

Экспериментальное исследование широкополосной антенной решетки К-диапазона с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика

А. М. Александрин[✉], Ю. П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

[✉] aalexandrin@sfu-kras.ru

Аннотация

Введение. В связи с освоением миллиметрового диапазона и развитием средств широкополосной связи имеется потребность в антенных системах, которые работали бы в широкой полосе частот (порядка октавной), имели высокую направленность и компактные размеры. Имеющиеся решения, как правило, не удовлетворяют данным требованиям.

Цель работы. Конструирование и экспериментальное исследование антенной решетки (АР) К-диапазона, обладающей высоким коэффициентом использования площади (КИП) и малыми продольными размерами.

Материалы и методы. Численные исследования проводились в САПР СВЧ (CST Studio Suite), экспериментальные исследования – на оборудовании для векторного анализа СВЧ-цепей (Agilent E8363B PNA). Характеристики направленности измерялись методом сканирования ближнего поля.

Результаты. Предложен вариант реализации широкополосной АР К-диапазона (18...26 ГГц). Период АР составляет 2.25 длины волны на верхней частоте диапазона. Для подавления дифракционных лепестков использован дополнительный слой, состоящий из линз из искусственного неоднородного диэлектрика, сформированный из тонких фигурных слоев листового полиэтилентерефталата. Предложена гибридная конфигурация диаграммообразующей схемы (ДОС), в которой одна часть схемы выполнена на основе печатных двухпроводных линий передачи, а другая – на прямоугольных волноводах. АР имеет КСВ ниже 2 и КИП выше 0.5, уровень боковых и дифракционных лепестков не превышает –12 в диапазоне 18...26 ГГц. Суммарная толщина всей системы составила 50 мм, что равно $4.3\lambda_{\min}$. Если из конструкции исключить волноводную часть, толщина может быть уменьшена до $2.5\lambda_{\min}$, что обеспечивает компактность АР при широкой полосе рабочих частот.

Заключение. По сравнению с имеющимися решениями антенна имеет более простую ДОС, за счет чего улучшается согласование с фидером. За счет применения линз из неоднородного диэлектрика обеспечивается высокий апертурный КИП в широкой полосе частот.

Ключевые слова: антенная решетка, широкополосная антенна, неоднородный диэлектрик, линзовая антенна

Для цитирования: Александрин А. М., Саломатов Ю. П. Экспериментальное исследование широкополосной антенной решетки К-диапазона с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 33–41. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-33-41

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.09.2019; принята к публикации после рецензирования 15.10.2019; опубликована онлайн 29.11.2019



Experimental Study of K-Band Broadband Antenna Array Using Artificial Inhomogeneous Dielectric Structures

Anton M. Aleksandrin[✉], Yury P. Salomatov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

[✉] aalexandrin@sfu-kras.ru

Abstract

Introduction. As a result of the extensive development of broadband communication in the millimetre wave band, there has arisen a need for antenna systems with a high level of directivity and compact dimensions, capable of operating across wide frequency ranges. However, at present, few engineering solutions satisfy this demand.

Aim. To develop and study experimentally a K-band antenna array (AR) characterized by a high aperture efficiency and compact longitudinal dimensions.

Materials and methods. Computer simulations were performed using the CST Studio Suite software. Measurements were carried out using an Agilent E8363B PNA vector circuit analyzer. Radiation patterns were obtained by the method of near-field scanning.

Results. A K-band broadband antenna array configuration operating over the 18...26 GHz range was proposed. It was found that the period of the array equals 2.25 wavelengths at the highest operating frequency. In order to suppress grating lobes, an additional layer consisting of artificial inhomogeneous dielectric lenses was used. The dielectric material consisted of thin curly layers of sheet polyethylene terephthalate. Additionally, a hybrid configuration of feeding network was proposed, in which one part of the network was developed by means of printed two-wire lines, while the other part was achieved by means of rectangular waveguides. The proposed antenna array demonstrates VSWR of less than 2 and an aperture efficiency above 0.5, side and diffractive lobe levels not exceed -12 in the 18...26 GHz range. The total thickness of the configuration equals 50 mm or $4.3\lambda_{\min}$. In order to ensure the compactness of the AR for wideband frequency applications, the thickness of the system can be reduced to $2.5\lambda_{\min}$ by excluding the waveguide part.

Conclusion. When compared with existing solutions, the proposed antenna has a simpler feed network, which yields better matching. High aperture efficiency is achieved in the wide frequency range by means of inhomogeneous dielectric lenses.

Key words: antenna array, broadband antenna, inhomogeneous dielectric, lens antenna

For citation: Aleksandrin A. M., Salomatov Yu. P. Experimental Study of K-Band Broadband Antenna Array Using Artificial Inhomogeneous Dielectric Structures. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 33–41. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-33-41

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

Submitted 16.09.2019; accepted 15.10.2019; published online 29.11.2019

Введение. В настоящее время с целью увеличения пропускной способности каналов передачи информации, развития широкополосных средств связи и радиолокации интенсивно осваивается миллиметровый диапазон длин волн [1–3]. Активно развиваются программы широкополосного спутникового доступа в Интернет в К-диапазоне [4]. Расширяется необходимость использования широкополосных средств радиомониторинга и радиоизмерений. Техническая и эксплуатационная эффективности указанных систем не в последнюю очередь определяются используемыми антеннами.

