила в редакцию 10.06.2021; принята к публикации после рецензирования 08.07.2021; опубликована онлайн 25.09.2021



## A Ku-Band Foldable Reflectarray Based on a Maltese-Cross Microstrip Element

Stanislav V. Polenga<sup>✉</sup>, Roman O. Ryazantsev, Anastasiya D. Poligina,  
Roman M. Krylov, Elena A. Litinskaya, Yury P. Salomatov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

✉ twinlive@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Reflectarrays have a number of design and functional advantages over their closest analogue - reflector antennas (RA). Although microstrip elements are the most preferred reflectarray elements, single-layer microstrip elements do not allow accurate phase control due to the limited phase adjustment range and a high phase slope. The use of multilayer elements significantly complicates the antenna design and increases its cost. The development of a single-layer element that allows more than 360° phase adjustment and a low phase curve slope is urgent.

**Aim.** To develop a single-layer microstrip phase-correcting element with a phase adjustment range of more than 360° and to design a reflectarray on its basis for operation in satellite communication networks.

**Materials and methods.** Numerical studies were carried out using finite element analysis and the finite-difference time-domain method. Radiation patterns were measured using the near-field scanning method in an anechoic chamber.

**Results.** A phase-correcting element based on a single-layer Maltese cross-shaped microstrip element with close to linear dependence of element size on the phase of the reradiated wave and more than 360° phase adjustment range was developed. On the basis of the investigated element, a foldable reflectarray was designed. The reflector consists of four subarrays, which provide its compact folding for transportation. The results of experimental studies confirmed a high efficiency of the reflectarray, the gain of which is 1.5 dB lower than that of an identical overall dimensions RA in a 7 % operating frequency band. The operating frequency band of the reflectarray in 1 dB gain zone was 11 %.

**Conclusion.** On the basis of a Maltese cross microstrip element, it is possible to implement a single-layer reflectarray with a more than 10 % frequency band. The developed prototype showed the possibility of creating highly efficient foldable reflectarrays for operation in satellite communication and television terminals.

**Keywords:** reflectarray, Floquet cell, microstrip element

**For citation:** Polenga S. V., Ryazantsev R. O., Poligina A. D., Krylov R. M., Litinskaya E. A., Salomatov Yu. P. A Ku-Band Foldable Reflectarray Based on a Maltese-Cross Microstrip Element. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 37–47. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-37-47

**Conflict of interest.** Authors declare no conflicts of interest.

**Financing source.** The research was funded by RFBR, Krasnoyarsk Territory and Krasnoyarsk Regional Fund of Science, project number 20-47-240003.

Submitted 10.06.2021; accepted 08.07.2021; published online 25.09.2021

**Введение.** Отражательные антенные решетки (ОАР) обладают рядом преимуществ перед традиционно используемыми в спутниковой связи зеркальными антеннами (ЗА). ОАР могут быть совмещены с конструктивными элементами различных объектов, таких, как стены зданий, рекламные баннеры [1], солнечные батареи телекоммуникационных спутников [2, 3]. ОАР могут

иметь плоскую форму, что значительно облегчает создание разборных и сворачиваемых конструкций [4]. Плоская форма решетки позволяет изготавливать антенны методами фотолитографии [1, 4], лазерной резки [5] и 3D-печати [6, 7]. Возможность независимой установки фазы на каждом из элементов решетки позволяет использовать методы фазового синтеза и создавать ОАР

с диаграммами направленности специальной формы [8, 9].

Несмотря на ряд преимуществ, ОАР имеют главный недостаток – узкую полосу рабочих частот [10–12]. Существует несколько основных факторов, ограничивающих диапазон рабочих частот: фиксированная фазовая настройка элементов в составе решетки, зонирование, ограниченная полоса рабочих частот элементов, ограниченный диапазон регулировки их фазы. Простые однослойные микрополосковые элементы (МЭ) не позволяют добиться диапазона регулировки фазы переизлученной волны, равного  $360^\circ$ ; как правило, диапазон регулировки ограничивается  $300 \dots 320^\circ$  в зависимости от толщины подложки. Использование многослойных элементов позволяет значительно расширить диапазон регулировки и сделать фазовую кривую более пологой [13], что снижает влияние погрешностей при производстве топологии ОАР на характеристики антенной системы. Однако использование в составе ОАР многослойных элементов [14, 15] значительно увеличивает сложность антенной системы, а соответственно, и ее стоимость. При использовании двухслойной конфигурации вдвое возрастают затраты на диэлектрическую подложку и на изготовление топологии. Таким образом, актуальным является поиск элементов ОАР, обеспечивающих диапазон регулировки более  $360^\circ$  и малую крутизну фазовой характеристики во всем диапазоне фазовой регулировки.

#### Элемент отражательной антенной решетки.

Для разработки ОАР использован элемент в виде креста с расширяющимися гранями (рис. 1). Расчет элемента производился методом ячейки Флоке [16], который позволяет учесть взаимосвязь элементов

