

Двухдиапазонная отражательная антенная решетка Ka/Q-диапазонов частот

С. В. Поленга^{1✉}, А. А. Ерохин¹, Р. О. Рязанцев¹, А. Д. Полигина¹, Р. М. Крылов¹,
Е. А. Литинская¹, Е. Р. Гафаров¹, А. М. Александрин¹, Ю. П. Саломатов¹, И. Ю. Данилов²

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнева», Железногорск, Россия

✉twinlive@gmail.com

Аннотация

Введение. Для организации дуплексной спутниковой связи, как правило, используются два разнесенных диапазона частот: один – для приема, второй – для передачи сигнала на спутник. Основной задачей антенной системы спутника связи является обеспечение идентичной зоны покрытия во всех задействованных диапазонах частот, что зачастую затруднительно с использованием традиционных параболических зеркальных антенн. Отражательные антенные решетки (ОАР) позволяют осуществлять независимое управление фазой переизлученной волны в разнесенных диапазонах частот, что может быть использовано для создания эффективных многодиапазонных антенных систем современной спутниковой связи.

Цель работы. Разработка фазокорректирующего элемента Ka/Q-диапазонов частот и создание на его основе двухдиапазонной ОАР для работы с ортогональными круговыми поляризациями, обладающей идентичными коэффициентами усиления (КУ) в заданном секторе углов в значительно разнесенных диапазонах частот.

Материалы и методы. Численные исследования проведены методом конечных элементов. Характеристики направленности измерялись методом сканирования в ближнем поле антенны.

Результаты. Разработан однослойный двухдиапазонный фазокорректирующий элемент ОАР для работы с ортогональными круговыми поляризациями с малыми потерями и слабой зависимостью фазовой характеристики от взаимного расположения элементов. На основе предложенного элемента синтезирована и изготовлена ОАР, состоящая из 24 465 двухчастотных элементов. Разработанный макет однослойной двухдиапазонной ОАР продемонстрировал хорошую эффективность, коэффициент использования поверхности достигает 56 и 36 %, соответственно, в Ka- и Q-диапазонах частот при практически идентичном минимальном КУ в секторе углов $\pm 0.75^\circ$.

Заключение. Результаты исследований показывают возможность ОАР с успехом замещать традиционные параболические рефлекторы как на современных спутниках связи, так и в составе наземных спутниковых терминалов в миллиметровом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: отражательная антенная решетка, двухдиапазонная антенна, микрополосковый элемент, круговая поляризация, Q-диапазон

Для цитирования: Двухдиапазонная отражательная антенная решетка Ka/Q-диапазонов частот / С. В. Поленга, А. А. Ерохин, Р. О. Рязанцев, А. Д. Полигина, Р. М. Крылов, Е. А. Литинская, Е. Р. Гафаров, А. М. Александрин, Ю. П. Саломатов, И. Ю. Данилов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 5. С. 18–31. doi: 10.32603/1993-8985-2021-25-5-18-31

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 06.06.2022; принята к публикации после рецензирования 05.07.2022; опубликована онлайн 29.11.2022

A Dual Ka/Q-Band Reflectarray

Stanislav V. Polenga^{1✉}, Alexey A. Erokhin¹, Roman O. Ryazantsev¹,
Anastasia D. Poligina¹, Roman M. Krylov¹, Elena A. Litinskaya¹,
Anton M. Aleksandrin¹, Eugeny R. Gafarov¹, Yury P. Salomatov¹, Igor Yu. Danilov²

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems, Zheleznogorsk, Russia

✉ twinlive@gmail.com

Abstract

Introduction. Duplex satellite communication is commonly arranged using two spaced frequency bands, with one band receiving and the other band transmitting signals to a satellite. The main task of a communications satellite antenna system consists in providing an identical coverage area across all involved frequency bands, which is often a challenging task for conventional parabolic reflector antennas. Reflectarrays allow an independent control of the radiated wave phase in spaced frequency bands, which can be used to create efficient multi-band antenna systems for modern communication satellites.

Aim. To develop a Ka/Q-frequency range phase-correcting element and to create on its basis a dual-band reflectarray for operation with orthogonal circular polarizations and identical gains in a given sector of angles in significantly spaced frequency ranges.

Materials and methods. Numerical studies were carried out using the finite element analysis method. Radiation patterns were measured using the near field scanning method.

Results. A single-layer dual-band phase-correcting reflectarray element was developed for operation with orthogonal circular polarizations with low losses and a weak dependence of the relative position of the elements on the phase characteristic. On the basis of the proposed element, a reflectarray consisting of 24 465 two-frequency elements was synthesized and manufactured. The developed prototype of a single-layer dual-band reflectarray demonstrated good characteristics, with the efficiency reaching 56 and 36 % in the Ka- and Q-frequency ranges, respectively, and an almost identical minimum gain in the $\pm 0.75^\circ$ angle sector.

Conclusion. The research results confirm the potential of the developed reflectarray to successfully replace conventional parabolic reflectors installed both on modern communication satellites and as part of ground-based satellite terminals in the millimeter wavelength range.

Keywords: reflectarray, dual-band antenna, microstrip element, circular polarization, Q-band

For citation: Polenga S. V., Erokhin A. A., Ryazantsev R. O., Poligina A. D., Krylov R. M., Litinskaya E. A., Aleksandrin A. M., Gafarov E. R., Salomatov Yu. P., Danilov I. Yu. A Dual Ka/Q-Band Reflectarray. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 5, pp. 18–31. doi: 10.32603/1993-8985-2021-25-5-18-31

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

Acknowledgements. The research was funded by RFBR, Krasnoyarsk Territory and Krasnoyarsk Regional Fund of Science, project no. 20-47-240003.

Submitted 06.06.2022; accepted 05.07.2022; published online 29.11.2022

Введение. Для организации дуплексной спутниковой связи, как правило, используются два разнесенных диапазона частот: один – для приема, второй – для передачи сигнала на спутник [1]. При использовании традиционных параболических зеркал необходимость в нескольких диапазонах частот не вызывает затруднений, диапазон частот параболического рефлек-

тора ограничен только точностью его изготовления. Наибольшее затруднение вызывает реализация многодиапазонных облучателей [2]. Облучатель для параболических зеркал при этом, помимо основных характеристик, должен обладать совмещенными фазовыми центрами в двух отдельных диапазонах и формировать сферический фазовый фронт в направлении ре-

флектора. При использовании отражательной антенной решетки (ОАР) в виде двухдиапазонного отражателя требования к облучателю могут быть значительно смягчены. Это связано с возможностью независимой настройки фазовых распределений в каждом из диапазонов [3], которая позволяет скомпенсировать не только неидеальное несовпадение фазовых центров, но и вовсе их разнесение в пространстве [4–6]. Остается вопрос обеспечения необходимой рабочей полосы частот ОАР в каждом из диапазонов. В работах последних лет представлены различные способы для расширения полосы рабочих частот ОАР [7, 8] и широкополосные элементы [9, 10], позволяющие получить ОАР с достаточной полосой рабочих частот для функционирования в современных сетях спутниковой связи Q- и Ka-диапазонов частот.

