

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-3-48-62>

УДК 621.396.677.85

А. В. Можаровский ✉

ООО "Радио Гигабит"

ул. Ошарская, 95 к. 2, Нижний Новгород, 603105, Россия

РАЗРАБОТКА ЛИНЗОВОЙ АНТЕННЫ С ПЛАНАРНЫМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ СЕЛЕКТОРОМ ДЛЯ СИСТЕМ ФИКСИРОВАННОЙ РАДИОСВЯЗИ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА 28 ГГц

Аннотация

Введение. Использование миллиметрового диапазона длин волн открывает широкие перспективы для увеличения пропускной способности в современных системах связи за счет применения широких полос передаваемых сигналов. Одной из основных сложностей при разработке систем радиосвязи диапазона длин волн 27.5...29.5 ГГц является обеспечение высоких значений коэффициента усиления используемых антенн порядка 30 дБи для компенсации значительного уровня затухания радиосигнала в канале связи по сравнению с традиционными диапазонами частот ниже 6 ГГц.

Цель работы. Разработка узконаправленной антенны с возможностью работы на двух ортогональных линейных поляризациях для разделения передаваемого и принимаемого потоков по поляризации и, соответственно, более эффективного использования спектра. При этом важной задачей является обеспечение высокой апертурной эффективности антенны и низкий уровень потерь в системе подведения, которая должна иметь интерфейс на основе печатных линий передачи для подключения к элементам радиочастотного тракта, реализованным на печатной плате.

Материалы и методы. Основным методом исследования характеристик антенны является численное электродинамическое моделирование в системе автоматизированного проектирования CST Microwave Studio. Полученные результаты подтверждены при измерении экспериментальных образцов.

Результаты. В качестве разрабатываемой антенны выбрана интегрированная линзовая антенна, состоящая из однородной полуэллиптической диэлектрической линзы диаметром $D = 120$ мм с цилиндрическим продолжением и первичного облучателя, выполненного на основе микрополосковой антенны с волноводным адаптером. Размер раскрытия адаптера оптимизирован для увеличения апертурной эффективности линзы с помощью комбинированного метода на основе принципов геометрической и физической оптики. Две ортогональные линейные поляризации на микрополосковом облучателе возбуждаются через соответствующие щели "Н"-формы, выполненные в одном из внутренних уровней металлизации печатной платы рядом друг с другом. В частотном диапазоне 27.5...29.5 ГГц разработанная линзовая антенна для каждой из поляризаций обеспечивает значение коэффициента усиления 29.5...30.2 дБи с шириной основного луча по уровню половинной мощности $4.8...5.1^\circ$ и уровнем кроссполяризационной развязки не менее 37 дБ.

Заключение. Простота конструкции, высокая апертурная эффективность и возможность работать на двух ортогональных линейных поляризациях позволяют сделать вывод, что разработанная линзовая антенна может быть успешно использована в системах радиосвязи частотного диапазона 27.5...29.5 ГГц.

Ключевые слова: миллиметровый диапазон длин волн, интегрированная линзовая антенна, микрополосковая антенна, печатная плата, волноводно-микрополосковый переход, двойная линейная поляризация, электродинамическое моделирование

Для цитирования: Можаровский А. В. Разработка линзовой антенны с планарным поляризационным селектором для систем фиксированной радиосвязи частотного диапазона 28 ГГц // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 48–62. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-48-62

Источник финансирования. Инициативная работа.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.04.2019; принята к публикации 20.05.2019; опубликована онлайн 27.06.2019

© Можаровский А. В., 2019

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



Andrey V. Mozharovskiy ✉

LLC "Radio Gigabit"

95, bldg 2, Osharskaya Str., 603105, Nizhny Novgorod, Russia

DESIGN OF LENS ANTENNA WITH PLANAR ORTHOMODE TRANSDUCER FOR 28 GHz FIXED SERVICE COMMUNICATION SYSTEMS

Abstract.

Introduction. Millimeter-wave frequency range can provide utilization of wide transmission frequency bands and therefore a significant increase of the capacity in modern communication systems. One of the main concerns in the design of the 27.5...29.5 GHz-wave communication system is a high gain antenna of the range of 30 dBi to compensate the significant level of radio signal attenuation in the communication channel compared to the traditional frequency bands below 6 GHz.

Objective. Development of the integrated lens antenna with the ability to operate on two orthogonal linear polarizations to separate the transmitted and received signals by polarization and, therefore, to create more efficient use of the spectrum. At the same time, an important task is to provide a high aperture efficiency of the antenna and a low level of insertion loss in the distribution system, which should have an interface based on printed transmission lines for connection to the radio frequency circuit elements realized on the printed circuit board.

Materials and methods. The main method of the analysis of the lens antenna characteristics is full-wave electromagnetic simulation in the computer-aided design system CST Microwave Studio. The results are confirmed with experimental samples measurement.

Results. The designed antenna is an integrated lens antenna consisting of a homogeneous semi-elliptical dielectric lens with a diameter of $D = 120$ mm with a cylindrical extension and a primary radiator based on a microstrip antenna with a waveguide adapter. Waveguide adapter radiating opening dimensions were optimized using an analytical method based on a combination of geometrical and physical optics. Two orthogonal polarizations are excited on the primary microstrip patch antenna with the corresponding closely spaced "H-type" slots in one internal metallization layer. According to experimental results, the designed antenna provides the gain level of 29.5...30.2 dBi with a half-power beamwidth of 4.8...5.1 degrees and cross-polarization level exceeding 37 dB for both polarizations in the whole frequency band of 27.5...29.5 GHz.

Conclusion. The simplicity of the design, high aperture efficiency and the ability to operate on two orthogonal linear polarizations show that the developed lens antenna can be successfully used in radio communication systems of the 27.5...29.5 GHz frequency range.

Key words: millimeter wave band, integrated lens antenna, microstrip antenna, printed circuit board, waveguide-to-microstrip transition, dual linear polarization, EM simulation

For citation: Mozharovskiy A. V. Design of Lens Antenna with Planar Orthomode Transducer for 28 GHz Fixed Service Communication Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 48–62. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-48-62

Acknowledgements. Initiative work.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 12.04.2019; accepted 20.05.2019; published online 27.06.2019

Введение. Рост объема передаваемой информации в современных беспроводных сетях приводит к необходимости существенного увеличения пропускной способности систем связи и, следовательно, увеличения скорости передачи данных вплоть до нескольких гигабит в секунду. Для достижения таких скоростей необходимо использовать широкую полосу передаваемых сигналов, что крайне затруднительно в условиях перегруженного частотного спектра в традиционно используемых диапазонах до 6 ГГц. Одним из спо-

собов решения этой проблемы является увеличение несущей частоты до миллиметрового диапазона длин волн, где для передачи данных доступны полосы шириной вплоть до нескольких гигагерц. Так в настоящее время диапазон частот 27.5...29.5 ГГц рассматривается как один из наиболее перспективных для реализации систем беспроводной связи типа "точка-точка" и "точка-многоточка" [1]–[3], а также для разворачивания мобильных сетей пятого поколения (5G) [4].

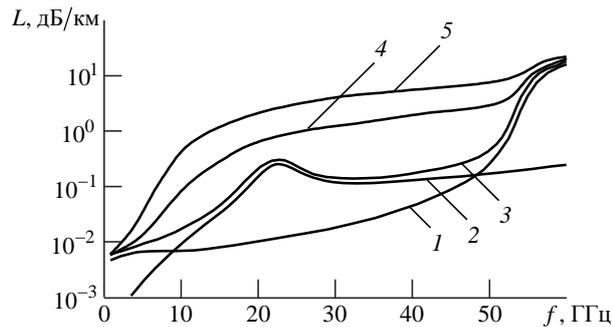


Рис. 1. Уровень ослабления радиосигнала в канале связи, вызванного влиянием кислорода, водяного пара и осадков
Fig. 1. Radio signal attenuation level in a communication channel caused by oxygen, water vapor and precipitation influences

Одной из основных сложностей при разработке систем радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн является обеспечение высоких значений коэффициента усиления (КУ) используемых антенн для компенсации значительного уровня затухания радиосигнала в канале связи по сравнению с диапазонами частот ниже 6 ГГц. Основная причина ослабления L в канале – влияние кислорода и водяного пара [5]–[7], как показано для различных частот f на рис. 1 (кривая 1 – кислород, 2 – водяной пар, 3 – ясная погода, 4 – дождь 5 мм/ч, 5 – дождь 20 мм/ч).

Кроме того, существенно влияют на уровень затухания осадки, как было показано в [6], [8], а также разъяснено в рекомендациях Международного союза электросвязи (ITU) [9]. Так, при интенсивности осадков, соответствующих сильному дождю, общий уровень ослабления радиосигнала при увеличении рабочей частоты с 6 ГГц до 28.5 ГГц (центральная частота рассматриваемого диапазона) возрастает с 0.05 дБ/км до 6 дБ/км (рис. 1), что существенно влияет на характеристики радиосоединения. В связи с этим основные регуляторные документы, принятые в Российской Федерации и странах Европы, регламентируют для использования в диапазоне частот вблизи 28 ГГц только остронаправленные антенны для систем связи типа "точка-точка" и комбинацию из остронаправленной антенны абонентской станции и секторной антенны с одним лучом для базовой станции в случае системы "точка-многоточка".

