

Д.Е. Губарев, Ю.В. Юханов

ШИРОКОПОЛОСНОЕ ДОУ НА ОСНОВЕ ПЕЧАТНОЙ ЛИНЗЫ РОТМАНА ДЛЯ МНОГОЛУЧЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Наиболее известной диаграммообразующим устройством (ДОУ) (для линейных и плоских МАР) является линза Ротмана, большой интерес к которой вызван тем, что она позволяет формировать веер лучей МАР в широком пространственном секторе углов (широкоугольное сканирование), имеет довольно высокий КПД и МАР с линзой Ротмана имеет низкий уровень боковых лепестков. Другим достоинством МАР с линзой Ротмана является слабая зависимость положения лучей в пространстве от частоты, в отличие от МАР с матричной ДОУ Батлера, у которой при высоком КПД (теоретически 100%) положение лучей зависит от частоты. Однако разработанные ранее аналоги линзы Ротмана, имеют большие размеры, требуют в конструкции дополнительные составные части, что влияет на коэффициент передачи линзы в рабочем диапазоне частот от 2 ГГц до 20 ГГц и на согласованность устройства с другими узлами приемопередающей аппаратуры. Отсюда следует, что исследование и модернизация линзовых структур, применительно к многолучевым антенным решеткам (МАР) является актуальной темой для исследования. Цель работы предложить методику расчета линзы Ротмана, модернизировать конструкцию линзы, изготовить макет линзы и провести экспериментальное исследование линзы с целью получения конструктивных методов оптимизации характеристик линз Ротмана для использования их в МАР в диапазоне частот от 2 ГГц до 20 ГГц. В результатах статьи оценены габариты линзы, масса линзы, коэффициент передачи, простота конструкции по сравнению с разработанными ранее аналогами. Предложена методика расчета геометрии линзы Ротмана, экспериментально на векторном анализаторе цепей исследован КСВ печатной линзы Ротмана, получены конструктивные методы оптимизации характеристик линз Ротмана для использования их в многолучевых антенных решетках. Изготовлен макет широкополосной линзы Ротмана в микрополосковом исполнении с максимальным КСВ 1.3 (S21) в диапазоне рабочих частот от 2 до 20 ГГц, размер линзы составил 150x100, масса линзы составила 0.4 кг. По этим параметрам линза Ротмана превосходит разработанные ранее аналоги.

Диаграммообразующее устройство; коэффициент стоячей волны; амплитудно-фазовое распределение; многолучевые антенные решетки (МЛА).

D.E. Gubarev, Yu.V. Yukhanov

BROADBAND DOU BASED ON ROTHMAN'S PRINTED LENS FOR MULTIBEAM ANTENNA ARRAYS

The most well-known beamforming device (DOU) (for linear and flat MAR) is the Rothman lens, which is of great interest because it allows you to form a fan of MAR rays in a wide spatial sector of angles (wide-angle scanning), has a fairly high efficiency and MAR with a lens Rothman has a low level of side lobes. Another advantage of the MAR with a Rothman lens is the weak dependence of the position of the rays in space on frequency, in contrast to the MAR with a Butler matrix DOE, in which, at a high efficiency (theoretically 100%), the position of the rays depends on the frequency. However, the previously developed analogs of the Rothman lens are large and require additional components in the design, which affects the transmission coefficient of the lens in the operating frequency range from 2 GHz to 20 GHz and the consistency of the device with other components of the transceiver equipment. It follows that the study and modernization of lens structures in relation to multibeam antenna arrays (MAR) is a topical topic for research. The purpose of the work is to propose a method for calculating the Rothman lens, modernize the lens design, make a lens model and conduct an experimental study of the lens in order to obtain constructive methods for optimizing the characteristics of the Rothman lenses for use in MAR in the frequency range from 2 GHz to 20 GHz. In the results of the article, the dimensions of the lens, the mass of the lens, the transmission coefficient, and the simplicity of the design are estimated in

comparison with the previously developed analogues. A technique for calculating the geometry of a Rotman lens is proposed, the SWR of a printed Rotman lens is experimentally studied on a vector network analyzer, constructive methods are obtained for optimizing the characteristics of Rotman lenses for use in multibeam antenna arrays. A model of a broadband Rotman lens in microstrip design with a maximum SWR of 1.3 (S21) in the operating frequency range from 2 to 20 GHz was made, the lens size was 150x100, and the lens weight was 0.4 kg. According to these parameters, the Rothman lens surpasses the analogues developed earlier.

