

ПЛОСКАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ЖЕЛОБКОВОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Ю.Е. Седельников¹, Мохамед Н. Шаабан²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

²Кафедра электротехники, инженерный факультет, Университет Аль-Азхар
Египет, 83513, Кена

Аннотация. В работе показана возможность модификации плоской антенной решетки, выполненной на основе диэлектрического желобкового волновода. Рассмотрены как варианты однолучевая поперечно излучающая антенна и многолучевая, формирующая веер лучей в поперечной плоскости. Однолучевая антенна состоит из линейных антенн в виде желобкового волновода с периодической системой металлических нерегулярностей и рупорного распределительного устройства. Многолучевая антенна содержит распределительное устройство в виде системы облучателей и бифокальной волноводной линзы. В отличие от традиционного выполнения нерегулярности в диэлектрических волноводах выполнены смещенными в направлении распространения волны. Работоспособность рассмотренных антенн подтверждена проведенным электродинамическим моделированием. Показано, что по основным электрическим характеристикам они не уступают выполненным традиционным способом. Достоинством является упрощение конструкции антенн.

Ключевые слова: плоская антенна, антенная решетка, желобковый волновод, многолучевая антенна, нерегулярности в волноводе, распределительное устройство, рупорная антенна, бифокальная линза.

Введение

Антенны на основе диэлектрических волноводных структур рассматриваются как альтернатива волноводно-щелевым антеннам (ВЩА) для использования в аппаратуре КВЧ и, тем более, ГВЧ диапазонов. Сохраняя основное достоинство - плоскую конструкцию с малыми электрическими размерами в поперечном направлении, антенны на основе диэлектрических волноводов обладают рядом серьезных преимуществ по сравнению с ВЩА. Прежде всего это значительно меньшая критичность основных параметров антенны к погрешностям изготовления и, следовательно, стоимость. Во-вторых, это меньший уровень тепловых потерь в антенне.

Первые работы в этом направлении, основанные на концепции «вытекающих» волн, относятся ко второй половине прошлого века [1]. К настоящему времени выполнено большое число работ, посвященных антеннам этого класса. Наиболее исследованы различные аспекты анализа и проектирования линейных антенн на основе диэлектрических волноводов, например [2-6]. Обзор наиболее известных работ содержится в [7]. Эти антенны представляют собой диэлектрический волновод с периодической системой нерегулярностей, чаще всего в виде идентичных металлических полосок, расположенных на его поверхности. Такие антенны обладают характеристиками, типичными для антенн с последовательным типом возбуждения. В ряде работ [3,5] показана возможность дальнейшего улучшения электрических показателей путем применения квазипериодической системы неидентичных нерегулярностей. К настоящему времени вопросы построения линейных антенн на основе

диэлектрических можно считать детально проработанными. Эти антенны могут формировать излучение с узкой диаграммой направленности в плоскости антенны и относительно широкой в поперечном направлении.

Для формирования излучения с узкой диаграммой направленности в обеих плоскостях предложено использовать двумерные диэлектрические волноводные структуры с периодической системой металлических нерегулярностей в двумерном плоском или радиальном волноводе [8-11,18,19]. Ими реализуются, как правило, однолучевые антенны поперечного излучения. Для реализации многолучевых антенн предложено формировать плоскую антенну из линейных антенных решеток, выполненных на желобковых диэлектрических волноводах в [14,15,17-20]. Возбуждение решетки линейных антенн осуществляется квазиоптическим распределительным устройством рупорного, зеркального или линзового типа. Возможности совершенствования плоских антенн, выполненных в виде системы линейных антенн типа «вытекающей» волны, к настоящему времени не исчерпаны. Рассмотрение нового варианта реализации плоской антенны, состоящей из линейных антенн на основе диэлектрического зеркального волновода, является целью настоящей работы

Материалы и методы

Двумерные антенные решетки

Двумерная антенная решетка образована системой линейных решеток и распределительным устройством, имеющим в общем случае несколько входов, каждому из которых соответствуют лучи различной ориентации в плоскости, перпендикулярной линейным решеткам, рис.1.

