

ИЗЛУЧАТЕЛЬ НА КВАДРАТНОМ ВОЛНОВОДЕ С ПЛАСТИНЧАТОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СТРУКТУРОЙ И ВЫСТУПАМИ

Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин,
Э. В. Гаджиев, А. В. Ширяева

В данной работе рассмотрена задача по проектированию малогабаритного поляризатора на основе волноводного излучателя. В ходе анализа существующих технических решений сделан выбор в пользу применения волноводного излучателя на квадратном волноводе с пластинчатой замедляющей структурой и выступами. Показана конструкция такого излучателя, которая дополнительно содержит два выступа, расположенные антисимметрично относительно пластинчатой замедляющей структуры, причем высота и ширина выступов увеличиваются к раскрытию излучателя по экспоненциальной огибающей. Проведено электродинамическое моделирование волноводного излучателя. Оценены полученные результаты. Разработанный излучатель предлагается для применения в составе антенной системы высокоскоростной радиолинии перспективных космических аппаратов.

Ключевые слова: бортовая антенна, космический аппарат, волноводная антенна, коэффициент стоячей волны, диаграмма направленности, коэффициент эллиптичности.

Введение

Одной из важнейших бортовых радиолиний космических аппаратов (КА) является радиолиния передачи целевой информации [1].

Причём указанная радиолиния применяется в составе всех классов КА (малых, средних и больших), а также любого целевого назначения (метеорологическое наблюдение, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и др.).

В [1] приведён состав аппаратуры и параметры РЛЦИ малых КА, спроектированных на базе космической платформы «Канопус-В», и больших КА серии «Метеор-М».

В настоящее время к РЛЦИ существенно выросли и ужесточились требования. Повышение пространственного разрешения снимков современных КА ДЗЗ приводит к возрастанию объёмов информации, которые необходимо оперативно сбрасывать на наземные пункты приёма информации. В [2] приведено и показано состояние и перспективы дальнейшего развития АФУ РЛЦИ.

Таким образом, есть потребность в разработке высокоскоростных радиолиний (ВРЛ) передачи, в которых скорость передачи данных достигала бы до 1 Гбит/с [3].

В настоящее время широкое применение в составе бортовых антенных систем нашли вибраторные, спиральные, рупорные, зеркальные и другие типы антенн [4 – 6].

В [2] показаны варианты применения антенно-фидерных устройств с механическим сканированием, а также применение антенных решёток.

Цель работы – разработка излучателя для построения бортовой антенной системы ВРЛ для применения на перспективных КА.

Обзор научно-технической литературы

Непрерывное повышение требований к тактико-техническим характеристикам систем спутниковой связи приводит к необходимости создания компактных антенн с широкой рабочей полосой частот и эллиптической поляризацией поля излучения. При этом все элементы антенно-фидерного устройства должны обладать высокой электрической и механической прочностью, включая и распределительные системы. Поэтому элементы фидерного тракта целесообразно выполнять на волноводах, обладающих высокой прочностью и малыми потерями. В системах спутниковой связи часто возникает необходимость преобразования поляризации, например, из линейной в круговую или наоборот. Для преобразования используются поляризационные секции на основе круглых или квадратных волноводов. Поляризаторы на основе квадратных волноводов проще в изготовлении и расчете, так как неоднородности, благодаря которым возникает фазовый сдвиг 90° между ортогональными составляющими поля, размещаются в ортогональных плоскостях декартовой системы координат.

В настоящее время для построения поляризаторов на квадратном волноводе широко применяются различные комбинации тонких диафрагм, расположенных на двух противоположных стенках волновода, или отрезки гофрированных волноводов.

Однако для возбуждения таких поляризационных секций требуется поворачивать питающий волновод на 45° , а также применять согласующие переходы, что конструктивно не всегда удобно [7 – 9]. Аналогичные конструкции поляризаторов на квадратном волноводе приведены в пособии [10]. В данной работе рассмотрены поляризаторы на квадрат-

ном волноводе с металлическими и диэлектрическими вставками.

В [11] приведена конструкция поляризатора, выполненного на Т-образном переходе, соединяющем регулярный прямоугольный волновод с квадратной поляризационной секцией, а питающий волновод не поворачивается относительно поляризационной секции.