Beam-forming device; standing wave ratio; amplitude-phase distribution; multibeam antenna arrays (MLA).

Введение. Многолучевая антенная решетка (МАР) предназначена для одновременного формирования набора лучей ДН в заданном угловом секторе без использования управляемых фазовращателей в широкой полосе рабочих частот. Это позволяет использовать МАР для построения радиоприемных систем, в которых необходимо обеспечить беспропусковой по частоте и направлению прием сигналов.

При построении широкополосных МАР часто применяются диаграммообразующие устройства на основе линзы Ротмана [1–12], позволяющей формировать веер лучей МАР в широком пространственном секторе углов со сравнительно низким уровнем боковых лепестков ДН и высоким КПД. Другим классическим достоинством МАР с линзой Ротмана является слабая зависимость положения лучей в пространстве от частоты.

К основным типам линз Ротмана относятся волноводные и печатные (полосковые), каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Волноводные воздушные линзы Ротмана позволяют исключить потери в диэлектриках, достаточно просты по конструкции и позволяют обеспечить высокую повторяемость выходных параметров. К недостаткам следует отнести большой вес, большой объем механических работ и большую материалоемкость, в чем они проигрывают печатным линзам Ротмана [1–12]. Соотношение указанных достоинств и недостатков во многом определяется диапазоном рабочих частот МАР.

В последние несколько десятилетий широкое распространение получили сканирующие антенные системы, такие как фазированные антенные решетки (ФАР) и многолучевые антенные решетки (МЛАР). Большой интерес проявляется в исследовании повышения точности пеленгования в радиопеленгаторах за счет модернизация линзовых структур и применение их в многолучевых антенных решетках (МАР). Поэтому данная тема исследования является актуальной.

Ниже приведены источники, посвященные различным конструкциям МАР на основе линзы Ротмана:

Ранее в нашей работе [1] была описана печатная ДОО на базе линзы Ротмана. Был выполнен расчет в программе полного электродинамического моделирования, во временной области. Была описана оценка фазовых ошибок амплитудно-фазового распределения на выходах линзы Ротмана, предложены конструктивные методы оптимизации характеристик линзы для использования их в многолучевых антенных решетках.

Pourahmadazar J. and Denidni T.A. в статье [2] впервые представлена многолучевая коническая щелевая антенная решетка (TSA) с интегрированным волноводом в подложку, работающая на частоте 10 ГГц (SIW).

Rajabalian M. and Zakeri B. в статье [3] приведена конструкция линзы Ротмана, в которой за счет оптимизации положения портов фазовая погрешность уменьшается.

Шурховецкий А.Н., Алпатова А.В. в статье [4] изложены основные этапы разработки многолучевой антенной решетки миллиметрового диапазона с перекрытием 1,5 на основе волноводной линзы Ротмана. Приведены результаты электродинамического моделирования и эксперимента.

Josef G. Worms, Peter Knott and Dirk Nuessler. В [5] описана экспериментальная система PALES: многофункциональная антенная решетка в диапазоне X с широкополосным формированием луча на базе линзы Ротмана.

Takashi Katagi, Seiji Mano, Shin-ichi Sato. в статье [6] описывают линзы Ротмана, полученную путем введения новой переменной конструкции. Показан метод проектирования, минимизирующий фазовую погрешность апертуры антенны с линейной антенной решеткой.

Yu Jian Cheng, Wei Hong, Ke Wu, Zhen Qi Kuai, Chen Yu, Ji Xin Chen, Jian Yi Zhou and Hong Jun Tang. в публикации [7] предложен новый тип многолучевой антенны на основе интегрированного волновода (SIW) для мобильной спутниковой связи с использованием методов переключения и разнесения луча. Он использует линзу SIW Ротмана в качестве сети формирования луча.

Singhal P.K., Sharma P.C., Gupta R.D. в статье [8], предложена конструкция компактной линзы Ротмана для широкоугольного сканирования. Были приведены уравнения для проектирования линзы.

Park C. S., Kim J., Min S. в статье [9] обсуждается несколько типов диэлектрических линз Ротмана. Они сравниваются и обсуждаются с точки зрения их методов возбуждения, потерь и диаграмм направленности.