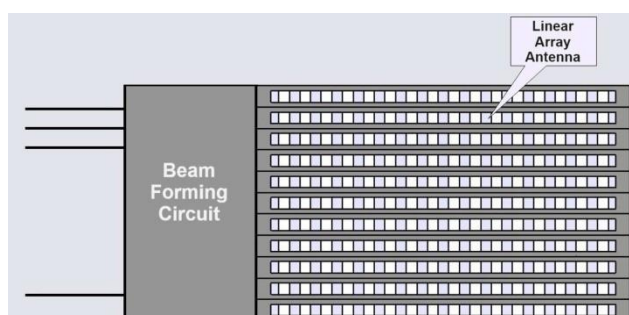


Рис. 1. Плоская двумерная антенная решетка

Могут использоваться распределительные устройства различных типов, как фидерные и квазиоптические. Их назначение состоит в возбуждении линейных решеток с требуемым линейным фазовым распределением соответственно заданной ориентации луча антенны в поперечной плоскости. В однолучевых антеннах КВЧ диапазона обычно используются устройства рупорно-линзового типа, реже в виде рупорно-зеркальной системы типа «пилбокс» [14-19].

Модифицированные антенны

Недостатком распределительных устройств однолучевых антенн рупорного типа (рис. 2) являются значительные габаритные размеры. Электрическая длина рупора R_{horn}/λ должна быть не меньше квадрата электрического размера апертуры ан-

тенны: $R_{horn}/\lambda \geq (L_{array}/\lambda)^2$. Введение линзы позволяет уменьшить длину рупора до величины порядка L_{array}/λ . С целью упрощения конструкции антенны в [14] предложен способ построения, позволяющий исключить радиолинзу в распределительном устройстве рупорного типа. Согласно [14] антенна состоит из N диэлектрических волноводов с периодической системой нерегулярностей и возбуждающего их Н-секториального рупора.

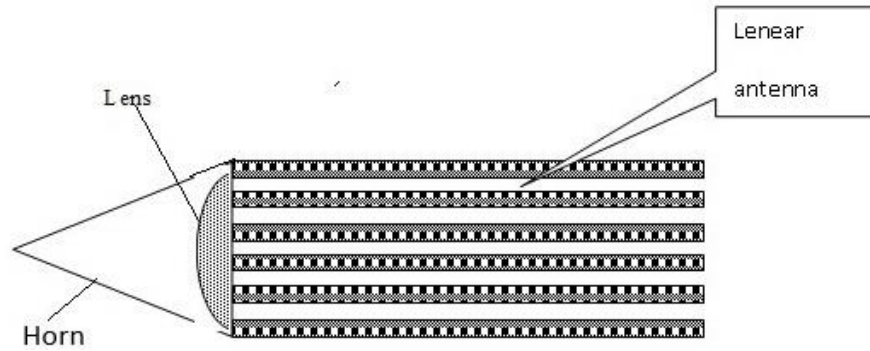


Рис. 2. Антенна с рупорно-линзовым распределительным устройством

Система нерегулярностей в каждом из волноводов выполнена смещенной относительно осевой линии (рис. 3) таким образом, чтобы обеспечивалось синфазное излучение элементов решетки