Кроме того, при создании антенных систем для спутниковой связи необходимы идентичные ширины диаграмм направленности (ДН) в разнесенных диапазонах частот для покрытия определенной территории, что затруднительно реализовать при помощи отражателя в виде параболического рефлектора. В этом случае ОАР также более удобны и позволяют за счет фазового синтеза сформировать необходимые ДН независимо для каждого из диапазонов, в том числе и контурные [11, 12].

Таким образом, плоские ОАР обладают преимуществами перед поверхностями двойной кривизны – параболическими рефлекторами – для применения как в наземных спутниковых терминалах, так и для установки на спутниках связи.

В данной статье пойдет речь о разработке и экспериментальных исследованиях ОАР для работы в Ka/Q-диапазонах частот.

Элемент ОАР. Заданные относительные полосы рабочих частот достаточно узкие и составляют менее 5 % в Ka-диапазоне и менее 2.5 % в Q-диапазоне, поэтому было принято решение о реализации однослойного элемента. Минимизация количества слоев позволит как снизить сложность изготовления топологии ОАР, так и уменьшить потери в диэлектриках решетки [13]. Разработанный элемент показан на рис. 1. Почти идентичные элементы были представлены в [14–16], однако главное отличие заключается в том, что фазовая

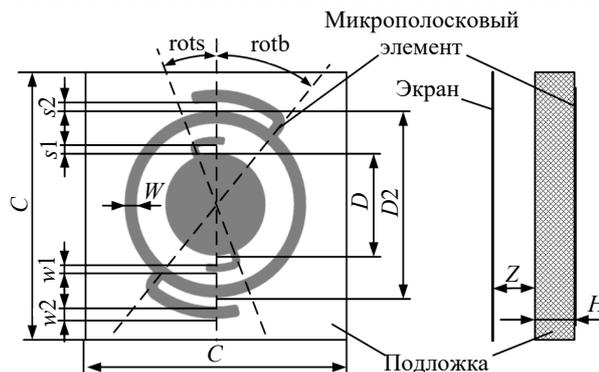


Рис. 1. Двухдиапазонный элемент ОАР

Fig. 1. Dualband reflectarray element

регулировка в данном случае достигается поворотом внутреннего и внешнего элементов ОАР, а не за счет изменения длин линий задержки, как в [14–16]. Подход, предложенный в данной статье, позволяет достичь лучшего согласования элемента с пространством.

Для уменьшения потерь в элементе использована конфигурация с подвешенной подложкой.

Двухчастотный элемент состоит из круглого микрополоскового элемента с линиями задержки для работы в Q-диапазоне и кольцевого элемента с линиями задержки для Ka-диапазона. Значения геометрических параметров элемента представлены в табл. 1.

Электрические размеры единичной ячейки составили 0.5λ на частоте 44 ГГц и менее 0.25λ в низкочастотном диапазоне. Диэлектрическая проницаемость подложки выбрана равной 3.38.

Расчет ячейки выполнялся методом ячейки Флоке, который позволяет учесть взаимное

Табл. 1. Геометрические параметры элемента ОАР

Tab. 1. Reflectarray element geometrical parameters

Параметр	Значение	Описание
C	3.4 мм	Размер ячейки
D	1.3 мм	Диаметр диска ВЧ-элемента
$D2$	2.52 мм	Диаметр кольца НЧ-элемента
W	0.17 мм	Ширина кольца НЧ-элемента
$w1$	0.1 мм	Ширина линии задержки ВЧ-элемента
$w2$	0.17 мм	Ширина линии задержки НЧ-элемента
$s1$	0.1 мм	Зазор между линией задержки и диском
$s2$	0.12 мм	Зазор между линией задержки и кольцом
$rots$	0...180°	Угол поворота ВЧ-элемента
$rotb$	0...180°	Угол поворота НЧ-элемента
S	0.51 мм	Толщина подложки
Z	0.5 мм	Высота подвеса подложки

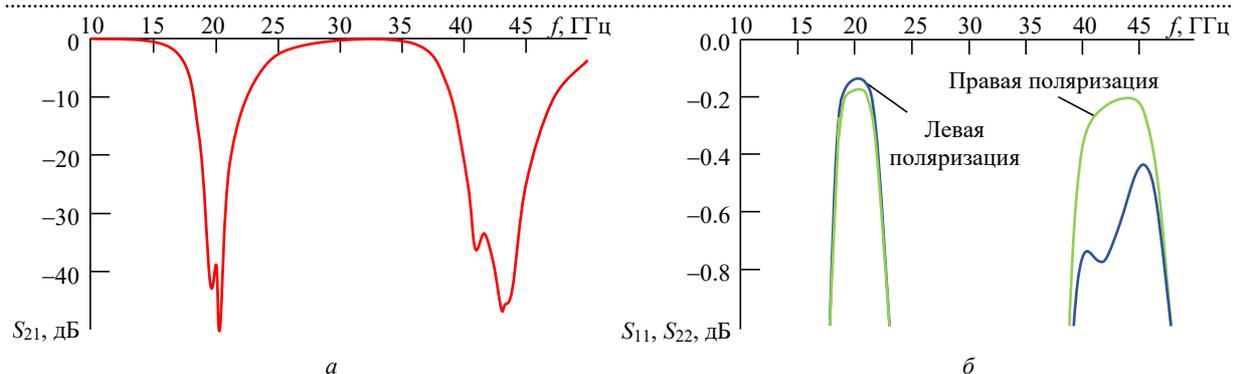


Рис. 2. S -параметры двухдиапазонного элемента ОАР: a – S_{21} ; b – S_{11} , S_{22}

Fig. 2. S -parameters of the dualband reflectarray element: a – S_{21} ; b – S_{11} , S_{22}

влияние соседних элементов в решетке [17, 18]. Возбуждение ячейки выполнялось одним портом с двумя низшими модами колебаний с ортогональными круговыми поляризациями. Первая мода соответствует правой круговой поляризации, вторая – левой. Индексы S -параметров, приведенные на графиках, указывают на моды колебания одного порта.

Типовые S -параметры элемента приведены на рис. 2. На рис. 2, a представлена частотная зависимость коэффициента передачи правополяризованной волны в левополяризованную. Наблюдаются две отдельные полосы частот, где направление вращения поляризации не меняется. На рис. 2, b приведены частотные зависимости коэффициента отражения волны с круговой поляризацией. Таким образом, в рабочих диапазонах частот электромагнитная волна возбуждает элемент и переизлучается без смены направления вращения поляризации. Волна, которая не взаимодействовала с

элементом, отражается от экрана, изменяя направление вращения поляризации. Далее в статье под переизлученной волной подразумевается отраженная волна без смены поляризации, под отраженной – со сменой направления вращения.

