

Разработка диаграммообразующей схемы для антенной решетки, работающей в W-диапазоне частот

Е.П. Грахова¹, Г.И. Абдрахманова¹, А.А. Ишмияров¹, И.Л. Виноградова¹,
И.К. Мешков¹, А.Х. Султанов¹, В.Х. Багманов¹, А.Р. Гизатулин¹

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, Карла Маркса 12,
Уфа, Россия, 450008

Аннотация. В статье представлена разработка диаграммообразующей схемы для антенной решетки, функционирующей в диапазоне 75–110 ГГц. Предлагаемое устройство основано на линзе Ротмана, форма которой рассчитана с учетом конфигурации антенной решетки и требуемых распределений ее диаграммы направленности. Схема линзы Ротмана имеет три входных порта, соответствующих трем выходным радиоканалам, переносящим различные состояния орбитального углового момента. Применение данной диаграммообразующей схемы позволит значительно уменьшить габаритные размеры антенной системы и может быть реализовано на основе микрополосковой технологии по аналогии с антенной решеткой.

1. Введение

Одной из основных тенденций развития современных телекоммуникационных сетей является поиск возможностей повышения их эффективности, а также качества предоставляемых услуг. Освоение более высокочастотного диапазона представляется одним из возможных решений указанных задач ввиду отсутствия строгих ограничений на уровне излучения и его низкой загруженности. В частности, W-поддиапазон 76-77,5 ГГц и 77,5–78 ГГц определен для использования в мобильных приложениях на территории Российской Федерации [1] с возможностью обеспечения связи на скоростях до 100 Гбит/с.

Еще одной перспективной технологией по повышению эффективности современных систем связи является использование уплотнения по орбитальному угловому моменту (ОУМ) электромагнитных волн, что предоставляет новый набор базисных функций для уменьшения перегрузки частотного ресурса и обеспечения безопасности данных.

ОУМ – это спиральная дислокация волнового фронта электромагнитной волны, определяемая фазовым коэффициентом $e^{il\phi}$, где l – целое число, определяющее порядок ОУМ. Таким образом, волны с ненулевым ОУМ образуют ортогональный базис радиосигналов, которые могут быть использованы для мультиплексирования. Защищенные каналы связи, а также множественный доступ могут быть реализованы с использованием радиоволн с различными порядками ОУМ в существующих и будущих сетях радиосвязи, значительно экономя частотный ресурс.

В статье [2] было показано, что существует несколько способов генерации сигналов с заданным порядком ОУМ, в частности, использование круговых антенных решеток, антенн со спиральной фазовой пластиной и т. д. В статье [3] было показано, что применение круговых антенных решеток, элементы которых запитаны сигналами одинаковой амплитуды, но разной

фазы, является одним из оптимальных решений ввиду его гибкости и быстрой перестройки для формирования радиоволн с различными порядками ОУМ без изменения конфигурации решетки. Представленный образец антенной решетки наглядно продемонстрировал возможность генерации сигналов с тремя порядками ОУМ: 0 и ± 1 .

Как было сказано выше, обязательным условием формирования подобного сигнала является наличие сигналов с разными фазами на входах элементов антенной решетки. С этой целью могут быть применены различные фазосдвигающие и диаграммообразующие схемы (ДОС). Применение ДОС для создания требуемого амплитудно-фазового распределения на элементах фазированной антенной решетки (ФАР) имеет большое преимущество перед дискретными фазовращателями, которые для выбранного рабочего диапазона частот характеризуются большими вносимыми потерями, отсутствием возможности перестройки системы и высокой стоимостью [4-6]. В свою очередь, наиболее распространенные виды ДОС, представленные, например, матрицей Батлера и линзой Ротмана, реализуются на основе микрополосковой или волноводной технологии, что позволяет интегрировать их вместе с ФАР на одной пластине, существенно снижая при этом массогабаритные показатели антенны и стоимость ее изготовления.