Волноводный поляризатор, содержащий первый отрезок круглого волновода, соединенный коническим переходом со вторым отрезком круглого волновода, имеющим больший диаметр, и в каждом из которых размещены фазосдвигающие элементы в виде двух рядов емкостных металлических стержней, установленных диаметрально противоположно и в общей продольной плоскости, и две пары металлических гребней, одна из которых установлена диаметрально противоположно в первом отрезке круглого волновода в плоскости, ортогональной общей продольной плоскости, а вторая пара металлических гребней установлена диаметрально противоположно во втором отрезке круглого волновода в общей продольной плоскости и в них установлены емкостные металлические стержни представлен в [12].

Известны [13] различные конструкции волноводных поляризаторов на прямоугольных и квадратных волноводах с применением волноводов со сложной формой поперечного сечения.

Аналогичные конструкции волноводов приведены в статьях [14, 15].

Известны конструкции диафрагменных поляризаторов на квадратном волноводе, рассмотренные в работе [16]. Данный класс устройств применяется в бортовых и наземных станциях космической связи для преобразования линейно поляризованных волн в волны круговой поляризации и обратно. Во многом конструкция поляризатора аналогична конструкции, приведённой в [9]. Отличие её состоит в более оптимальном с точки зрения расширения рабочей полосы выборе закона, по которому меняется высота гребней замедляющей структуры в диафрагме. Поляризатор обеспечивает дифференциальный фазовый сдвиг с точностью $1,2^\circ$ в выделенных диапазонах, при коэффициенте стоячей волны (КСВ) $<1,038$. В расширенном частотном диапазоне с коэффициентом перекрытия 1,29 погрешность реализации дифференциального фазового сдвига не превышает $1,5^\circ$ при КСВ $<1,045$.

Более простой по своей конструкции волноводный поляризатор описан в [17]. Он содержит отрезок волновода, выполненный в виде усеченной пирамиды, и два клина, с помощью которых образо-

ван переход от квадратного сечения к Т-образному. Клинья выполнены с основанием $0,2\lambda \times 0,7\lambda$ и высотой, равной высоте отрезка волновода, где λ – длина волны в свободном пространстве. Введены две группы настроечных элементов, причём каждая группа состоит из трёх элементов и расположена по осевым линиям широких стенок волноводов, образующих Т-образное сечение. Первый элемент отстоит от торца Т-образного сечения на расстоянии $\lambda_{cp}/4$, а последующие – на расстоянии $\lambda_{cp}/8$ друг от друга, где λ_{cp} – средняя длина волны в волноводе. Поляризатор обеспечивает коэффициент эллиптичности равный 0,98, коэффициент бегущей волны равный 0,95, полосу пропускания 18% и упрощение конструкции.

В антенне, приведенной в [18], используется свернутый Т-образный переход от поляризационной секции к двум прямоугольным волноводам и требуемый фазовый сдвиг между волнами, возбуждаемыми в волноводах, достигается только за счёт разности хода волн в поляризационной секции.

Волноводный излучатель с пластинчатой замедляющей структурой представляет собой излучатель, в котором применена замедляющая структура в виде пластины и двух выступов, при этом высота и ширина выступов увеличиваются к раскрытию излучателя по экспоненциальной огибающей.

Анализ рассмотренных вариантов построения

Такая конструкция [11] разработана с целью повышения электрической прочности и имеет большие габариты, чем конструкции, рассмотренные в [10].

Недостатком волноводного поляризатора из [12] является сложность изготовления, потому что он состоит из множества элементов, которые должны быть строго рассчитаны и установлены в расчётных местах, что является непростой технической задачей. Также отсутствуют подстроечные элементы и поэтому характеристики зависят от расчёта и точности установки. Из-за наличия резонансных элементов волноводный поляризатор имеет узкую частотную полосу. Характеристики (коэффициент эллиптичности $<0,92$, коэффициент бегущей волны $<0,8$, полоса пропускания $<8\%$) получаются неудовлетворительными. Для расширения рабочей полосы в таких поляризаторах применяются различные законы размещения диафрагм или гофров. Существенное расширение рабочей полосы достигается применением волноводов и гофров сложной формы [19 – 24].