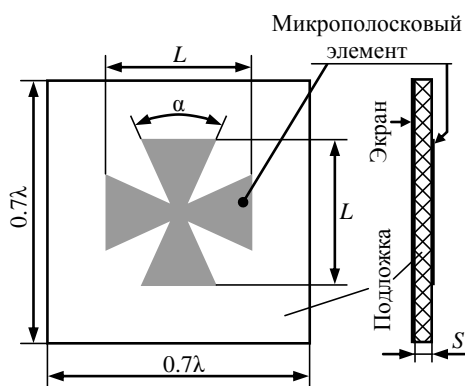


Рис. 1. Элемент ОАР на основе резонатора в форме мальтийского креста

Fig. 1. Reflectarray element based on a Maltese cross shaped resonator

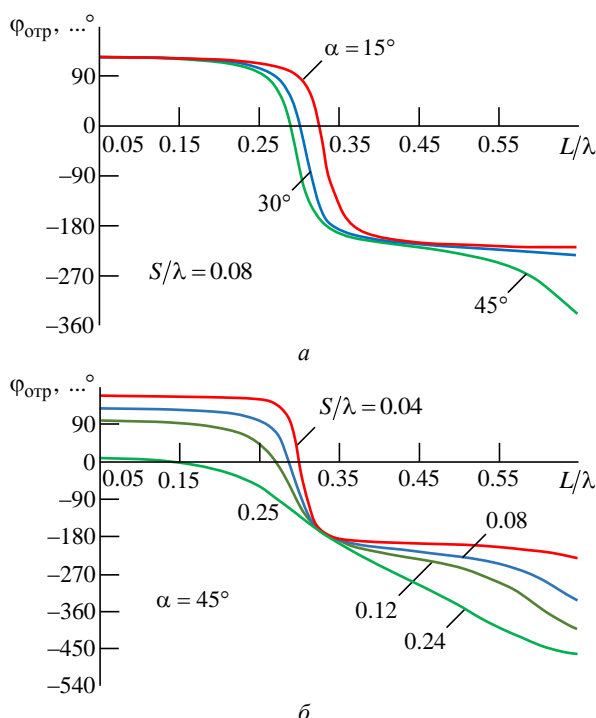


Рис. 2. Зависимость фазы отраженной волны от размера элемента при различных углах расширения луча  $\alpha$  (а); при различной толщине подложки для  $\alpha = 45^\circ$  (б)

Fig. 2. Dependence of the phase of the reflected wave on the  $L$ : а – for different angles of beam expansion; б – for different substrates thicknesses at  $\alpha = 45^\circ$

в составе решетки. Возбуждение элемента предусмотрено одним портом.

В качестве материала подложки выбран вспененный полиэтилен с эффективной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 1.05$ . В связи с малой плотностью материала потери в нем пренебрежимо малы. Топология элемента описывается двумя параметрами: длиной креста  $L$  и углом расширения его луча  $\alpha$ . Проводящий слой МЭ и экран имеют толщину 35 мкм.

На рис. 2, а показана зависимость фазы отраженной волны  $\Phi_{отр}$  от длины стороны элемента при толщине подложки  $S/\lambda = 0.08$  ( $\lambda$  – длина волны на центральной частоте). При  $\alpha \leq 30^\circ$  характеристика предложенного элемента совпадает с характеристикой обычного крестообразного элемента [17]. По мере увеличения угла  $\alpha$  до  $45^\circ$  возможности регулировки фазы отраженной волны расширяются за счет появления ее зависимости от размера элемента при  $L > 0.5\lambda$ .

На рис. 2, б показаны фазовые зависимости для четырех значений толщины подложки при  $\alpha = 45^\circ$ . Диапазон регулировки фазы достигает  $500^\circ$  при  $S/\lambda = 0.12$ . В таком случае может быть

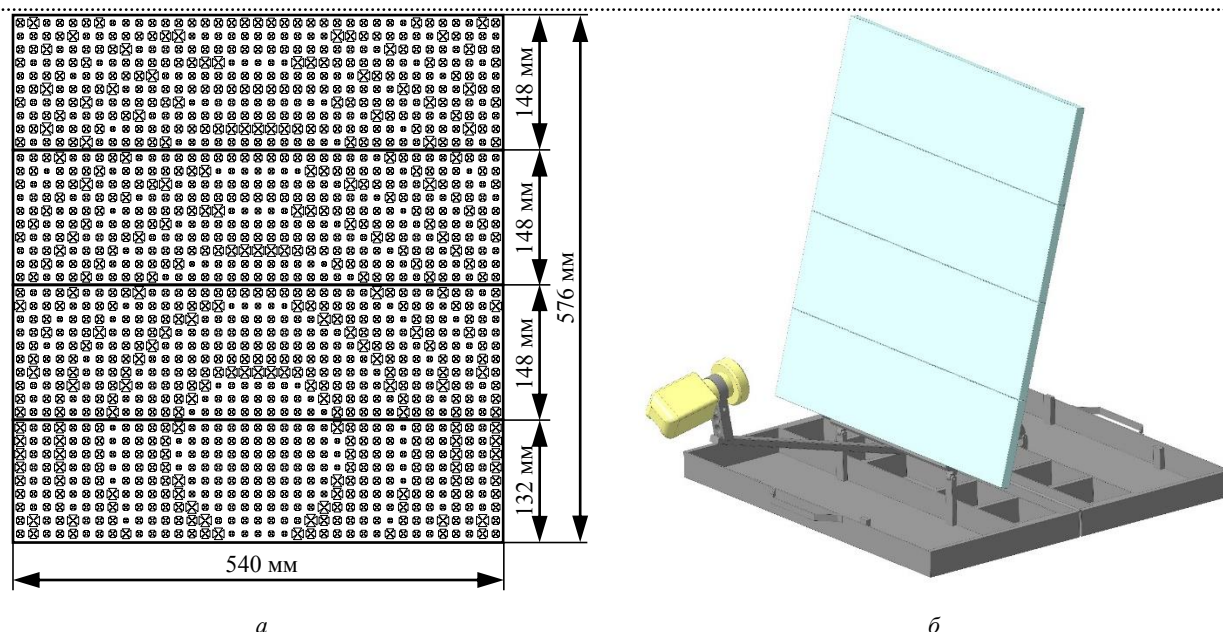


Рис. 3. Разборная отрагательная антенная решетка: а – топология; б – конструкция ОАР

Fig. 3. Foldable reflectarray: a – topology; б – reflectarray design

выбран удобный, наиболее линейный участок кривой для построения ОАР. Шаг решетки может быть уменьшен до  $0.55\lambda$  с сохранением диапазона регулировки равным  $360^\circ$ . Дальнейшее увеличение толщины подложки повышает линейность регулировочной кривой практически во всем диапазоне регулировки фазы. Таким образом, на основе представленного элемента может быть разработан однослойная ОАР без ошибок в фазовом распределении на центральной частоте, вызванных ограниченным диапазоном фазовой регулировки.