При этом интенсивность дождя является статистическим параметром с некоторой плотностью вероятности, специфичной для каждой географической области [10]. Обычно в качестве критерия оценки системы связи выбирается доступность канала, определяющая среднее время, для которого обеспечивается полная заявленная пропускная

способность. Наиболее часто в современных системах связи используются критерии доступности 99.9, 99.99 и 99.999 %, соответствующие отсутствию связи в выбранном канале примерно 52 мин, 5 мин и 30 с в год. Рассчитать дальность связи можно расширением классической формулы Фрииса, в которую добавлены потери при распространении радиосигнала в атмосферных газах и потери, связанные с дождем:

$$P_r - P_t = 20 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) + G_r + G_t - R(\gamma_{\text{кислород}} + \gamma_{\text{пар}} + \gamma_{\text{дождь}}),$$

где P_r и P_t – принимаемая и передаваемая мощность соответственно в дБм; λ – длина волны излучения (10.53 мм для частоты 28.5 ГГц); R – искомая дальность; G_r и G_t – КУ приемной и передающей антенн; $\gamma_{\text{кислород}}$, $\gamma_{\text{пар}}$, $\gamma_{\text{дождь}}$ – коэффициенты ослабления в кислороде, водяном паре и дожде. Значения коэффициентов ослабления приведены для частот от 1 до 1000 ГГц в [7] и [9].

Согласно расчетам, на низших модуляциях дальность радиосоединения более 4 км при условии доступности 99.99 % в зоне осадков, соответствующей средней полосе России, достигается только при использовании антенн с КУ 30 дБи и более. В рассматриваемом частотном диапазоне такие значения КУ соответствуют размеру апертуры порядка 120 мм. Выбранная для рассмотрения географическая область располагается в поясе умеренного климата со средним уровнем осадков в год. Поэтому полученные результаты можно считать средними по географическому положению наиболее заселенных частей материков.

Дополнительно, для обеспечения более эффективного использования спектра реализация систем связи возможна на основе технологии MIMO (Multiple Input Multiple Output) [11], позволяющей осуществлять одновременную параллельную передачу сразу нескольких потоков данных с использованием нескольких антенн, в том числе и с разделением потоков по поляризации.

Таким образом, целью исследования, описываемого в настоящей статье, является разработка эффективной антенны с высоким уровнем КУ для систем радиосвязи частотного диапазона 27.5...29.5 ГГц, обеспечивающей работу на двух ортогональных линейных поляризациях для эффективного разделения приемного и передающего сигналов по поляризации. Поскольку разраба-

тываемая антенна предназначена для использования в составе систем связи, то важным требованием является наличие выходного интерфейса на основе печатной линии передачи для прямого подключения к элементам радиочастотного тракта, таким, как, например, малошумящие усилители (МШУ), смесители и фильтры. Также важной проблемой при разработке остронаправленной антенны миллиметрового диапазона длин волн является обеспечение высокой апертурной эффективности антенны при малом уровне потерь в системе подведения, поскольку с повышением рабочей частоты до миллиметрового диапазона существенно возрастают потери в печатных структурах, реализованных на печатных платах. При этом возникает необходимость анализа принципов максимизации апертурной эффективности остронаправленных антенн.

Основными требованиями к антенне являются обеспечение высокого уровня КУ порядка 30 дБи, работа на двух ортогональных линейных поляризациях с уровнем кроссполяризации развязки более 30 дБ и согласование по уровню коэффициента отражения $S_{11} < -10$ дБ в рассматриваемом диапазоне частот 27.5...29.5 ГГц.

Выбор конфигурации антенны. Известны различные подходы к разработке остронаправленной антенны, поддерживающей работу на двух ортогональных линейных поляризациях в миллиметровом диапазоне длин волн. Например, такая антенна может быть реализована на двумерной решетке печатных микрополосковых антенных элементов [12]–[14], что является привлекательным планарным решением с низкой стоимостью изготовления в массовом производстве. Однако для обеспечения высокого значения КУ такая решетка должна содержать большое число антенных элементов, что существенно усложняет систему подведения сигнала и увеличивает потери вплоть до нескольких децибел, особенно при использовании двух поляризаций.

Потери в подводящей системе могут быть существенно уменьшены за счет использования последовательной схемы возбуждения элементов антенной решетки [15]–[16], которая может быть реализована на печатной плате на основе поверхностных волноводов (Substrate Integrated Waveguides (SIW)) [17]. Основным недостатком использования параллельной схемы возбуждения является частотная зависимость положения основного луча диаграммы направленности, вызванная изменением набега фаз между соседними

элементами решетки при изменении рабочей частоты. Возможный путь решения проблемы частотного качания луча – использование симметричного возбуждения ветвей системы подведения сигнала [18]–[19]. В этом случае противоположные ветви позволяют компенсировать качание луча при изменении частоты, однако это приводит к уменьшению КУ антенны, что делает данное решение сравнительно узкополосным.

Еще одним подходом к уменьшению потерь в подводящей системе двумерной антенной решетки является ее реализация на основе полых металлических волноводов [20]. При этом отдельные антенные элементы могут быть реализованы на основе щелей или небольших рупорных антенн. Основным недостатком такого подхода – массивность волноводных элементов в рассматриваемом диапазоне частот, сложность изготовления, а также необходимость дополнительно обеспечивать переход с волноводного интерфейса на печатную линию передачи для интеграции с радиочастотным модулем систем связи.

Также может быть рассмотрена рефлекторная антенна, например антенна Кассегрена, с двухполяризационным первичным облучателем [21]. Следует отметить, что данный подход получил большое распространение в коммерческих реализациях высоконаправленных антенн рассматриваемого частотного диапазона за счет сравнительно простой конструкции и использования стандартного волноводного интерфейса на основе металлического волновода круглого или квадратного сечения, хотя такие коммерческие решения, как правило, имеют высокую стоимость. Один из недостатков антенн этого типа – эффект затенения излучающей апертуры вторичным отражателем. При этом, поскольку размер вторичного отражателя обычно слабо меняется с увеличением размера рефлектора (и, соответственно, с ростом КУ), то эффект затенения оказывает наибольшее влияние на антенны с умеренным значением КУ, которые рассматриваются в настоящей статье.

В рамках описываемого исследования в качестве основного подхода к реализации остронаправленной двухполяризационной антенны частотного диапазона 27.5...29.5 ГГц была выбрана интегрированная линзовая антенна (ИЛА) [22]–[24]. Такой выбор обусловлен рядом известных преимуществ ИЛА по сравнению с другими апертурными антеннами. В частности, в них отсутствует эффект затенения апертуры первичным облучателем (в отличие от антенн Кассегрена), а

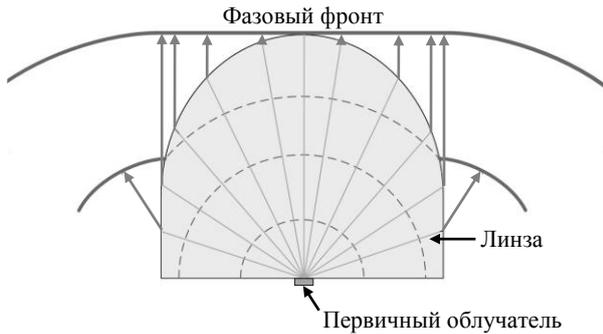


Рис. 2. Ход лучей от первичного облучателя и фазовый фронт

Fig. 2. The primary feed rays path and phase front

также имеется возможность реализации первичного облучателя на печатной плате совместно с элементами радиочастотного тракта, что существенно упрощает разработку систем связи.

В общем случае ИЛА представляет собой однородную диэлектрическую линзу эллиптической (или квазиэллиптической) формы, в фокусе которой установлен первичный облучатель. Из законов геометрической оптики известно, что если эксцентриситет эллипсоида e удовлетворяет соотношению $e = 1/n$, где n – показатель преломления материала линзы, то геометрический и оптический фокусы эллипсоида совпадают. В этом случае излучение от первичного облучателя, проходя через границу раздела "диэлектрик–свободное пространство", формирует плоский фазовый фронт и, соответственно, узкий луч диаграммы направленности (ДН) в дальней зоне (рис. 2). Таким образом, принцип фокусировки в ИЛА схож с таковым в классических рефлекторных антеннах и тонких линзах с вынесенным первичным облучателем. Нижняя часть линзы (цилиндрическое продолжение) не участвует в фокусировке излучения, поэтому ее форма может

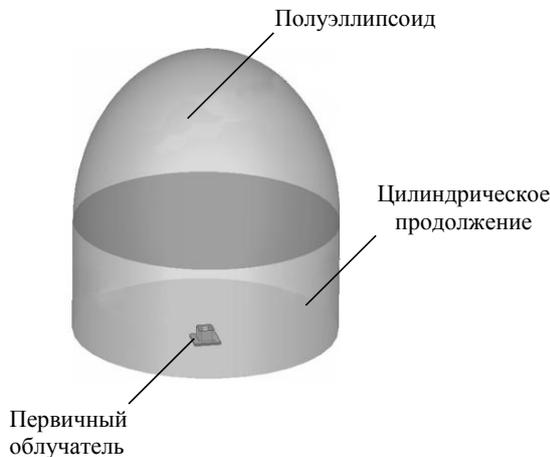


Рис. 3. Модель линзовой антенны
Fig. 3. Lens antenna model

быть адаптирована произвольным образом для облегчения интеграции линзовой антенны с корпусом радиорелейной станции.