Широкое распространение перечисленных систем предъявляет определенные требования к их ан-

тенным системам, которые должны быть широкополосными, компактными, допускать легкий монтаж и развертывание, иметь низкую стоимость. Требования компактности, широкополосности и высокой направленности в известной мере противоречивы:

– широкополосные узконаправленные антенны на основе зеркал и линз имеют выносные элементы и, соответственно, значительные продольные размеры;

– компактные антенные решетки (АР), выполняемые по печатной технологии, работают, как правило, в узкой полосе частот и зачастую имеют очень сложную диаграммообразующую схему (ДОС), затрудняющую согласование в широкой полосе частот;

– некоторые типы широкополосных и компактных антенн (например, логопериодические), удовлетворяя описанным требованиям, не обеспечивают высокой направленности.

Для решения описанных проблем в настоящей статье предложена АР, содержащая фокусирующие линзы из искусственного неоднородного диэлектрика. С помощью линз достигается сужение диаграммы направленности (ДН) элемента АР за счет эффективного подавления дифракционных лепестков и таким образом обеспечивается работа в широкой полосе частот.

В [5] предложен способ реализации линз из неоднородного диэлектрика (ЛНД), определены предельные значения параметров дискретизации однородного диэлектрика, из которого изготавливается ЛНД, таких как толщина элементарного цилиндрического слоя и количество фигурных "лепестков", реализующих переменный закон изменения диэлектрической проницаемости [6]. В [7] рассмотрена конструкция АР с ЛНД, составленной из 16 элементов, расположенных гексагонально.

В настоящей статье рассмотрена АР из 64 элементов с ДОС гибридного типа на основе печатных двухпроводных линий и волноводов. Такая конфигурация используется с целью снижения потерь в печатных линиях передачи за счет замены их части волноводами, в которых затухание существенно меньше.

Разрабатываемая АР рассчитана на работу в К-диапазоне (18...26 ГГц).

Описание экспериментальных образцов. Диаграммообразующая схема. Чтобы избежать появления дифракционных лепестков при работе АР в широком диапазоне частот, ее период должен составлять 0.5 от длины волны на верхней границе диапазона λ_{\min} . При этом размеры широкополосных излучателей определяются длиной волны на нижней рабочей частоте λ_{\max} . При определенной ширине полосы неизбежно перекрывание излучателями друг друга. Известны широкополосные АР, в которых применяется именно такая конфигурация излучателей – АР на основе сильносвязанных вибраторов. В таких АР концы вибраторов заходят друг на друга, образуя встречно-штыревую структуру [8]. Существуют различные вариации таких АР с различными способами "упаковки" излучателей на плоскости, например переплетенные спирали [9].

Помимо сильносвязанных вибраторов существуют также АР на основе длинных щелей [10–12].

Недостатки этих способов следующие:

– невозможно разместить ДОС на общей подложке с излучающими элементами. Это ведет к необходимости предусматривать элементы перехода между линиями передач различных типов, что, в свою очередь, затрудняет согласование;

– плотность расположения излучателей очень велика, так как период структуры должен быть меньше $0.5\lambda_{\min}$. Это приводит к сложностям в проектировании ДОС для такой решетки и к ухудшению согласования.

Другой способ расширения рабочей полосы АР состоит в увеличении ее периода за счет уменьшения числа элементов и упрощения таким образом ДОС. Для подавления дифракционных лепестков в данном случае необходимо применять фокусирующие элементы, сужающие ДН каждого излучателя. В качестве таких элементов возможно применение линз из неоднородного диэлектрика [13–15].

В рассматриваемой конструкции АР излучателями служат печатные широкополосные вибраторы-"бабочки", вытравленные на подложке из материала Rogers RT5880 с тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0.0009$, что соответствует потерям порядка 4 дБ/м на частоте 26 ГГц (рис. 1).

Плечи вибраторов располагаются на разных сторонах подложки, а питание осуществляется печатной двухпроводной линией (ДПЛ), подводимой к центру вибратора. Элементы расположены гексагонально, ДОС имеет двоично-этажную конфигурацию. Период АР составляет 3.25λ на верхней частоте 26 ГГц.

Первые две ступени делителя выполнены на основе волноводной линии стандарта WR42, имеющей размеры 10.67×4.32 мм и коэффициент затухания порядка 0.4 дБ/м. Волновод образован

