https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-3-36-47
УДК 621.396.67

А. А. Мальцев, В. М. Селезнев✉, А. С. Рульков, О. В. Болховская

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия

СКАНИРУЮЩАЯ ТОРОИДАЛЬНО-БИФОКАЛЬНАЯ ЛИНЗОВАЯ АНТЕННАЯ СИСТЕМА ДИАПАЗОНА 57–64 ГГЦ

Аннотация.
Введение. *В настоящее время одним из перспективных подходов к построению систем мобильной радиосвязи пятого поколения является развертывание неоднородных сетей на основе существующих систем сотовой связи LTE с большими и малыми сотами. Основными элементами таких сетей могут стать небольшие дешевые релейные станции, оснащенные высоконаправленными сканирующими антенными системами для связи малых сот с базовой станцией LTE, обслуживающей макросоту. Существующие решения во многом слишком дороги или не позволяют гибко перестраивать используемые линии передачи информации.*
Цель работы. *Разработка антенного оборудования для дешевых релейных станций на основе простых сканирующих антенных систем миллиметрового диапазона длин волн (57...64 ГГц), позволяющих управлять главным лучом в двух плоскостях: азимутальной и угломестной.*
Материалы и методы. *Профиль линзы из высокомолекулярного полиэтилена был рассчитан в приближении геометрической оптики в MATLAB. Основные технические характеристики линзовой антенной системы получены прямым электромагнитным моделированием в CST Microwave Studio, а также в ходе экспериментальных исследований с помощью вспомогательной антенны с высоким коэффициентом усиления, расположенной в дальней зоне.*
Результаты. *Разработан и создан прототип сканирующей бифокальной линзовой антенной системы, представляющий собой линзу специальной формы из высокомолекулярного полиэтилена, интегрированную с плоской фазированной антенной решеткой. В диапазоне рабочих частот 57...64 ГГц достигнуты следующие технические показатели: углы сканирования в угломестной плоскости ±3°, в азимутальной плоскости ±40°, коэффициент усиления антенной системы для всех углов сканирования находится в пределах 20...27.5 дБи.*
Заключение. *Разработанная линзовая антенная система может найти практическое применение в качестве приемо-передающего антенного оборудования небольших релейных станций, осуществляющих передачу информации в частотном диапазоне 57...64 ГГц на расстояния 100...300 м.*

Ключевые слова: бифокальная линзовая антенна, миллиметровый диапазон, фазированная антенная решетка, сканирование, диаграмма направленности

Для цитирования: Сканирующая тороидально-бифокальная линзовая антенная система диапазона 57–64 ГГц / А. А. Мальцев, В. М. Селезнев, А. С. Рульков, О. В. Болховская // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 36–47. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-36-47

Источник финансирования. Инициативная работа.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.03.2019; принята к публикации 20.05.2019; опубликована онлайн 27.06.2019

© Мальцев А. А., Селезнев В. М., Рульков А. С., Болховская О. В., 2019

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Alexander A. Maltsev, Valentin M. Seleznev✉, Alexander S. Rulkov, Olesya V. Bolkhovskaya
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
23, Gagarin Pr., 603950, Nizhny Novgorod, Russia

STEERABLE TOROIDAL BIFOCAL LENS-ARRAY ANTENNA IN 57–64 GHZ RANGE

Abstract

Introduction. *Currently, one of the most promising approaches to the development of 5th generation mobile wireless systems is the deployment of heterogeneous networks based on existing LTE cellular systems having both large and small cells. Small, low-cost relay stations equipped with highly directional steerable antenna systems to connect small cells with LTE base station serving macrocell can comprise the main elements of such networks.*

Objective. *Since existing solutions are either too expensive or do not allow the flexible rearrangement of current information transmission lines, the objective of this work is to develop antenna equipment for low-cost relay stations based on simple, steerable antenna systems of millimetre wavelength (57-64 GHz), which allow beamsteering on both azimuth and elevation planes.*

Methods and materials. *The developed steerable, bifocal lens antenna system comprises a specially-shaped lens made of high-molecular-weight polyethylene and integrated with a phased array antenna. A key feature of its design is a wide-angle beam-steering in the azimuth plane and ability to adjust the beam in the elevation plane. The calculation of the lens profiles was carried out by means of an approximation of geometrical optics in Matlab, while the main technical characteristics of the lens antenna system were obtained by direct electromagnetic modelling in CST Microwave Studio.*

Results. *A prototype steerable, bifocal lens-array antenna system has been developed and its characteristics studied. The following technical characteristics are achieved in the 57–64 GHz range: beamsteering in the elevation plane – ±3°; beamsteering in the azimuth plane – ±40°; antenna gain – from 20 to 27.5 dBi for all angles.*

Conclusion. *It is shown that the developed antenna system can be successfully used as a component of the receiving and trans-mission equipment of small relay stations that transmit information in the frequency range of 57-64 GHz over a distance of 100-300 m.*

Key words: bifocal lens antenna, millimetre band, phased array, scanning, radiation pattern

For citation: Maltsev A. A., Seleznev V. M., Rulkov A. S., Bolkhovskaya O. V. Steerable Toroidal Bifocal Lens-Array Antenna in 57–64 GHz Range. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 36–47. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-36-47

Acknowledgements. Initiative work.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 28.03.2019; accepted 20.05.2019; published online 27.06.2019

Введение. Современные стандарты широкополосных высокоскоростных систем сотовой связи 4-го поколения (WiMAX-Advanced IEEE802.16m [1], [2] и LTE-Advanced 3GPP LTE Rel.10 [3]) и стандарты беспроводного доступа в Интернет Wi-Fi (IEEE 802.11ac [4], [5] и IEEE 802.11ad [6]) для полного использования пропускной способности канала связи применяют высокоэффективные методы помехоустойчивого кодирования, новые виды широкополосной модуляции (OFDM, OFDMA, MIMO-OFDM и т. д. [7]), а также разнообразные алгоритмы пространственно-временнóй обработки сигналов. Тем не менее, даже эти современные системы мобильной радиосвязи при их полном развертывании не могут удовлетворить стремительно возрастающие потребности пользователей. Поэтому задача нахождения новых путей повышения пропускной способности существующих систем мобильной наземной радиосвязи весьма актуальна [8].

Развертывание неоднородных (гетерогенных) сетей на основе существующих систем сотовой связи LTE относится к перспективным подходам к построению систем мобильной радиосвязи 5-го поколения. Предполагается, что в зонах покрытия макросот LTE в местах большого скопления пользователей (hot-spots) будут дополнительно располагаться малые соты с радиусом покрытия несколько десятков метров [8]. При этом передача большого объема данных от базовых станций, обслуживающих малые соты, к макростанциям будет осуществляться с помощью реконфигурируемой

опорной сети из небольших релейных станций, обеспечивающих передачу данных со скоростями до нескольких десятков гигабит в секунду.