Разработанная антенна состоит из полуэллиптической линзы диаметром $D = 120$ мм, выполненной из полиэтилена высокой плотности с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.3$ и низким значением тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$) в рассматриваемом диапазоне частот, и первичного облучателя, интегрированного на плоское основание линзы в точке фокуса, как показано на рис. 3.

Конструкция и характеристики первичного облучателя. Важной задачей при разработке остронаправленной ИЛА является обеспечение эффективной засветки коллимирующей эллиптической поверхности линзы первичным облучателем [23], [25], [26]. Форма диаграммы направленности первичного облучателя в теле линзы определяет распределение амплитуды на ее излучающей поверхности и, соответственно, форму диаграммы направленности ИЛА в дальней зоне и значение ее КУ. Так, если первичный облучатель имеет в теле линзы широкую диаграмму направленности, то значительная часть излучаемой им мощности засвечивает не участвующее в формировании узкого луча диаграммы направленности ИЛА цилиндрическое продолжение (рис. 4, а). Это приводит к увеличению доли бокового и обратного излучения и уменьшению уровня главного луча диаграммы направленности.

Напротив, если первичный облучатель имеет узкую диаграмму направленности, то излучаемая им мощность концентрируется в центре эллиптической части линзы, уменьшая эффективную излучающую апертуру линзы, тем самым уменьшая КУ линзовой антенны (рис. 4, б). Таким образом, контролируя ширину диаграммы направленности

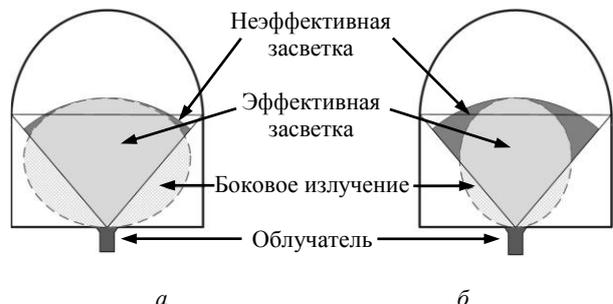


Рис. 4. Засветка коллимирующей поверхности линзы первичным облучателем
Fig. 4. Lens collimating surface illumination by the primary feed

первичного облучателя, можно обеспечить более эффективную засветку эллиптической поверхности линзы и, соответственно, увеличить КУ ИЛА.

Для определения принципиальной зависимости коэффициента направленного действия (КНД) ИЛА от ширины ДН ее первичного облучателя по уровню половинной мощности было использовано разработанное ранее специализированное программное обеспечение для расчета характеристик ИЛА, реализованное в среде MATLAB. Используемый метод расчета основан на гибридном методе, сочетающем принципы геометрической и физической оптики (ГО/ФО) [27]. При этом диаграмма направленности первичного облучателя в теле линзы считалась осесимметричной, а угловое распределение амплитуды напряженности электрического поля определялось по формуле

$$|\vec{E}_{\text{п.о}}(\theta)| = E_0 \cos^\gamma(\theta),$$

где E_0 – амплитуда главного луча; θ – угол, отсчитываемый от оси линзы; γ – коэффициент, определяющий ширину диаграммы направленности первичного облучателя в теле линзы. Результаты расчета для линзы из термопластика диаметром $D = 120$ мм на центральной частоте рассматриваемого диапазона 28.5 ГГц представлены на рис. 5.

Из рисунка следует, что первичный облучатель с шириной диаграммы направленности 44...50° обеспечивает для выбранного типа линзы максимальное значение КНД, а следовательно, и КУ. Нужно отметить, что ширина диаграммы направленности первичного облучателя, обеспечивающая максимальный КУ ИЛА, не зависит от размера линзы, а только от ее материала и, следовательно, полученные результаты справедливы для линз любого размера (диаметром более 5–10 длин волн в свободном пространстве) и могут быть использо-

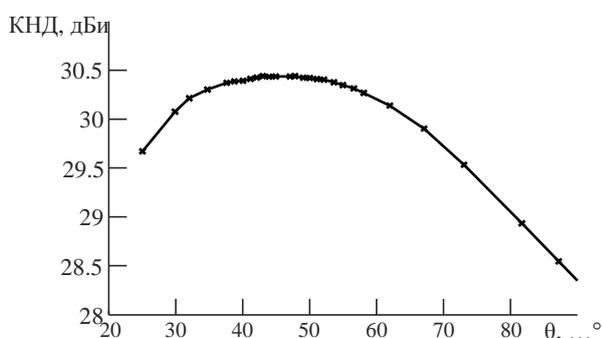


Рис. 5. Зависимость КНД ИЛА от ширины ДН первичного облучателя

Fig. 5. ILA AD dependence on the primary feed RP width

ваны для дальнейших расчетов.

Наиболее подходящими для управления шириной диаграммы направленности являются волноводные первичные облучатели, в которых контроль ширины ДН осуществляется за счет управления размером раскрыва облучателя [23]. При этом важным аспектом разработки такого облучателя является осуществление электрического сопряжения волноводного раскрыва облучателя с интерфейсом на основе печатной линии передачи для прямого подключения к элементам радиочастотного тракта. Для решения этой задачи был использован подход, близкий к применяемому в ряде волноводно-микрорасщеливых переходов, – использование излучающей микрорасщели антенны в волноводном канале [28]–[31].

Первичный облучатель разработанной ИЛА основан на комбинации микрорасщели антенны и волноводного адаптера с раскрывом квадратного сечения 8.5×8.5 мм и адаптирован для использования с диэлектрической линзой в частотном диапазоне 27.5...29.5 ГГц. Структура и модель разработанного первичного облучателя представлены на рис. 6.

Первичный облучатель реализован на печатной плате, состоящей из пяти слоев диэлектрика (6 уровней металла). В качестве материала печатной платы был выбран высокочастотный ламинат Rogers RO4350В (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3.66$) со связующим слоем Rogers RO4450В ($\epsilon = 3.55$). Основным излучающим элементом микрорасщели антенны является квадратный патч-излучатель. Возбуждение ортогональных линейных поляризаций осуществляется через соответствующие щели "Н"-формы, выполненные в одном из внутренних уровней металлизации печатной платы (рис. 6, б). Сигнал подводится с помощью микрорасщели линий с обратной от излучателя стороны печатной платы, что позволяет изолировать излучающий элемент от радиочастотного тракта системы связи. Остальные уровни металлизации платы в формировании структуры микрорасщели антенны не участвуют. Они предусмотрены для дальнейшей трассировки платы приемопередатчика с активными цепями и антенной.

Волноводный адаптер закрепляется между печатной платой и линзой и, благодаря оптимальным размерам его раскрыва, корректирует излучение патча для более равномерной засветки поверхности линзы и, как следствие, увеличения КУ ИЛА.

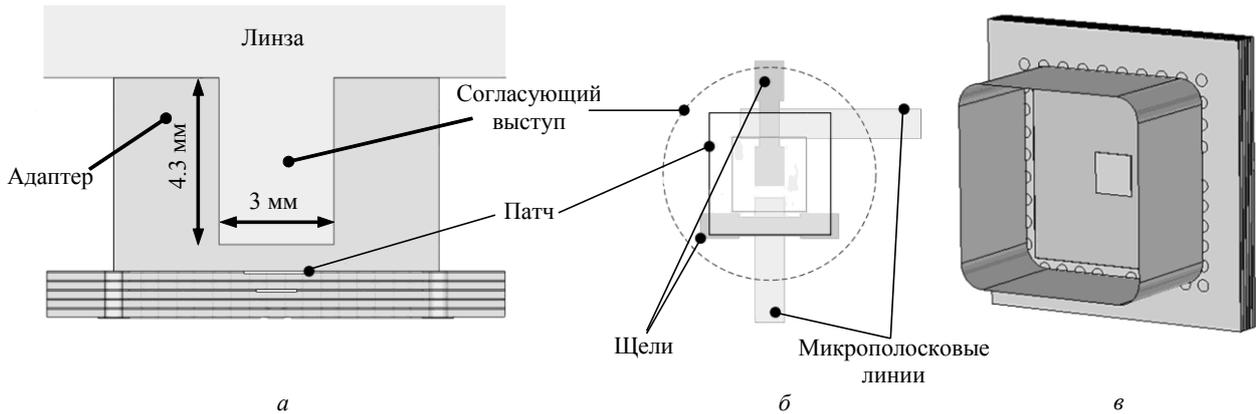


Рис. 6. Структура первичного облучателя с адаптером в разрезе (а); структура отдельной микрополосковой антенны (б); модель первичного облучателя (в)

Fig. 6. Cross-section structure of the primary feed with adapter (a); single microstrip antenna structure (b); primary feed model (c)

Как видно из рис. 6, а, раскрыв адаптера содержит диэлектрическую согласующую вставку круглого сечения диаметром 3 мм и высотой 4.6 мм. Технологически такая вставка выполняется как выступ на плоском основании линзы в месте крепления адаптера и служит для улучшения согласования по импедансу диэлектрической линзы и волноводного адаптера [23].