**Разработка отрагательной антенной решетки.** На основе рассмотренного элемента была синтезирована топология ОАР (рис. 3, а). Решетка содержит  $37 \times 39$  элементов, расположенных с шагом 14.5 мм ( $0.6\lambda$ ). Для преобразования сферического фазового фронта волны облучателя в плоский фазовый фронт антенной системы в составе ОАР предусмотрены МЭ трех размеров, формирующие отраженную волну с различными фазами, расположенные в необходимой конфигурации<sup>1</sup>.

Для формирования складной конструкции ОАР разбита на 4 подрешетки (рис. 3). Нижняя по топологии подрешетка (рис. 3, а) имеет уменьшенный вертикальный размер и на один ряд меньше МЭ. В силу технологических ограничений расстояние

между крайними рядами МЭ подрешеток увеличено на 2.5 мм.

Для ликвидации затенения решетки облучателем выбран угол подъема луча  $12^\circ$  относительно перпендикуляра к плоскости решетки (рис. 3, б). Конфигурация питания офсетная.

Фокусное расстояние составило 300 мм, размеры ОАР  $540 \times 576$  мм. Габаритные размеры решетки выбраны близкими к габаритным размерам ЗА "Супрал СТВ-0.55" ( $560 \times 600$  мм), используемой в сетях спутникового телевидения, с целью дальнейшего сравнительного анализа характеристик антенных систем.

**Изготовление макета отрагательной антенной решетки.** Макет ОАР представлен на рис. 4, а. В основании подрешеток использован листовой вспененный поливинилхлорид толщиной 10 мм. Печатная плата с элементами ОАР изготовлена из фольгированного лавсана толщиной 0.15 мм методом фотолитографии. Подложка выполнена из вспененного полиэтилена. Монтаж слоев основания, экрана, подложки и печатной платы с элементами ОАР между собой производился с использованием двухсторонней клейкой ленты. Для защиты от внешних воздействий подрешетки ОАР закрыты обтекателем, изготовленным из листового полиэтилентерефталата толщиной 1 мм. В сложенном состоянии антенна представляет собой кейс размерами  $590 \times 280 \times 83$  мм (рис. 4, б, в), внутри которого размещаются все

<sup>1</sup> В ЗА, с характеристиками которой сопоставляются характеристики разработанной ОАР, преобразование фазового фронта достигается за счет разности длин хода лучей.