Конструкции [13 – 15] узкополосны, а рабочая полоса не превышает единиц процентов.

Характеристики поляризаторов, приведённых в [16], реализуются с помощью замедляющей структуры, состоящей из 20-ти элементов.

Конструкция волноводного поляризатора, приведённая в [17], имеет сравнительно большие габариты и требует подстройки параметров.

Конструкция поляризатора, приведённая в [18], имеет высокую электрическую прочность, но как следствие применения плавного Т-образного перехода и большие продольные габариты.

Поэтому возникает необходимость разработки конструкции поляризатора, обладающего высокой электрической прочностью при меньших продольных габаритах.

Предлагаемый вариант

В ходе анализа рассмотренных вариантов построения волноводных излучателей был сделан выбор в пользу волноводного излучателя квадратного сечения с пластинчатой ступенчатой замедляющей структурой, содержащий волноводный вход, отличающийся от наиболее близкого аналога, описанного в [25] тем, что дополнительно содержит два выступа, расположенные антисимметрично относительно пластинчатой замедляющей структуры, причем высота и ширина выступов увеличиваются к раскрытию излучателя по экспоненциальной огибающей.

Общий вид волноводного излучателя на квадратном волноводе с пластинчатой замедляющей структурой и выступами показан на рис. 1 [26].

Структура излучателя показана на рис. 2.

Сигнал подается на волноводный вход, обозначенный позицией 1 на рис. 2 на поляризационной секции. Комбинированная замедляющая система, состоящая из ступенчатой пластины и выступов, показанная позициями 2 и 3 на рис. 2, представляет собой квадратный волновод с пластинчатой замедляющей структурой и выступами, размещенными антисимметрично относительно замедляющей структуры. Высота выступов изменяется по экспоненциальному закону и увеличивается в направлении излучающего раскрытия.

В поляризационной секции возбуждаются две волны H_{10} и H_{01} . Волна H_{01} замедляется пластинчатой замедляющей системой. Параметры пластины и размеры выступов, из которых состоит замедляющая система, подбирались таким образом, чтобы получить минимальное отражение от замедляющей структуры и минимальную длину.

На рис. 3 показана ступенчатая замедляющая структура с габаритными размерами.

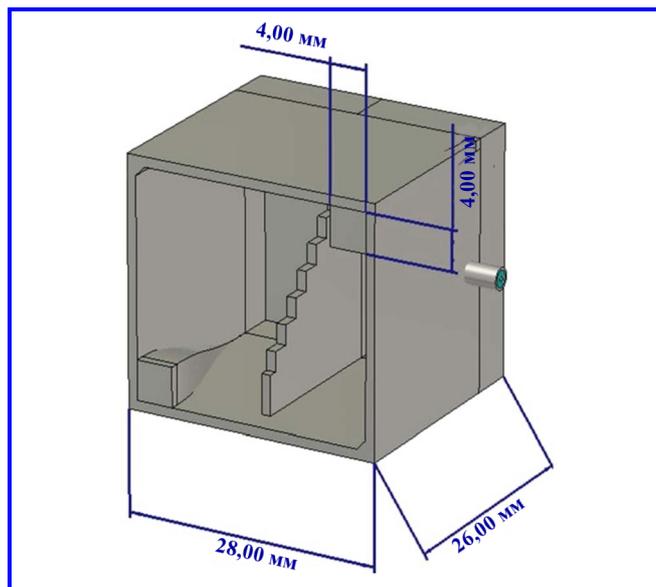


Рис. 1. Общий вид волноводного излучателя на квадратном волноводе с пластинчатой замедляющей структурой и выступами