Такими скоростями обладают новые системы Wi-Fi миллиметрового диапазона длин волн [9], [10]. Однако для использования этих стандартов в релейных станциях необходимо увеличить дальность передачи до 100...300 м. Таким образом, одним из основных элементов опорной сети будущих неоднородных сетей сотовой связи 5-го поколения должны стать небольшие дешевые релейные станции, оснащенные высоконаправленными сканирующими антенными системами.

Существующие решения на основе многоэлементных фазированных антенных решеток достаточно дороги [11], а традиционно используемые параболические рефлекторные антенны или плоские антенные решетки на базе пассивных отражательных элементов [12] требуют прецизионной установки и не позволяют гибко перестраивать используемые линии передачи информации. В работах авторов настоящей статьи для таких релейных станций предложено использовать тороидально-эллиптические антенные системы, имеющие достаточно высокий коэффициент усиления и обладающие возможностью широкого сканирования лучом в азимутальной плоскости [13], [14]. Однако отсутствие возможности подстройки луча в угломестной плоскости ограничивает область их применения только релейными станциями с приблизительно одинаковым расположением антенн по высоте.

Основной целью работы, результаты которой представлены в настоящей статье, являлась разработка сканирующей тороидально-бифокальной линзовой антенны, интегрированной с первичным излучателем в виде небольшой плоской фазированной антенной решетки (ФАР), элементы которой формируют отдельные подрешетки (модули) ФАР. Проведенные экспериментальные измерения показали, что разработанная авторами линзовая антенная система может успешно применяться в качестве приемопередающего антенного оборудования небольших релейных станций, передающих информацию между узлами опорной сети гетерогенных систем сотовой связи на расстояния до 300 м.

Разработка диэлектрической тороидально-бифокальной линзы для сканирующей антенной системы. Основными требованиями к разрабатываемой линзовой антенной системе были высокий коэффициент усиления, позволяющий передавать данные на расстояние нескольких сот метров в миллиметровом диапазоне длин волн, и возможность сканирования лучом в двух плоскостях: в широком секторе в азимутальной плоскости и в небольшом секторе в угломестной.

Решение поставленной задачи достигнуто комбинацией небольшой ФАР, представляющей первичный облучатель, с пассивной фокусирующей системой в виде диэлектрической линзы, имеющей специальную тороидально-бифокальную форму. ФАР состоит из нескольких горизонтальных подрешеток (модулей), каждая из которых могла осуществлять сканирование в широком секторе азимутальных углов. Для сохранения этого свойства в разрабатываемой антенной системе тело линзы определялось вращением ее бифокального геометрического профиля вокруг вертикальной оси, проходящей вблизи облучателя. В результате линза имеет тороидальную форму.

Особенностью линз с бифокальным профилем является наличие двух преломляющих поверхностей и двух точек идеальной фокусировки [9]. Если поместить фазовый центр облучателя в любую из них, то на выходе линзы сформируется плоский фазовый фронт, имеющий наклон на некоторый угол относительно вертикальной плоскости раскрыва линзы. Таким образом, переключением горизонтальных подрешеток ФАР можно добиться нужного угла сканирования в угломестной плоскости.

В представленной работе расчет вертикального бифокального профиля линзы проводился аналитически в приближении геометрической оптики с помощью метода Джента–Штернберга [9]–[12]. Диаграммы направленности (ДН) разработанной линзовой антенной системы определялись прямым электромагнитным моделированием в CST Microwave Studio. При моделировании в качестве источника излучения использовалась модель рупорной антенны с размерами апертуры, близкими к размерам подрешеток ФАР. Эта замена обеспечила упрощение моделирования и сокращение его времени.

В качестве материала для изготовления тела линзы использован высокомолекулярный полиэтилен исходя из его доступности, низкой стоимости и удовлетворительных диэлектрических параметров. Указанный материал обладает диэлектрической постоянной $\varepsilon = 2.35$ и малым значением тангенса угла потерь $\mathrm{tg}\,\delta = 0.0006$. Остальные параметры линзы определялись техническими требованиями к общему коэффициенту усиления антенной системы и необходимыми углами сканирова-

ния. Так, размер апертуры в угломестной плоскости выбран равным 130 мм, а расстояние между фокусами 10 мм, что должно было обеспечить общий коэффициент усиления линзовой антенной системы порядка 25 дБ и угол вертикального сканирования порядка ±3º при сохранении большого угла горизонтального сканирования ±40º. По предварительным расчетам, эти параметры линзовой антенной системы должны обеспечить устойчивую связь между абонентами на расстояниях 100...300 м и точную электронную подстройку главного луча ДН к высотам приемной антенны в угломестной плоскости порядка ±10...15 м.

В соответствии с используемым методом Джента–Штернберга [15]–[18] кривые, описывающие вертикальные профили внешней и внутренней поверхностей бифокальной линзы, аппроксимировались функциями вида:

$$y(x) = (Ax + B)^k, \qquad (1)$$

где A, B и k – числовые коэффициенты, зависящие от заданных параметров модели бифокальной линзы (расстояния между фокусами, угла наклона плоского фазового фронта на выходе и материала линзы). В (1) переменные y и x имеют размерность длины и измеряются в миллиметрах.

Для рассматриваемого набора параметров на рис. 1 представлен рассчитанный в MATLAB вертикальный профиль бифокальной линзы с двумя преломляющими поверхностями и двумя фокусами ($n_а$, $n_л$ – показатели преломления окружающей среды и линзы соответственно).

Внешняя поверхность линзы описывается кривой

$$y(x) = \pm(-730x + 85\,142)^{0.4}, \qquad (2)$$

а кривая внутреннего профиля задается выражением

$$y(x) = \pm(14\,124x - 984\,180)^{0.5}. \qquad (3)$$

Следует отметить, что наличие у бифокальной линзы двух преломляющих поверхностей ведет к появлению дополнительных переотражений на внутренней поверхности и в теле линзы, а также к усложнению процесса изготовления и юстировки линзовой антенной системы в целом. Известно, что при размещении антенных элементов на поверхности диэлектрика электромагнитное излучение "втягивается" в диэлектрик тем больше, чем выше его диэлектрическая проницаемость. Отношение мощности излучения внутрь диэлектрика к мощности излучения в свободное пространство в этом случае пропорционально $\varepsilon^{3/2}$ [19]. Этот эффект приводит к снижению коэффициента отражения (уровня обратного излучения) в линзовых антеннах с излучателями, расположенными на внутренней поверхности линзы, и успешно используется при их проектировании [20].

Рис. 1. Вертикальный профиль бифокальной линзы из полиэтилена, рассчитанный в среде MATLAB

Fig. 1. Vertical cross section of a polyethylene bifocal lens calculated in MATLAB

Из рис. 1 видно, что для рассматриваемого случая внутренний профиль линзы, описываемый выражением (3), может быть с хорошей точностью аппроксимирован отрезком прямой линии (рис. 1, *2*). Поэтому было принято решение заполнить свободное пространство между облучателем, расположенным в позиции $y = 5$ (верхний фокус) или $y = -5$ (нижний фокус), и телом линзы полиэтиленом, чтобы антенные элементы размещались на поверхности линзы. Проведенные численные расчеты показали, что для этого следует увеличить на 38 мм расстояние между облучателем (фокальной осью) и внешней (преломляющей) поверхностью линзы, описываемой выражением (2).