Направление загиба линий задержки элементов определяет оптимальное направление вращения круговой поляризации. В высокочастотном (ВЧ) диапазоне элемент обладает меньшими потерями и большей линейностью фазы переизлученной волны при облучении волной с правой круговой поляризацией. В низкочастотном (НЧ) диапазоне наиболее выигрышной является работа с левой круговой поляризацией.

Отраженная часть мощности от элемента трансформируется в ортогональную круговую поляризацию, и чем лучше согласован элемент со свободным пространством, тем меньше ожидаемый уровень кроссполяризации (КП) всей антенной решетки.

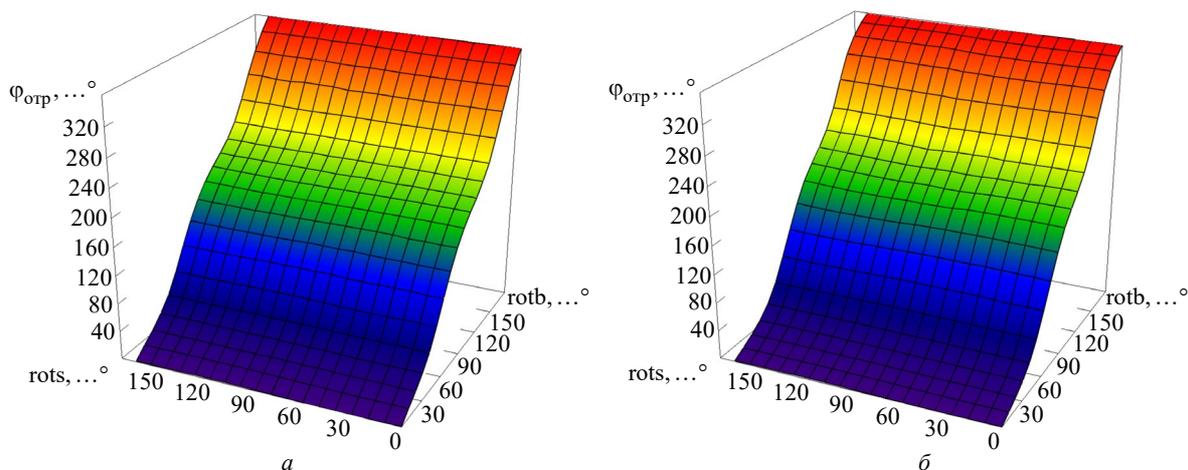


Рис. 3. Расчетные фазы переизлученной от элемента волны на частоте $f = 20.5$ ГГц при углах облучения: a – 0° ; b – 40°

Fig. 3. Calculated phases of the wave reradiated from the element at a frequency $f = 20.5$ GHz at an incidence angle: a – 0° ; b – 40°

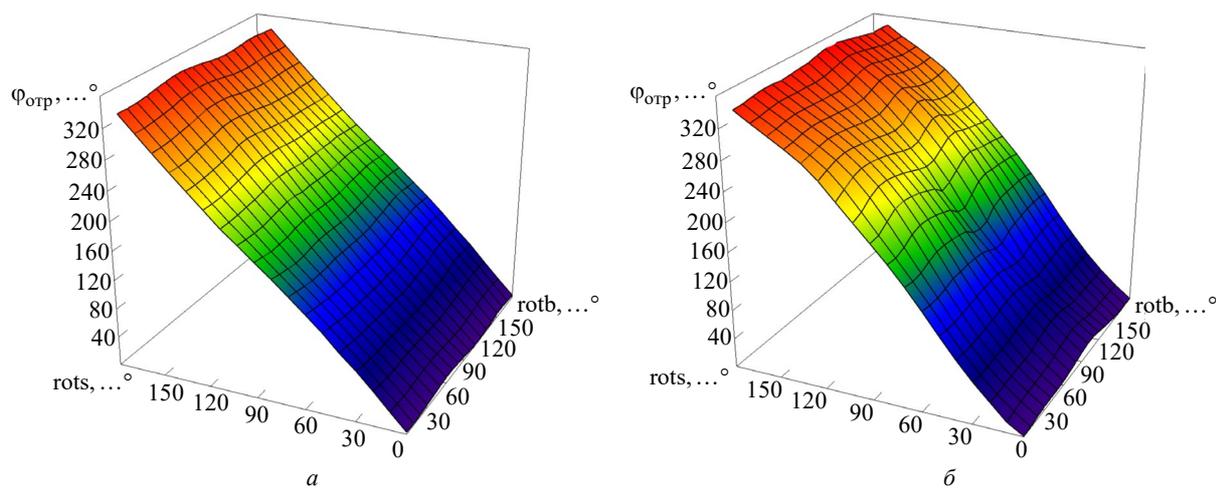


Рис. 4. Расчетные фазы переизлученной от элемента волны на частоте $f = 43.5$ ГГц при углах облучения: $a - 0^\circ$; $b - 40^\circ$

Fig. 4. Calculated phases of the wave reradiated from the element at a frequency $f = 43.5$ GHz at the incidence angle: $a - 0^\circ$; $b - 40^\circ$

Элемент был численно оптимизирован по критерию согласования и линейности фазовой кривой. На рис. 3, 4 представлены расчетные зависимости фазы переизлученной волны от угловых поворотов элементов.

В низкочастотном диапазоне частот поведение зависимости фазы переизлученной волны от угла поворота внешнего элемента близко к линейному и практически не зависит от угла поворота внутреннего элемента. Искажение фазы переизлученной волны возникает из-за влияния соседних элементов друг на друга, среднее значение отклонения фазы от линейного поведения составляет 9° при облучении элемента по нормали. При облучении элемента под углом 40° усиливается взаимное влияние соседних элементов, средняя фазовая ошибка достигает 18.2° .

В высокочастотном диапазоне присутствует незначительное влияние положения внешнего элемента на характеристики внутреннего. При облучении по нормали средняя фазовая ошибка составляет 3.8° . При увеличении угла облучения до 40° средняя фазовая ошибка достигает 14.4° .

На рис. 5 представлены расчетные зависимости амплитуды переизлученной волны для различных углов поворота элементов и углов облучения θ . В расчете были учтены тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрической подложки, проводимость и шероховатость металла.

На цветовых картах наблюдаются области с повышенным уровнем потерь, которые связаны с ухудшением согласования при определенных

комбинациях угловых положений элементов. Максимальные суммарные потери в высокочастотном диапазоне при облучении ячейки по нормали составляют около 0.8 дБ, что является достаточно большим уровнем, однако среднее значение суммарных потерь составляет 0.34 дБ. В Ka-диапазоне при облучении по нормали средние потери в элементе составляют всего 0.2 дБ при максимальном значении 0.3 дБ.