Электродинамическое моделирование разработанного первичного облучателя ИЛА проведено в системе автоматизированного проектирования (САПР) CST Microwave Studio. При электродинамическом моделировании были учтены потери в диэлектрическом материале печатной платы на основе экспериментальных данных, представленных в [32], [33]. В частности, тангенс угла диэлектрических потерь задавался равным 0.005 во всем исследуемом диапазоне частот 27.5...29.5 ГГц. Кроме того, при моделировании учитывались потери в металлических проводниках за счет задания конечной проводимости и шероховатости медной фольги.

Результаты моделирования S-параметров первичного облучателя представлены на рис. 7. Сле-

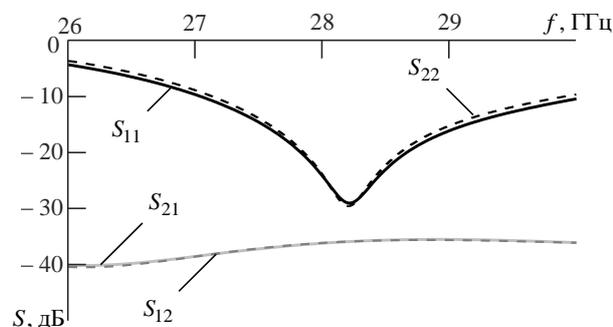


Рис. 7. Результаты электродинамического моделирования разработанного первичного облучателя
Fig. 7. The designed primary feed electrodynamic modelling results

дует отметить, что для определения характеристик разрабатываемого первичного облучателя в теле линзы при моделировании краевые условия и параметры окружающего пространства задавались таким образом, чтобы первичный облучатель излучал в среду (полупространство) с характеристиками материала диэлектрической линзы.

В соответствии с результатами электродинамического моделирования разработанный первичный облучатель согласован по уровню коэффициентов отражения для каждого из портов, соответствующих двум поляризациям, S_{11} и $S_{22} < -13$ дБ во всей рабочей полосе системы 27.5...29.5 ГГц. При этом уровень поляризационной развязки в полосе составляет более 35 дБ.

В теле линзы первичный облучатель обеспечивает близкие по форме ДН для каждой поляризации с КУ в пределах 10.8...11.5 дБи и эффективностью излучения не менее 96 % (или не менее -0.2 дБ) во всем частотном диапазоне 27.5...29.5 ГГц. Полученные по результатам электродинамического моделирования сечения диаграммы направленности, сформированной в теле диэлектрической

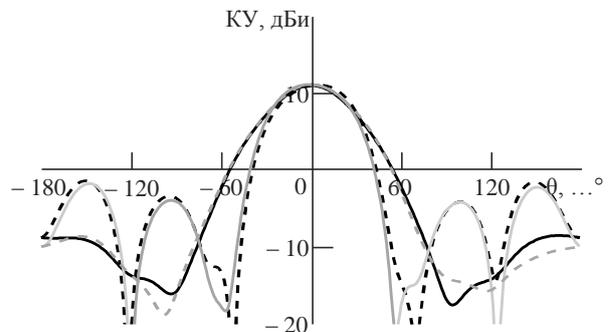


Рис. 8. Сечения диаграммы направленности первичного облучателя в теле диэлектрической линзы
Fig. 8. Radiation pattern cross sections of the primary feed in the dielectric lens body

линзы, при возбуждении каждого из ортогональных портов разработанного первичного облучателя на центральной частоте 28.5 ГГц рассматриваемого частотного диапазона приведены на рис. 8. Сечения представлены в двух принципиальных плоскостях ($\phi = 0^\circ$ (сплошные линии) и $\phi = 90^\circ$ (штриховые линии)). Черный цвет – порт 1, серый цвет – порт 2.

По результатам моделирования получено, что первичный облучатель формирует в теле линзы диаграмму направленности с шириной по уровню половинной мощности $47...51^\circ$ для каждой из ортогональных поляризации, что находится в пределах оптимальных значений для достижения требуемых значений КУ ИЛА (см. рис. 5).

Экспериментальное исследование прототипа. Элементы разработанной линзовой антенны с двухполяризационным первичным облучателем были изготовлены для проведения экспериментальных исследований. Для подключения измерительного оборудования со стандартным волноводным интерфейсом WR-28 к микрополосковым линиям разработанного первичного облучателя в структуру печатной платы были добавлены волноводно-микрополосковые переходы зондового типа с волноводными заглушками [31]. Для того чтобы учесть влияние переходов и подводящих микрополосковых линий на характеристики двухполяризационной ИЛА, они были отдельно протестированы с помощью двусторонних переходов "волноводно-микрополосковая линия-волноводно" (рис. 9). Структура печатной платы тестовых структур полностью идентична структуре платы, использованной для планарного первичного облучателя.

Двухсторонние тестовые структуры с различной длиной микрополосковой линии (15 и 25 мм) позволили экспериментально оценить погонные потери в микрополосковой линии и в последующем учесть их при определении характеристик отдельных переходов и характеристик разработанной ИЛА. Переходы согласованы по уровню коэффициента отражения $S_{11} < -20$ дБ в рассматриваемой полосе частот 27.5...29.5 ГГц. При этом потери на прохождение в отдельном переходе не более 0.4 дБ, а погонные потери в микрополосковой линии не более 0.7 дБ/см.

Фотографии печатной платы с планарным двухполяризационным первичным облучателем и волноводно-микрополосковыми переходами представлены на рис. 10, а и б.

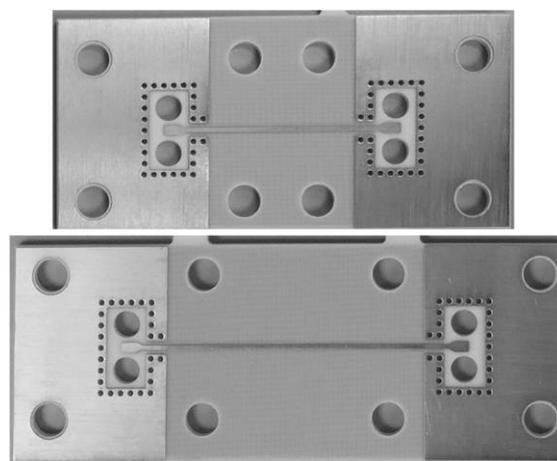
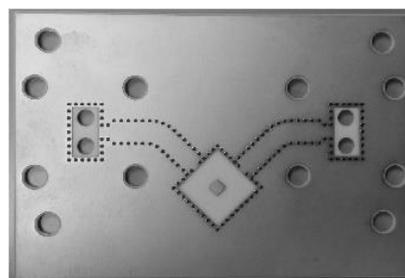
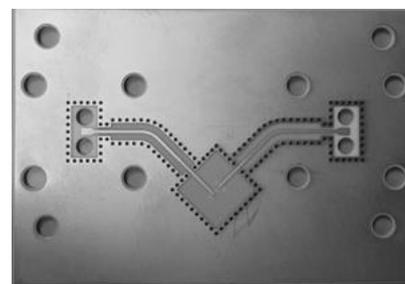


Рис. 9. Двухсторонние структуры "волноводно-микрополосковая линия-волноводно" для тестирования характеристик волноводно-микрополосковых переходов
Fig. 9. Back-to-back "waveguide-microstrip line-waveguide" structures for waveguide-to-microstrip transition characteristics testing



а



б



в

Рис. 10. Фотографии: а – вид сверху печатной платы с двухполяризационным первичным облучателем; б – вид снизу печатной платы с двухполяризационным первичным облучателем; в – вид волноводного адаптера
Fig. 10. Photos: а – a top view of a printed circuit board with dual-polarized primary feed; б – bottom view of the printed circuit board with a dual-polarized primary feed; в – waveguide adapter

Фотография волноводного адаптера представлена на рис. 10, в. Адаптер содержит волноводный раскрыв первичного облучателя и волноводный канал на основе прямоугольного волновода стандартного сечения WR-15, используемый для упрощения подключения измерительного оборудования. Для изготовления волноводного канала методом фрезеровки адаптер был разделен на 2 части, соединяющиеся посередине волноводного канала. При этом волноводный канал оказывается разделенным в E -плоскости, вдоль которой плотность электрического тока минимальна, и щели, возникающие при сопряжении металлических элементов, существенно не влияют на характеристики волновода.