Внешний вид 3D-модели тороидально-бифокальной линзы, спроектированной в соответствии с описанной методикой, и ее сечение в вертикальной плоскости представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

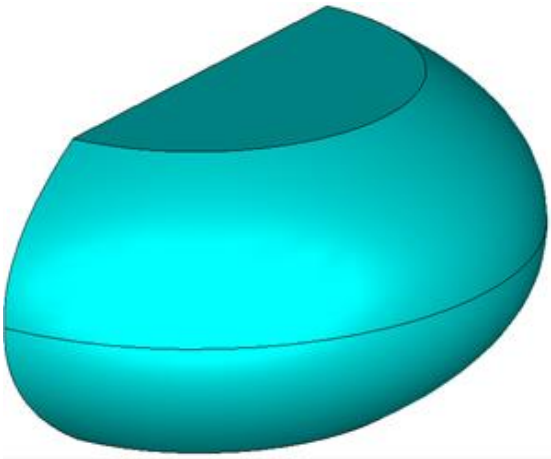


Рис. 2. 3D-модель тороидально-бифокальной линзы
Fig. 2. 3D model of a toroidal bifocal lens

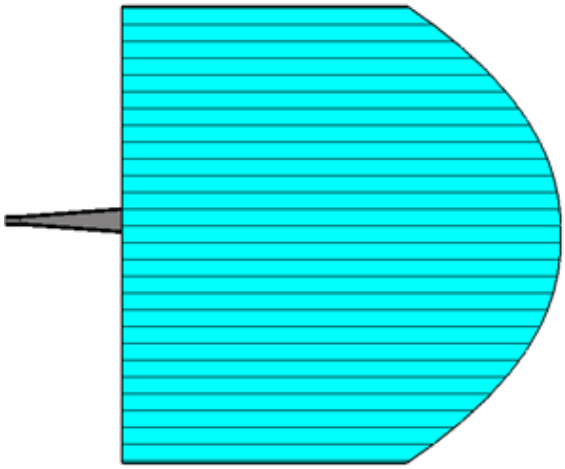


Рис. 3. Сечение тороидально-бифокальной линзы в вертикальной плоскости
Fig. 3. Vertical cross section of a toroidal bifocal lens

На рис. 4 приведены ДН $D(\theta)$ (θ – угол места) для антенн, в одной из которых (линия *1*) между источником, расположенным в нижнем фокусе, и линзой имеется свободное пространство (профиль изображен на рис. 1), а в другой (линия *2*) источник расположен на поверхности линзы (профиль изображен на рис. 3). Как следует из рис. 4, заполнение пространства между источником и линзой полиэтиленом привело к небольшому уменьшению уровня боковых лепестков без искажения плоского фазового фронта на выходе линзы, что вызвано достаточно узкой ДН по углу места (порядка 60...70°) используемого излучателя (подрешетки ФАР).

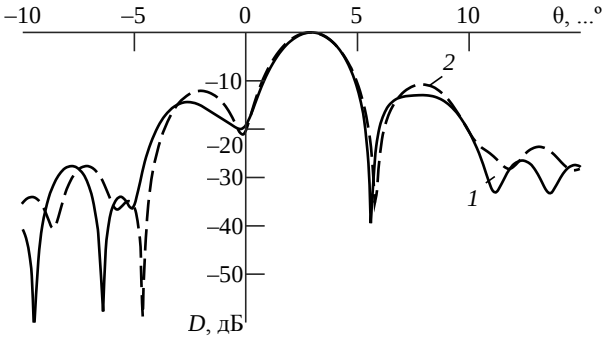


Рис. 4. Диаграммы направленности линзовой антенны с одной и двумя преломляющими поверхностями при расположении первичного излучателя в нижнем фокусе бифокального профиля
Fig. 4. Radiation patterns of a bifocal lens antenna with one and two refracting surfaces when a primary radiation source is located in the lower focus

На рис. 5 и 6 показаны ДН созданной 3D-модели тороидально-бифокальной линзы в горизонтальной (φ – азимут) и в вертикальной плоскостях соответственно, рассчитанные электромагнитным моделированием в CST Microwave Studio. ДН в горизонтальной плоскости (рис. 5) приведена для расположения первичного излучателя на оси симметрии между фокусами. ДН в вертикальной плоскости (рис. 6) даны при положении первичного излучателя в верхнем (кривая *2*) и в нижнем (кривая *3*) фокусах, а также в центре между ними

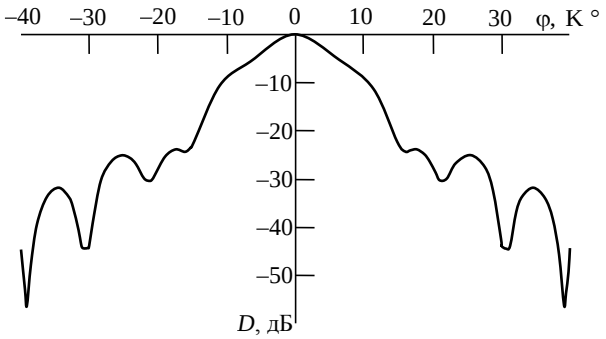


Рис. 5. Диаграмма направленности тороидально-бифокальной линзовой антенны с одной преломляющей поверхностью в горизонтальной плоскости (результаты электромагнитного моделирования)
Fig. 5. Radiation pattern of a toroidal bifocal lens antenna with one refractive surface in a horizontal plane (electromagnetic modelling results)

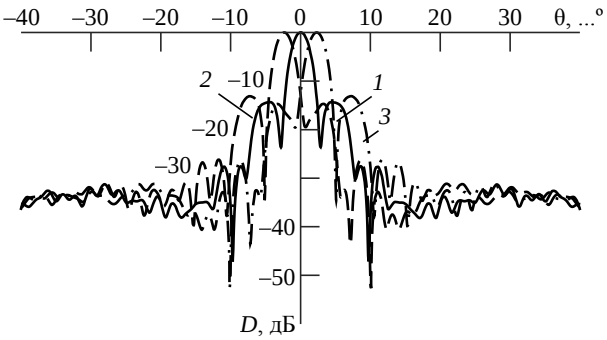


Рис. 6. Диаграмма направленности тороидально-бифокальной линзовой антенны с одной преломляющей поверхностью в вертикальной плоскости (результаты электромагнитного моделирования)
Fig. 6. Radiation patterns of a toroidal bifocal lens antenna with one refractive surface in a vertical plane (electromagnetic modelling results)

(кривая *1*). Как видно из рис. 5 и 6, разработанная модель тороидально-бифокальной линзовой антенны характеризуется не только формированием в вертикальной плоскости узкого луча шириной порядка 3°, но и обладает некоторой апланатичностью, т. е. способностью изменять направление излучения при смещении первичного источника излучения относительно фокуса. В горизонтальной же плоскости формируется луч шириной порядка 12°, форма которого совпадает с ДН первичного излучателя.