При увеличении угла облучения элементов до 40° согласование элементов ухудшается, средний уровень потерь возрастает до 0.73 и 0.6 дБ в Ka- и Q-диапазонах соответственно.

В табл. 2 приведены значения средней фазовой ошибки и средних потерь от угла облучения θ в двух диапазонах частот.

Полученный элемент позволяет осуществлять независимое управление фазой переизлученной волны в двух значительно разнесенных диапазонах частот. Элемент лучше подходит для работы в составе длиннофокусных ОАР с минимальными углами облучения.

Макет ОАР. На основе представленного элемента была синтезирована ОАР диаметром 600 мм, состоящая из $24\,465$ ячеек. Для исключения затенения решетки облучателем была выбрана офсетная конфигурация. Геометрические параметры антенны представлены на рис. 6.

Угол поворота облучателя в плоскости элевации составляет 15° и соответствует углу подъема луча. Максимальные углы облучения элементов составили 26.5° в азимутальной плоскости и 38° в плоскости элевации.

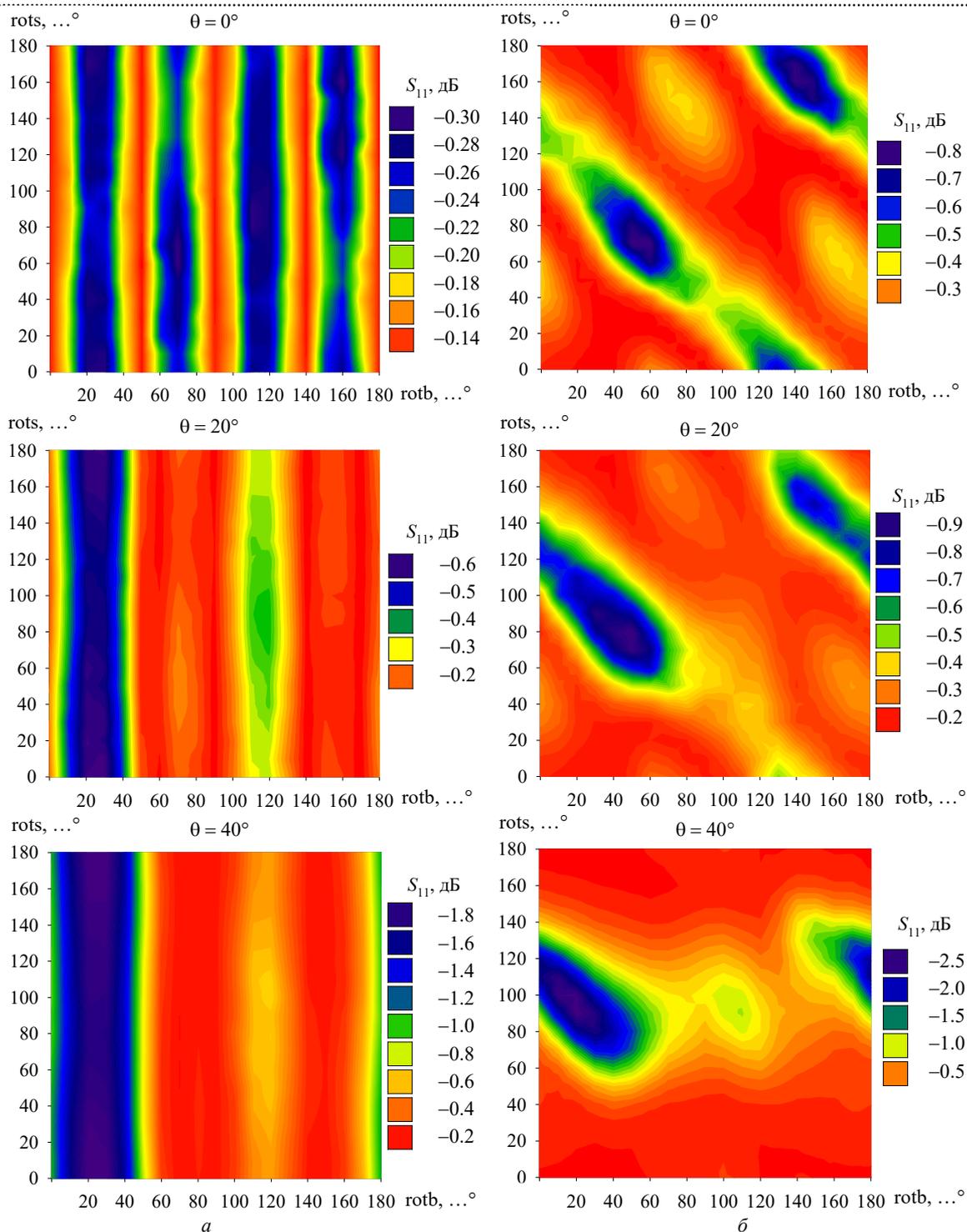


Рис. 5. Расчетные амплитуды переизлученной от элемента волны: $a - f = 20.5$ ГГц; $b - f = 43.5$ ГГц

Fig. 5. Calculated amplitude of the wave reradiated from the element: $a - f = 20.5$ GHz; $b - f = 43.5$ GHz

Табл. 2. Характеристики двухдиапазонного элемента ОАР

Tab. 2. Characteristics of the dual-band reflectarray element

Диапазон	θ, \dots°				
	0°	10°	20°	30°	40°
Ka	9°	9.7°	11.9°	14.1°	16.9°
	-0.2 дБ	-0.21 дБ	-0.27 дБ	-0.44 дБ	-0.73 дБ
Q	3.2°	3.5°	4.8°	7.8°	14.4°
	-0.34 дБ	-0.35 дБ	-0.36 дБ	-0.42 дБ	-0.6 дБ

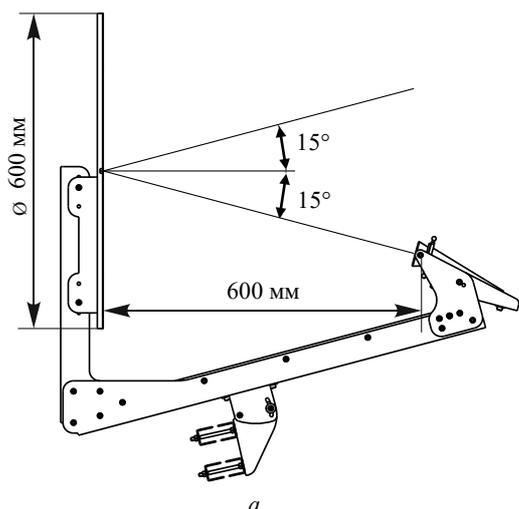


Рис. 6. Макет двухдиапазонной ОАР: а – чертеж; б – ОАР во время измерений в безэховой камере

Fig. 6. Layout of the proposed dualband reflectarray: a – drawing; б – the reflectarray during measurements in an anechoic chamber

Синтез решетки выполнен для получения плоского фазового фронта ОАР в Ka-диапазоне и сферического в Q-диапазоне для предотвращения "излишнего" сужения главного лепестка. Целью было получение идентичного коэффициента усиления (КУ) в двух разнесенных диапазонах в угловом секторе $\pm 0.75^\circ$.