Kim S., Zepeda P., Chang K. в публикации [10] описана многолучевая фазированная решетка разработанная на основе микрополосковой линзы Ротмана и фазовращателя, управляемого пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭТ) в Кадиапазоне.

Основываясь на полученных данных из статей была упорядочена и сформулирована методика расчёта геометрии линзы Ротмана, для разработки макета ДООУ на основе печатной линзы Ротмана, который работал бы в диапазоне частот в таком же или близком что и рассмотренные аналоги [1–12], а именно от 2 ГГц до 20 ГГц, имел бы минимальный размер конструкции и коэффициент передачи линзы был равен или меньше 1,5.

Расчет геометрии линзы Ротмана. Линза Ротмана представляет собой трехфокальную кабельную линзу [2] с тремя точками идеальной фокусировки, одна из которых лежит на оси линзы, а две другие расположены симметрично относительно этой оси.

Линзу Ротмана можно использовать как диаграммообразующую схему для формирования нескольких лучей линейной антенной решеткой. Для наглядности приведена схема соединения линзы Ротмана с антенной решеткой на рис. 1. Методика расчета, описанная в данной статье, основывается на формулах освещенных в работах [2, 4–15].

Принцип формирования сигнала в линзе Ротмана приведен на рис. 2. При расчете линзы Ротмана считаются заданными положение фокальных точек F_1 , F_2 и F , а следовательно и величины r_0 , S_0 , a на рис. 2, также считаются заданными ординаты точек выхода лучей y_1 (положение излучателей антенной решетки).

По этим параметрам рассчитываются контуры Σ_1 и Σ_2 линзы, а так же длина отрезков $l=t-t_0$.

В работе [2,8] приведены формулы для определения этих параметров, приведем эти формулы в наших обозначениях (все размеры нормированы относительно r_0).

Электрические длины отрезков находятся из решения квадратного уравнения (1).

$$l = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (1)$$

где

$$a = 1 - y_1^2 - \left(\frac{S_0 - 1}{S_0 - \cos\alpha}\right)^2$$

$$b = 2S_0 * \frac{\cos\alpha - 1}{S_0 - \cos\alpha} - \frac{(S_0 - 1)y_1^2 \sin^2\alpha}{(S_0 - \cos\alpha)^2} - 2y_1^2$$

$$c = \frac{S_0 y_1^2 \sin^2\alpha}{S_0 - \cos\alpha} - \frac{y_1^4 \sin^4\alpha}{4(S_0 - \cos\alpha)^2} - y_1^2$$

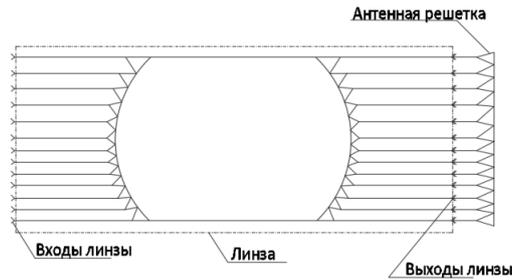


Рис. 1. Пример соединения линзы Ротмана с антенной решеткой

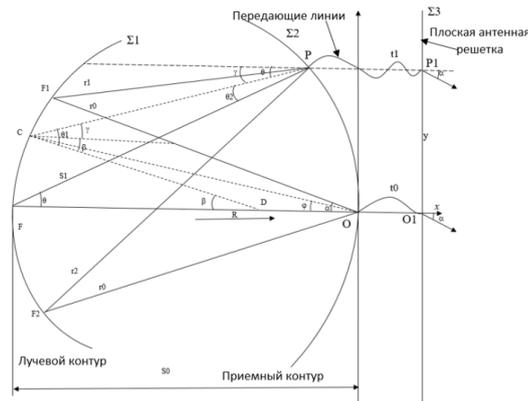


Рис. 2. Принцип формирования сигнала в линзе Ротмана

При этом знаки плюс или минус в (1) соответствуют случаям $b \geq 0$ и $b < 0$.