Экспериментальный прототип. Для проверки технических характеристик спроектированной линзовой антенной системы на практике был изготовлен экспериментальный прототип (рис. 7), который включал в себя линзу из полиэтилена *1*, источник первичного излучения (ФАР) *2*, теплоотводящий радиатор из металла *3*, служащий для отвода тепла от ФАР, и корпус из оргстекла *4*, предназначенный для фиксации ФАР на обратной стороне линзы.

Излучающая ФАР вставлялась в корпус из оргстекла, к одной стороне которого вплотную примыкало тело линзы, а к другой – теплоотводящий радиатор. Все перечисленные элементы скреплялись в единую конструкцию. Размеры радиатора, корпуса из оргстекла и крепежных винтов были минимизированы, чтобы не оказывать существенного влияния на рассчитанные характеристики линзовой антенны. Тело линзы было изготовлено на станке с числовым программным управлением, адаптированным для обработки пластмасс.

В качестве излучающей ФАР использовался антенный модуль, разработанный компанией "Интел" (рис. 8) и интегрирующий собственно антенную решетку и радиочасть, изготовленную по КМОП-технологии [21]. Антенная решетка содержит 2×10 микрополосковых патчей, 16 из которых (2×8, обведены штриховой линией на рис. 8) активны и участвуют в формировании ДН решетки, а 4 расположенных по краям – пассивны. Излучение ФАР имеет линейную поляризацию в вертикальной плоскости. Коэффициент усиления ФАР составлял около 15 дБ.

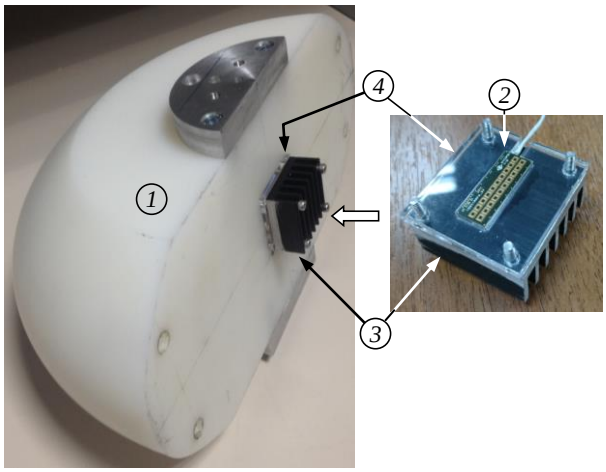


Рис. 7. Экспериментальный прототип тороидально-бифокальной линзовой антенной системы

Fig. 7. Experimental prototype of toroidal bifocal lens antenna system (*1* – toroidal bifocal polyethylene lens; *2* – phased array antenna; *3* – metallic heat sink; *4* – plexiglas housing)

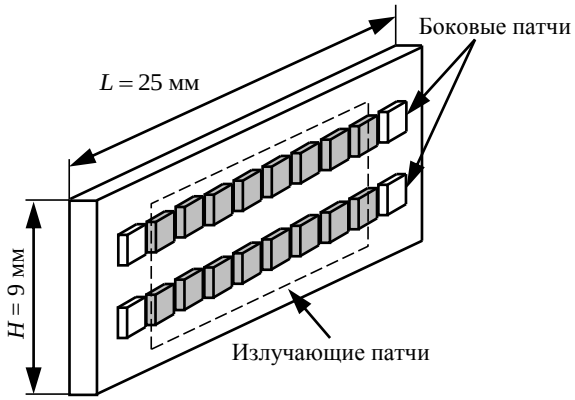


Рис. 8. Излучающая ФАР из микрополосковых патчей

Fig. 8. Radiating microstrip PAA

В лабораторных исследованиях прототипа использовалась одномодульная ФАР, поэтому сканирование по углу места осуществлялось механическим перемещением источника в фокальной плоскости с дискретным шагом 5 мм. Для этих целей в конструкции корпуса из оргстекла были предусмотрены дополнительные крепежные отверстия, располагающиеся на расстоянии 5 мм друг от друга. Шаг отверстий был выбран с учетом габаритов ФАР. Прототип также включал в себя элементы, необходимые для крепления к измерительной установке.

Описание экспериментальной установки и методики измерений. Для измерения характеристик разработанного прототипа сканирующей линзовой антенной системы (СЛАС) был создан измерительный стенд (рис. 9), состоящий из следующих основных блоков:

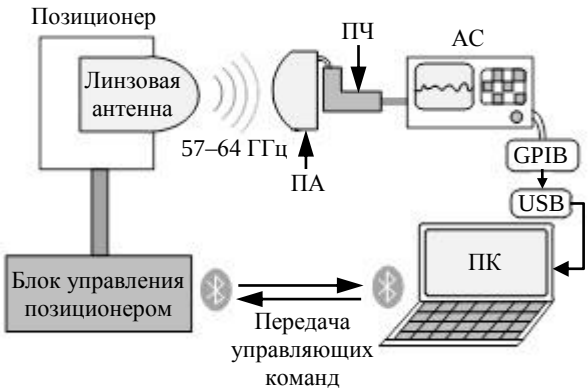


Рис. 9. Блок-схема измерительного стенда

Fig. 9. Block diagram of the measuring stand

– позиционер, управляемый персональным компьютером (ПК);

– универсальный анализатор спектра (АС) E4407B компании "Agilent Technologies";

– преобразователь частоты (ПЧ) 11970V компании "Agilent Technologies";

– узконаправленная приемная антенна (УПА);

– комплект разработанного программного обеспечения (ПО) для измерения характеристик антенн в автоматическом режиме.

Описанная экспериментальная установка в комплекте с калиброванными антеннами позволяла проводить измерения всех основных характеристик разработанного прототипа СЛАС: двумерных ДН, коэффициента направленного действия, коэффициента усиления, частотных характеристик антенны.

Принцип функционирования измерительного стенда состоит в следующем. В соответствии с пользовательскими установками в разработанной на ПК программе позиционер последовательно поворачивает испытуемую антенну, работающую в активном режиме передачи сигналов, в заданных угловых диапазонах по азимуту и углу места с заданным шагом. Принимаемый сигнал диапазона 57…64 ГГц с УПА, используемой для повышения чувствительности установки и компенсации сигналов, переотраженных от местных предметов, в ПЧ переносится в диапазон, доступный для АС. На каждом шаге измерений АС фиксирует полную мощность и спектр входного сигнала, поступающего от испытуемой линзовой антенны. Данные измерения передаются по интерфейсу GPIB-USB в управляющую программу на ПК и сохраняются в ПЗУ для дальнейшей обработки.