Для измерения потерь в системе подведения двухполяризационной ИЛА использовалась специальная поляризационная вставка (рис. 11).

Поляризационная вставка крепится к антенному порту адаптера вместо линзы таким образом, что ее прямоугольный раскрыв широкой стенкой располагается перпендикулярно одной из подводящих линий первичного облучателя. Для этой микрополосковой линии и соответствующей ей поляризации излучающего патча адаптер согласован по коэффициенту отражения. При этом для сигналов ортогональной поляризации такая вставка является полностью отражающей.

Сравнение результатов моделирования (сплошная линия) и измерений (штриховая линия) первичного облучателя с системой подведения представлено на рис. 12 (черные линии – порт 1, серые – порт 2). Потери в подводящем тракте (до антенного порта) составляют 1.8...2 дБ. Таким образом, за вычетом потерь в волноводно-микрополосковых переходах и подводящих линиях, которые были оценены ранее при измерении двухсторонних тестовых структур, разработанный первичный облучатель совместно с адаптером вносит менее 0.4 дБ потерь.

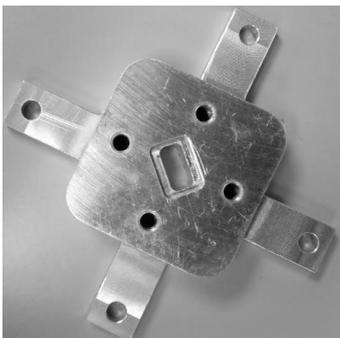


Рис. 11. Поляризационная вставка
Fig. 11. Polarizing insert

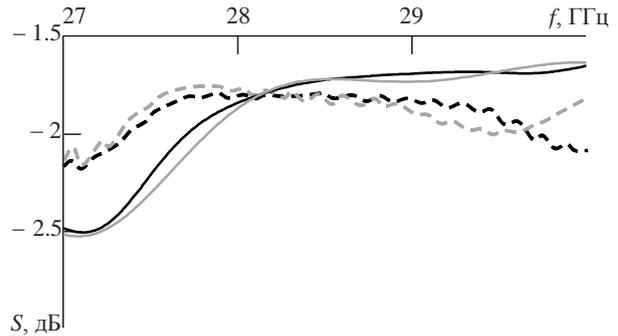


Рис. 12. Потери в системе подведения
Fig. 12. Feed system insertion losses

На рис. 13 представлена фотография изготовленной диэлектрической линзы диаметром $D = 120$ мм. Масса изготовленной линзы составляет 1.1 кг. Цилиндрическое продолжение линзы модифицировано для облегчения крепления адаптера и надежной фиксации в измерительной установке. Для этого в предварительно подготовленные при изготовлении линзы глухие отверстия на ее основании были установлены специальные резьбовые вставки. На плоском основании линзы реализован согласующий выступ с размерами, указанными на рис. 6, а.

S -параметры антенн измерялись с помощью векторного анализатора цепей Keysight N5224A PNA. При проведении измерений порты анализатора цепей подключались к соответствующим входным волноводным интерфейсам системы подведения сигнала с помощью высококачественных коаксиальных кабелей с малым уровнем внутренних потерь в сочетании с волноводно-коаксиальными переходами производства компании Mi-Wave. При измерениях ИЛА направлялась на стенд с радиопоглощающим материалом (РПМ), чтобы исключить переотражения от окружающего пространства. Сравнение измеренных (штриховые линии) и полученных посредством электродинамического моделирования (сплошные) S -параметров линзовой антенны показано на рис. 14.

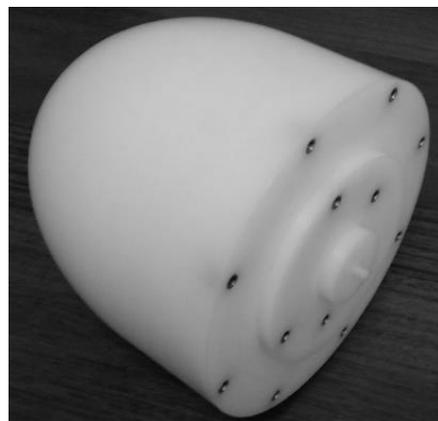


Рис. 13. Диэлектрическая линза
Fig. 13. Dielectric lens

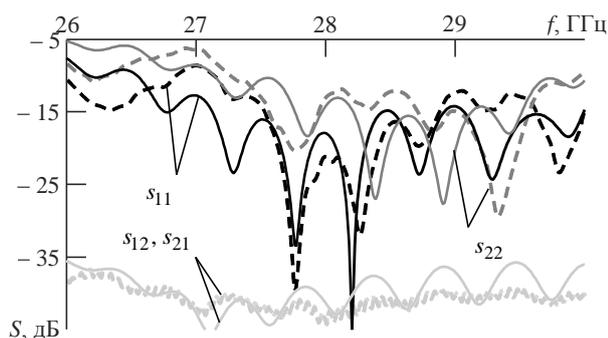


Рис. 14. Сравнение результатов моделирования и измерений S -параметров ИЛА

Fig. 14. Comparison of modelled and measured ILA S -parameters

На частотных зависимостях S -параметров присутствуют волнообразные искажения, которые отсутствуют в результатах моделировании отдельного первичного облучателя. Эти искажения вызваны переотражениями излучения от внутренней эллиптической поверхности линзы, которые по принципам геометрической оптики возвращаются в фокус эллипса, где расположен первичный облучатель. Наличие таких искажений не приводит к изменению среднего уровня коэффициентов отражения и изоляции. Из представленных данных видно, что достигнуто хорошее соответствие между результатами электродинамического моделирования и измерений. В частотном диапазоне 27.5...29.5 ГГц антенна обеспечивает уровень изоляции между кроссполяризованными портами более 37 дБ и уровень коэффициентов отражения S_{11} S_{22} не более -12 дБ.

Для измерения КУ и диаграммы направленности линзовой антенны с двойной поляризацией

использовался измерительный стенд (рис. 15).

При измерениях линзовая антенна была закреплена в специальном удерживающем устройстве, расположенном на программно-управляемом поворотном позиционере. Расстояние между приемной (стандартный рупор) и передающей (ИЛА) антеннами выбрано равным 3.5 м для выполнения требования дальней зоны. Приемная рупорная антенна встроена в щель в экране из РПМ для исключения влияния переотражений в помещении и увеличения тем самым точности измерений.

Измерения диаграммы направленности ИЛА проведены отдельно для каждого из ортогональных портов в E - и H -плоскостях на трех ключевых частотах (27.5, 28.5 и 29.5 ГГц). При этом не использовавшийся порт антенны был подключен к согласованной волноводной нагрузке. Измеренные (штриховые линии) и полученные посредством электродинамического моделирования (сплошные линии) диаграммы направленности ИЛА на центральной частоте 28.5 ГГц для двух портов, соответствующих ортогональным поляризациям представлены на рис. 16 (черные линии – E -плоскость, серые – H -плоскость).

Как следует из представленных результатов, достигается хорошее соответствие измеренных и полученных с помощью полного электродинамического моделирования ДН как в области главного луча и значениях КУ, так и в области боковых лепестков. Сводные данные по измеренным и полученным с помощью моделирования (результаты указаны в скобках) характеристикам разработанной ИЛА представлена в табл. 1.