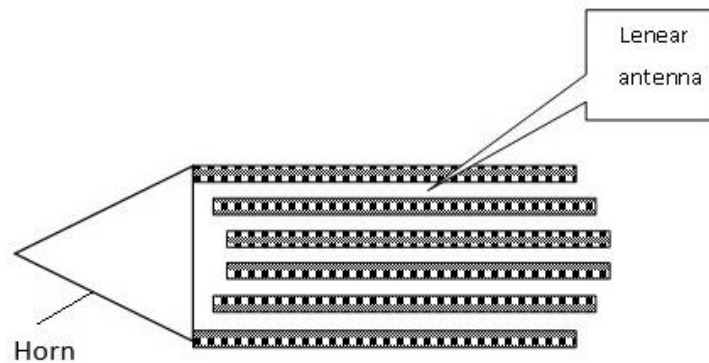


Рис. 3. Антенна со смещенными нерегулярностями

$$\beta_{horn}\sqrt{R_{horn}^2 + x^2} + \beta_{waveguide}y(x) = \beta_{horn}\sqrt{R_{horn}^2 + \left(\frac{L_{ant}}{2}\right)^2} \quad (1)$$

При указанном выполнении антенного полотна со смещенными нерегулярностями обеспечивается излучение, ориентированное в поперечной плоскости по нормали к антенне.

Многолучевые антенны

В многолучевых антеннах – формирование отдельных лучей диаграмм направленности реализуется а основе использования в качестве распределительного устройства линз

или зеркал специального профиля [17-20]. Число лучей равно числу облучателей. Один из наиболее успешных вариантов показан на рис. 4.

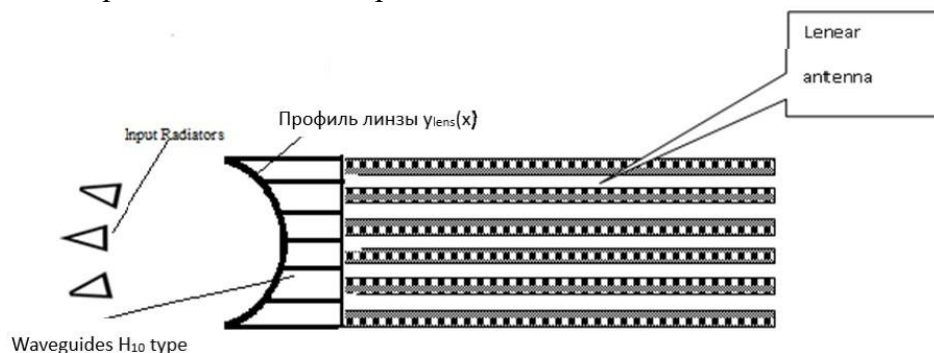


Рис.4. Трехлучевая антенна

В распределительном устройстве использована линза с вынужденным распространением, выполненная на основе прямоугольных волноводов с волной H_{10} . Профиль бифокальной линзы $y_{lens}(x)$ – эллипс. Конструкция линзы должна обеспечивать равенство электрических длин путей

$$\beta_{lens}(x)y_{lens}(x) = const(x) . \quad (2)$$

Возбуждение многолучевой диаграммы направленности осуществляют входные облучатели.

При реализации многолучевой антенны данного типа определенные трудности представляет выполнение условия (2). Для этого приходится либо использовать в составе линзы ϵ -волноводы с частичным диэлектрическим заполнением, либо имеющими различные размеры поперечного сечения. Использование принципа смещенных нерегулярностей в линейных антеннах позволяет упростить реализацию антенны. Для этого волноводная линза и система излучателей выполняются аналогичными описанной выше антенне, а условие равенства электрических длин (2) обеспечивается путем смещения систем нерегулярностей аналогично варианту построения однолучевой антенны, рис. 5.