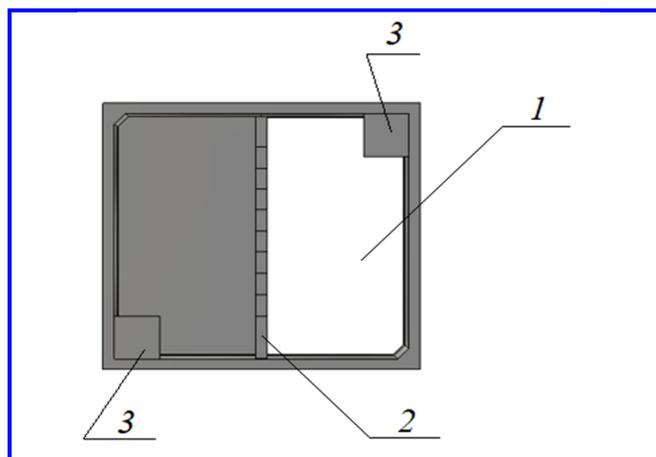


Рис. 2. Структура излучателя

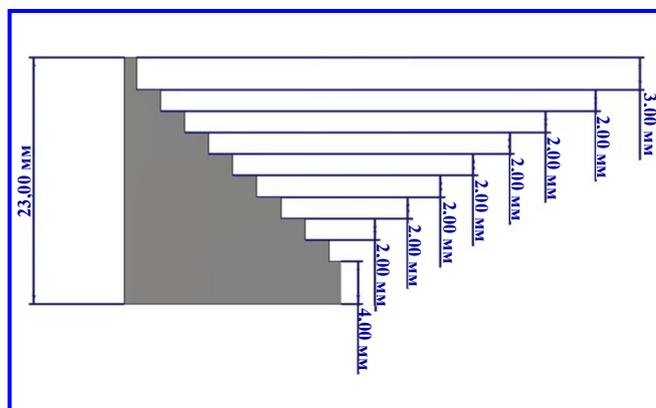


Рис. 3. Ступенчатая замедляющая структура

Характеристики излучателя такие, как КСВ, зависимость коэффициента эллиптичности от пространственного угла и пространственная диаграмма направленности (ДН) приведены на рис. 4 – 6 соответственно [27]. Данный излучатель разработан для применения в составе бортовой антенной системы для высокоскоростной радиолинии для перспективных космических аппаратов [28 – 30].

Заключение

Таким образом, разработана конструкция широкополосного волноводного излучателя, обладающая простотой практической реализации и малыми массогабаритными параметрами за

счёт оптимального выбора закона распределения замедляющей структуры в поляризационной секции.

Решение поставленной задачи достигается тем, что в известном волноводном поляризаторе применена замедляющая структура в виде пластины и двух металлических выступов с оптимально подобранным изменением выступов по высоте. Для определения этого распределения применялся метод параметрической оптимизации по критерию минимума длины поляризационной секции и коэффициента отражения.

Экспоненциальная огибающая подбиралась таким образом, чтобы получить минимальное отражение от замедляющей структуры.