Профиль линзы Σ_2 в полярной системе координат S_1, θ с центром в точке F по найденным значениям l определяется уравнениями [2, 8]:

$$\sin\theta = y_1 \frac{1-l}{S_0-l} \quad (2)$$

$$S_1 = S_0 + l$$

или в декартовой системе

$$y = S_1 \sin\theta \quad (3)$$

$$x = S_1 \cos\theta - S_0.$$

Радиус окружности, проходящей через точки $F_1 F_2$ (контур Σ_1 линзы) находится по формуле [8]:

$$R = \frac{1+S_0^2-2S_0\cos\alpha}{2(S_0-\cos\alpha)}. \quad (4)$$

В декартовой системе координат профиль Σ_1 может быть записан [2, 8]:

$$\begin{aligned} x &= R \sin \beta \\ y &= R(1 - \cos \beta) - S_0, \end{aligned} \quad (5)$$

здесь β -текущий угол.

Величина S_0 определяет фазовые ошибки на выходах линзы для облучателей, не совпадающих с фокальными точками. Близкое к оптимальному значение S_0 находится из выражения (6) [2].

$$S_0 = \left(1 + \frac{\alpha^2}{2}\right). \quad (6)$$

Используя методику, необходимо в САПР рассчитать контуры в полярной декартовой системе координат и вычислить фазовые ошибки по методу геометрической оптики.

Входными параметрами являются: S_0, α, y_1 и число входов. При расчете геометрии линзы Ротмана использован метод, который не дает информации об амплитудном распределении на выходах линзы.

Общие соотношения для КПД в ДОС. Основными требованиями, предъявляемыми к любым ДОС для МАР являются требования на высокую точность воспроизведения требуемого амплитудно-фазового распределения, высокий КПД (малые потери) и технологичность [6].

Первое требование обеспечивается разработкой методов расчета высокой точности, требованиями к точности изготовления.

Требования высокого КПД для ДОС наталкиваются на принципиальное ограничение, которое сводится к тому, что получение идеального КПД (равного 1) возможно лишь в ДОС с частотно-независимым фазовым распределением, а это означает, что положение лучей в МАР с такой ДОС будет частотнозависимым [7, 8].

Любую ДОС можно рассматривать как некоторый многополюсник с N выходами и M входами, который описывается своей матрицей рассеяния. Элемент матрицы рассеяния такого многополюсника может быть записан [8]:

$$S_{ek} = A_{ek} e^{-i\psi}, \quad \psi = k\varphi_e, \quad (7)$$

где A_{ek} – амплитуда коэффициента передачи, ψ – фаза коэффициента передачи, φ_e – фазовый сдвиг между соседними выходами.

Будем предполагать, что рассматриваемый многополюсник взаимный, т.е. входы и выходы согласованы.

При возбуждении какого-либо входа многополюсника единичной мощностью, сумма мощностей на выходах определяется выражением [8]:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N |S_{ek}|^2 &= \sum_{k=1}^N A_{ek}^2 = \xi \\ 0 &\leq \xi \leq 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Величину ξ будем, по аналогии с [5, 8], называть эффективностью l -го канала или КПД l входа ДОС.

Пусть на все входы многополюсника подана единая мощность, тогда ток на K -выходе будет:

$$I_k = \sum_{l=1}^N S_{ek}. \quad (9)$$

Сумма мощностей на выходах многополюсника, или полезная мощность $P_{пол}$ равна

$$P_{пол} = \sum_{k=1}^N |I_k|^2 \quad (10)$$

$$P_{пол} = \sum_{k=1}^N \left| \sum_{l=1}^M S_{ek} \right|^2. \quad (11)$$

Поскольку каждый вход возбужден единичной мощностью, то [8–10]

$$P_{пол} \leq M. \quad (12)$$

Знак равенства будет в случае отсутствия потерь. Квадрат суммы в (11) можно переписать следующим образом

$$|\sum_{l=1}^M S_{ek}|^2 = \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M S_{ek} S_{mk}^* \quad (13)$$

С учетом этого выражения (11) переписывается

$$P_{\text{пол}} = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M S_{ek} S_{mk}^* \quad (14)$$

или

$$P_{\text{пол}} = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M A_{ek} A_{mk} e^{-ik(\varphi_e - \varphi_m)} \quad (15)$$

С учетом выражения (8) можно записать

$$\sum_{l=1}^M \xi + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M A_{ek} A_{mk} e^{-ik(\varphi_e - \varphi_m)} = P_{\text{пол}} \leq M. \quad (16)$$

Таким образом, полученное выражение дает связь между эффективностью каждого канала и амплитудно-фазовым распределением.