Электродинамический анализ представленной ОАР не проводился из-за больших электрических размеров и сложности топологии. Только построение представленной топологии заняло более 12 ч машинного времени. Для проверки алгоритмов синтеза осуществлялся электродинамический анализ масштабной модели антенной решетки.

Печатная плата ОАР была выполнена на диэлектрическом материале Rogers RO4003 толщиной 0.51 мм, с толщиной фольги 17 мкм. На рис. 7 представлен изготовленный сегмент

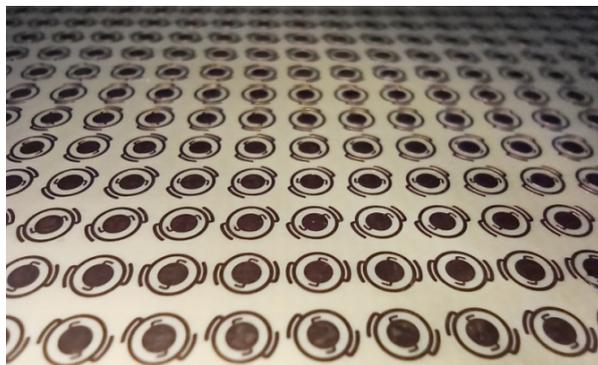


Рис. 7. Фрагмент изготовленной топологии двухчастотной ОАР

Fig. 7. A fragment of the fabricated dualband reflectarray topology

топологии ОАР. Минимальные значения ширины проводника и зазора для данной топологии составили 0.1 мм. После изготовления печатной платы были проведены при помощи микроскопа выборочные измерения размеров ряда микрополосковых элементов. Отклонения от номинальных размеров не превышали 5 мкм. Такие отклонения практически не окажут влияния на фазу отраженной волны, но могут оказать влияние на согласование элемента, особенно в высокочастотном диапазоне, где доля отклонения от номинального размера наиболее велика.

Из-за технологических ограничений поверхность ОАР была выполнена из 4 сегментов. Стыковка полотен осуществлялась при помощи микроскопа, ошибка позиционирования не превысила 25 мкм.

За основание решетки был взят диск из оргстекла с приклеенным слоем медной фольги. Печатная плата ОАР была наклеена на экран через проставки толщиной 0.5 мм.

В роли облучателя ОАР использовался двухчастотный гофрированный рупор Ka- и Q-диапазонов частот с разнесенными фазовыми центрами в двух диапазонах на 30 мм. Уровень облучения края рефлектора составил -10 и -23 дБ в Ka- и Q-диапазонах соответственно.

Эксперимент. Измерения диаграммы направленности ОАР проводились методом сканирования в ближнем поле антенны [19]. При измерениях главный лепесток антенны был

направлен перпендикулярно плоскости сканирования, что позволило минимизировать область сканирования и проводить визуальный контроль амплитудно-фазового распределения.

Сечения измеренных диаграмм направленности для основной и крессовой компонент поля представлены на рис. 8.

В высокочастотном диапазоне наблюдается достаточно высокий уровень КП, который достигает -18.7 дБ. Максимумы диаграмм направленности (ДН) для основной и крессовой

поляризации совпадают, что свидетельствует о повышенном уровне отражения волны от элемента, так как отражение происходит со сменой направления вращения поляризации, а переизлучение – без. При отражении волны также происходит ее фазирование, соответственно, и формирование главного лепестка ДН, что является особенностью работы элемента. Вблизи собственного резонанса элемента наблюдается резкое изменение фазы отраженной волны на 180° в зависимости от его углового положения.