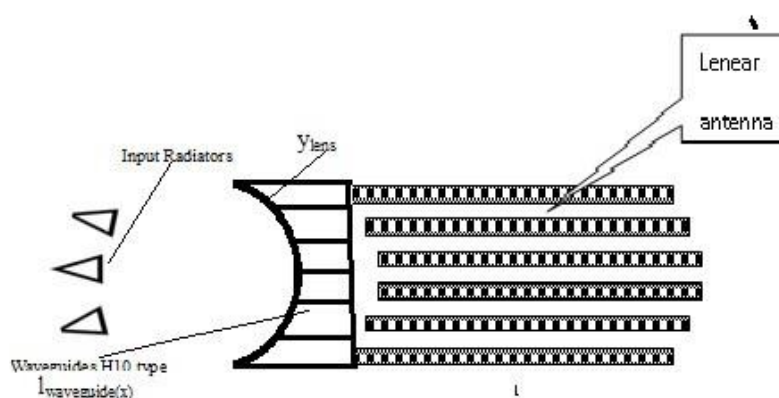


Рис. 5. Модифицированная трехлучевая антенна

Условие равенства электрических длин выполняется, если профиль $y(x)$ отвечает условию:

$$\beta_{lens}y_{lens}(x) = \beta_{waveguide}y(x) . \quad (3)$$

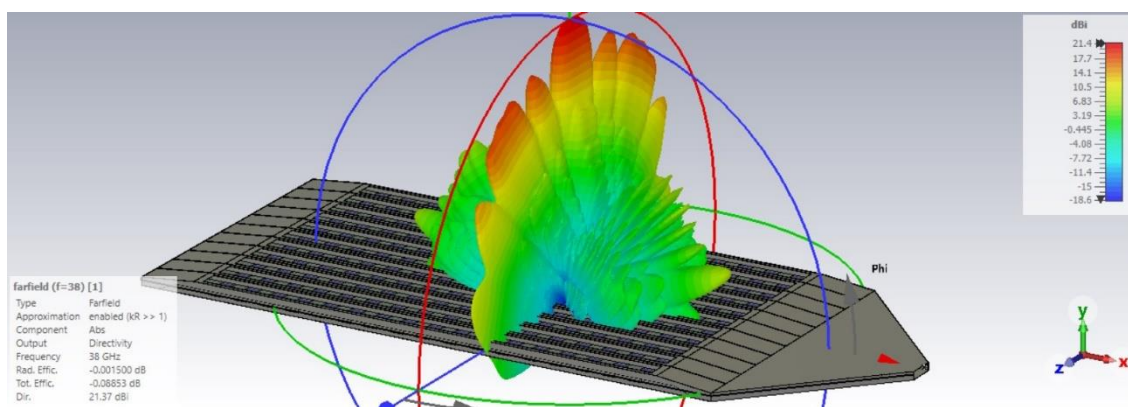
В этом случае может быть реализована антенна с многолучевой диаграммой направленности в достаточно широком секторе углов.

Экспериментальные исследования

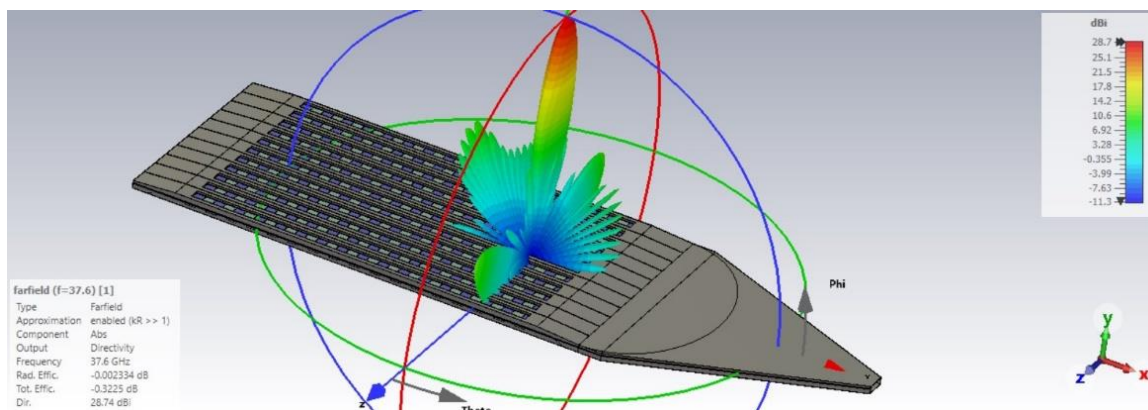
В качестве иллюстрации приводятся результаты расчетов для нескольких вариантов построения антенн, выполненных на основе диэлектрического зеркального волновода. Эксперимент осуществлялся путем численного моделирования излучения рассматриваемых антенн. Расчеты выполнены с использования аппарата электродинамического моделирования, реализующего метод конечных элементов.