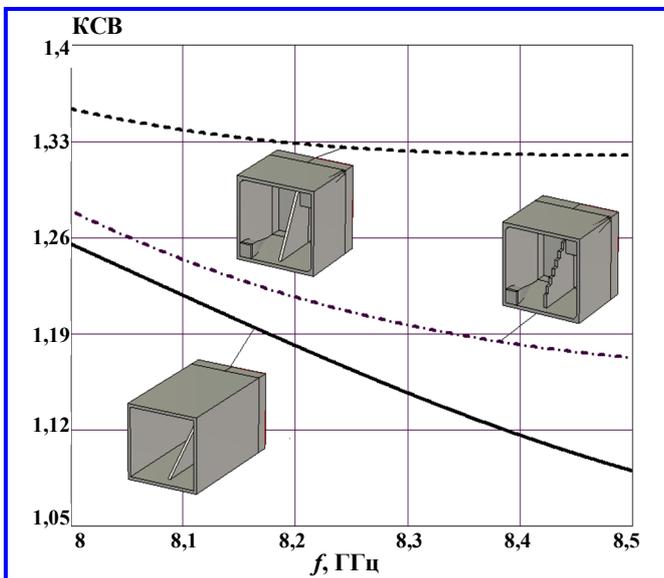


Рис. 4. Коэффициент стоячей волны излучателя

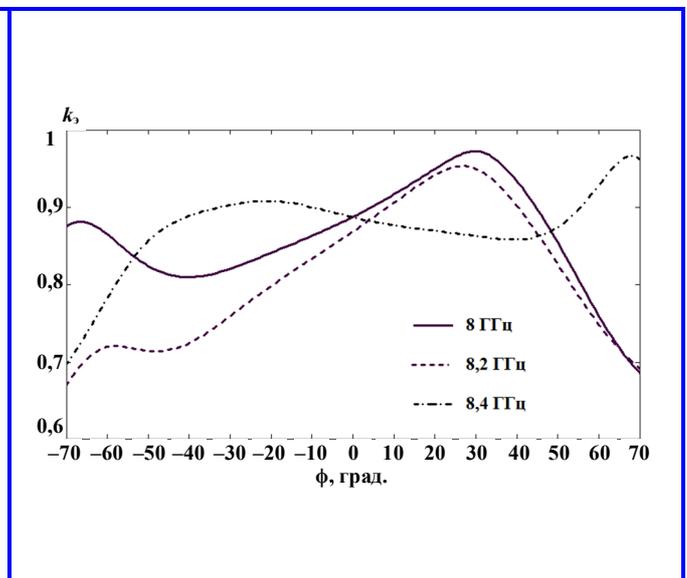


Рис. 5. Зависимость коэффициента эллиптичности k_e от пространственного угла ϕ излучателя