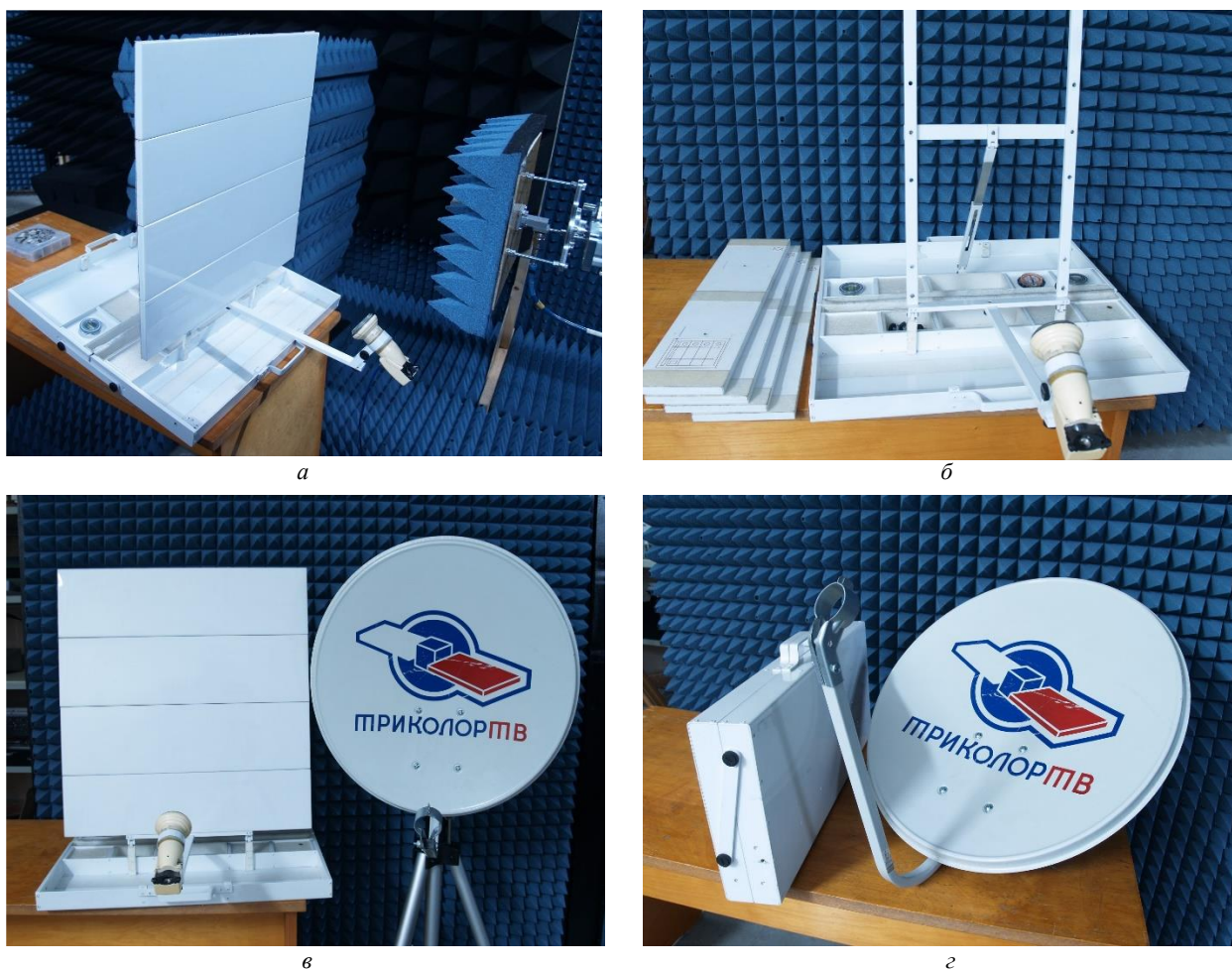


Рис. 4. Исследуемые антенные системы: а – ОАР в процессе измерений; б – ОАР в частично разобранном состоянии; в – ЗА и ОАР в развернутом состоянии; з – ЗА и ОАР в сложенном состоянии

Fig. 4. Antenna systems under study: а – reflectarray on the measurements; б – reflectarray in a partially disassembled state; в – reflector antenna and reflectarray in the unfolded state; з – reflector antenna and reflectarray in the folded state

элементы конструкции при транспортировке. В развернутом состоянии кейс является основанием ОАР. Конструкцией предусмотрена регулировка антенны по углу места.

На рис. 4, в, з для сравнения представлены фотографии разработанной ОАР с ЗА в развернутом и сложенном состояниях. В свернутом состоянии ОАР занимает небольшой объем и более удобна для транспортировки. Все элементы конструкции защищены от внешних воздействий алюминиевым кейсом.

**Результаты экспериментальных исследований.** Направленные характеристики антенн измерялись методом сканирования амплитудно-фазового распределения в ближнем поле антенны (рис. 4, а) с последующим пересчетом характеристики в дальнюю зону.

Коэффициент усиления (КУ)  $G$  измерялся методом эталонной антенны, в качестве которой ис-

пользована антенна П6-128<sup>2</sup> с пределами допускаемой погрешности измерения КУ  $\pm 1.5$  дБ.

В качестве облучателя использован гофрированный рупор Ку-диапазона частот с установленными коаксиальными разъемами. Коэффициент стоячей волны облучателя составляет не более двух во всем исследуемом диапазоне частот. В целях сравнительного анализа измерены характеристики ЗА с использованием этого же облучателя.

Измеренные диаграммы направленности представлены на рис. 5.

Во всех случаях уровень боковых лепестков (УБЛ) ОАР оказался выше, чем у ЗА. Это связано с тем, что площадь поверхности, отражающей периферийное излучение облучателя, у ОАР

<sup>2</sup> Антенна измерительная рупорная широкополосная П6-128. Паспорт КНПР.464663.002 ПС / ЗАО "СКАРД-Электроникс". 2014. 14 с.