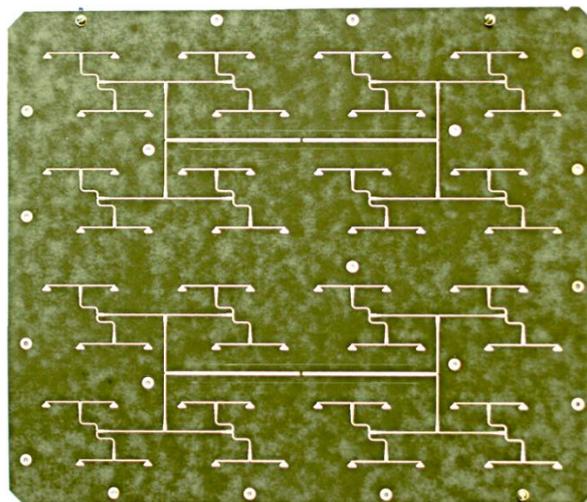


Рис. 1. Топология печатной платы АР

Fig. 1. Feeding network circuit

двумя алюминиевыми деталями. Первая деталь образует одну из широких стенок волновода, а также выполняет функции отражающего экрана для элементов АР и несущего элемента для крепления линз (рис. 2, 1), вторая деталь в виде прямоугольной канавки в толстой пластине образует канавки в оставшиеся три стенки волновода (рис. 2, 2 и рис. 3). Для сопряжения печатной линии и волновода применяется специальный плавный переход.

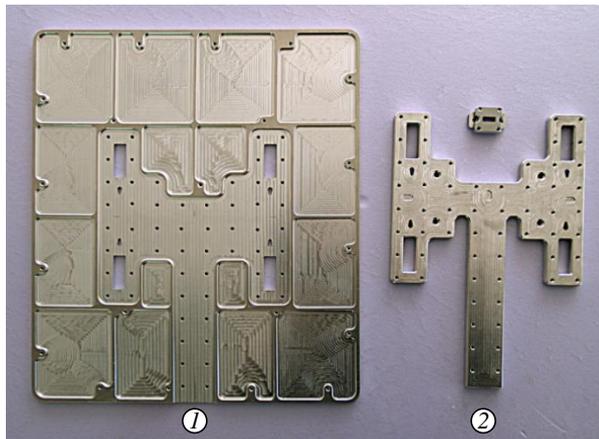


Рис. 2. Волноводный делитель на четыре направления (без переходов на двухпроводную линию)

Fig. 2. Waveguide divider (without transitions to two-wire line)

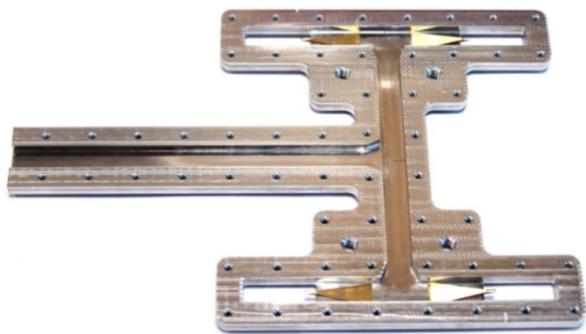


Рис. 3. Нижняя часть волноводного делителя (вид изнутри); линии оканчиваются переходами на двухпроводную линию

Fig. 3. Bottom part of the waveguide divider (inside view). Lines end with transitions to two-wire line

Волноводно-двухпроводной переход. На рис. 4 представлен изометрический вид перехода с прямоугольного волновода на печатную двухпроводную линию. Волноводно-двухпроводной переход представляет собой плавный линейный переход волновода в Н-образный волновод с последующим плавным переходом на печатную линию. Диэлектрическая подложка печатной линии заходит в пространство между гребнями Н-образного волновода и заканчивается треугольным сужением диэлектрика. Проводники линии заканчиваются в месте перехода их в гребни волновода.

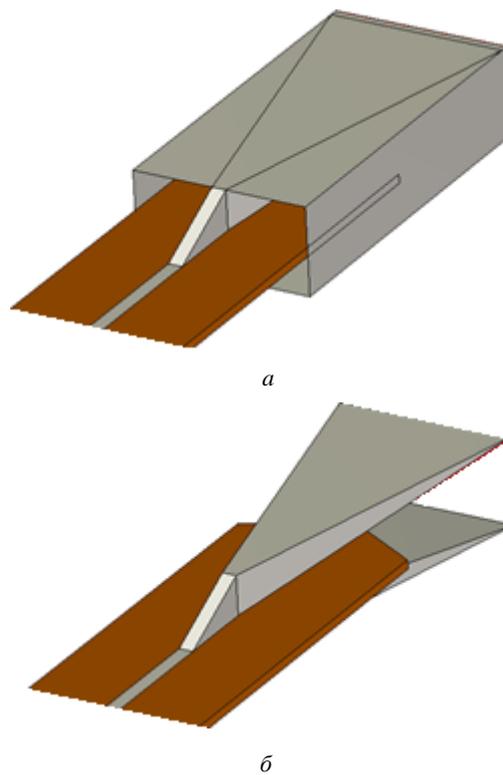


Рис. 4. Изометрический вид перехода от волновода к двухпроводной симметричной планарной линии передачи: а – полностью; б – без стенок волновода

Fig. 4. Isometric view from the waveguide to transition two-wire symmetrical line: а – completely; б – without the walls of the waveguide

В экспериментальном исследовании измерялся коэффициент отражения (КО) системы из двух идентичных переходов, соединенных отрезком ДПЛ длиной 140 мм (рис. 5).

Описанная система имеет два волноводных порта. В ней происходят отражения как от входного, так и от выходного портов. Чтобы устранить влияние отражений от выходного порта, применяется фильтрация частотной характеристики S_{11} во временной области. Данная возможность предоставляется прибором Agilent E8363B PNA.