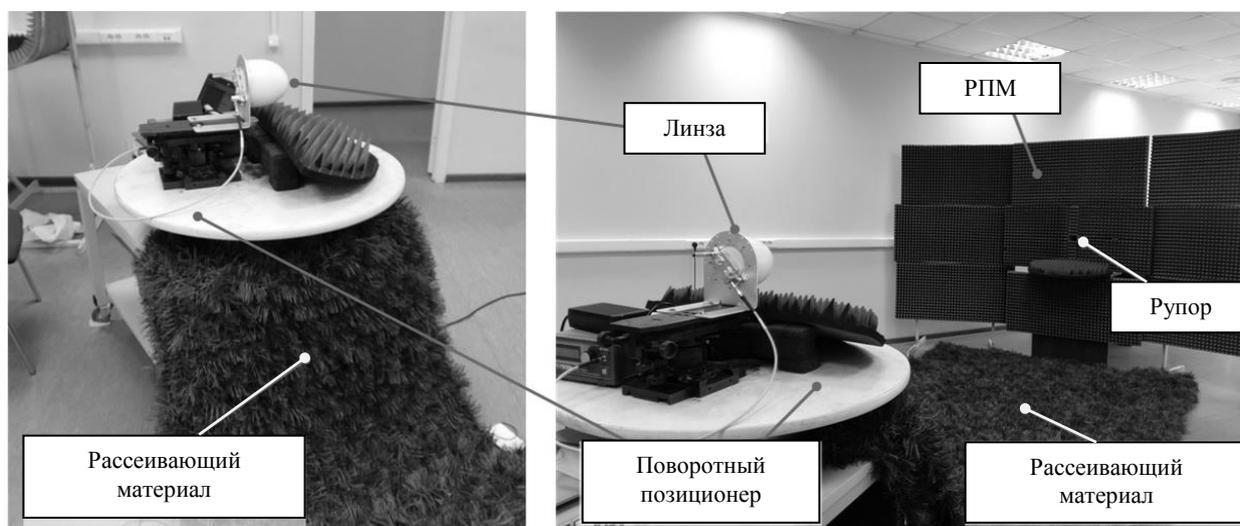


Рис. 15. Антенный измерительный стенд

Fig. 15. Antenna measurement setup

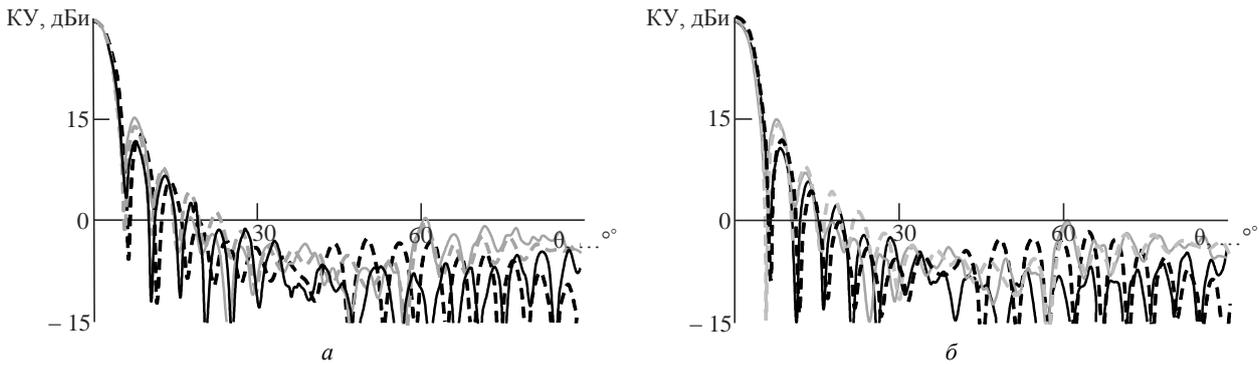


Рис. 16. Измеренные и полученные посредством электродинамического моделирования ДН для порта 1 (а) и порта 2 (б)
Fig. 16. Measured and modelled radiation patterns for port 1 (a) and port 2 (b)

Таблица 1. Характеристики диаграмм направленности разработанной ИЛА

Table 1. Radiation pattern parameters of the designed ILA			
	f , ГГц f , GHz	Ширина луча, ...° Beam width, ...°	КУ, дБи Gain, dBi
Порт 1 Port 1	27.5	5.1 (5.1)	29.8 (29.8)
	28.5	4.8 (4.9)	30.2 (30.2)
	29.5	4.8 (4.8)	29.9 (30.3)
Порт 2 Port 2	27.5	5.1 (5.1)	29.5 (29.7)
	28.5	4.8 (4.9)	29.8 (30.1)
	29.5	4.8 (4.8)	29.9 (30.3)

Измеренные значения КУ разработанной ИЛА лежат в пределах 29.5...30.3 дБи для каждой из поляризаций, что хорошо согласуется с результатами электродинамического моделирования и предварительными оценками. При этом измеренный коэффициент использования поверхности разработанной антенны 71...79 %, что подтверждает эффективность засветки поверхности ИЛА разработанным первичным облучателем. Уровень первого бокового лепестка на всех измеренных частотах для каждой из поляризаций не превышает -15 дБ.

Сравнение характеристик разработанной ост-

ронаправленной ИЛА с двойной линейной поляризацией с различными конструкциями антенн, рассмотренными во введении, представлено в табл. 2. Видно, что разработанная антенна по совокупности параметров и характеристик превосходит в рассматриваемом частотном диапазоне 27.5...29.5 ГГц другие антенны с учетом возможности работы на двух ортогональных линейных поляризациях.

Вывод. Представлены результаты разработки, электродинамического моделирования и измерений ИЛА с планарным двухполяризованным первичным облучателем, предназначенной для использования в системах фиксированной радиосвязи типа "точка-точка" и "точка-многоточка" частотного диапазоне 27.5...29.5 ГГц. Антенна состоит из полуэллиптической линзы диаметром $D = 120$ мм, выполненной из термопластика с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.3$ и низким значением тангенса угла диэлектрических потерь в рассматриваемом диапазоне частот, и первичного облучателя, интегрированного на плоское основание линзы в точке фокуса. Первичный облучатель разработанной ИЛА ос-

Таблица 2. Сравнительная таблица характеристик рассмотренных антенн
Table 2. Comparative table of the considered antennas parameters

Источник Source of literature	Частотный диапазон, ГГц Frequency range, GHz	КУ, дБи Gain, dBi	Работа на двух поляризациях Work on two polarizations	Интерфейс на основе печатных линий Printed Line Interface
Настоящая работа This work	27.5...29.5	29.5...30.3	Да/Yes	Да/Yes
[12]	28...32	22.5	Нет/No	Да/Yes
[13]	26...30	19	Да/Yes	Да/Yes
[14]	12.25...12.75/ 14...14.5	33.7	Да/Yes	Да/Yes
[17]	26.9...29.2	22	Нет/No	Да/Yes
[19]	23.5...25	20	Да/Yes	Да/Yes
[20]	23.5...24.5	17.5	Нет/No	Нет/No
[22]	24.3...24.7	20.5	Нет/No	Да/Yes
[23]	25	32.5	Нет/No	Да/Yes
[25]	27.5...29.5	23.5	Да/Yes	Нет/No
[28]	34...36	34	Да/Yes	Нет/No

нован на комбинации микрополосковой антенны и волноводного адаптера с раскрывом квадратного сечения 8.5×8.5 мм. Размер раскрыва адаптера выбран с помощью аналитического метода, основанного на комбинации принципов геометрической и физической оптики для увеличения апертурной эффективности ИЛА и, следовательно, повышения ее КУ. Дополнительно для улучшения согласования по импедансу первичного облучателя и линзы раскрыв адаптера содержит диэлектрическую согласующую вставку круглого сечения, реализованную на плоском основании линзы.

По результатам измерений получено, что разработанная ИЛА в частотном диапазоне 27.5...29.5 ГГц обеспечивает уровень КУ в пределах 29.5...30.3 дБи для каждой из поляризаций, что до-

стигается за счет высокой апертурной эффективности ИЛА (71...79 %) и малых потерь в системе подведения. При этом ширина основного луча по уровню половинной мощности составляет $4.8...5.1^\circ$, а уровень первого бокового лепестка не превышает -15 дБ. Система подведения сигнала к ИЛА выполнена на основе микрополосковых линий передачи и обеспечивает согласование по импедансу по уровню коэффициента отражения $S_{11} < -12$ дБ. Уровень изоляции между ортогональными антенными портами ИЛА не менее 37 дБ.

Разработанная ИЛА может быть успешно использована в системах радиосвязи частотного диапазона 27.5...29.5 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решение ГКРЧ от 25.06.2007 № 07-21-01-001 "Об использовании полос радиочастот в диапазонах 1.5 ГГц и 28 ГГц радиоэлектронными средствами фиксированного беспроводного доступа гражданского назначения" (в ред. от 16.04.2014 № 14-23-09-2). URL: <http://www.rfs-rf.ru/upload/medialibrary/fc3/018816.doc> (дата обращения 22.02.2019)
2. Recommendation ITU-R F.748-4 (05/2001). Radio-frequency arrangements for systems of the fixed service operating in the 25, 26 and 28 GHz bands. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.748-4-200105-!!!PDF-E.pdf (дата обращения 22.02.2019)
3. Harmonized European Standard ETSI EN 302 326-3 V1.3.1 (2008-02). Fixed Radio Systems; Multipoint Equipment and Antennas; Part 3: Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive for Multipoint Radio Antennas. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30232603/01.03.01_60/en_30232603_v010301p.pdf (дата обращения 22.02.2019)
4. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! / T. S. Rappaport, Sh. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, F. Gutierrez // IEEE Access. 2013. Vol. 1, № 1. P. 335-349. doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813
5. Wells J. Faster than fiber: The future of multi-G/s wireless // IEEE Microwave Magazine. 2009. Vol. 10, iss. 3. P. 104-112. doi: 10.1109/MMM.2009.932081
6. Al-Hourani A., Chandrasekharan S., Kandeepan S. Path loss study for millimeter wave device-to-device communications in urban environment // IEEE Intern. Conf. on Communications Workshops (ICC), Sydney, Australia, 10-14 June 2014. Piscataway: IEEE. P. 102-107. doi: 10.1109/ICCW.2014.6881180
7. Recommendation ITU-R P.676-11 (09/2016) "Attenuation by atmospheric gases". URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-11-201609-!!!PDF-E.pdf (дата обращения 22.02.2019)
8. Qingling Z., Li J. Rain Attenuation in Millimeter Wave Ranges // 7th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory, Guilin, China, 26-29 Oct. 2006. Piscataway: IEEE, 2006. P. 1-4. doi: 10.1109/ISAPE.2006.353538
9. Recommendation ITU-R P.838-3 (03/2005). Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-!!!PDF-E.pdf (дата обращения 22.02.2019)
10. Recommendation ITU-R P.837-7 (06/2017). Characteristics of precipitation for propagation modelling. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-7-201706-!!!PDF-E.pdf (дата обращения 22.02.2019)
11. Five Disruptive Technology Directions for 5G / F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, P. Popovski // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52, iss. 2. P. 74-80. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736746
12. A 64-Element 28-GHz Phased-Array Transceiver With 52-dBm EIRP and 8-12-Gb/s 5G Link at 300 Meters Without Any Calibration / K. Kibaroglu, M. Sayginer, T. Phelps, G. M. Rebeiz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018. Vol. 66, iss. 12. P. 5796-5811. doi: 10.1109/TMTT.2018.2854174
13. Microstrip patch antenna arrays with fan-shaped 90 and 45-degree wide radiation patterns for 28 GHz MIMO applications / S. Churkin, A. Mozharovskiy, A. Artemenko, R. Maslennikov // 12th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), London, UK, 9-13 April 2018. P. 1-5. doi: 10.1049/cp.2018.1204
14. A dual-polarized planar array antenna for Ku-band satellite communications / M. Ohtsuk, T. Takahashi, Y. Konishi, S. Urasaki, K. Harada // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest. Antennas: Gateways to the Global Network. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting, Atlanta, USA, 21-26 June 1998. Piscataway: IEEE, 1998. P. 16-19. doi: 10.1109/APS.1998.698732
15. Diawuo H. A., Jung Y.-B. Broadband Proximity-Coupled Microstrip Planar Antenna Array for 5G Cellular Applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018. Vol. 17, iss. 7. P. 1286-1290. doi: 10.1109/LAWP.2018.2842242