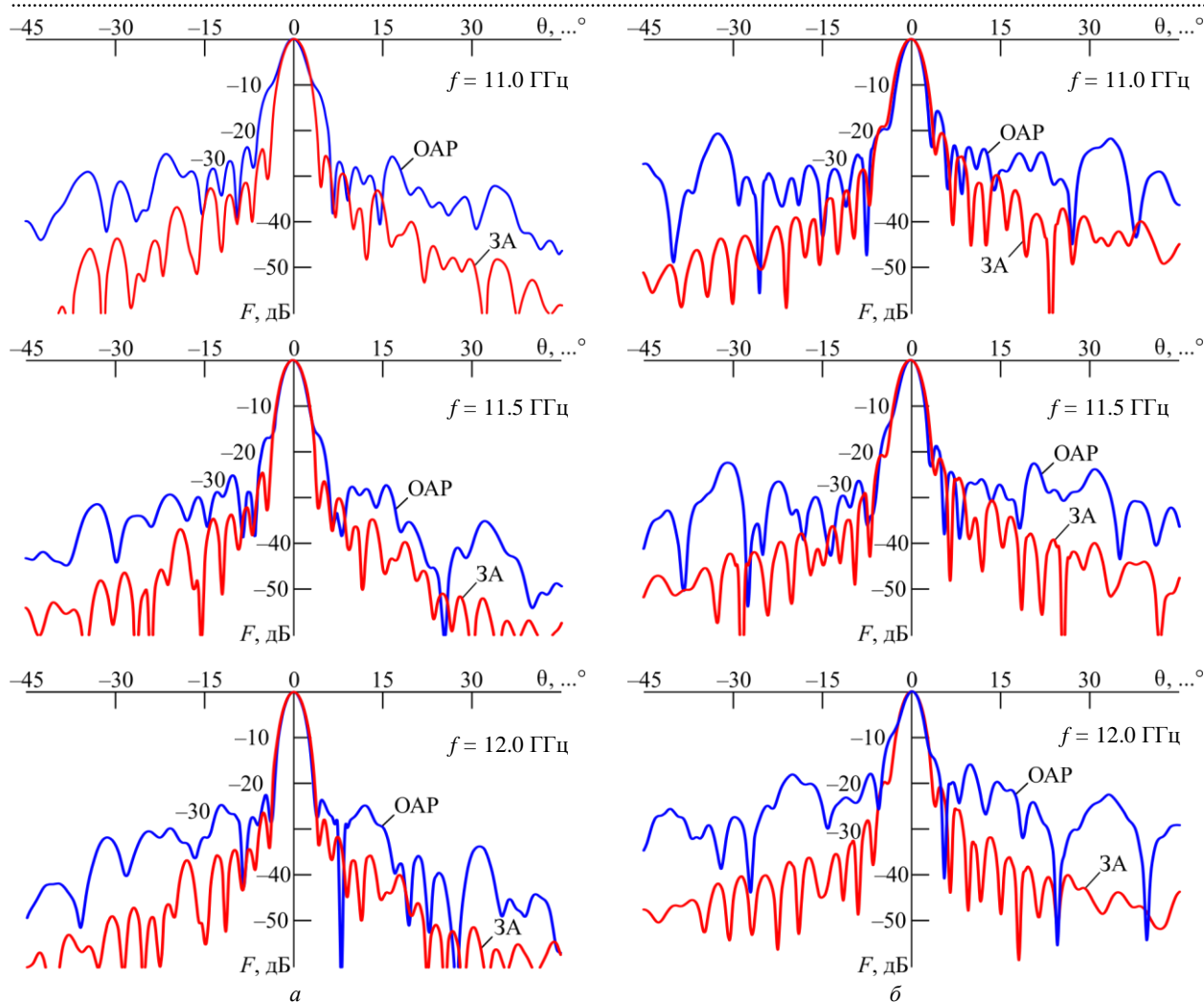


Рис. 5. Диаграммы направленности ОАР и ЗА: а – азимутальное сечение; б – угловое сечение.  
Результаты измерений

Fig. 5. Radiation patterns of reflectarray and parabolic reflector antenna: а – azimuth section; б – elevation section.  
Measurement results

больше, чем у ЗА, за счет прямоугольной формы. Помимо этого, коррекция фазового распределения в ОАР выполняется дискретно, а не непрерывно, как это происходит в ЗА. За счет более равномерного амплитудного распределения ОАР обладает более узкими диаграммами направленности в рабочей полосе частот, чем ЗА.

Частотные зависимости ширины диаграммы направленности (ШДН)  $W$  по уровню  $-3$  дБ и уровня максимального бокового лепестка  $U$  приведены на рис. 6, а, б соответственно. В рабочей полосе частот уровень максимального бокового лепестка ОАР не превышает  $-15$  дБ в угловом и  $-20$  дБ в азимутальных плоскостях. За пределами рабочей полосы частот наблюдается повышение бокового излучения.

ШДН ЗА в двух плоскостях отличаются незначительно. Это связано с тем, что эффективная

апертура в направлении излучения близка к окружности. Напротив, эффективный размер апертуры ОАР в угловой плоскости больше, чем в азимутальной, за счет чего наблюдается дополнительное сужение ШДН.

Измеренные значения коэффициента направленного действия (КНД) и КУ ЗА отличаются в среднем на  $1.6$  дБ (рис. 6, а) в исследуемом диапазоне частот ( $10.7 \dots 12$  ГГц). В этих значениях учитываются потери в материалах антенн, потери на рассогласование облучателя, погрешности метода измерения и погрешности эталонной антенны. Указанные погрешности можно считать одинаковыми для обеих антенн, поскольку в исследованиях использовался один и тот же облучатель и одна и та же измерительная установка. Потери в рефлекторе ЗА методом электродинамического моделирования оценены в  $0.1$  дБ. На основании

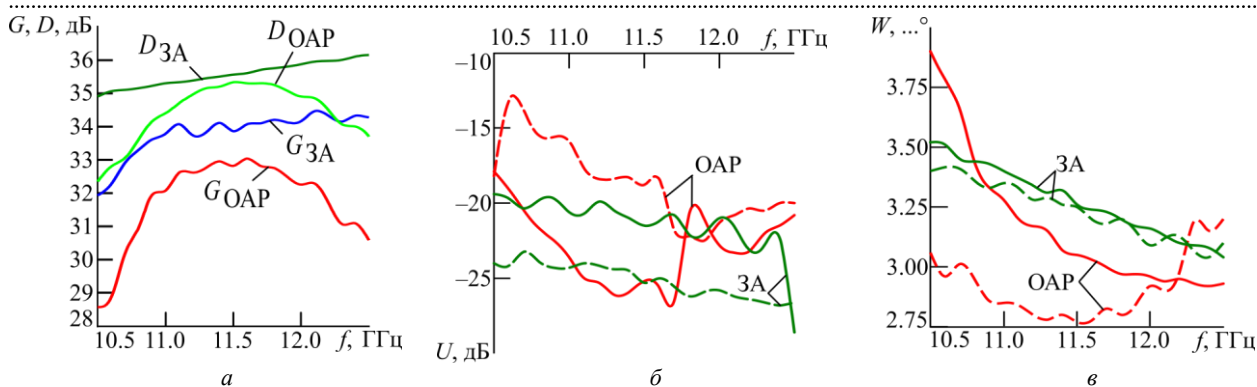


Рис. 6. Измеренные характеристики ОАР и ЗА: а – КУ и КНД; б – УБЛ; в – ШДН. Сплошные линии – азимутальное сечение; штриховые линии – угломестное сечение

Fig. 6. Measured characteristics of reflectarray and parabolic reflector antenna: а – gain and directivity; б – sidelobe level; в – beamwidth. Solid lines – azimuth section; dashed lines – elevation section

полученных данных (рис. 6, а) могут быть оценены потери в диэлектрических и проводящих слоях ОАР. Отличие КУ от КНД ОАР в среднем составляет 2.4 дБ. Таким образом, потери в ОАР составляют около 0.9 дБ, или на 0.8 дБ больше, чем в ЗА. Минимальное различие КНД ОАР и ЗА наблюдается на частоте 11.5 ГГц и составляет 0.23 дБ, что свидетельствует о высоком апертурном коэффициенте использования поверхности ОАР на центральной частоте. Фактическая площадь ОАР больше площади ЗА за счет прямоугольной формы рефлектора, однако углы решетки облучаются с меньшей амплитудой и их вклад в КУ минимален. Полоса рабочих ОАР-частот по уровню снижения КУ в 1 дБ составляет 11 %.