Иллюстрирующие расчеты проведены для плоской антенны, состоящей из 11 линейных антенн, выполненных на желобковом диэлектрическом волноводе. Каждая из линейных антенн содержит 16 металлических нерегулярностей в виде прямоугольных металлических полосок. Размеры волновода - 7.2 x 3.4 мм., ширина полосок 3 мм. Распределительное устройство - Н-секториальный рупор длиной 60 мм и высотой 3.4 мм. Частота - 37.5 ГГц.

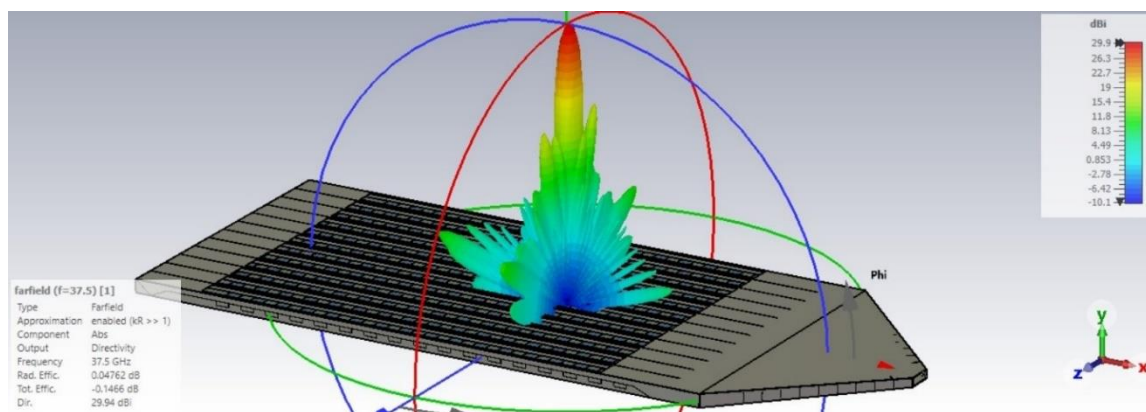
Рассматривается три варианта: без фазокорректирующей линзы, с диэлектрической линзой (фторопласт 4) и без линзы со смещенными нерегулярностями. Согласно расчетам для варианта с фазокорректирующей линзой: КУ в главном луче ДН = 28.7 dBi, уровень боковых лепестков в поперечной плоскости = -18.2 dB, ширина луча -4.9° . Для антенны со смещенными нерегулярностями: КУ в главном луче ДН = 29.9 dBi, уровень боковых лепестков = -14.8 dB, ширина луча -3.5° . Диаграммы направленности приведены на рис. 6. Таким образом, результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного варианта построения плоской антенны на базе диэлектрического волновода.



а)



б)



в)

Рис. 6. Диаграммы направленности: а) без корректирующей линзы, б) с корректирующей линзой, в) без линзы со смещенными нерегулярностями

Обсуждение полученных результатов

В данной работе исследовалась возможность построения плоской антенны, направленной в обоих главных плоскостях, выполненной на основе линейных излучателей в виде периодической системы нерегулярностей в желобковом диэлектрическом волноводе. Принцип построения антенн этого типа предложен ранее [14]. Однако, ни в указанной работе, ни в последующих опубликованных материалах не содержится достаточно обоснованных данных о работоспособности предлагаемого варианта построения антенны. Главной целью настоящей работы явилось подтверждение заявляемых достоинств путем проведения электродинамического моделирования. Как показали проведенные расчеты, использование принципа смещения систем нерегулярностей в диэлектрических волноводах, образующих двумерную антенную решетку, действительно позволяет строить плоские антенны с характеристиками, не уступающими выполненным традиционными средствами.