Задавая амплитудно-фазовым распределением на выходах многополюсника можно оптимизировать КПД [1-4].

Рассмотрим случай равноамплитудного распределения и равной эффективности каналов, то есть $A_{ek} = A$, $\xi = \xi_e$, тогда выражение (16) примет вид:

$$M\xi + A^2 \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M e^{-ik(\varphi_e - \varphi_m)} = P_{\text{пол}} \quad (17)$$

При принятых предположениях из (8) следует

$$A^2 = \frac{\xi}{N'} \quad (18)$$

Проведя суммирование по K в выражении (17) получим

$$M\xi + \frac{\xi}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M e^{-i\frac{N+1}{2}(\varphi_e - \varphi_m)} * \frac{\sin\frac{N}{2}(\varphi_e - \varphi_m)}{\sin\frac{1}{2}(\varphi_e - \varphi_m)} = P_{\text{пол}} \leq M. \quad (19)$$

Пусть $\xi=1$, $P_{\text{пол}}=M$ тогда

$$\sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M e^{-i\frac{N+1}{2}(\varphi_e - \varphi_m)} * \frac{\sin\frac{N}{2}(\varphi_e - \varphi_m)}{\sin\frac{1}{2}(\varphi_e - \varphi_m)} = 0. \quad (20)$$

Это выражение будет справедливо, если

$$\varphi_e - \varphi_m = \frac{2\pi}{N} * P, \quad p = 1, 2, \dots \quad (21)$$

Таким образом, условие отсутствия потерь приводит к условию (21) на фазовые сдвиги.

Выражение (21) показывает, что в случае отсутствия потерь фазовые сдвиги не зависят от частоты, а это означает, что положение лучей МАР в пространстве будет зависеть от частоты, что следует из формулы [8]:

$$\sin\theta_0^l = \frac{\varphi_e}{kd}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (22)$$

где θ^l – положение l -го луча; φ_e – фазовый сдвиг между выходами ДОС; d – расстояние между излучателями; λ – длина волны.

Для МАР с частотнонезависимым положением лучей необходима ДОС с линейной зависимостью фазового сдвига от частоты, а это как следует из предыдущего рассмотрения, означает, что КПД каналов такой ДОС будет меньше 1. На основании описанных методик расчёта был разработан макет ДОУ и проведено экспериментальное исследование.

Эксперимент. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 3. Для настройки антенны использовался Анализатор цепей «Agilent» серии PNA-L N5235A-Option 216 с калибровочными комплектами 85056A, N4693A (модуль электронной калибровки), а также комплект гибких измерительных кабелей 85133F. В ходе эксперимента измеряли параметр S11

(КСВН) и параметр S_{21} (коэффициент передачи ДОУ) только центрального канала, а остальные входные и выходные порты были нагружены нагрузками с сопротивлением 50 Ом. Данные условия эксперимента установили с целью получения основных оптимальных характеристик центрального канала линзы в диапазоне рабочих частот от 2 ГГц до 20 ГГц без учета вносимых потерь соседних каналов.

К линзе Ротмана предъявлялись следующие требования:

- ◆ диапазон рабочих частот от 2 до 20 ГГц;
- ◆ КСВН центрального канала на входе линзы не более 2 (S_{11});
- ◆ Коэффициент передачи не более 2 (S_{21});
- ◆ материал корпуса латунь ЛС59;
- ◆ число входных портов 8;
- ◆ поглотитель «Лист-51С» ТУ2534-04600152075-2008;
- ◆ толщина поглотителя 5 мм;
- ◆ материал линзы полистирол, наполненный двуокисью титана ПТ-16 $\epsilon=16$;
- ◆ тип портов СР-50-725 ФВ;
- ◆ масса 0.4 кг;
- ◆ число выходных портов 11.

Фотография разработанного макета линзы Ротмана и листа поглотителя представлены на рис. 4 и 5.