На рис. 6, 7 показан возможный способ подключения печатной ДПЛ к волноводу при помощи данного перехода. В рассматриваемом случае используется гибкая подложка, в которой вырезается "язычок", заходящий между двумя гребнями Н-образного волновода.



Рис. 5. Экспериментальная цепь из двух переходов, соединенных отрезком ДПЛ

Fig. 5. Experimental circuit from two transitions connected with a fragment of the two-wire line

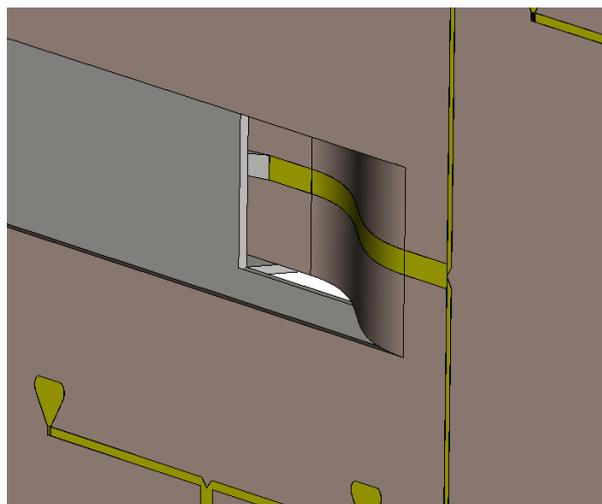


Рис. 6. Переход от волновода к двухпроводной линии (вид спереди)

Fig. 6. Front view of the transition from the waveguide to two-wire line

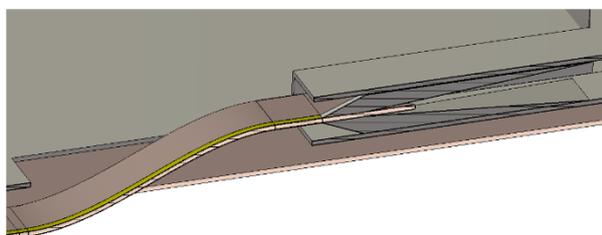


Рис. 7. Внутреннее устройство перехода, сечение через E -плоскость волновода

Fig. 7. Inside construction of the transition, cross-section through E -plane of the waveguide

Экспериментальный макет АР. Полный макет АР (рис. 8) состоит из 64 излучателей, расположенных в узлах гексагональной сетки.

В качестве верхней стенки прямоугольного волновода выступает нижняя часть металлической пластины, играющей также роль экрана (рис. 2).

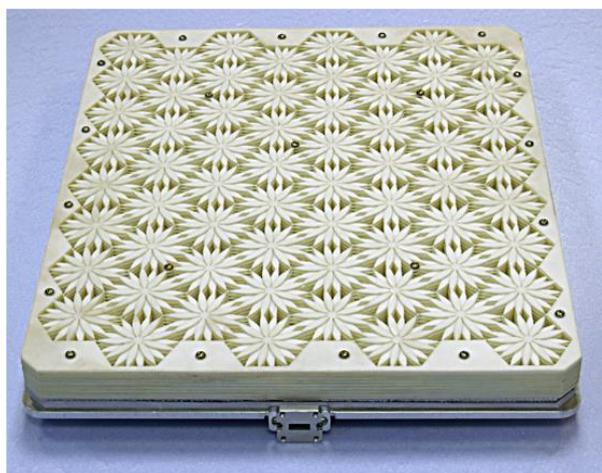


Рис. 8. Экспериментальный макет АР (вид сверху)

Fig. 8. Experimental model of the antenna array (top view)

Остальные три стенки образованы прямоугольными канавками в ответной части волноводного делителя.

Фокусирующий слой набран из 22 слоев листового полиэтилентерефталата толщиной 1 мм, из которого лазерной резкой вырезаны лепестки для создания линз.

Между экраном, платой ДОС и слоем линз введены зазоры в 5.2 и 2 мм соответственно, которые обеспечиваются прослойками пенополистирола, а также пластиковыми шайбами соответствующей толщины. Все слои конструкции скрепляются винтами по периметру и в 5 центральных точках.

Габариты макета АР составляют $330 \times 290 \times 50$ мм, таким образом, продольный размер антенны равен $4.3\lambda_{\min}$.

Методы исследования. Излучающие структуры численно моделировались при помощи пакета CST Studio Suite. Характеристики экспериментального образца волноводно-двухпроводного перехода измерялись векторным анализатором цепей Agilent E8363B PNA, позволяющим измерять S -параметры четырехполосников в полосе частот 0.01...40 ГГц. Указанный прибор обеспечивает также фильтрацию получаемых характеристик во временной области, что позволяет при необходимости исключить из них влияние отражений от определенных элементов измеряемой цепи. Для измерения характеристик направленности использовался разработанный на кафедре радиотехники Сибирского федерального университета аппаратно-программный комплекс для измерения характеристик антенн в ближней зоне, состоящий из безэховой камеры, четырехкоординатного плоского сканера и программного обеспечения для обработки измерений. ДН и коэффициент направленного действия (КНД) вычислялись по амплитудно-фазовому распределению в раскрыве антенны. Коэффициент усиления (КУ) измерялся методом эталонной антенны.