Практическая ценность: Предложенный в [14] метод построения антенны, основанный на использовании системы смещенных нерегулярностей в волноводах, позволяет упростить конструкцию антенны за счет исключения фазокорректирующей радиолинзы.

Условия применимости: Использование двумерных антенных решеток, выполненных на диэлектрических волноводах, наиболее целесообразно для радиоаппаратуры высокочастотных диапазонов, в частности перспективных средств телекоммуникаций.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило эффективность предложенного способа построения антенн на основе принципа смещения систем нерегулярностей в диэлектрических волноводах, образующих двумерную антенную решетку.

Список литературы

1. Lamparello P. Advances in leaky-wave periodic structures after Oliner's pioneering research / P. Lamparello, F. Frezza, A. Galli et al.// Proceedings of the 44 European Microwave Conference 6-9 Oct. 2014, Rome, Italy. - P.433-437.
2. Классен В.И., Олейник Е.Ю., Седельников Ю.Е., Шаабан Мохамед. Плоские антенны Ka диапазона для перспективных средств связи / В.И. Классен, Е.Ю. Олейник, Ю.Е. Седельников, Мохамед Шаабан // Электросвязь. - N4. – 2017. - С.59-63.

3. Седельников Ю.Е. Линейные антенные решетки КВЧ диапазона на диэлектрических волноводах / Ю.Е. Седельников, Е.Ю. Олейник, Мохамед Шаабан // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2018. – № 8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/1/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.1
4. Sedelnikov Y.E. Ku Band Antenna for Perspective Telecommunication Facilities / Y.E. Sedelnikov, M. N. Shaaban // International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE2018)), Aswan University, Egypt. – 2018.– P.190 – 192.
5. Ghomi M. Radiation characteristics of uniform and nonuniform dielectric leaky-wave antennas/ M. Ghomi, B. Lejay, J.L. Amalric, et al. // IEEE Trans, Antennas Propagation, Sept. 1993. - V.41. - P.1177-1186.
6. Shaaban M.N. A promising Ka band leaky-wave antenna based on a periodic structure of non-identical irregularities / M.N. Shaaban, M.H.E.Ali, M. S. Yasseen, A.R. Nasybullin, and Y.E. Sedelnikov, // EURASIP J. Wireless Commun. Netw, Oct. 2022. - V. 2022. - no. 1. - P. 97.
7. Shaaban M.N. Design and analysis antennas of transverse polarization on the dielectric waveguide/ M.N. Shaaban, A.R. Nasybullin, and Y.E. Sedelnikov// EURASIP J. Wireless Commun. Netw. , Mar.2024. - V.2024. - no.1. - P. 14.
8. Шаабан Мохамед Нурэльдин. Антенны с улучшенными характеристиками, на основе диэлектрического волновода. Дисс.на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, Казань, 2020.
9. Борисов Д.Н. Исследование характеристик плоских антенных решеток вытекающей волны, рассчитанных для режима нормального излучения / Д.Н. Борисов, А.В. Золотухин, А.И. Климов, Ю.Б. Нечаев // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. - 2013. - Т.56, N 10. - С.3-12.
10. Антипов С.А. Плоские антенные решетки вытекающей волны для применения в миллиметровом диапазоне / С.А. Антипов, Д.Н. Борисов, Д.А. Ерошенко, А. И. Климов // Вестник Воронежского государственного технического университета - 2013. - Т. 9 - № 6-3.
11. Ашихмин А.В. Плоская антенна на основе радиального волновода / А.В.Ашихмин, А.Д. Виноградов, А. И. Климов и др.// Радиолокация, навигация, связь: сб. докл. V-й Международной науч.-техн. конференции, Воронеж. - 1999. - Т.3- С.1785-1789.
12. Juneja S. Design considerations for implementation of planar antennas for millimeter wave (mmW) 5G network: a review / S. Juneja, R. Pratap and R. Sharma // Circuit World. – 2024. - Vol. 50, No. 2/3. - P. 247-256. <https://doi.org/10.1108/CW-09-2020-0221>
13. Ерошенко Д.А. Экспериментальные исследования плоских антенн вытекающей волны СВЧ диапазона / Д.А. Ерошенко, А.И. Климов, Ю.Б. Нечаев // Вестник Воронежского института МВД России - № 3. – 2015. - С. 30-36.
14. Седельников Ю.Е. Головин Е.М, Косоруков В.В., Черепенин Г.М. Плоская антенная решетка. АС СССР SU 1739414 A1 БИ №37 1992.
15. Hany S. Hussein. Pencil Beam Planar Ka-Band Antenna Array Using Waveguide Displaced Radiators Sections for Millimeter Wave Applications / S.Hussein Hany, Ismeil Mohamed, M.S. Yaseen et al. // IEEE Xplore. - V. 13. - P. 15079-15089.
16. Классен В.И. Плоские антенны Ка-диапазона для перспективных средств телекоммуникаций / В.И. Классен, Е.Ю. Олейник, Ю.Е. Седельников, М. Шаабан // Электросвязь. - 2017. - № 4 - С. 30-34.
17. Lavrushev V.N. Millimeter band low-height multi beam antennas / V.N. Lavrushev, Yu.E.Sedelnikov // 20-th ESTEC Antenna Workshop on Millimeter Wave Antenna Technology and Antenna Measurement// 18-20 June 1997. - ESTEC Noordwijk, the Netherlands. - P.87-91.
18. Nechaev Yu. B. Planar center-fed leaky-wave antenna arrays for millimeter wave systems / Yu.B. Nechaev, D. N. Borisov, A.I. Klimov et al. // <http://docslide.net/documents/recent-publications-on-leaky-wave-antennas.html>
19. Классен В.И. Антенны К_u диапазона для перспективных средств телекоммуникаций. Часть 2. Антенны с управляемыми характеристиками / В.И. Классен, Ю.Е. Седельников // Научно-технический Вестник Поволжья. – 2013. - № 6. - С. 331-335.