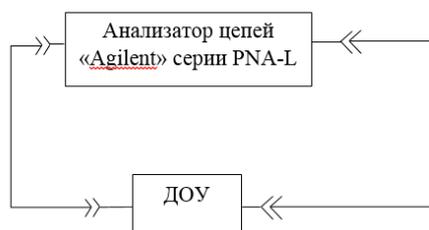


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки

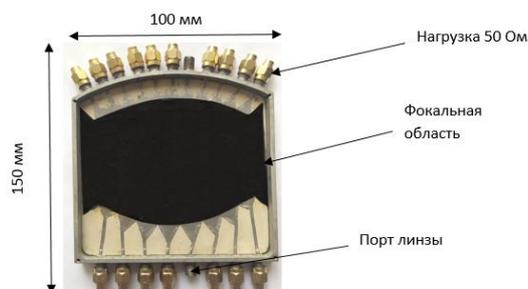


Рис. 4. Фото ДОУ на основе линзы Ротмана



Рис. 5. Поглотитель «Лист-51С»

КСВ и коэффициент передачи ДОУ параметры (S11, S21) центрального канала представлены на рис. 6 и 7.



Рис. 6. КСВ центрального канала на входе ДОУ (S11)



Рис. 7. Коэффициент передачи ДОУ (S21)

Заключение. Предложена методика расчета геометрии линзы Ротмана. Разработан макет ДОУ для диапазона частот от 2 ГГц до 20 ГГц. Проведено экспериментальное исследование макета линзы. В результате эксперимента получены графики КСВН и коэффициента передач рисунки 6 и 7. Было обнаружено, что коэффициент стоячей волны центрального канала по входу макета ДОУ (параметр S11) на частоте 13 ГГц составляет 2.8, что не является оптимальным значением. Это показывает, что по входу вносятся дополнительное переотражение мощности сигнала и данный параметр значение КСВ ухудшает согласованность линзы с другими составными частями МАР. Данная проблема решается заменой разъемов ДОУ СР-50-725 ФВ на врубные СВЧ разъемы SMP-KBB2 с низкими потерями на частотах 0.01-18 ГГц (КСВ<1.5) и подключением на входы ДОУ аттенуаторов с коэффициентом ослабления 3 дБ.

Так же на основе полученных результатов эксперимента видно, что максимальный коэффициент передачи (S21) в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц равен 1.3, что удовлетворяет заданным требованиям к ДОУ. В табл. 1 сведены параметры линзы Ротмана, полученные в результате экспериментального исследования.

Таблица 1

Основные параметры ДООУ

Наименование параметра, размерность	Задано	Измерено
Диапазон рабочих частот, ГГц	2-20	2-20
Материал корпуса	ЛС59	ЛС59
Размер ДООУ, мм	150x100	150x100
Число входных лучей, шт.	8	8
Число выходных лучей, шт.	11	11
Коэффициент передачи (S21)	не более 2	1.3
КСВ (S11)	не более 2	2.8
масса, кг	0.4	0.4
Поглотитель	«Лист-51С» ТУ2534-04600152075-2008	«Лист-51С» ТУ2534-04600152075-2008
Тип портов	СР-50-725 ФВ	СР-50-725 ФВ

Как видно из результатов исследования диаграммообразующее устройство соответствует заявленным требованиям и может быть использована в многолучевых антенных решетках в диапазоне рабочих частот от 2 до 20 ГГц, с учетом предложенных доработок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Губарев Д.Е.* Разработка диаграммообразующих устройств на базе линзы Ротмана // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информатика и вычислительная техника»: Сб. статей II Всероссийской научно-технической конференции. – Анапа, 2020. – С. 87-92.
2. *Pourahmadazar J. and Denidni T.A.* Multi-beam Tapered Slot Antenna Array Using Substrate Integrated Waveguide Rotman Lens // Proceedings of the 45th European Microwave Conference (EuMA). – 2015. – P. 1457-1450.
3. *Rajabalian M. and Zakeri B.* An Implemented Non-Focal Rotman Lens // Proceedings of the 45th European Microwave Conference (EuMA). – 2015. – P. 1415-1418.
4. *Шурховецкий А.Н., Алпатова А.В.* Многолучевая антенная решетка миллиметрового диапазона на основе волноводной линзы Ротмана // Радиотехника. – 2018. – № 11. – С. 94-98.
5. *Josef G. Worms, Peter Knott and Dirk Nuessler.* The experimental system PALES: signal separation with a multibeam-system based on a Rotman lens // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – June 2007. – Vol. 49, No. 3. – P. 95-107.
6. *Takashi Katagi, Seiji Mano, Shin-ichi Sato.* An improved design method of Rotman lens antennas // IEEE Transactions on antennas and propagation. – May 1984. – Vol. AP-32, No. 5. – P. 524-527.
7. *Yu Jian Cheng, Wei Hong, Ke Wu, Zhen Qi Kuai, Chen Yu, Ji Xin Chen, Jian Yi Zhou and Hong Jun Tang.* Substrate integrated waveguide (SIW) Rotman Lens and its Ka-band multibeam array antennas applications // IEEE Transactions on antennas and propagation. – August 2008. – Vol. 56, No. 8. – P. 2504-2513.
8. *Singhal P.K., Sharma P.C., Gupta R.D.* Rotman lens with equal height of array and feed contours // IEEE Transactions on antennas and propagation. – August 2003. – Vol. 51, No. 8. – P. 2048-2056.
9. *Park C.S., Kim J., Min S.* TM0 mode surface wave excited dielectric slab Rotman lens // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2007. – Vol. 6. – P. 584-587.
10. *Kim S., Zepeda P., Chang K.* Piezoelectric transducer controlled multiple beam phased array using microstrip Rotman lens // IEEE Microwave and wireless components letters. – April 2005. – Vol. 15, No. 4. – P. 247-249.