16. A planar dual-polarized microstrip 1D-beamforming antenna array for the 24GHz ISM-band / G. F. Hamberger, A. Drexler, S. Trummer, U. Siart, T. F. Eibert // 10th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, Switzerland, 10–15 April 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1–5. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481205
17. Zhang L., Li L., Yi H. Design of a Traveling Wave Slot Array on Substrate Integrated Waveguide for 24GHz Traffic Monitoring // Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf. (CSQRWC), Xuzhou, China, 21–24 July 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 1–3. doi: 10.1109/CSQRWC.2018.8455559
18. A K-band series-fed microstrip array antenna with low sidelobe for anticollision radar application / Y.-L. Chang, Y.-C. Jiao, L. Zhang, G. Chen, X. Qiu // Sixth Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, China, 16–19 Oct. 2017. Piscataway: IEEE, 2017. P. 1–3. doi: 10.1109/APCAP.2017.8420878
19. Center-fed traveling-wave microstrip array antenna using elliptically-shaped radiating elements in quasi millimeter-wave band / K. Sakakibara, K. Shida, Y. Mouri, N. Kikuma // IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, USA, 9–14 July 2017. Piscataway: IEEE, 2017. P. 2609–2610. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073347
20. 28 GHz waveguide antennas with fan-shaped patterns for base stations MIMO applications / A. Mozharovskiy, S. Churkin, A. Artemenko, R. Maslennikov // 12th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), London, UK, 9–13 April 2018. P. 1–5. doi: 10.1049/cp.2018.0373
21. Dufilie P. A. A Ka-band Dual-Pol Monopulse Shaped Reflector Antenna // IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, USA, 8–13 July 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 1717–1718. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608180
22. Filipovic D. F., Gearhart S. S., Rebeiz G. M. Double-Slot Antennas on Extended Hemispherical and Elliptical Silicon Dielectric Lenses // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1993. Vol. 41, № 10. P. 1738–1749. doi: 10.1109/22.247919
23. Millimeter-Wave Electronically Steerable Integrated Lens Antennas for WLAN/WPAN Applications / A. Artemenko, A. Maltsev, A. Mozharovskiy, A. Sevastyanov, V. Ssorin // IEEE Transactions on Antennas Propagation. 2013. Vol. 61. P. 1665–1671. doi: 10.1109/TAP.2012.2232266
24. High gain millimeter-wave lens antennas with improved aperture efficiency / A. Mozharovskiy, A. Artemenko, V. Ssorin, R. Maslennikov, A. Sevastyanov // 9th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, Portugal, 13–17 April 2015. Piscataway: IEEE, 2015. P. 1–5.
25. Boriskin A. V., Sauleau R., Nosich A. I. Performance of Hemielliptic Dielectric Lens Antennas With Optimal Edge Illumination // IEEE Transactions on Antennas Propagation. 2009. Vol. 57, № 7. P. 2193–2198. doi: 10.1109/TAP.2009.2021979
26. Разработка и оптимизация антенной решетки облучателей для сканирующей линзовой антенны частотного диапазона 71–76 ГГц / В. Д. Голубь, А. С. Мысков, А. В. Можаровский, А. А. Артеменко, Р. О. Масленников // Тр. конф. "Антенны и распространение радиоволн". СПб., 2018. С. 112–116.
27. Эффективный метод расчета характеристик интегрированных линзовых антенн на основе приближений геометрической и физической оптики / А. В. Можаровский, А. А. Артеменко, А. А. Мальцев, Р. О. Масленников, А. Г. Севастьянов, В. Н. Ссорин // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 6. С. 492–504.
28. Wideband aperture coupled stacked patch type microstrip to waveguide transition for V-band / H. Y. Lee, D. S. Jun, S. E. Moon, E. K. Kim, J. H. Park, K. H. Park // IEEE Proc. of Asia-Pacific Microwave Conf., Yokohama, Japan, 12–15 Dec. 2006. Piscataway: IEEE, 2006. P. 360–362. doi: 10.1109/APMC.2006.4429440
29. Волноводно-микроролоосковый переход в частотном диапазоне 60 ГГц / А. А. Артеменко, Р. О. Масленников, А. Г. Севастьянов, В. Н. Ссорин // 19-я Междунар. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 2009. С. 505–506.
30. Design of wideband waveguide to microstrip transition for 60 GHz frequency band / A. Artemenko, A. Maltsev, R. Maslennikov, A. Sevastyanov, V. Ssorin // Proc. of 41st European Microwave Conf. (EuMC), Manchester, UK, 10–13 Oct. 2011. Piscataway: IEEE, 2011. P. 838–841. doi: 10.23919/EuMC.2011.6101966
31. Wideband Probe-Type Waveguide-to-Microstrip Transition for V-band Applications / O. Soykin, A. Artemenko, V. Ssorin, A. Mozharovskiy, R. Maslennikov // Proc. of 46th European Microwave Conf. (EuMC), London, UK, 4–6 Oct. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/EuMC.2016.7824262
32. Felbecker R., Keusgen W., Peter M. Estimation of Permittivity and Loss Tangent of High Frequency Materials in the Millimeter Wave // IEEE Intern. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS), Tel Aviv, Israel, 7–9 Nov. 2011. Piscataway: IEEE, 2011. P. 1–8. doi: 10.1109/COMCAS.2011.6105829
33. Horn A. Dielectric constant and loss of selected grades of Rogers high frequency circuit substrates from 1–50 GHz. Rogers Corporation Technical Report 5788, 2003.

Можаровский Андрей Викторович – инженер (2011) по специальности "Информационные системы и технологии" (ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород). Соискатель кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ". Старший инженер по СВЧ-устройствам и антенной технике ООО "Радио Гигабит". Автор 27 научных публикаций. Сфера интересов – различные антенно-фидерные устройства миллиметрового диапазона длин волн, включая печатные, волноводные и линзовые антенны и антенные решетки, планарные и волноводные дуплексирующие устройства и фильтры.
E-mail: andrey.mozharovskiy@radiogigabit.com
<https://orcid.org/0000-0002-9827-6720>