Помимо измерений в безэховой камере производились испытания антенны на реальном спутниковом сигнале в сети спутникового телевидения.

Разница в уровнях принимаемого сигнала ОАР и ЗА коррелирует с результатами, полученными в рамках лабораторных измерений. ОАР продемонстрировала уверенный прием радиосигналов с геостационарного спутника.

**Заключение.** Результаты исследования демонстрируют возможность создания ОАР для работы в сетях спутниковой связи. Использование однослойного МЭ в виде мальтийского креста позволило реализовать ОАР с полосой рабочих частот 11 % по уровню КУ –1 дБ от максимального. ОАР демонстрирует высокую эффективность, сравнимую с эффективностью ЗА. Плоская форма ОАР позволяет компактно сворачивать конструкцию, что актуально не только для мобильных терминалов, но и для транспортировки антенн с большой апертурой в регионы с затрудненной транспортной доступностью.

### Авторский вклад

**Поленга Станислав Владимирович** – расчет элементов, синтез топологии ОАР, экспериментальные исследования ОАР.

**Рязанцев Роман Олегович** – изготовление топологии ОАР, натурные испытания макета ОАР.

**Полигина Анастасия Дмитриевна** – моделирование элементов ОАР, обработка теоретических данных.

**Крылов Роман Михайлович** – разработка и изготовление конструкции ОАР.

**Литинская Елена Алексеевна** – моделирование ОАР, обработка экспериментальных данных.

**Саломатов Юрий Петрович** – общее руководство проектом.

### Author's contribution

**Stanislav V. Polenga**, calculation of elements, synthesis of reflectarray topology, experimental studies of reflectarray.

**Roman O. Ryazantsev**, production of the reflectarray topology, full-scale tests of the reflectarray layout.

**Anastasya D. Poligina**, modeling of reflectarray elements, processing of theoretical data.

**Roman M. Krylov**, development of the UAR design, manufacture of the UAR.

**Elena A. Litinskaya**, reflectarray modeling, experimental data processing.

**Yuri P. Salomatov**, general project management.

### Список литературы

1. A Ku-band foldable reflectarray / S. V. Polenga, A. V. Stankovsky, Y. A. Litinskaya, R. M. Krylov, A. M. Alexandrin, Y. P. Salomatov // XIV Intern. Scientific-Technical Conf. on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia, 2–6 Oct. 2018. Piscataway: IEEE, 2018. Acc. № 18303692. doi: 10.1109/APEIE.2018.8545456
2. Chen Y. S., Wu Y. H., Chung C. C. Solar-powered active integrated antennas backed by a transparent reflectarray for cubesat applications // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 137934–137946. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3012133
3. A Ka-band high-efficiency transparent reflectarray antenna integrated with solar cells / W. An, L. Xiong, S. Xu, F. Yang, H. Fu, J. Ma // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 60843–60851. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2875359
4. Отражательная антенная решетка для сетей дуплексной спутниковой связи технологии VSAT / С. В. Поленга, Е. А. Литинская, Ю. П. Саломатов, Р. М. Крылов // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 39–42.
5. Ballandovich S. V., Liubina L. M., Sugak M. I. Investigation of slot reflectarray antennas // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, 14–16 March 2018. Piscataway: IEEE, 2018. Acc. № 17715494. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337282
6. 3D printed reflectarray antenna at 60 GHz / B. Chen, H. Yi, K. B. Ng, S. Qu, C. H. Chan // Intern. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP), Okinawa, Japan, 24–28 Oct. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. Acc. № 16602081.
7. Wideband 3D-printed reflectarray of closed-volume elements / Y. Antonov, S. Ballandovich, G. Kostikov, L. Liubina, M. Sugak // 10<sup>th</sup> Intern. Congress on ultra modern telecommunications and control systems and workshops (ICUMT), Moscow, Russia, 5–9 Nov. 2018. Piscataway: IEEE, 2018. Acc. № 18439590. doi: 10.1109/ICUMT.2018.8631236
8. A Ka-band shaped-beam circularly polarized reflectarray antenna / S. V. Polenga, A. A. Erokhin, R. M. Krylov, A. V. Stankovsky, Y. A. Litinskaya, A. D. Hudonogova, I. Y. Danilov, Yu. P. Salomatov // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019. Piscataway: IEEE, 2019. Acc. № 18904513. doi: 10.1109/RSEMW.2019.8792697
9. Zhao G., Jiao Y., Zhang F. Broadband design of a shaped beam reflectarray with China coverage pattern // Proc. of the 9<sup>th</sup> Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory, Guangzhou, China, 29 Nov.– 2 Dec. 2010. Piscataway: IEEE, 2010. Acc. № 11772827. doi: 10.1109/IS-APE.2010.5696447
10. Analysis of multi-faceted reflectarray antenna for spatial bandwidth improvement / V. Patel, P. Mevada, D. Pujara, S. Chakrabarty, M. Mahajan // IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, Canada, 5–10 July 2020. Piscataway: IEEE, 2020. Acc. № 20465479. doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329895
11. Impact of feed position on the operating band of broadband reflectarray antenna / M. Mohammadirad, N. Komjani, M. R. Chaharmir, J. Shaker, A. R. Sebak // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2012. Vol. 11. P. 1104–1107. doi: 10.1109/LAWP.2012.2218563
12. Carrasco E., Encinar J. A., Barba M. Bandwidth improvement in large reflectarrays by using true-time delay // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2008. Vol. 56, № 8. P. 2496–2503. doi: 10.1109/TAP.2008.927559
13. Encinar J. A. Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2001. Vol. 49, № 10. P. 1403–1410. doi: 10.1109/8.954929
14. ANN characterization of multi-layer reflectarray elements for contoured-beam space antennas in the Ku-band / P. Robustillo, J. Zapata, J. A. Encinar, J. Rubio // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60, № 7. P. 3205–3214. doi: 10.1109/TAP.2012.2196941
15. Study on three-layer refelectarray microstrip patches with polarisation transform / H.-H. Chen, W.-X. Zhang, Z.-H. Wu, H.-L. Sun // First Europ. Conf. on Antennas and Propagation, Nice, France, 6–10 Nov. 2006. Piscataway: IEEE, 2018. Acc. № 10152828. doi: 10.1109/EUCAP.2006.4584622
16. Capacitive loading effect of dual element reconfigurable reflectarray unit cell / M. A. Daud, N. Misran, M. F. Mansor, M. Y. Ismail // IEEE 14<sup>th</sup> Malaysia Intern. Conf. on Communication (MICC), Selangor, Malaysia, 2–4 Dec. 2019. Piscataway: IEEE, 2019. Acc. № 19471408. doi: 10.1109/MICC48337.2019. 9037584
17. A design of a broadband single layer polarization beam splitting reflectarray using varying-sized cross dipoles / S. Yu, H. Zhang, S. Liu, B. Bian // Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS), St Petersburg, Russia, 22–25 May 2017. Piscataway: IEEE, 2017. Acc. № 17521116. doi: 10.1109/PIERS.2017.8261835