Механические приводы позиционера управляются удаленно программой на ПК через беспроводной канал Bluetooth, что позволяет использовать экспериментальную установку и для дальнейших полевых испытаний. Обмен данными между управляющей программой на ПК и анализатором спектра проводится через GPIB-интерфейс посредством соответствующих команд. Синхронность поворотов испытуемой антенны с процессом измерения значений мощности и спектра сигнала, поступающих на вход АС, обеспечивается алгоритмом работы управляющей программы на ПК.

Результаты экспериментальных измерений. В ходе экспериментального исследования прототипа СЛАС проведены измерения ДН в азимутальной и угломестной плоскостях. В первую очередь, в целях проверки корректного функционирования линзовой антенны проведены измерения для двух различных положений луча ФАР (двух секторов ФАР).

На рис. 10 и 11 приведены измеренные ДН для случая несмещенного положения главного луча ФАР. Результаты измерений показывают, что ширина ДН по уровню половинной мощности составила 2.5° в угломестной плоскости (рис. 10) и 11° в азимутальной плоскости (рис. 11).

На рис. 12 и 13 показаны измеренные ДН линзовой антенной системы при нахождении главного луча излучающей ФАР в отклоненном положении (на максимальный угол –40° в азимутальной плоскости). В этом случае ДН претерпевают искажения, приводящие к расширению главного луча. Ширина по уровню половинной мощности в угломестной плоскости составила в этом случае 3.8 (рис. 12) и 15° в азимутальной плоскости (рис. 13).

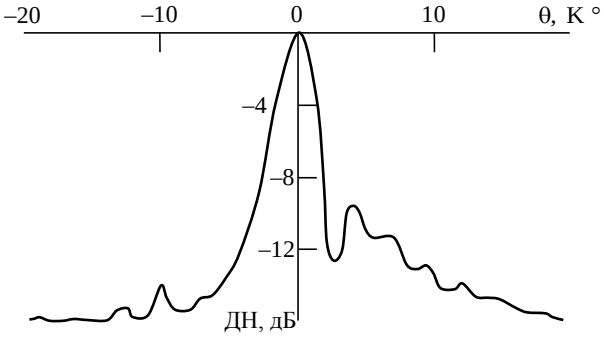


Рис. 10. Диаграмма направленности прототипа линзовой антенны в угломестной плоскости при центральном положении луча излучателя

Fig. 10. Radiation pattern of the lens antenna prototype in the elevation plane when PAA beam is located in the central position

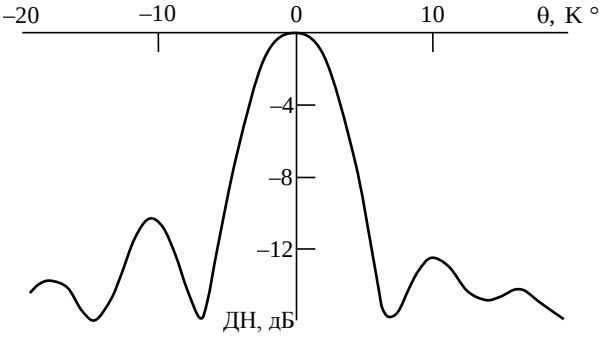


Рис. 11. Диаграмма направленности прототипа линзовой антенны в азимутальной плоскости при центральном положении луча излучателя

Fig. 11. Radiation pattern of the lens antenna prototype in the azimuth plane when PAA beam is located in the central position

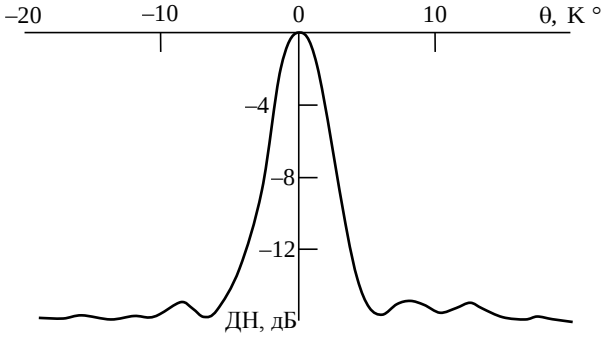


Рис. 12. Диаграмма направленности прототипа сканирующей линзовой антенны в угломестной плоскости при отклоненном положении главного луча антенны –40° в азимутальной плоскости

Fig. 12. Radiation pattern of the steerable lens antenna prototype when the PAA beam is shifted at an angle of –40° in the elevation plane

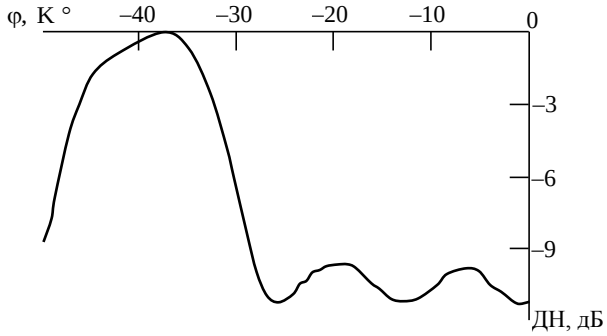


Рис. 13. Диаграмма направленности прототипа сканирующей линзовой антенны в азимутальной плоскости при отклоненном положении главного луча антенны –40° в азимутальной плоскости

Fig. 13. Radiation pattern of the steerable lens antenna prototype when the PAA beam is shifted at an angle of –40° in the azimuth plane

По оценкам, сделанным в ходе измерения ДН, установлено, что общий коэффициент усиления разработанной СЛАС при несмещенном положении главного луча составил около 27.5 дБи, а коэффициент полезного действия (КПД) – порядка 80 %. Учитывая то, что коэффициент усиления излучающей ФАР составлял 15 дБи, можно оценить дополнительный коэффициент усиления разработанной тороидально-бифокальной линзы значением порядка 12.5 дБи.

На следующем этапе экспериментальных исследований прототипа СЛАС были изучены ее сканирующие свойства в азимутальной (горизонтальной) плоскости. Для переключения между пространственными положениями главного луча ДН ФАР использовалось специализированное ПО, позволяющее устанавливать требуемый сектор излучения в азимутальной плоскости в пределах ±40°.

На рис. 14 представлены измеренные ДН образца СЛАС в азимутальной плоскости для различных положений главного луча ДН ФАР. Из него следует, что разработанная антенная система позволяет сканировать пространство лучом в азимутальной плоскости, сохраняя практически неизменной форму ДН антенны. Деградация коэффициента усиления при максимальных углах сканирования составляла около –7.5 дБ по сравнению с коэффициентом усиления при несмещенном положении главного луча. Поскольку максимальное значение коэффициента усиления в несмещенном положении равнялось 27.5 дБ, минимальный коэффициент усиления разработанного образца СЛАС во всем диапазоне сканирования (±40°) составлял около 20 дБ.