Результаты исследований. Волноводно-двухпроводной переход. На рис. 9 представлены частотные характеристики модуля КО для нескольких длин перехода (L_{Π}).

В соответствии с данными расчетов длина экспериментального перехода выбрана равной 26 мм, что соответствует его работе в диапазоне 18...26 ГГц.

На рис. 10 представлена частотная зависимость $S_{11\Pi}$, полученная при помощи исключения отражений от второго порта фильтрацией во временной области. Расчетная кривая соответствует длине перехода 26 мм.

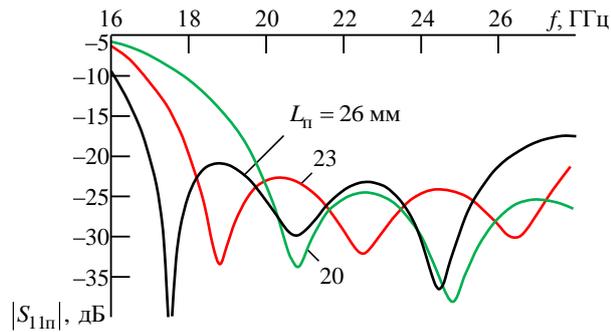


Рис. 9. Расчетные частотные зависимости модуля КО волноводно-двухпроводного перехода

Fig. 9. Simulated frequency dependences of the reflection coefficient modulus of the waveguide two-wire transition

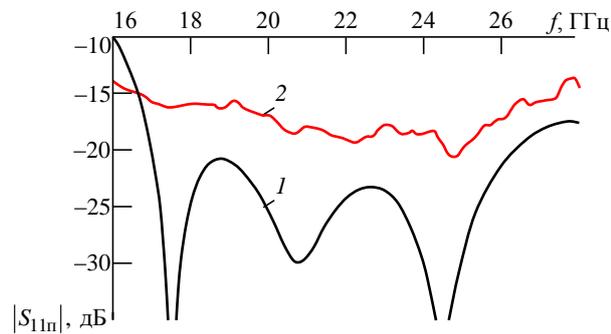


Рис. 10. КО волноводно-двухпроводного перехода: 1 – расчет для $L_n = 26$ мм; 2 – эксперимент

Fig. 10. Reflection coefficient of the transition from waveguide to two-wire line: 1 – calculation for $L_n = 26$ mm; 2 – experiment

Экспериментальный макет АР. В ходе экспериментальных исследований макета АР измерялись КО (рис. 11), ДН на верхней частоте рабочего диапазона в сечениях $\varphi = 0, 30, 60$ и 90° (рис. 12), уровни боковых лепестков (УБЛ) в этих сечениях ДН; частотные зависимости КНД и КУ.

На рис. 13 представлены графики уровня боковых лепестков в различных характерных сечениях трехмерной характеристики направленности АР. Под УБЛ здесь понимается наибольший уровень любого из всех боковых лепестков антенны. В плоскостях E ($\varphi = 90^\circ$) и H ($\varphi = 0$) таковым являлся первый боковой лепесток, уровень которого составлял примерно -12 дБ во всей полосе частот.