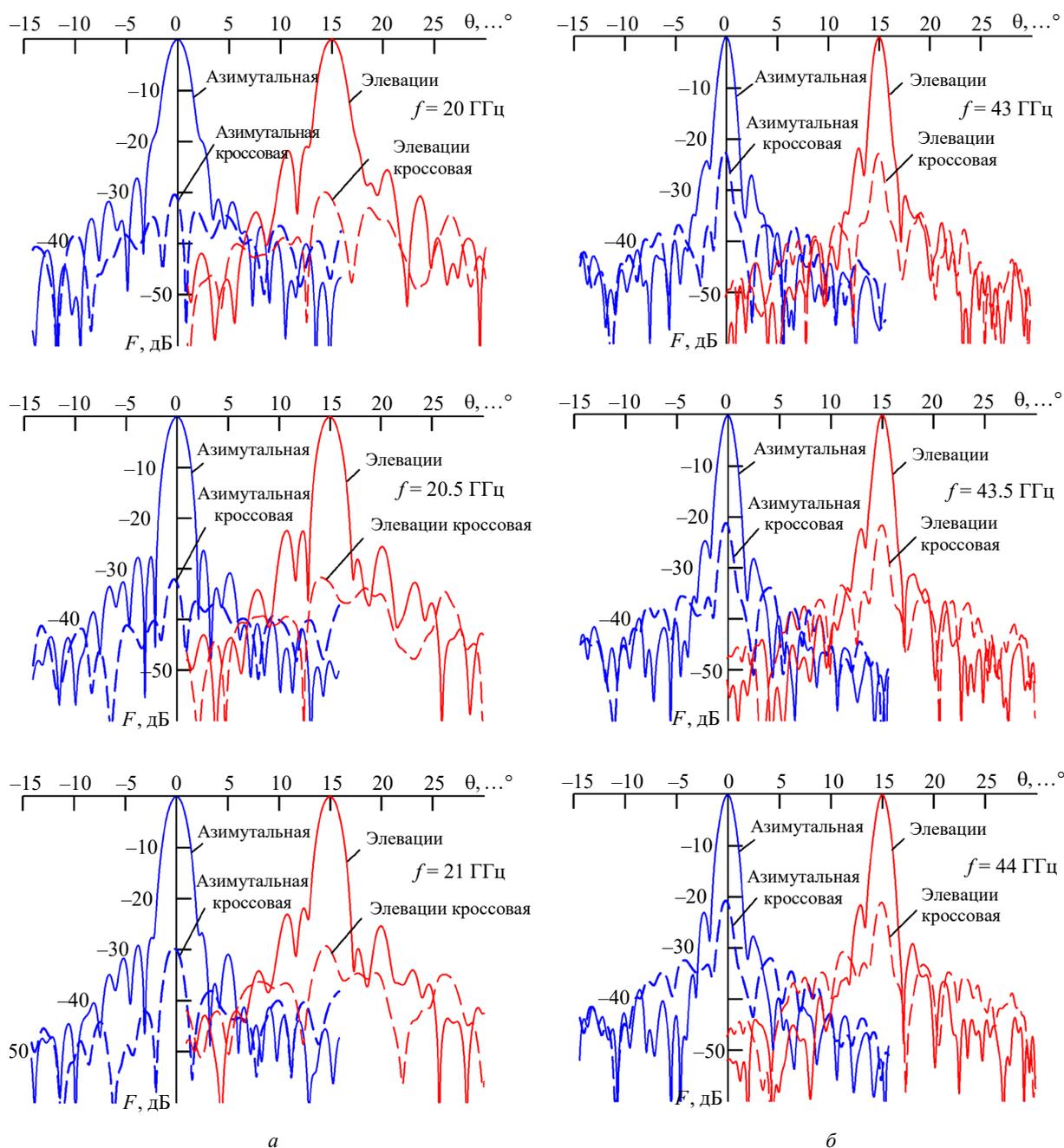


Рис. 8. Измеренные диаграммы направленности двухчастотной ОАР: а – в Ка-диапазоне; б – в Q-диапазоне

Fig. 8. Measured radiation patterns of the developed dualband reflectarray: а – Ka-band; б – Q-band

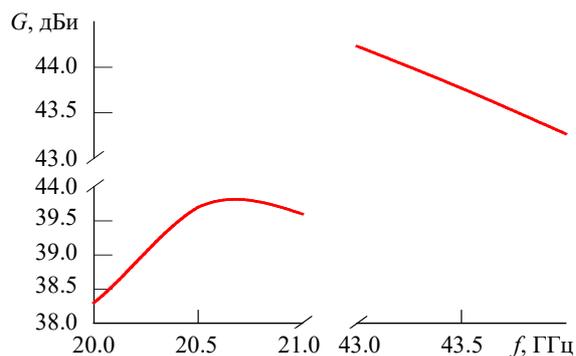


Рис. 9. Измеренный КУ ОАР
 Fig. 9. Measured reflectarray gain

и недооблучения рефлектора в связи с особенностями используемого облучателя. Тем не менее КИП антенны находится на высоком уровне, что свидетельствует о малых потерях в рефлекторе антенны.

Числовые значения худших измеренных значений КУ и уровня КП в секторе углов $\pm 0.75^\circ$, уровня боковых лепестков представлены в табл. 3.

Минимальные значения КУ в секторе углов $\pm 0.75^\circ$ близки, несмотря на более чем двухкратное различие между частотными диапазонами.

Табл. 3. Измеренные характеристики ОАР

Tab. 3. Measured reflectarray characteristics

Частота, ГГц	Минимальный КУ в секторе $\pm 0.75^\circ$, дБи	Минимальный уровень КП в секторе $\pm 0.75^\circ$, дБи	Уровень боковых лепестков, дБ	
			в азимутальной плоскости	в плоскости элевации
20	35.8	27	-27.6	-21.8
20.5	37.1	30	-26.3	-22.5
21	36.9	27	-26.7	-21.8
43	36	20.3	-24.2	-21.7
43.5	36.1	18.9	-24.7	-22.5
44	36.6	18.7	-23	-21.8

Хотя управление фазой отраженной волны и происходит нелинейно, но этого достаточно для формирования выраженного кросс-поляризационного лепестка. Повышенный уровень КП в ВЧ-диапазоне может быть связан с ошибками при изготовлении антенны и недостаточной настройкой элемента на этапе моделирования. В НЧ-диапазоне формирование лепестка с КП также заметно, однако уровень данного лепестка более чем на 27 дБ ниже основного. Это свидетельствует о хорошем согласовании элемента со свободным пространством.

Уровень боковых лепестков в двух диапазонах достаточно низкий и не превышает -22 дБ. Значения измеренного КУ приведены на рис. 9.

Средний коэффициент использования поверхности (КИП) в Ka- и Q-диапазонах составили более 50 и 30 % соответственно. Однако следует отметить, что КИП для Q-диапазона не показателен по причине намеренного расширения главного лепестка на этапе синтеза антенны

Заключение. В статье рассмотрена разработка, изготовление и экспериментальное исследование ОАР диаметром 600 мм. Антенная решетка построена на базе предложенной конфигурации однослойного микрополоскового элемента, который позволяет осуществлять практически независимую фазовую регулировку в Ka- и Q-диапазонах частот. Топология ОАР состоит из 24 465 двухчастотных элементов и способна функционировать в Ka- и Q-диапазонах частот на ортогональных круговых поляризациях.

Предложенная однослойная двухдиапазонная ОАР демонстрирует хорошую эффективность, КИП достигает 56 и 36 % в Ka- и Q-диапазонах частот соответственно. Результаты исследований показывают возможность ОАР с успехом замещать традиционные параболические рефлекторы как на современных спутниках связи, так и в составе наземных спутниковых терминалов даже в высокочастотных диапазонах.

Авторский вклад

Поленга Станислав Владимирович – разработка элемента ОАР, синтез топологии, экспериментальные исследования ОАР.

Ерохин Алексей Александрович – синтез фазовых распределений ОАР.

Рязанцев Роман Олегович – изготовление топологии ОАР, 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.
Гафаров Евгений Раисович – экспериментальные исследования ОАР.
Александрин Антон Михайлович – моделирование масштабных моделей ОАР.
Саломатов Юрий Петрович – общее руководство проектом.
Данилов Игорь Юрьевич – постановка задачи.

Author's contribution

Stanislav V. Polenga, reflectarray element development, topology synthesis, reflectarray experimental studies.
Aleksey A. Erokhin, synthesis of reflectarray phase distributions.
Roman O. Ryazantsev, reflectarray topology manufacturing, testing of the reflectarray layout.
Anastasia D. Poligina, modeling of reflectarray elements, processing of theoretical data.
Roman M. Krylov, development and manufacture of the reflectarray prototype.
Elena A. Litinskaya, reflectarray modeling, processing of experimental data.
Eugeniyy R. Gafarov, reflectarray experimental studies.
Anton M. Aleksandrin, reflectarray scale model's simulation.
Yury P. Salomatov, general project management.
Igor Yu. Danilov, problem formulation.