На следующем этапе экспериментальных исследований образца были изучены сканирующие свойства СЛАС в угломестной (вертикальной) плоскости. Для проверки корректности работы диэлектрической линзы как бифокальной поверхности в вертикальной плоскости излучающая ФАР располагалась в трех положениях: в нижнем и верхнем фокусах диэлектрической линзы, а

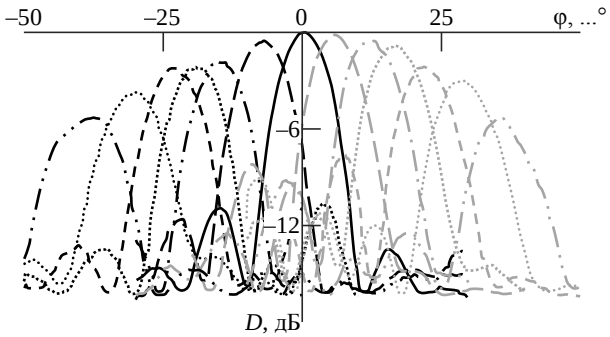


Рис. 14. Диаграммы направленности в азимутальной плоскости для различных секторов первичного излучателя ФАР

Fig. 14. Radiation patterns in the azimuth plane for various PAA positions

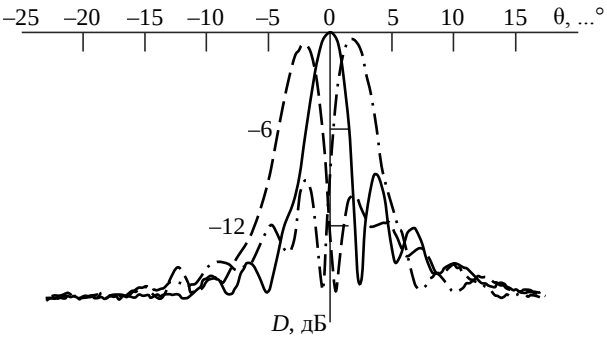


Рис. 15. Диаграммы направленности в угломестной плоскости для различных расположений модуля ФАР

Fig. 15. Radiation patterns in the elevation plane for various PAA positions

Основные характеристики образца СЛАС
The main characteristics of the SLAS prototype

Характеристика	Значение
Материал	Полиэтилен
Апертура в угломестной плоскости, мм	130
Апертура в азимутальной плоскости, мм	302 (2×151)
Расстояние между фокусами, мм	10
КУ, дБ	27.5
КПД, %	80
КНД, дБ	28.5
Ширина главного луча ДН в угломестной плоскости, ...°	3.1
Ширина главного луча ДН в азимутальной плоскости, ... °	12
Сектор сканирования в угломестной плоскости, ... °	±3
Сектор сканирования в азимутальной плоскости, ... °	±40
Уровень боковых лепестков, дБ	–8

также в центре между ними. Измерения ДН в угломестной плоскости проводились с шагом 0.2° при несмещенном положении главного луча в азимутальной плоскости для всех трех положений модуля ФАР. Из нормированных ДН, приведенных на рис. 15, следует, что перекрытие между соседними лучами в угломестной плоскости происходит на уровнях меньше –3 дБ и деградация лучей при положении активных элементов ФАР в нижнем и верхнем фокусах не превышает –0.6 дБ по сравнению с центральным лучом.

Из приведенных графиков также видно, что угол сканирования разработанного прототипа СЛАС по углу места (по уровню –3 дБ) составил ±3º. Основные характеристики образца СЛАС приведены в таблице.

Заключение. В настоящей статье представлены результаты разработки и экспериментальных исследований характеристик прототипа сканирующей бифокальной линзовой антенной системы диапазона 57…64 ГГц. Установлено, что измеренные характеристики прототипа линзовой антенны соответствуют предъявленным к антенной системе требованиям и подтверждают результаты электромагнитного моделирования в CST Microwave. Для разработанного прототипа тороидально-бифокальной линзовой антенны во всем диапазоне рабочих частот 57…64 ГГц получены следующие технические характеристики: углы сканирования (по уровню –3дБ) в угломестной плоскости ±3º, в азимутальной плоскости ±40º. При этом коэффициент усиления антенной системы для всех углов сканирования менялся в пределах от 20 до 27.5 дБи.

Достигнутые технические параметры по углам сканирования и коэффициентам усиления свидетельствуют о значительных преимуществах предложенной линзовой антенной системы перед существующими решениями [13], [14], [20], [21]. Представленная в настоящей статье бифокальная линзовая антенная система может успешно применяться в качестве приемопередающего антенного оборудования небольших релейных станций, работающих в частотном диапазоне 57...64 ГГц на расстояния от 100 до 300 м.

Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на оптимизацию формы бифокальной линзы с целью уменьшения ее массы и вносимых потерь, а также на совершенствование конструкции антенной системы в целом для достижений лучших технических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. WiMAX technology support for applications in environmental monitoring, fire prevention and telemedicine / E. Guainella, E. Borcoei, M. Katz, P. Neves, M. Curado, F. Andreotti, E. Angori // 2007 IEEE Mobile WiMAX Symposium, 25–29 March 2007, Orlando, FL, USA. URL: https://ieeexplore. ieee.org /document/4156108. doi: 10.1109/WIMAX.2007. 348690 (дата обращения 03.05.2019)

2. IEEE Std 802.16™-2004 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. https://standards.ieee.org/standard/802_16-2004.html (дата обращения 03.05.2019)

3. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – The UMTS long term evolution. From theory to practice. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2011. 625 p.

4. 802.11ac-2013 – IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz. https://ieeexplore.ieee.org/document/7797535. doi: 10.1109 /IEEESTD.2013.7797535 (дата обращения 03.05.2019)

5. Nasir S. A., Mustaqim M., Khawaja B. A. Antenna array for 5th generation 802.11ac Wi-Fi applications // 2014 11th Annual High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies, 15–17 Dec. 2014, Charlotte, NC, USA. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document /7029354. doi: 10.1109/HONET.2014.7029354 (дата обращения 03.05.2019)

6. Analysis of factors in phase array antenna and RF units on system performance of the OFDM PHY of IEEE 802.11ad standard / J. Qin, L. Zhang, L. Zhang, Y. Wang // 2016 IEEE Int. Conf. on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), 3–5 Aug. 2016, Hong Kong, China. https://ieeexplore.ieee.org/document/7785273. doi: 10.1109 /EDSSC.2016.7785273 (дата обращения 03.05.2019)

7. van Nee R., Prasad R. OFDM for Wireless Multimedia Communications. Boston, London: Artech House, 2000. 278 p.

8. Пат. RU 2660385 C1 H01Q 3/24 (2006.01). Сканирующая линзовая антенна / О. В. Болховская, В. М. Селезнев, В. Д. Голубь. Опубл. 06.07.2018. Бюл. № 19.