11. Зеленин И.А., Рыжиков А.Г., Федоров С.М. AP на основе линзы Ротмана // Вестник Воронежского государственного технического университета. Радиоэлектроника и системы связи. – 2012.
12. Hall L., Hansen H., Abbott D. Rotman lens for mm-wavelengths // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4935. – P. 215-221.
13. Гошин Г.Г. Устройства СВЧ и антенны. Ч. 2. Антенны: учебное методическое пособие. – Томск: ТУСУР, ТМЦДО, 2003. – 130 с.
14. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
15. Tao Y.M., Delisle G.Y. Lens-fed multiple beam array for millimeter wave Indoor Communications // IEEE Trans. On Antennas and propagation. – May 1997. – Vol. AP-32, No. 5. – P. 2206-2209.
16. Крюков Д.Ю., Курьянов Ю.С., Пастернак Ю.Г. Исследование ДООУ МЛАР на основе плоской линзы Ротмана // Вестник Воронежского государственного технического университета. Радиоэлектроника и системы связи. – 2014.
17. Карпунин В.И., Неверетдинов Р.Р. Особенности пеленгационных характеристик МЛА с линзами Ротмана // Антенны. – 2018. – № 6. – С. 41-46.
18. Suarez F.C., Mendez D.N. and Baquero-Escudero M. Rotman lens with ridge gap waveguide technology for millimeter wave applications // Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – 2013. – P. 4006-4009.
19. Nussler D., Fuchs H.-H., Brauns R. Rotman Lens for the millimeter wave frequency range // Proceedings of the 37th European Microwave Conference (EuMA). – 2007. – P.696-699.
20. By Ollie Holt. Technology Survey a Sampling of RWRs and ESM Systems // The Journal Electronic Defense. – Yune 2015. – P. 39-46.

REFERENCES

1. Gubarev D.E. Razrabotka diagrammoobrazuyushchikh ustroystv na baze linzy Rotmana [Development of diagram-forming devices based on the Rotman lens], *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki po napravleniyu «Informatika i vychislitel'naya tekhnika»: Sb. statey II Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [The state and prospects of development of modern science in the direction of "Computer Science and computer engineering": Collection of articles of the II All-Russian Scientific and Technical Conference], Anapa, 2020, pp. 87-92.
2. Pourahmadazar J. and Denidni T.A. Multi-beam Tapered Slot Antenna Array Using Substrate Integrated Waveguide Rotman Lens, *Proceedings of the 45th European Microwave Conference (EuMA)*, 2015, pp. 1457-1450.
3. Rajabalian M. and Zakeri B. An Implemented Non-Focal Rotman Lens, *Proceedings of the 45th European Microwave Conference (EuMA)*, 2015, pp. 1415-1418.
4. Shurkhovetskiy A.N., Alpatova A.V. Mnogoluchevaya antennaya reshetka millimetrovogo diapazona na osnove volnovodnoy linzy Rotmana [Multipath antenna array of the millimeter range based on a Rotman waveguide lens], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2018, No. 11, pp. 94-98.
5. Josef G. Worms, Peter Knott and Dirk Nuessler. The experimental system PALES: signal separation with a multibeam-system based on a Rotman lens, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, June 2007, Vol. 49, No. 3, pp. 95-107.
6. Takashi Katagi, Seiji Mano, Shin-ichi Sato. An improved design method of Rotman lens antennas, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, May 1984, Vol. AP-32, No. 5, pp. 524-527.
7. Yu Jian Cheng, Wei Hong, Ke Wu, Zhen Qi Kuai, Chen Yu, Ji Xin Chen, Jian Yi Zhou and Hong Jun Tang. Substrate integrated waveguide (SIW) Rotman Lens and its Ka-band multibeam array antennas applications, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, August 2008, Vol. 56, No. 8, pp. 2504-2513.
8. Singhal P.K., Sharma P.C., Gupta R.D. Rotman lens with equal height of array and feed contours, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, August 2003, Vol. 51, No. 8, pp. 2048-2056.
9. Park C.S., Kim J., Min S. TM0 mode surface wave excited dielectric slab Rotman lens, *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2007, Vol. 6, pp. 584-587.