Список литературы

1. 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. 39–43.
2. Совмещенный облучатель Ку/Ка-диапазонов частот для земных станций спутниковой связи / С. В. Поленга, А. М. Александрин, Ю. П. Саломатов, К. В. Лемберг, А. А. Попович // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016. № 11. С. 43–47.
3. Dual polarized reflectarray antenna to generate independent beams in Ku and Ka bands / E. Martinez-de-Rioja, J. A. Encinar, R. Florencio, R. R. Boix // 10th European Conf. on Antennas and Propagation, Davos, Switzerland, 10–15 Apr. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1–5. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481439
4. Design of bifocal dual reflectarray antennas in Ka-band to generate a multi-spot coverage from geostationary satellites / E. Martinez-de-Rioja, J. A. Encinar, A. Pino, B. Gonzalez-Valdes // 13th European Conf. on Antennas and Propagation. Krakow, Poland, 31 March – 5 Apr. 2019. Piscataway: IEEE, 2019. P. 1–5.
5. Arrebola M., Encinar J. A., Barba M. Multifed Printed Reflectarray with three simultaneous shaped beams for LMDS central station antenna // *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 2001. Vol. 56, № 6. P. 1518–1527. doi: 10.1109/TAP.2008.923360
6. Single-layer dual-frequency reflectarray for Ka-band antennas / M. Abdollahvand, J. A. Encinar, K. Forooghi, Z. Atlasbaf, M. Barba // 10th European Conf. on Antennas and Propagation, Davos, Switzerland, 10–15 Apr. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481879.
7. Design of wideband reflectarray antennas / Y. G. Antonov, M. I. Sugak, S. V. Ballandovich, G. A. Kostikov, L. M. Liubina // 14th European Conf. on Antennas and Propagation, Copenhagen, Denmark, 15–20 March 2020. Piscataway: IEEE, 2020. P. 1–5. doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135649
8. Ballandovich S. V., Liubina L. M., Sugak M. I. Non-planar full-metal slot reflectarray antenna // 23rd Intern. Microwave and Radar Conf., Warsaw, Poland, 5–8 Oct. 2020. Piscataway: IEEE, 2019. P. 338–341. doi: 10.23919/MIKON48703.2020.9253864
9. Gao Q., Wang J. Bandwidth enhancement element for linearly polarized reflectarray design in Ku-band // 7th IEEE Intern. Symp. on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies, Xi'an, China, 24–27 Oct. 2017. Piscataway: IEEE, 2017. P. 34–36. doi: 10.1109/MAPE.2017.8250789
10. Hamzavi-Zarghani Z., Atlasbaf Z. A new broadband single-layer dual-band reflectarray antenna in X- and Ku-Bands // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2015. Vol. 14. P. 602–605. doi: 10.1109/LAWP.2014.2374351
11. A Ka-band shaped-beam circularly polarized reflectarray antenna / S. V. Polenga, A. A. Erokhin, R. M. Krylov, A. V. Stankovsky, E. A. Litinskaya, A. D. Hudonogova, I. Yu., Danilov, Yu. P. Salomatov // *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves*, Divnomorskoe, Russia, 24–28 June, 2019. Piscataway: IEEE, 2019. P. 281–284. doi: 10.1109/RSEMW.2019.8792697.
12. Pozar D. M., Targonski S. D., Pokuls R. A shaped-beam microstrip patch reflectarray // *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 1999. Vol. 47, № 7. P. 1167–1173. doi: 10.1109/8.785748

13. Reflectarray antennas for dual polarization and broadband telecom satellite applications / R. Florencio, J. A. Encinar, R. R. Boix, V. Losada, G. Toso // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63, № 4. P. 1234–1246. doi: 10.1109/TAP.2015.2391279
14. Shamsaee Malfajani R., Abbasi Arand B. Dual-band orthogonally polarized single-layer reflectarray antenna // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2017. Vol. 65, № 11. P. 6145–6150. doi: 10.1109/TAP.2017.2754459
15. Hasani H., Kamyab M., Mirkamali A. Low cross-polarization reflectarray antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011. Vol. 59, № 5. P. 1752–1756. doi: 10.1109/TAP.2011.2123071
16. Malfajani R. S., Atlasbaf Z. Design and implementation of a broadband single-layer reflectarray antenna with large-range linear phase elements // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2012. Vol. 11. P. 1442–1445. doi: 10.1109/LAWP.2012.2228147
17. Pozar D. M., Schaubert D. H. Analysis of an infinite array of rectangular microstrip patches with idealized probe feeds // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1984. Vol. 32. P. 1101–1107. doi: 10.1109/TAP.1984.1143211
18. Pozar D. M. Analysis of an infinite phased array of aperture coupled microstrip patches // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1989. Vol. 37. P. 418–425. doi: 10.1109/8.24161.
19. Implementation of antenna near-field scanning without using probe position sensors / A. S. Ivanov, K. V. Lemberg, S. V. Polenga, R. M. Krylov, Yu. P. Salomatov // Intern. Siberian Conf. on Control and Communications. Omsk, Russia, 21–23 May 2015. Piscataway: IEEE, 2015. P. 1–3. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147334

Информация об авторах

Поленга Станислав Владимирович – магистр по направлению "Радиотехника" (2009), старший преподаватель кафедры "Радиотехника" Сибирского федерального университета. 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>

Ерохин Алексей Александрович – кандидат технических наук (2021), старший преподаватель кафедры "Радиотехника" Сибирского федерального университета. Область научных интересов – синтез антенных решеток; цифровое диаграммоформирование; моделирование адаптивных антенных систем.

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

E-mail: aerokhin@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7707-8792>

Рязанцев Роман Олегович – кандидат технических наук (2019), доцент кафедры "Радиотехника" Сибирского федерального университета. 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) Сибирского федерального университета. Автор 4 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), инженер кафедры "Радиотехника" Сибирского федерального университета. 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 "Радиотехника" Сибирского федерального университета. 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>

Гафаров Евгений Раисович – кандидат технических наук (2021), доцент кафедры "Радиотехника" Сибирского федерального университета. Автор 40 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; антенны ГНСС и антенные решетки.

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

E-mail: egafarov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7810-7196>

Александрин Антон Михайлович – кандидат технических наук (2020), доцент кафедры "Радиотехника" Сибирского федерального университета. Автор 30 научных работ. Сфера научных интересов – широкополосные антенны; антенные решетки; метаматериалы.

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

E-mail: aalexandrin@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8428-5562>

Саломатов Юрий Петрович – кандидат технических наук (1982), профессор (2013) кафедры "Радиотехника" Сибирского федерального университета. 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>

Данилов Игорь Юрьевич – кандидат технических наук (2017), начальник отдела разработки и испытательной антенно-фидерных устройств и высокочастотных элементов полезной нагрузки. Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства, испытания антенн.