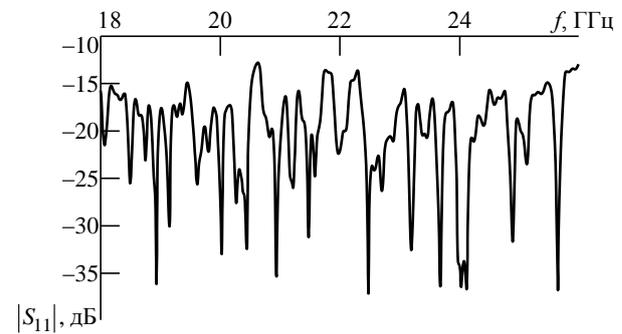


Рис. 11. КО от входа АР

Fig. 11. Reflection coefficient from the antenna input

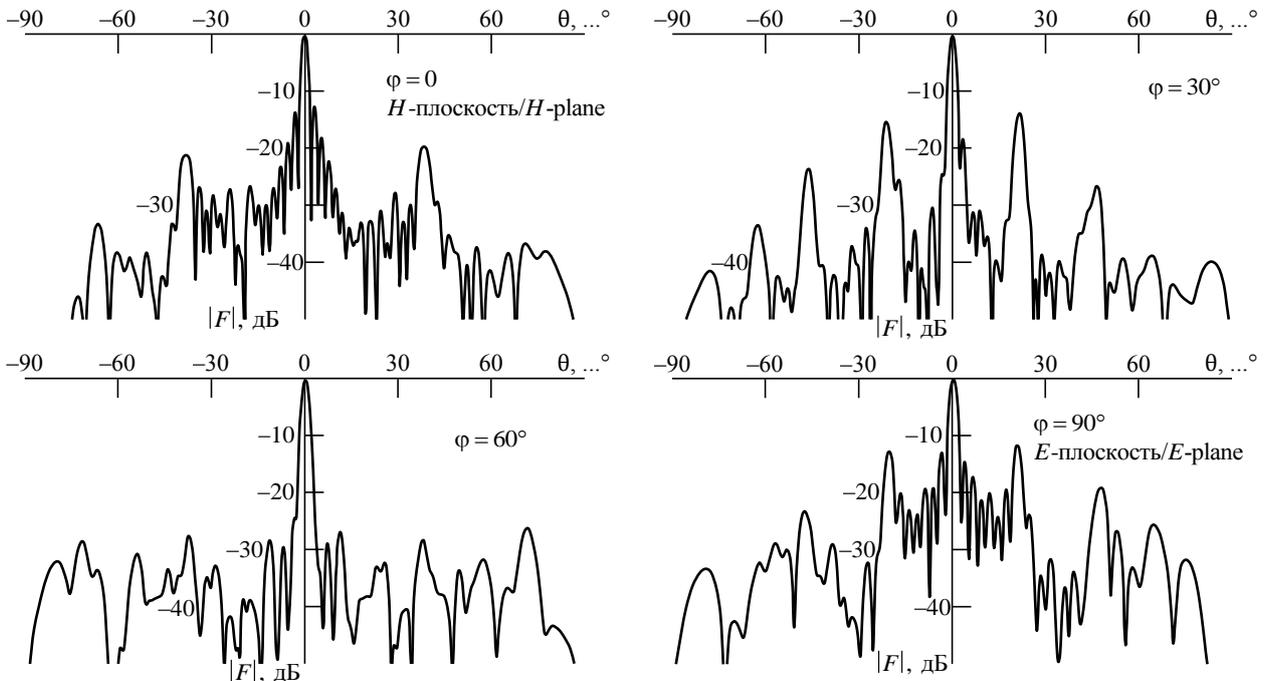


Рис. 12. ДН АР на частоте 26 ГГц

Fig. 12. Array radiation pattern at the frequency 26 GHz

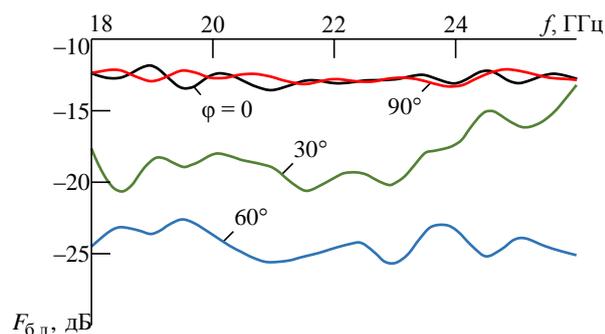


Рис. 13. Уровень максимального бокового лепестка ДН АР
 Fig. 13. The level of the maximum side lobe of the antenna radiation pattern

На рис. 14 представлены экспериментальные частотные зависимости КНД (D_3) и КУ (G_3) антенны, а также для сравнения приведен график КНД синфазной равномерно возбуждаемой идеальной апертуры ($D_{ид}$), равной исследуемой антенной площадью.

Обсуждение. Волноводно-двухпроводной переход. Наиболее важным габаритным параметром перехода является его длина ($L_{п}$). Численные исследования показывают, что этот параметр определяет нижнюю рабочую частоту перехода. Коэффициент перекрытия рабочей полосы перехода по уровню -20 дБ составляет примерно 1.5. Как видно из рис. 10, коэффициент передачи экспериментального волноводно-двухпроводного перехода в рабочей полосе частот не превышает -15 дБ, но это существенно выше расчетных данных. Такое расхождение может быть обусловлено неточностью позиционирования проводников печатной линии относительно гребней волновода и недостаточно точным подбором ширины двухпроводной линии, из-за чего возникает рассогласование.

Макет АР. Поскольку коэффициент использования площади (КИП) одиночного излучателя меньше 1, дифракционные лепестки в АР подавляются не полностью. Однако в полосе частот 18...26 ГГц их уровень не превышает уровня первого бокового лепестка, составляющего -12 дБ. Из данных эксперимента следует, что период решетки, равный $3.25\lambda_{min}$, является слишком большим по критерию уровня дифракционных лепестков: на верхней частоте их уровень достигает -12 дБ. Уровень дифракционных лепестков можно несколько снизить, если уменьшить период решетки.

КИП антенны (e_a) в рабочей полосе частот выше 0.5 (рис. 15). КПД (η) у экспериментального образца равен примерно 0.5, а на верхней границе

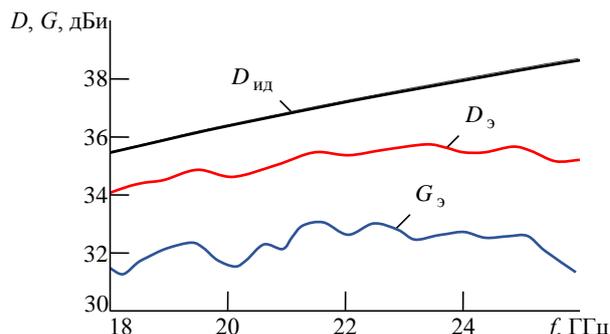


Рис. 14. Экспериментальные зависимости КНД и КУ антенны, КНД идеальной апертуры

Fig. 14. Experimental dependencies of the directivity (D_3) and gain (G_3) of the antenna, the directivity of an ideal aperture ($D_{ид}$)