ДОС на основе матрицы Батлера была впервые предложена в работе [7] и нашла широкое применение для решения вопросов фазового сканирования. Матрица, выполненная в виде микрополосковых дорожек, имеет несколько входных портов, переключение между которыми позволяет изменить угол наклона главного максимума диаграммы направленности на требуемое значение. На сегодняшний день представлено несколько работ, посвященных разработке данного вида ДОС для W-диапазона частот. Так, в работе [8] представлена матрица Батлера 4×4 , изготовленная методом струйной печати на полимере для 5-ти элементной ФАР, функционирующей на частоте 90 ГГц. Матрица, реализованная на основе пересекающихся прямоугольных микро-коаксиальных линий, представлена в работе [9]. Авторами работы показано, что подобный трехмерный дизайн ДОС позволяет существенно снизить потери и фазовые ошибки излучающей системы. Наконец, в работе [10] представлена ФАР с ДОС в виде матрицы Батлера, выполненная на основе интегральных волноводов. Помимо технологических преимуществ, таких, как малый вес, низкая стоимость и высокая степень интеграции элементов, данное устройство также характеризуется высокой направленностью излучения. Однако, несмотря на вышеперечисленные достоинства, главным недостатком данного вида ДОС являются сравнительно большая площадь матрицы, которая должна быть обеспечена для реализации требуемого управления углом ДН.

Одним из возможных способов формирования сигнала является использование в качестве ДОС волноводных и микрополосковых разновидностей радиочастотной линзы, предложенной Ротманом [11]. Такие устройства позволяют достаточно просто создать практически реализуемые конструкции антенн с диаграммой направленности, имеющей оптимальные характеристики в требуемой рабочей полосе частот. Основы проектирования ДОС на основе линзы Ротмана базируются на законах геометрической оптики, с помощью которых можно приближенно определить фазовое распределение на выходе линзы. В линзе Ротмана используются различные пути распространения волны в пределах одной структуры, чтобы обеспечить для различных входных портов уникальный линейный сдвиг фазы на выходном порте.

Существуют различные области применения данной технологии и методы ее реализации. Так, в работе [12] показано применение линзы Ротмана в качестве решения проблемы увеличения пропускной способности спутниковых систем связи путем сопряжения большого количества входных портов для формирования требуемой диаграммы направленности.

Также немаловажной проблемой является уменьшение геометрических размеров линзы. В работе [13] предложена конструкция линзы, позволяющая уменьшить габаритные размеры на 50% путем сложения тела линзы в два слоя. В работе [14] представлена компактная микрополосковая линза Ротмана, работающая в полосе частот от 8 ГГц до 12 ГГц на основе чебышевских преобразователей сопротивлений, которые используются в качестве входных,

выходных и фиктивных портов. Это приводит к уменьшению размера линзы Ротмана, а также уменьшению вносимых ею потерь.

Линзы Ротмана могут использоваться в качестве ДОС на различных частотах, в частности, в миллиметровом диапазоне. Так в работе [15] представлено электронно-лучевое переключающее устройство, использующее линзу Ротмана в диапазоне миллиметровых волн на частоте 60 ГГц. Элементы антенны питаются линзой Ротмана с пятью входными портами и семью выходными портами. Предлагаемая конструкция может быть реализована в виде печатных многолучевых матриц с питанием от линз.

В статье [16] представлен формирователь РЧ-пучка на основе линз Ротмана, который существенно снижает сложность реализации гибридного формирования луча, повышает спектральную эффективность многопользовательской системы с множеством входов и выходов (MU-MIMO) на частоте 28 ГГц.

Таким образом, на основе представленного обзора можно сделать вывод, что преимуществами линз Ротмана являются легкость изготовления, низкая стоимость, малый вес и широкополосность. К недостаткам можно отнести то, что на более низких частотах линза Ротмана становится слишком громоздкой и потому трудной для встраивания в конструкцию приемопередатчика.