## Информация об авторах

**Поленга Станислав Владимирович** – магистр по направлению "Радиотехника" (2009), старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета (СФУ). Автор 50 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства, отражательные антенные решетки, квазиоптические антенны, метаматериалы.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: twinlive@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1375-2629>

**Рязанцев Роман Олегович** – кандидат технических наук (2019), доцент кафедры радиотехники СФУ. Автор 28 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства, метаматериалы, квазиоптические антенны.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: rryazantsev@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1747-0917>

**Полигина Анастасия Дмитриевна** – магистр по направлению "Радиотехника" (2021). Автор четырех научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: anastasia0711@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5810-7626>

**Крылов Роман Михайлович** – инженер по специальности "Конструирование и проектирование РЭА" (2009, СФУ), инженер кафедры радиотехники СФУ. Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – конструирование и проектирование РЭА, антенны и СВЧ-устройства.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: krulow\_roman@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0899-8595>

**Литинская Елена Алексеевна** – магистр по направлению "Радиотехника" (2011), аспирант, старший преподаватель кафедры радиотехники СФУ. Автор 29 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства, спутниковая связь, сканирующие антенны.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: ylitinskaya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4442-8047>

**Саломатов Юрий Петрович** – кандидат технических наук (1982), профессор (2013) кафедры радиотехники СФУ. Автор 240 научных работ. Сфера научных интересов – ФАР, ЦФАР, квазиоптические антенны.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>

## References

1. Polenga S. V., Stankovsky A. V., Litinskaya Y. A., Krylov R. M., Alexandrin A. M., Salomatov Y. P. A Ku-band foldable reflectarray. XIV Intern. Scientific-Technical Conf. on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia, 2–6 Oct. 2018. Piscataway, IEEE, 2018, acc. no. 18303692. doi: 10.1109/APEIE.2018.8545456
2. Chen Y. S., Wu Y. H., Chung C. C. Solar-powered active integrated antennas backed by a transparent reflectarray for cubesat applications. IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 137934–137946. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3012133
3. An W., Xiong L., Xu S., Yang F., Fu H., Ma J. A Ka-band high-efficiency transparent reflectarray antenna integrated with solar cells. IEEE Access. 2018, vol. 6, pp. 60843–60851. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2875359
4. Polenga S. V., Litinskaya Y. A., Salomatov Y. P., Krylov R. M. Reflectarray antenna for bidirectional VSAT satellite communication networks. Achievements of modern radioelectronics. 2012, no. 9, pp. 39–42.
5. Ballandovich S. V., Liubina L. M., Sugak M. I. Investigation of slot reflectarray antennas. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, Russia, 14–16 March 2018. Piscataway, IEEE, 2018, acc. no. 17715494. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337282
6. Chen B., Yi H., Ng K. B., Qu S., Chan C. H. 3D printed reflectarray antenna at 60 GHz. Intern. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP). Okinawa, Japan, 24–28 Oct. 2016. Piscataway, IEEE, 2016, acc. no. 16602081.
7. Antonov Y., Ballandovich S., Kostikov G., Liubina L., Sugak M. Wideband 3D-printed reflectarray of closed-vol-

ume elements. 10<sup>th</sup> Intern. Congress on ultra modern telecommunications and control systems and workshops (ICUMT). Moscow, Russia, 5–9 Nov. 2018. Piscataway, IEEE, 2018, acc. no. 18439590. doi: 10.1109/ICUMT.2018.8631236

8. Polenga S. V., Erokhin A. A., Krylov R. M., Stankovsky A. V., Litinskaya Y. A., Hudonogova A. D., Danilov I. Y., Salomatov Yu. P. A Ka-band shaped-beam circularly polarized reflectarray antenna. Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019. Piscataway, IEEE, 2019, acc. no. 18904513. doi: 10.1109/RSEMW.2019.8792697

9. Zhao G., Jiao Y., Zhang F. Broadband design of a shaped beam reflectarray with China coverage pattern. Proc. of the 9<sup>th</sup> Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory. Guangzhou, China, 29 Nov. – 2 Dec. 2010. Piscataway, IEEE, 2010, acc. no. 11772827. doi: 10.1109/ISAPE.2010.5696447