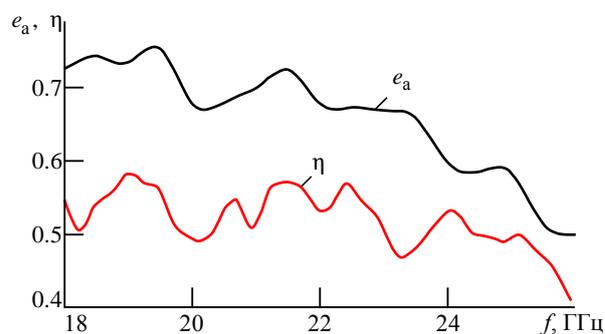


Рис. 15. Апертурный КИП и КПД антенны

Fig. 15. Aperture efficiency (e_a) and energy efficiency of the antenna (η)

диапазона падает до 0.25. КИП может быть повышен путем уменьшения периода решетки, а для повышения КПД требуется использование материалов с более низкими потерями.

Закключение. Рассмотренная в статье АР позволяет перекрыть стандартный IEEE-диапазон 18...26 ГГц, при этом КИП в полосе частот превышает 0.5, а уровень боковых и дифракционных лепестков не превосходит -12 дБ. Применение гибридной ДОС на основе печатной двухпроводной и волноводной линий позволяет сократить потери в печатной линии передач. Общий КПД экспериментального макета оказался относительно низким, что может быть исправлено применением диэлектрика с более низкими потерями для изготовления линз (например, полистирола).

Суммарная толщина всей системы составила 50 мм, что равно $4.3\lambda_{min}$. Если из конструкции исключить волноводную часть, толщина может быть уменьшена до $2.5\lambda_{min}$, что обеспечивает компактность АР при широкой полосе рабочих частот.

Список литературы

1. Pi Z., Khan F. An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems // IEEE Communications Magazine. 2011. Vol. 49, iss. 6. P. 101–107. doi: 10.1109/MCOM.2011.5783993
2. Moving Towards Mmwave-Based Beyond-4G (B-4G) Technology / M. Cudak, A. Ghosh, T. Kovarik, R. Ratasuk, T. A. Thomas, F. W. Vook, P. Moorut // 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conf. Dresden, Germany, 2–5 June 2013. Piscataway: IEEE, 2013. P. 1–5. doi: 10.1109/VTCSpring.2013.6692638
3. A Survey on Access Technologies for Broadband Optical and Wireless Networks / R. Q. Shaddadab, A. B. Mohammada, S. A. Al-Gailaniac, A. M. Al-hetarb, M. A. Elmagzouba // J. of Network and Computer Applications. 2014. Vol. 41. P. 459–472. doi: 10.1016/j.jnca.2014.01.004
4. Distributed Earth Satellite Systems: What is Needed to Move Forward? / D. Selva, A. Golkar, O. Korobova, I. Lluchi Cruz, P. Collopy, O. L. de Weck // J. of Aerospace Information Systems. 2017. Vol. 14, № 8. P. 412–438. doi: 10.2514/1.1010497
5. Alexandrin A. M. Implementation of a Radially Inhomogeneous Medium and Construction of the Aperture Antennas on its Basis // 2013 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2013). Krasnoyarsk, Russia, 12–13 Sept. 2013. Piscataway: IEEE, 2013. doi: 10.1109/SIBCON.2013.6693593
6. Alexandrin A. M., Ryazantsev R. O., Salomatov Yu. P. Numerical Optimization of the Discrete Mikaelian Lens // 2016 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2016). Moscow, Russia, 12–14 May 2016. Piscataway: IEEE, 2016. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491859
7. Александрин А. М., Саломатов Ю. П. Широкополосная антенная решетка с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика // Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2 (26). С. 7–10.
8. Munk B. A. Finite Antenna Arrays and FSS. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2003. 392 p.
9. Gross F. B. Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering. New York: McGraw-Hill, 2011. 526 p.
10. Volakis J. L. Antenna Engineering Handbook. New York: McGraw-Hill, 2007. 1754 p. doi: 10.1002/9780471730071.ch1
11. Lee J. J., Livingston S., Nagata D. A Low Profile 10:1 (200–2000 MHz) Wide Band Long Slot Array // 2008 IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. San Diego, CA, USA, 5–11 July 2008. Piscataway: IEEE, 2008. Vol. 1. P. 61–64. doi: 10.1109/APS.2008.4619302
12. Design of a Cylindrical Long-Slot Array Antenna Integrated with Hybrid EBG/Ferrite Ground Plane / H. S. Youn, Y. L. Lee, N. Celik, M. F. Iskander // IEEE Antennas Wireless Propagation Lett. 2012. Vol. 11. P. 180–183. doi: 10.1109/LAWP.2012.2186782
13. Lenses Designed by Transformation Electromagnetics and Fabricated by 3D Dielectric Printing / J. Yi, A. de Lustrac, G.-P. Piau, S. N. Burokur // 2016 IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. (APSURSI 2016). Fajardo, Puerto Rico, 26 June–1 July 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1385–1386. doi: 10.1109/APS.2016.7696399
14. Котляр В. В., Мелехин А. С. Преобразование Абеля в задачах синтеза градиентных оптических элементов // Компьютерная оптика. 2002. № 3. С. 29–36.
15. Триандафилов Я. Р., Котляр В. В. Фотонно-кристаллическая линза Микаэляна // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31, № 3. С. 27–31.