Адрес: АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнева», ул. Ленина, д. 52, Железногорск, 662972, Россия

E-mail: danilov@iss-reshetnev.ru

References

1. Polenga S. V., Litinskaya E. A., Salomatov Yu. P., Krylov R. M. Reflectarray Antenna for Bidirectional VSAT Satellite Communication Networks. *Achievements of Modern Radioelectronics*. 2012, no. 9, pp. 39–42.
2. Polenga S. V., Alexandrin A. M., Salomatov Yu. P., Lemberg K. V., Popovich A. A. Dual Ku/Ka-Band Feed Horn for Satellite Ground Stations. *Achievements of modern radioelectronics*. 2016, no. 11, pp. 43–47.
3. Martinez-de-Rioja E., Encinar J. A., Florencio R., Boix R. R. Dual Polarized Reflectarray Antenna to Generate Independent Beams in Ku and Ka Bands. 10th European Conf. on Antennas and Propagation, Davos, Switzerland, 10–15 April 2016. Piscataway, IEEE, 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481439
4. Martinez-de-Rioja E., Encinar J. A., Pino A., Gonzalez-Valdes B. Design of Bifocal Dual Reflectarray Antennas in Ka-Band to Generate a Multi-Spot Coverage from Geostationary Satellites. 13th European Conf. on Antennas and Propagation, Krakow, Poland, 31 March 2019 – 5 April 2019. Piscataway, IEEE, 2019, pp. 1–5.
5. Arrebola M., Encinar J. A., Barba M. Multifed Printed Reflectarray with Three Simultaneous Shaped Beams for LMDS Central Station Antenna. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 2001, vol. 56, no. 6, pp. 1518–1527. doi: 10.1109/TAP.2008.923360
6. Abdollahvand M., Encinar J. A., Forooghi K., Atlasbaf Z., Barba M. Single-Layer Dual-Frequency Reflectarray for Ka-Band Antennas. 10th European Conf. on Antennas and Propagation. Davos, Switzerland, 10–15 April 2016. Piscataway, IEEE, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481879
7. Antonov Y. G., Sugak M. I., Ballandovich S. V., Kostikov G. A., Liubina L. M. Design of Wideband Reflectarray Antennas. 14th European Conf. on Antennas and Propagation. Copenhagen, Denmark, 15–20 March 2020. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 1–5. doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135649
8. Ballandovich S. V., Liubina L. M., Sugak M. I. Non-Planar Full-Metal Slot Reflectarray Antenna. 23rd Intern. Microwave and Radar Conf. Warsaw, Poland, 5–8 Oct. 2020. Piscataway, IEEE, 2019, pp. 338–341. doi: 10.23919/MIKON48703.2020.9253864
9. Gao Q., Wang J. Bandwidth Enhancement Element for Linearly Polarized Reflectarray Design in Ku-band. 7th IEEE Intern. Symp. on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies. Xi'an, China, 24–27 Oct. 2017. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 34–36. doi: 10.1109/MAPE.2017.8250789
10. Hamzavi-Zarghani Z., Atlasbaf Z. A New Broadband Single-Layer Dual-Band Reflectarray Antenna in X- and Ku-Bands. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2015, vol. 14, pp. 602–605. doi: 10.1109/LAWP.2014.2374351
11. Polenga S. V., Erokhin A. A., Krylov R. M., Stankovsky A. V., Litinskaya E. 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, Divnomorskoe, Russia*, 24–28 June 2019. Piscataway, IEEE, 2019, pp. 281–284. doi: 10.1109/RSEMW.2019.8792697
12. Pozar D. M., Targonski S. D., Pokuls R. A Shaped-Beam Microstrip Patch Reflectarray. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 1999, vol. 47, no. 7, pp. 1167–1173. doi: 10.1109/8.785748
13. Florencio R., Encinar J. A., Boix R. R., Losada V., Toso G. Reflectarray Antennas for Dual Polarization and Broadband Telecom Satellite Applications. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1234–1246. doi: 10.1109/TAP.2015.2391279
14. Shamsaei Malfajani R., Abbasi Arand B. Dual-band Orthogonally Polarized Single-Layer Reflectarray Antenna. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*.

Двухдиапазонная отражательная антенная решетка Ka/Q-диапазонов частот

A Dual Ka/Q-Band Reflectarray

2017, vol. 65, no. 11, pp. 6145–6150. doi: 10.1109/TAP.2017.2754459

15. Hasani H., Kamyab M., Mirkamali A. Low Cross-Polarization Reflectarray Antenna. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2011, vol. 59, no. 5, pp. 1752–1756. doi: 10.1109/TAP.2011.2123071

16. Malfajani R. S., Atlasbaf Z. Design and Implementation of Broadband Single-Layer Reflectarray Antenna with Large-Range Linear Phase Elements. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2012, vol. 11, pp. 1442–1445. doi: 10.1109/LAWP.2012.2228147

17. Pozar D. M., Schaubert D. H. Analysis of an Infinite Array of Rectangular Microstrip Patches with

Idealized Probe Feeds. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1984, vol. 32, pp. 1101–1107. doi: 10.1109/TAP.1984.1143211

18. Pozar D. M. Analysis of an Infinite Phased Array of Aperture Coupled Microstrip Patches. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1989, vol. 37, pp. 418–425. doi: 10.1109/8.24161

19. Ivanov A. S., Lemberg K. V., Polenga S. V., Krylov R. M., Salomatov Yu. P. Implementation of Antenna Near-Field Scanning without Using Probe Position Sensors. Intern. Siberian Conf. on Control and Communications, Omsk, Russia, 21–23 May 2015. Piscataway, IEEE, 2015, pp. 1–3. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147334.

Information about the authors

Stanislav V. Polenga, Master's degree in Radio Engineering (2009), senior lecturer at the Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. 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>

Aleksey A. Erokhin, Cand. Sci. (Eng.) (2021), senior lecturer of Department of Radio Engineering. Area of expertise: digital beamforming algorithm; math processing and modelling of the adaptive antenna systems for different applications.

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

E-mail: aerokhin@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7707-8792>

Roman O. Ryazantsev, Cand. Sci. (Eng.) (2019), Associate Professor at the Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. 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) of the Siberian Federal University. 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), engineer at the Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. The 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 at the Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. 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>

Eugeny R. Gafarov, Cand. Sci. (Eng.) (2021), Assistant Professor of Radio Engineering Department of the Siberian Federal University. The author of 40 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; GNSS antennas and antenna arrays.

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

E-mail: egafarov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7810-7196>

Anton M. Aleksandrin, Cand. Sci. (Eng.) (2020), Associate Professor of Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. The author of 30 scientific publications. Area of expertise: wideband antennas; antenna arrays; metamaterials.

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

E-mail: aalexandrin@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8428-5562>

Yury P. Salomatov, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Professor (2013) at the Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. 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>

Igor Yu. Danilov, Cand. Sci. (Eng.) (2017), Head of the Department for the Development and Testing of Antenna-Feeder Devices and High-Frequency Payload Elements. The author of 20 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices, antenna testing.

Address: JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems, 52, Lenina St., Zheleznogorsk 662972, Russia

E-mail: danilov@iss-reshetnev.ru