10. Patel V., Mevada P., Pujara D., Chakrabarty S., Mahajan M. Analysis of multi-faceted reflectarray antenna for spatial bandwidth improvement. IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. Montreal, Canada, 5–10 July 2020. Piscataway, IEEE, 2020, acc. no. 20465479. doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329895

11. Mohammadirad M., Komjani N., Chaharmir M. R., Shaker J., Sebak A. R. Impact of feed position on the operating band of broadband reflectarray antenna. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2012, vol. 11, pp. 1104–1107. doi: 10.1109/LAWP.2012.2218563

12. Carrasco E., Encinar J. A., Barba M. Bandwidth improvement in large reflectarrays by using true-time delay.

IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2008, vol. 56, no. 8, pp. 2496–2503. doi: 10.1109/TAP.2008.927559

13. Encinar J. A. Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2001, vol. 49, no. 10, pp. 1403–1410. doi: 10.1109/8.954929

14. Robustillo P., Zapata J., Encinar J. A., Rubio J. ANN characterization of multi-layer reflectarray elements for contoured-beam space antennas in the Ku-band. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2012, vol. 60, no. 7, pp. 3205–3214. doi: 10.1109/TAP.2012.2196941

15. Chen H.-H., Zhang W.-X., Wu Z.-H., Sun H.-L. Study on three-layer refelectarray microstrip patches with polarisation transform. First Europ. Conf. on Antennas and Propagation. Nice, France, 6–10 Nov. 2006. Piscataway, IEEE, 2018, acc. no. 10152828. doi: 10.1109/EUCAP.2006.4584622

16. Daud M. A., Misran N., Mansor M. F., Ismail M. Y. Capacitive loading effect of dual element reconfigurable reflectarray unit cell. IEEE 14<sup>th</sup> Malaysia Intern. Conf. on Communication (MICC). Selangor, Malaysia, 2–4 Dec. 2019. Piscataway, IEEE, 2019, acc. no. 19471408. doi: 10.1109/MICC48337.2019.9037584

17. S. Yu, H. Zhang, S. Liu, B. Bian A design of a broadband single layer polarization beam splitting reflectarray using varying-sized cross dipoles./ Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS). St Petersburg, Russia, 22–25 May 2017. Piscataway, IEEE, 2017, acc. no. 17521116. doi: 10.1109/PIERS.2017.8261835

## Information about the authors

**Stanislav V. Polenga**, Master's degree in Radio Engineering (2009), senior lecturer of the Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University (SFU). The author of 50 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices, reflectarrays, quasi-optical antennas, metamaterials.

Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: twinlive@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1375-2629>

**Roman O. Ryazantsev**, Cand. Sci. (Eng.) (2019), associate professor of Department of Radio Engineering of the SFU. The author of 28 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices, metamaterials, quasi-optical antennas and antenna arrays.

Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: rryazantsev@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1747-0917>

**Anastasia D. Poligina**, Master's degree in Radio Engineering (2021). The author of 4 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices, phased arrays.

Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: anastasia0711@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5810-7626>

**Roman M. Krylov**, engineer on Design and Engineering of Electronic Equipment (2009, SFU), engineer of the Department of Radio Engineering of the SFU. Author of 10 scientific papers. Area of expertise: design of electronic equipment, antennas and microwave devices.

Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: krulow\_roman@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0899-8595>

**Elena A. Litinskaya**, Master's degree in Radio Engineering (2011), postgraduate student, senior lecturer of the Department of Radio Engineering of the SFU. The author of 29 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices, satellite communication, scanning antennas.

Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: ylitinskaya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4442-8047>

**Yury P. Salomatov**, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Professor (2013) of the Department of Radio Engineering of the SFU. The author of 240 scientific publications. Area of expertise: phased arrays, digital phased arrays, quasi-optical antennas.

Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>

## Конференции, форумы, семинары

### Всероссийская научно-техническая конференция

#### «Антенны и распространение радиоволн»

24–26 ноября 2021 года

Россия, Санкт-Петербург

Всероссийская научно-техническая конференция «Антенны и распространение радиоволн 2021» (APP'21) проводится 24–26 ноября 2021 г. в рамках Санкт-Петербургской антенной недели 2021 совместно с Международной конференцией «Antenna Design and Measurement International Conference 2021» (ADMInC'21) в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»). Мероприятие предоставляет специалистам в области антенной техники, электродинамики, измерений антенных систем и распространения радиоволн широкие возможности для представления новых научных результатов, обмена опытом и установления деловых контактов.

Труды конференции на русском языке будут опубликованы в электронном виде и распространены в день открытия конференции.

Доклады размещаются в коллекции Научной электронной библиотеки e-library.ru и индексируются библиографической базой данных научных публикаций российских ученых РИНЦ.

Планируется поддержка Международного института инженеров электротехники и электроники IEEE (англ. Institute of Electrical and Electronic Engineers). По итогам рецензирования англоязычные доклады, подготовленные авторами – членами IEEE, будут переданы для размещения в электронную библиотеку IEEE Xplore для последующей индексации Scopus.

Antenna Design and Measurement International Conference 2021 (ADMInC'21) is held on Nov. 24–26, 2021 as part of the St Petersburg Antenna Week 2021 together with the All-Russian Scientific and Technical Conference "Antennas and Radio Wave Propagation 2021" (APP'21) in St Petersburg Electrotechnical University (ETU). The event provides ample opportunities to present new scientific results, exchange experience and establish business contacts to researchers in the field of antenna technology, electromagnetics, antenna measurements and wave propagation.

The Conference Proceedings will be published digitally.

The Conference Proceedings will be submitted for inclusion into the IEEE Xplore Digital Library.