9. IEEE 802.11ay: Next-Generation 60 GHz Communication for 100 Gb/s Wi-Fi / Y. Ghasempour, C. R. C. M. da Silva, C. Cordeiro, E. W. Knightly // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, № 12. P. 186–192. doi: 10.1109/MCOM. 2017.1700393

10. Analysis and Simulation of the IEEE 802.11ay Single-Carrier PHY / C. R. C. M. da Silva, A. Lomayev, C. Chen, C. Cordeiro // 2018 IEEE Int. Conf. on Communications (ICC), 20–24 May 2018, Kansas City, MO, USA. doi: 10.1109 /ICC.2018.8422532.

11. Advanced millimeter-wave technologies: Antennas, Packaging and Circuits / ed. by D. Liu, B. Gaucher, U. Pfeiffer, J. Grzyb. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2009. 827 p.

12. Visentin T., Keusgen W., Weiler R. Dual-Polarized Square-Shaped Offset-Fed Reflectarray Antenna with High Gain and High Bandwidth in the 60 GHz Domain /2015 9th Europ. Conf. on Ant. and Prop. (EuCAP), 13–17 April 2015, Lisbon, Portugal. https://ieeexplore.ieee.org /document/7228414 (дата обращения 03.05.2019)

13. Highly Directional Steerable Antennas: High-Gain Antennas Supporting User Mobility or Beam Switching for Reconfigurable Backhauling / A. Maltsev, A. Sadri, A. Pudeyev, I. Bolotin // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2016. Vol. 11, №. 1. P. 32–39.

14. Millimeter-wave Toroidal Lens-Array Antennas Experimental Measurements / A. Maltsev, A. Lomaev, A. Pudeyev, I. A. Bolotin, O. V. Bolkhovskaya, V. M. Seleznev // 2018 IEEE Int. Symposium on Ant. and Prop. & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 8–13 July 2018, Boston, MA, USA. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM. 2018.8608633

15. Brown R. Dielectric Bifocal Lenses // IRE Int. Convention Record. 1956. Vol. 4. P. 180–187.

16. Peebles A. L. A dielectric bifocal lens for multibeam antenna applications // IEEE Trans. Ant. And Prop. 1988. Vol. 36, № 5. P. 599–606.

17. Holt F., Mayer A. A Design Procedure for Dielectric Microwave Lenses of Large Aperture Ratio and Large Scanning Angle // IEEE Trans. Ant. and Prop. 1957. Vol. 5, № 1. P. 25–30.

18. Richter J., Hofmann A., Schmidt L.-P. Dielectric Wide Angle Lenses for Millimeter-Wave Focal Plane Imaging // 31st Europ. Microwave Conf., London, England, 24–26 Sept., 2001. Piscataway: IEEE, 2001. P. 1–4. doi: 10.1109/EUMA.2001.338934

19. Rutledge D. B., Neikirk D. P., Kasilingam D. P. Integrated Circuit Antennas // Infrared and Millimeter Waves / ed. by K. J. Button. New York: Academic, 1983. Vol. 10. P. 1–90.

20. Experimental Characterization of E-Band Two-Dimensional Electronically Beam-Steerable Integrated Lens Antennas / A. Artemenko, A. Mozharovskiy, A. Maltsev, R. Maslennikov, A. Sevastyanov, V. Ssorin // IEEE Ant. and Wireless Prop. Lett., 2013. Vol. 12. P. 1188–1191. doi: 10.1109/LAWP.2013.2282212

21. Mm-Wave Phased Array Antenna and System Integration on Semi-Flex Packaging / H. K. Pan, B. D. Horine, M. Ruberto, S. Ravid // IEEE AP-S Conf. on Ant. and Prop. for Wireless Communications, 3–8 July 2011, Spokane, WA, USA. P. 2059–2062. doi: 10.1109/APS.2011.5996913

Мальцев Александр Александрович – доктор физико-математических наук (1990), профессор (1992), зав. кафедрой бионики и статистической радиофизики Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского. Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – адаптивная обработка сигналов; адаптивные антенные решетки; MIMO-OFDM системы связи.
https://orcid.org/0000-0001-8694-0033
E-mail: maltsev@rf.unn.ru

Селезнев Валентин Михайлович – магистр по направлению "Радиофизика" (2015), аспирант кафедры бионики и статистической радиофизики Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского. Автор восьми научных публикаций. Сфера научных интересов – микроволновая техника; проектирование антенно-фидерных устройств; вычислительная электродинамика.
https://orcid.org/0000-0001-7970-3777
E-mail: valentin.seleznev@wcc.unn.ru

Рульков Александр Сергеевич – магистр по направлению "Физика" (2016), аспирант кафедры теоретической физики Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского. Автор пяти научных работ. Сфера научных интересов – антенно-фидерные устройства; вычислительная электродинамика.
https://orcid.org/0000-0003-4227-9110
E-mail: aleksrulkov@yandex.ru

Болховская Олеся Викторовна – кандидат физико-математических наук (2004), доцент кафедры бионики и статистической радиофизики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – обнаружение сигналов и оценивание их параметров; многоэлементные антенные решетки.
https://orcid.org/0000-0002-6679-9295
E-mail: obol@rf.unn.ru

REFERENCES

1. Guainella E., Borcoei E., Katz M., Neves P., Curado M., Andreotti F., Angori E. WiMAX Technology Support for Applications in Environmental Monitoring, Fire Prevention and Telemedicine. 2007 IEEE Mobile WiMAX Symposium, 25–29 March 2007, Orlando, FL, USA. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/4156108. doi: 10.1109/WIMAX.2007.348690 (accessed 03.05.2019)

2. IEEE Std 802.16™-2004 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. Available at: https://standards.ieee.org/standard/802_16-2004.html (accessed 03.05.2019)

3. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – The UMTS Long Term Evolution. From Theory to Practice. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2011. 625 p.

4. 802.11ac-2013 – IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/7797535 (accessed 03.05.2019) doi: 10.1109/IEEESTD.2013.7797535

5. Nasir S. A., Mustaqim M., Khawaja B. A. Antenna array for 5th generation 802.11ac Wi-Fi applications. 2014 11th Annual High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies, 15–17 Dec. 2014, Charlotte, NC, USA. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/7029354 (accessed 03.05.2019) doi: 10.1109/HONET.2014.7029354

6. Qin J., Zhang L., Zhang L., Wang Y. Analysis of Factors in Phase Array Antenna and RF Units on System Performance of the OFDM PHY of IEEE 802.11ad Standard. 2016 IEEE Int. Conf. on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), 3–5 Aug. 2016, Hong Kong, China. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/7785273. (accessed 03.05.2019) doi: 10.1109 /EDSSC.2016.7785273

7. van Nee R., Prasad R. OFDM for Wireless Multimedia Communications. Boston, London, Artech House, 2000, 278 p.