20. Jorge Ruiz-García. Multi-beam modulated metasurface antenna for 5G backhaul applications at K-band / Jorge Ruiz-García, Marco Faenzi , AdhamMahmoud et al.// Comptes Rendus Physique. – 2021. - 22, n S1. – P.47-52. <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/physique/>

A FLAT ANTENNA BASED ON A GROOVED DIELECTRIC WAVEGUIDE

Yu.E. Sedelnikov¹, Mohamed N. Shaaban²

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, st. Karl Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

² Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Al-Azhar University
Qena 83513, Egypt

Abstract. The paper shows the possibility of modifying a flat antenna array based on a dielectric grooved waveguide. A single-beam transversely radiating antenna and a multibeam antenna forming a fan of rays in the transverse plane are considered as options. A single-beam antenna consists of linear antennas in the form of a grooved waveguide with a periodic system of metal irregularities and a input power distribution device. The multibeam antenna contains a input power distribution device in the form of a bifocal waveguide lens. In contrast to the traditional design, irregularities in dielectric waveguides are offset in the direction of wave propagation. The operability of the considered antennas is confirmed by electrodynamic modeling.

The operability of the considered antennas is confirmed by electrodynamic modeling. It is shown that in terms of basic electrical characteristics, they are not inferior to those made in the traditional way. The advantage of the proposed antennas is the simplification of their design.

Keywords: flat antenna, antenna array, grooved waveguide, multibeam antenna, irregularities in the waveguide, power distribution device , horn antenna, bifocal lens.

Статья представлена в редакцию 9 декабря 2024 г.