10. Kim S., Zepeda P., Chang K. Piezoelectric transducer controlled multiple beam phased array using microstrip Rotman lens, *IEEE Microwave and wireless components letters*, April 2005, Vol. 15, No. 4, pp. 247-249.
11. Zelenin I.A., Ryzhikov A.G., Fedorov S.M. AR na osnove linzy Rotmana [AR based on the Rotman lens], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Radioelektronika i sistemy svyazi* [Bulletin of the Voronezh State Technical University. Radio electronics and communication systems], 2012.
12. Hall L., Hansen H., Abbott D. Rotman lens for mm-wavelengths, *Proceedings of SPIE*, 2002, Vol. 4935, pp. 215-221.
13. Goshin G.G. Ustroystva SVCh i anteny. Ch. 2. Antenny: uchebnoe metodicheskoe posobie [Microwave devices and antennas. Part 2. Antennas: a training manual]. Tomsk: TUSUR, TMTSDO, 2003, 130 p.
14. Zhuk M.S., Molochkov Yu.B. Proektirovanie linzovykh, skaniruyushchikh, shirokodiapazonnykh antenn i fidernykh ustroystv [Design of lens, scanning, wide-band antennas and feeder devices]. Moscow: Energiya, 1973, 440 p.
15. Tao Y.M., Delisle G.Y. Lens-fed multiple beam array for millimeter wave Indoor Communications, *IEEE Trans. On Antennas and propagation*, May 1997, Vol. AP-32, No. 5, pp. 2206-2209.
16. Kryukov D.Yu., Kur'yanov Yu.S., Pasternak Yu.G. Issledovanie DOU MLAR na osnove ploskoy linzy Rotmana [DOE MLAR research based on Rotman's flat lens], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Radioelektronika i sistemy svyazi* [Bulletin of the Voronezh State Technical University. Radio electronics and communication systems], 2014.
17. Karpukhin V.I., Neveretdinov R.R. Osobennosti pelengatsionnykh kharakteristik MLA s linzami Rotmana [Features of direction finding characteristics of MLA with Rotman lenses], *Antenny* [Antennas], 2018, No. 6, pp. 41-46.
18. Suarez F.C., Mendez D.N. and Baquero-Escudero M. Rotman lens with ridge gap waveguide technology for millimeter wave applications, *Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2013, pp. 4006-4009.
19. Nussler D., Fuchs H.-H., Brauns R. Rotman Lens for the millimeter wave frequency range, *Proceedings of the 37th European Microwave Conference (EuMA)*, 2007, pp. 696-699.
20. By Ollie Holt. Technology Survey a Sampling of RWRs and ESM Systems, *The Journal Electronic Defense*, Yune 2015, pp. 39-46.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.И. Дулин.

Губарев Дмитрий Егорович – Южный федеральный университет; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89614132918; кафедра АиРПУ; аспирант.

Юханов Юрий Владимирович – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru; кафедра АиРПУ; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Gubarev Dmitriy Evgen'evich – Southern Federal University; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of A&RPU; post-graduate student.

Yukhanov Yuriy Vladimirovich – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru; phone: +79614132918; the department of A&RPU; head of the department; dr. of eng. sc.; professor.