8. Bolkhovskaya O. V., Seleznev V. M., Golub' V. D. *Skaniruyushchaya linzovaya antenna* [Steerable lens antenna]. Pat. RU 2660385 C1 H01Q 3/24 (2006.01). 06.07.2018. Bull. No. 19. (in Russ.)

9. Ghasempour Y., da Silva C. R. C. M., Cordeiro C., Knightly E. W. IEEE 802.11ay: Next-Generation 60 GHz Communication for 100 Gb/s Wi-Fi. IEEE Communications Magazine. 2017, vol. 55, no. 12, pp. 186–192. doi: 10.1109 /MCOM.2017.1700393

10. da Silva C. R. C. M., Lomayev A., Chen C., Cordeiro C. Analysis and Simulation of the IEEE 802.11ay Single-Carrier PHY. 2018 IEEE Int. Conf. on Communications (ICC), 20–24 May 2018, Kansas City, MO, USA. doi: 10.1109/ICC.2018.8422532.

11. Advanced millimeter-wave technologies: Antennas, Packaging and Circuits; ed. by D. Liu, B. Gaucher, U. Pfeiffer, J. Grzyb. Chichester, UK, John Wiley and Sons, 2009, 827 p.

12. Visentin T., Keusgen W., Weiler R. Dual-Polarized Square-Shaped Offset-Fed Reflectarray Antenna with High Gain and High Bandwidth in the 60 GHz Domain. 2015 9th Europ. Conf. on Ant. and Prop. (EuCAP), 13–17 April 2015, Lisbon, Portugal. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/7228414 (accessed 03.05.2019)

13. Maltsev A., Sadri A., Pudeyev A., Bolotin I. Highly Directional Steerable Antennas: High-Gain Antennas Supporting User Mobility or Beam Switching for Reconfigurable Backhauling. IEEE Vehicular Technology Magazine. 2016, vol. 11, no. 1, pp. 32–39.

14. Maltsev A., Lomaev A., Pudeyev A., Bolotin I. A., Bolkhovskaya O. V., Seleznev V. M. Millimeter-wave Toroidal Lens-Array Antennas Experimental Measurements. 2018 IEEE Int. Symposium on Ant. and Prop. & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 8–13 July 2018, Boston, MA, USA. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608633

15. Brown R. Dielectric Bifocal Lenses. IRE Int. Convention Record. 1956, vol. 4, pp. 180–187.

16. Peebles A. L. A dielectric bifocal lens for multibeam antenna applications. IEEE Trans. Ant. And Prop. 1988, vol. 36, no. 5, pp. 599–606.

17. Holt F., Mayer A. A Design Procedure for Dielectric Microwave Lenses of Large Aperture Ratio and Large Scanning Angle. IEEE Trans. Ant. and Prop. 1957, vol. 5, no. 1, pp. 25–30.

18. Richter J., Hofmann A., Schmidt L.-P. Dielectric Wide Angle Lenses for Millimeter-Wave Focal Plane Imaging. 31st Europ. Microwave Conf., London, England, 24–26 Sept., 2001. Piscataway: IEEE, 2001, pp. 1–4. doi: 10.1109/EUMA.2001.338934

19. Rutledge D. B., Neikirk D. P., Kasilingam D. P. Integrated Circuit Antennas. Infrared and Millimeter-Waves; ed. by K. J. Button. New York, Academic, 1983, vol. 10, pp. 1–90.

20. Artemenko A., Mozharovskiy A., Maltsev A., Maslennikov R., Sevastyanov A., Ssorin V. Experimental Characterization of E-Band Two-Dimensional Electronically Beam-Steerable Integrated Lens Antennas. IEEE Ant. and Wireless Prop. Lett., 2013, vol. 12, pp. 1188–1191. doi: 10.1109/LAWP.2013.2282212

21. Pan H. K., Horine B. D., Ruberto M., Ravid S. Mm-Wave Phased Array Antenna and System Integration on Semi-Flex Packaging. IEEE AP-S Conf. on Ant. and Prop. for Wireless Communications, 3–8 July 2011, Spokane, WA, USA, pp. 2059–2062. doi: 10.1109/APS.2011.5996913

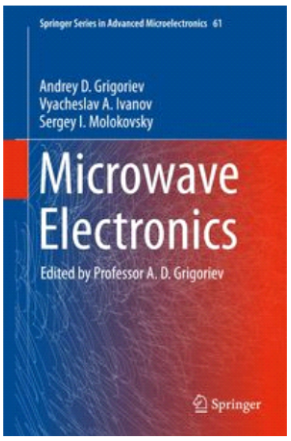
Alexander A. Maltsev – Dr. of Sci. (Phys. and Math.) (1990), Professor (1992), Head of the Department of Bionics and Statistical Radiophysics of Lobachevsky University of Nizhny Novgorod. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: adaptive signal processing; adaptive antenna arrays; MIMO-OFDM communication systems.
https://orcid.org/0000-0001-8694-0033
E-mail: maltsev@rf.unn.ru

Valentin M. Seleznev – Master on Radio Physics (2015), Postgraduate Student of the Department of Bionics and Statistical Radiophysics of Lobachevsky University of Nizhny Novgorod. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: microwave technology; antennas; electrodynamics.
https://orcid.org/0000-0001-7970-3777
E-mail: valentin.seleznev@wcc.unn.ru

Alexander S. Rulkov – Master on Physics (2016), Postgraduate Student of the Department of Theoretical Physics of Lobachevsky University of Nizhny Novgorod. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: antennas; electrodynamics.
https://orcid.org/0000-0003-4227-9110
E-mail: aleksrulkov@yandex.ru

Olesya V. Bolkhovskaya – Cand. of Sci. (Phys. and Math.) (2004), Associate Professor of the Department of Bionics and Statistical Radiophysics in Lobachevsky University of Nizhny Novgorod, The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: signal detection and parameters estimation, multi-element antenna arrays.
https://orcid.org/0000-0002-6679-9295
E-mail: obol@rf.unn.ru

Книжные новинки



Andrey D. Grigoriev, Vyacheslav A. Ivanov, Sergey I. Molokovsky

Microwave Electronics

Edited by Professor A. D. Grigoriev

ISSN 1437-0387 ISSN 2197-6643 (electronic)
Springer Series in Advanced Microelectronics
ISBN 978-3-319-68890-9 ISBN 978-3-319-68891-6 (eBook)
https://doi.org/10.1007/978-3-319-68891-6
Library of Congress Control Number: 2017957671
Copyright for the English version is with the authors.
© Springer International Publishing AG 2018

This book describes the physical basis of microwave electronics and related topics, such as microwave vacuum and microwave semiconductor devices.

It comprehensively discusses the main types of microwave vacuum and microwave semiconductor devices, their principles of action, theory, parameters and characteristics, as well as ways of increasing the frequency limit of various devices up to the terahertz frequency band. Further, it applies a unified approach to describe charged particle interaction within electromagnetic fields and the motion laws of charged particles in various media.

The book is intended as a manual for researchers and engineers, as well as advanced undergraduate and graduate students.