В связи с этим в данной статье поставлена задача разработки ДОС на основе линзы Ротмана, поскольку ее единственный недостаток (большие размеры на низких частотах) неактуален для диапазона частот 75-110 ГГц. Строгие методы расчета амплитудно-фазовых распределений поля на выходе ДОС на сегодняшний день отсутствуют, поэтому основным подходом к проектированию таких линз является экспериментальное исследование.

Статья организована следующим образом: в разделе 2 представлены расчеты и описание линзы Ротмана, проведены ее моделирование и анализ, в разделе 3 представлены выводы по полученным результатам.

2. Расчет ДОС на основе линзы Ротмана

Для изготовления линзы Ротмана были рассмотрены современные высокотехнологичные материалы и оборудование. Поскольку конструкция линзы должны быть совмещена с ФАР в виде многослойной структуры, с одной стороны которой располагается непосредственно линза, а с другой – решетка, то целесообразно для изготовления линзы выбрать тот же материал Rogers RO 3003, который был использован для расчетов ФАР. Данный материал характеризуется следующими параметрами: толщина подложки – 0,5 мм; толщина медной фольги – 35 мкм; диэлектрическая проницаемость – $3,00 \pm 0,04$; тангенс угла диэлектрических потерь – 0,0010. В качестве разъемов для входных и выходных портов, а также портов, предназначенных для подключения согласованных нагрузок, аналогично выбраны разъемы КМСО КРС100, функционирующие в диапазоне до 110 ГГц.

Линза Ротмана представляет собой конструкцию, расположенную между двумя параллельными пластинами, с портами на противоположных сторонах. Порты, расположенные на выходной дуге, называются портами решетки, они соединены с отдельными излучающими элементами антенной решетки. Порты, расположенные на входной дуге линзы, называются портами лучей, они расположены таким образом, чтобы каждый из них соответствовал определенному направлению луча в пространстве. Синтез линзы предполагает, что известны несколько входных параметров, которые используются для расчета конструкции:

- распределение элементов ($\eta = N / F$) – распределение линейных антенных элементов вдоль выходной дуги;
- ширина линзы (G) – расстояние между центром выходной дуги и центром входной дуги;
- фокальный коэффициент ($g = G / F$) и нормализованная разница длин волн ($\omega = (W - W_0) / F$);
- угол сканирования α – угол между осью линзы и одной из внеосевых фокальных точек, также угол вне осевого лепестка, для которого фазовая ошибка равна нулю.

Порты решетки линзы и длина линий передачи находятся при помощи метода сравнения оптической длины пути. На основании известных входных данных конструкция линзы Ротмана определяется уравнениями Ротмана-Тернера:

$$a_0 = \cos \alpha, b_0 = \sin \alpha,$$

$$a\omega^2 + b\omega + c = 0,$$

где

$$a = 1 - \eta^2 - \left(\frac{g-1}{g-a_0} \right)^2,$$

$$b = 2g \left(\frac{g-1}{g-a_0} \right) - \frac{g-1}{(g-a_0)^2} b_0^2 \eta^2 + 2\eta^2 - 2g,$$

$$c = \frac{g b_0^2 \eta^2}{g-a_0} - \frac{b_0^4 \eta^4}{4(g-a_0)^2} - \eta^2.$$

Эти уравнения задают расположение портов, основываясь на трех идеальных фокальных точках.

Для представленной математической модели была рассчитана имитационная модель в программе Matlab [17], позволяющая учесть особенности изготовления устройства. В качестве цели проектирования линзы использовались параметры ФАР, представленной в работе [3]. В результате имитационного моделирования был получен предварительный контур проектируемой ДОС (рисунок 1), а также координаты ее фазовых центров (рисунок 2).