REFERENCES

1. Decision of The State Commission for Radio Frequencies 25.06.2007 no 07-21-01-001. About the use of radio frequency bands in the 1.5 GHz and 28 GHz bands by radio electronic means of fixed civil access for civilian use. Available at: <http://www.rfs-rf.ru/upload/medialibrary/fc3/018816.doc> (accessed: 22.02.2019) (In Russ.)
2. Recommendation ITU-R F.748-4 (05/2001). Radio-frequency arrangements for systems of the fixed service operating in the 25, 26 and 28 GHz bands. Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.748-4-200105-!!!PDF-E.pdf (accessed: 22.02.2019)
3. Harmonized European Standard ETSI EN 302 326-3 V1.3.1 (2008-02). Fixed Radio Systems; Multipoint Equipment and Antennas; Part 3: Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive for Multipoint Radio Antennas. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30232603/01.03.01_60/en_30232603v010301p.pdf (accessed: 22.02.2019)
4. Rappaport T. S., Sun Sh., Mayzus R., Zhao H., Azar Y., Wang K., Wong G. N., Schulz J. K., Samimi M., Gutierrez F. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! *IEEE Access*. 2013, vol. 1, no. 1, pp. 335–349. doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813
5. Wells J. Faster than fiber: The future of multi-G/s wireless. *IEEE Microwave Magazine*. 2009, vol. 10, iss. 3, pp. 104–112. doi: 10.1109/MMM.2009.932081
6. Al-Hourani A., Chandrasekharan S., Kandeepan S. Path loss study for millimeter wave device-to-device communications in urban environment. *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*. 10-14 June 2014. Sydney, Australia. 2014. Piscataway, IEEE, pp. 102–107. doi: 10.1109/ICCW.2014.6881180
7. Recommendation ITU-R P.676-11 (09/2016) "Attenuation by atmospheric gases". Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-11-201609-!!!PDF-E.pdf (accessed: 22.02.2019)
8. Qingling Z., Li J. Rain Attenuation in Millimeter Wave Ranges. 7th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory. 26–29 Oct. 2006. Guilin, China. Piscataway, IEEE, 2006, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISAPE.2006.353538
9. Recommendation ITU-R P.838-3 (03/2005). Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-!!!PDF-E.pdf (accessed: 22.02.2019)
10. Recommendation ITU-R P.837-7 (06/2017). Characteristics of precipitation for propagation modelling. Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-7-201706-!!!PDF-E.pdf (accessed: 22.02.2019)
11. Boccardi F., Heath R. W., Lozano A., Marzetta T. L., Popovski P. Five Disruptive Technology Directions for 5G. *IEEE Communications Magazine*, 2014, vol. 52, iss. 2, pp. 74–80. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736746
12. Kibaroglu K., Sayginer M., Phelps T., Rebeiz G. M. A 64-Element 28-GHz Phased-Array Transceiver With 52-dBm EIRP and 8–12-Gb/s 5G Link at 300 Meters Without Any Calibration. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2018, vol. 66, iss. 12, pp. 5796–5811. doi: 10.1109/TMTT.2018.2854174
13. Churkin S., Mozharovskiy A., Artemenko A., Maslennikov R. Microstrip patch antenna arrays with fan-shaped 90 and 45-degree wide radiation patterns for 28 GHz MIMO applications. 12th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP). 9-13 April 2018. London, UK. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1049/cp.2018.1204
14. Ohtsuk M., Takahashi T., Konishi Y., Urasaki S., Harada K. A dual-polarized planar array antenna for Ku-band satellite communications. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest. Antennas: Gateways to the Global Network*. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting. 21–26 June 1998. Atlanta, USA. Piscataway, IEEE, 1998, pp. 16–19. doi: 10.1109/APS.1998.698732
15. Diawuo H. A., Jung Y.-B. Broadband Proximity-Coupled Microstrip Planar Antenna Array for 5G Cellular Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, vol. 17, iss. 7, pp. 1286–1290. doi: 10.1109/LAWP.2018.2842242
16. Hamberger G. F., Drexler A., Trummer S., Siart U., Eibert T. F. A planar dual-polarized microstrip 1D-beamforming antenna array for the 24GHz ISM-band. 10th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP). 10-15 April 2016. Davos, Switzerland. Piscataway, IEEE, 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481205
17. Zhang L., Li L., Yi H. Design of a Traveling Wave Slot Array on Substrate Integrated Waveguide for 24GHz Traffic Monitoring. *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*. 21–24 July 2018. Xuzhou, China. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 1–3. doi: 10.1109/CSQRWC.2018.8455559
18. Chang Y.-L., Jiao Y.-C., Zhang L., Chen G., Qiu X. A K-band series-fed microstrip array antenna with low side-lobe for anticollision radar application. *Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*. 16-19 Oct. 2017. Xi'an, China. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 1–3. doi: 10.1109/APCAP.2017.8420878
19. Sakakibara K., Shida K., Mouri Y., Kikuma N. Center-fed traveling-wave microstrip array antenna using elliptically-shaped radiating elements in quasi millimeter-wave band. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. 9-14 July 2017. San Diego, USA. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 2609–2610. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073347
20. Mozharovskiy A., Churkin S., Artemenko A., Maslennikov R. 28 GHz waveguide antennas with fan-shaped patterns for base stations MIMO applications. 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 9-13 April 2018. London, UK. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1049/cp.2018.0373
21. Duffie P. A. A Ka-band Dual-Pol Monopulse Shaped Reflector Antenna. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting*. 8-13 July 2018. Boston,

USA. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 1717–1718. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608180

22. Filipovic D. F., Gearhart S. S., Rebeiz G. M. Double-Slot Antennas on Extended Hemispherical and Elliptical Silicon Dielectric Lenses. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1993, vol. 41, no. 10, pp. 1738–1749. doi: 10.1109/22.247919

23. Artemenko A., Maltsev A., Mozharovskiy A., Sevast'yanov A., Ssorin V. Millimeter-Wave Electronically Steerable Integrated Lens Antennas for WLAN/WPAN Applications. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*. 2013, vol. 61, pp. 1665–1671. doi: 10.1109/TAP.2012.2232266

24. Mozharovskiy A., Artemenko A., Ssorin V., Maslennikov R., Sevast'yanov A. High gain millimeter-wave lens antennas with improved aperture efficiency. 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 13-17 April 2015, Lisbon, Portugal. Piscataway, IEEE, 2015, pp. 1–5.

25. Boriskin A. V., Sauleau R., Nosich A. I. Performance of Hemielliptic Dielectric Lens Antennas With Optimal Edge Illumination. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*. 2009, vol. 57, no. 7, pp. 2193–2198. doi: 10.1109/TAP.2009.2021979

26. Golub' V. D., Myskov A. S., Mozharovskii A. V., Artemenko A. A., Maslennikov R. O. *Razrabotka i optimizatsiya antennoi reshetki obluchatelei dlya skaniruyushchei linzovoi anteny chastotnogo diapazona 71–76 GGts* [Development and optimization of the antenna array of irradiators for a scanning lens antenna of the frequency range 71-76 GHz]. Conference Proc. Antennas and the Distribution of Radio Waves. St. Petersburg, 2018, pp. 112–116 (In Russ.)

27. Mozharovskii A. V., Artemenko A. A., Maltsev A. A., Maslennikov R. O., Sevast'yanov A. G., Ssorin V. N. An effective method for calculating the characteristics of integrated lens antennas based on geometrical and physical optical

approximations. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2015, vol. 58, no. 6, pp. 492–504. (In Russ.)

28. Lee H. Y., Jun D. S., Moon S. E., Kim E. K., Park J. H., Park K. H. Wideband aperture coupled stacked patch type microstrip to waveguide transition for V-band. *IEEE Proc. of Asia-Pacific Microwave Conf.* 12-15 Dec. 2006. Yokohama, Japan. Piscataway, IEEE, 2006, pp. 360–362. doi: 10.1109/APMC.2006.4429440

29. Artemenko A. A., Maslennikov R. O., Sevast'yanov A. G., Ssorin V. N. *Volnovodno-mikropoloskovyi perekhod v chastotnom diapazone 60 GGts* [Waveguide-microstrip junction in the 60 GHz frequency range]. 19th Intern. Crimean Conf. Microwave Engineering and Telecommunication Technologies, 2009, pp. 505–506. (In Russ.)

30. Artemenko A., Maltsev A., Maslennikov R., Sevast'yanov A., Ssorin V. Design of wideband waveguide to microstrip transition for 60 GHz frequency band. *Proc. of 41st European Microwave Conf. (EuMC)*. 10-13 Oct. 2011. Manchester, UK. Piscataway, IEEE, 2011, pp. 838–841. doi: 10.23919/EuMC.2011.6101966

31. Soykin O., Artemenko A., Ssorin V., Mozharovskiy A., Maslennikov R. Wideband Probe-Type Waveguide-to-Microstrip Transition for V-band Applications. *Proc. of 46th European Microwave Conf. (EuMC)*. 4-6 Oct. 2016. London, UK. Piscataway, IEEE, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/EuMC.2016.7824262

32. Felbecker R., Keusgen W., Peter M. Estimation of Permittivity and Loss Tangent of High Frequency Materials in the Millimeter Wave. *IEEE Intern. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS)*. 7-9 Nov. 2011. Tel Aviv, Israel. Piscataway, IEEE, 2011, pp. 1–8. doi: 10.1109/COMCAS.2011.6105829

33. Horn A. Dielectric constant and loss of selected grades of Rogers high frequency circuit substrates from 1-50 GHz. *Rogers Corporation Technical Report 5788*, 2003.

Andrey V. Mozharovskiy Engineer (2011) in Information Systems and Technologies (Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod). Doctoral candidate of the Department of micro radio electronics and radio technology of Saint Petersburg Electro-technical University "LETI". Senior microwave systems and antennas engineer in LLC "Radio Gigabit". The author of 27 scientific publications. Area of expertise: various millimeter wavelength range antenna and feeding systems, including printed, waveguide and lens antennas and antenna arrays; planar and waveguide duplexing devices and filters.

E-mail: andrey.mozharovskiy@radiogigabit.com

<https://orcid.org/0000-0002-9827-6720>