Информация об авторах

Александрин Антон Михайлович – магистр по направлению "Радиотехника" (2009), аспирант, старший преподаватель кафедры "Радиотехника" Сибирского федерального университета. Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; широкополосные антенны и антенные решетки. Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Россия
E-mail: aalexandrin@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8428-5562>

Саломатов Юрий Петрович – кандидат технических наук (1982), профессор (2013) кафедры "Радиотехника" Сибирского федерального университета. Автор 240 научных работ. Сфера научных интересов – ФАР; ЦФАР; квазиоптические антенны и антенные решетки. Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Россия
E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>

References

1. Pi Z., Khan F. An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems. IEEE Communications Magazine. 2011, vol. 49, iss. 6, pp. 101–107. doi: 10.1109/MCOM.2011.5783993
2. Cudak M., Ghosh A., Kovarik T., Ratasuk R., Thomas T. A., Vook F. W., Moorut P. Moving Towards Mmwave-Based Beyond-4G (B-4G) Technology. 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conf. Dresden, Germany, 2–5 June 2013. Piscataway, IEEE, 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCSpring.2013.6692638
3. Shaddadab R. Q., Mohammada A. B., Al-Gailaniac S. A., Al-hetarb A. M., Elmagzouba M. A. A Survey on

Access Technologies for Broadband Optical and Wireless Networks. J. of Network and Computer Applications. 2014, vol. 41, pp. 459–472. doi: 10.1016/j.jnca.2014.01.004

4. Selva D., Golkar A., Korobova O., Lluch i Cruz I., Collopy P., de Weck O. L. Distributed Earth Satellite Systems: What is Needed to Move Forward? J. of Aerospace Information Systems. 2017, vol. 14, no. 8, pp. 412–438. doi: 10.2514/1.I010497

5. Alexandrin A. M. Implementation of a Radially Inhomogeneous Medium and Construction of the Aperture Antennas on its Basis. 2013 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2013). Krasnoyarsk, Russia, 12–13 Sept. 2013. Piscataway, IEEE, 2013. doi: 10.1109/SIBCON.2013.6693593

6. Alexandrin A. M., Ryazantsev R. O., Salomatov Y. P. Numerical Optimization of the Discrete Mikaelian Lens. 2016 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2016). Moscow, Russia, 12–14 May 2016. Piscataway, IEEE, 2016. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491859

7. Aleksandrin A. M., Salomatov Yu. P. Wideband Antenna Array with the Use of Artificial Inhomogeneous Dielectric Structures. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Proc. of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics]. 2012, no. 2 (26), pp. 7–10. (In Russ.)

8. Munk B. A. Finite Antenna Arrays and FSS. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2003, 392 p.

9. Gross F. B. Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering. New York, McGraw-Hill, 2011, 526 p.

10. Volakis J. L. Antenna Engineering Handbook. New York, McGraw-Hill, 2007, 1754 p. doi: 10.1002/9780471730071.ch1

11. Lee J. J., Livingston S., Nagata D. A Low Profile 10:1 (200–2000 MHz) Wide Band Long Slot Array. 2008 IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. San Diego, CA, USA, 5–11 July 2008. Piscataway, IEEE, 2008, vol. 1, pp. 61–64. doi: 10.1109/APS.2008.4619302

12. Youn H. S., Lee Y. L., Celik N., Iskander M. F. Design of a Cylindrical Long-Slot Array Antenna Integrated with Hybrid EBG/Ferrite Ground Plane. IEEE Antennas Wireless Propagation Lett. 2012, vol. 11, pp. 180–183. doi: 10.1109/LAWP.2012.2186782

13. Yi J., de Lustrac A., Piau G.-P., Burokur S. N. Lenses Designed by Transformation Electromagnetics and Fabricated by 3D Dielectric Printing. 2016 IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. (APSURSI 2016). Fajardo, Puerto Rico, 26 June–1 July 2016. Piscataway, IEEE, 2016, pp. 1385–1386. doi: 10.1109/APS.2016.7696399

14. Kotljarskiy V. V., Meljohin A. S. Abel Transform in Synthesis of Gradient Optical Elements. Computer Optics. 2002, no. 3, pp. 29–36. (In Russ.)

15. Triandafilov Ya. R., Kotlyar V. V. Photonic Crystal Mikaelian Lens. Computer Optics. 2007, vol. 31, no. 3, pp. 27–31. (In Russ.)

Information about the authors

Anton M. Aleksandrin, Master's degree in Radio Engineering (2009), postgraduate, senior lecturer of Radio Engineering Department of the Siberian Federal University (SFU). The author of 20 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; wideband antennas and antenna arrays.

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

E-mail: aalexandrin@sfu-kras.ru

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

Yury P. Salomatov, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Professor (2013) of Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. The author of 240 scientific publications. Area of expertise: phased arrays; digital phased arrays; quasi-optical antennas and antenna arrays.

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

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>