Рассчитанная линза имеет три входных порта, переключение между которыми позволяет управлять состоянием ОУМ выходного излучения ФАР, два порта для улучшения характеристик согласования, а также восемь выходных портов для подключения элементов ФАР. Рабочая полоса частот данной ДОС составляет 77-78,5 ГГц.

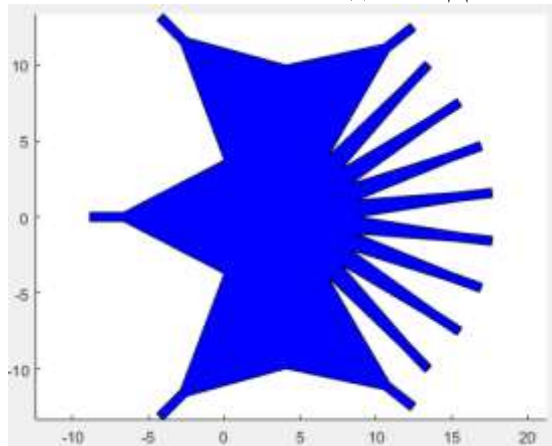


Рисунок 1. Предварительный контур ДОС на основе линзы Ротмана.

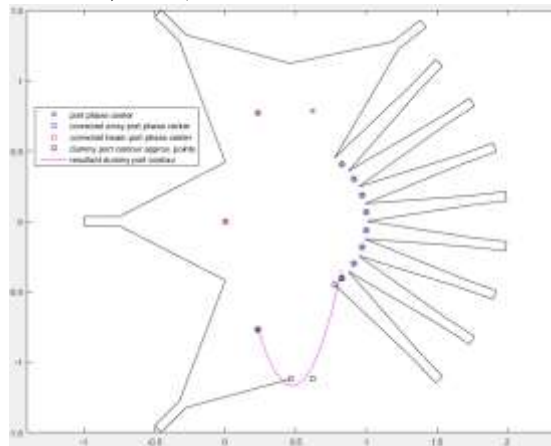


Рисунок 2. Координаты фазовых центров ДОС на основе линзы Ротмана.

3. Заключение

Представленная в статье диаграммообразующая схема на основе линзы Ротмана представляет собой устройство для формирования сигнала с заданным порядком ОУМ на выходе антенной решетки в диапазоне частот 77-78,5 ГГц. Расчеты линзы были проведены аналитически на основе известных расчетных уравнений, а также при помощи имитационного моделирования. Полученный прототип линзы позволяет формировать сигналы с тремя состояниями ОУМ: 0 и ± 1 . Структурно схема линзы включает в себя три входных порта, восемь выходных портов и два порта для подключения согласованных нагрузок. Дальнейшим этапом разработки линзы является ее изготовление на основе микрополосковой технологии в виде единой монолитной с антенной решеткой конструкции.

4. Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 18-19-00123.

5. Литература

- [1] Решение ГКРЧ от 15.07.2010 №10-07-01 «О выделении полос радиочастот для радиоэлектронных средств любительской и любительской спутниковой служб».
- [2] Abdrakhmanova, G.I. Ultra-wideband vortex antenna array design for high capacity radio links / G.I. Abdrakhmanova, E.P. Grakhova, V.K. Bagmanov, A.R. Gizatulin, I.A. Kuk, I.K. Meshkov, A.A. Ishmiyarov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1096(1). – P. 1-9.
- [3] Grakhova, E.P. An approach for generating and detecting the signals with the given orbital angular momentum for wireless communication systems / E.P. Grakhova, I.K. Meshkov, G.I. Abdrakhmanova, V.Kh. Bagmanov, I.L. Vinogradova, A.R. Gizatulin, I.A. Kuk, A.Kh. Sultanov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Volume 1368. – P. 1-10.
- [4] Afroz, S. 90° Hybrid-coupler based phase-interpolation phase-shifter for phased-array applications at W-band and beyond / S. Afroz, K.-J. Koh // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2016. – P. 1-4.
- [5] Schmalenberg, P. SiGe-based 16-channel phased array radar system at W-band for automotive applications / P. Schmalenberg, J.S. Lee, K.A. Shiozaki // *Proceedings of the 43rd European Microwave conference*, 2013. – P. 1611-1614.
- [6] Shahramian, S. A fully integrated 384-element, 16-tile, W-band phased array with self-alignment and self-test / S. Shahramian, M.J. Holyoak, A. Songh, Y. Baeyens // *IEEE Journal of solid-state circuits*. – 2019. – Vol. 54(9). – P. 2419-2434.
- [7] Butler, J.L. Beam-forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas / J.L. Butler, R. Lowe // *Electron. Des.* – 1961. – Vol. 9(4). – P. 170-173.
- [8] Kimionis, J. Pushing Inkjet Printing to W-Band: An all-printed 90-GHz beamforming array / J. Kimionis, S. Shahramian, Y. Baeyens, A. Singh, M.M. Tentzeris // *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, 2018. – P. 63-66.
- [9] Liang, R. Millimeter Wave Butler Matrix Based on Micro-coaxial Lines / R. Liang, A. Zhang, X. Chen // *12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, 2018. – P. 1-4.
- [10] Ren, F. W-band series-connected patches antenna for multibeam application based on SIW Butler matrix / F. Ren, W. Hong, K. Wu // *11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2017. – P. 198-201.
- [11] Rotman, W. Wide-angle microwave lens for line source applications / W. Rotman, R.F. Turner // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 1963. – Vol. AP-11. – P. 623-632.
- [12] Jankovic, P. The Multi-Functional Payload Based on Rotman-Lens Beamforming Network / P. Jankovic, P.C. Tapia, J. Galdeano, G. Toso, P. Angeletti // *4th ESA Workshop on Advanced Flexible Telecom Payloads*, 2019.
- [13] Vo Dai, T.K. A Compact Microstrip Rotman Lens Design / T.K. Vo Dai, T. Nguyen, O. Kilic // *United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting*, 2017.
- [14] Liang, Q. Compact Microstrip Rotman Lens Using Chebyshev Impedance Transformers / Q. Liang, B. Sun, G. Zhou, J. Li // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. – 2018. – Vol. 76. – P. 1-6.
- [15] Hassanien, M.A. Miniaturized Beam Steerable System using Rotman Lens for mm Wave Applications at 60GHz / M.A. Hassanien, M. Jennings, D. Plettemeier // *16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, 2016.
- [16] Abbasi, M. Ali Babar. Performance of a 28 GHz Two-Stage Rotman Lens Beamformer for Millimeter Wave Cellular Systems / M. Ali Babar Abbasi, H. Tataria, V.F. Fusco, M. Matthaiou // *13th European Conference on Antennas and Propagation*, 2018.
- [17] Pokorny, M. Rotman Lens design and visualization / M. Pokorny, Z. Raida // *Matlab code*.

Development of a beam-forming circuit for an antenna array operating in the W-band

E.P. Grakhova¹, G.I. Abdrakhmanova¹, A.A. Ishmiyarov, I.L. Vinogradova¹,
I.K. Meshkov¹, A. Kh. Sultanov¹, V. Kh. Bagmanov¹, A.R. Gizatulin¹

¹Ufa State Aviation Technical University, Karl Marx street 12, Ufa, Russia, 450008

Abstract. The paper presents the development of a beam-forming circuit for an antenna array operating in the range of 75-110 GHz. The proposed device is based on the Rotman lens, the shape of which is calculated taking into account the configuration of the antenna array and the required states of its radiation pattern. The Rotman lens circuit has three input ports corresponding to three output radio beams carrying different states of the orbital angular momentum. The application of such a beam-forming scheme can significantly reduce the overall dimensions of the antenna system and can be implemented in the microstrip technology in analog to the antenna array.