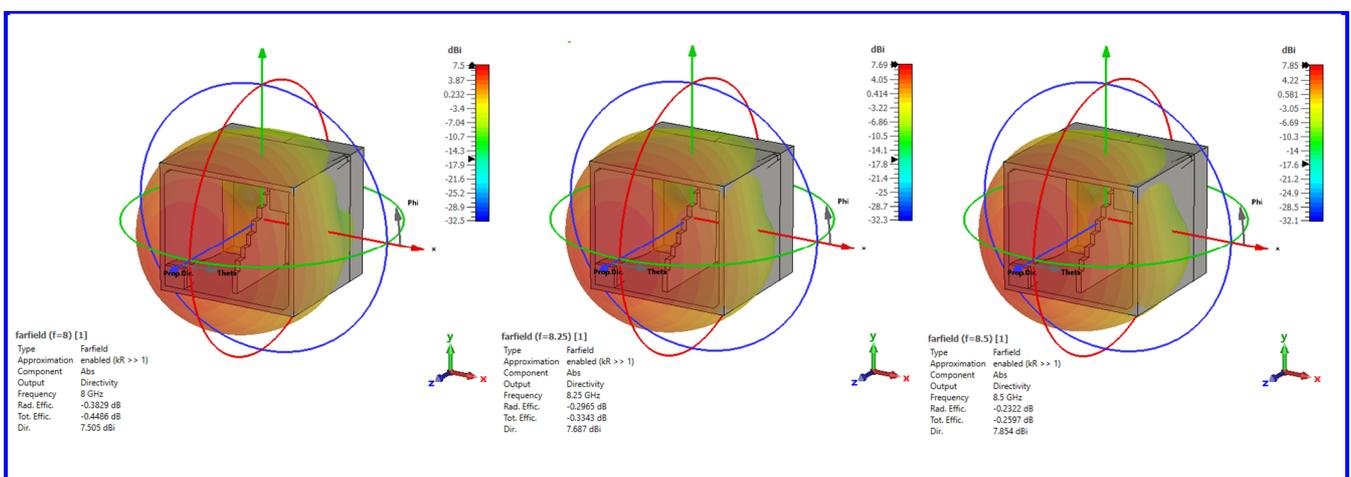


Рис. 6. Пространственная диаграмма направленности излучателя

Литература

1. Антенные системы радиолинии передачи информации космических аппаратов: состояние и перспективы развития / Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин [и др.] // Радиотехника. – 2021. – Т. 85. – № 3. – С. 86 – 95. – DOI 10.18127/j00338486-202103-09.
2. Антенные системы радиолинии передачи информации космических аппаратов: пути построения / Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин [и др.] // Радиотехника. – 2022. – Т. 86. – № 6. – С. 109 – 128. – DOI 10.18127/j00338486-202206-14.
3. Бахтин А. А. Анализ современных возможностей организации сверхвысокоскоростных спутниковых радиолиний / А. А. Бахтин, Е. В. Омелянчук, А. Ю. Семенова // Труды МАИ. – 2017. – № 96. – 18 с.
4. Application of spiral antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Gadzhiev, A. Generalov, A. Zhukov [et al.] // Proceedings – 5th International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT-MIPT 2018 : 5, Moscow, 15 – 16 ноября 2018 года. – Moscow, 2018. – P. 91 – 93. – DOI : 10.1109/EnT-MIPT.2018.00027.
5. Application of dipole antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Gadzhiev, A. Generalov, M. Salikhov [et al.] // 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT 2019, Dolgoprudny, 20 – 21 ноября 2019 года. – Dolgoprudny, 2019. – P. 9030543. – DOI : 10.1109/EnT47717.2019.9030543.
6. Application of horn antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Ovchinnikova, N. D. To, S. Kondrat'eva [et al.] // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T 2020, Dolgoprudny, 25 – 26 ноября 2020 года. – Dolgoprudny, 2020. – P. 9431308. – DOI : 10.1109/EnT50437.2020.9431308.
7. Жук М. С. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств / М. С. Жук, Ю. Б. Молочков. – Москва : Энергия, 1973. – 439 с.
8. Low-attenuation properties of corrugated rectangular waveguide / M. B. Al-Hariri, A. D. Olver, P. J. B. Clarricoats // Electron. Lett. – 1974. – Vol. 10. – P. 304 – 305.
9. Simmons A. J. Phase shift by periodic loading of waveguide and its application to broad-band circular polarization / A. J. Simmons // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1955. – Vol. 3. – № 6. – P. 18 – 21. – DOI : 10.1109/TMTT.1955.1124986.
10. Методические указания к лабораторным работам 3, 4 по курсам «Электродинамика и распространение радиоволн» и «Электромагнитные поля и волны» / Сост. И. П. Соловьянова, М. П. Наймушин, С. Н. Шабунин. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУУПИ, 2006. – 37 с.
11. Авторское свидетельство SU № 1798839 А1 СССР, МПК Н01Р 1/165. Волноводный поляризатор : № 4757303/09 : заявл. 09.11.89 : опубл. 28.02.93 / В. М. Антоненко, И. З. Верлявский, Д. В. Васильев, А. Д. Сидоренко, В. П. Черепанов. – Бюл. № 8. – [4] с.
12. Авторское свидетельство SU № 1793496 А1 СССР МПК Н01Р 1/165. Волноводный поляризатор : № 4741159/09 : заявл. 05.09.89 : опубл. 07.02.93 / А. М. Модель, В. М. Антоненко, И. З. Берлявский. – Бюл. № 5. – [3] с.
13. Электродинамическая модель и характеристики поляризаторов на отрезках квадратного волновода с диагонально расположенными квадратными выступами / Л. А. Рудь, К. С. Шпаченко // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 3 (17). – № 1. – С. 3 – 10.
14. Toyama N. A cross-shaped horn and a square waveguide polarizer for a circularly polarized shaped beam antenna for a broadcasting satellite / N. Toyama // IEEE MTT-S Int. Symp.: symp. digest. – Washington, 1980. – P. 299 – 301.
15. Levy R. The relationship between dual mode cavity crosscoupling and waveguide polarizers / R. Levy // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1995. – Vol. 43. – № 11. – P. 2614 – 2620.
16. Мануилов М. Б. Электродинамический анализ конечных волноводных антенных решеток, частотно-селективных и распределительных устройств на гребневых и прямоугольных волноводах : специальность 01.04.03 «Радиофизика» : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Мануилов Михаил Борисович. – Ростов-на-Дону, 2007. – 463 с.
17. Патент RU № 2298862 С2 МПК Н01Р 1/16 (2006.01), Н01Р 5/08 (2006.01). Волноводный поляризатор : № 200512224/09 : заявл. 13.07.2005 : опубл. 10.05.2007 / Беляев В. В., Богданов Ю. Н., Маюнов А. Т.
18. Патент SU № 1798839 А1 МПК Н01Р1/165. Волноводный поляризатор : № 4757303/09 : заявл. 09.11.89 : опубл. 28.02.93 / Антоненко В. М., Верлявский И. З., Васильев Д. В., Сидоренко А. Д., Черепанов В. П. – Бюл. № 8.
19. Rebollar J. Broad-band corrugated polarisers using different kinds of corrugations / J. Rebollar // IEEE AP-S Int. Symp.: digest. – Vancouver, 1985. – P. 639 – 642.
20. A novel design tool for waveguide polarizers / G. Virone, R. Tascone, M. Baralis [et al.] // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2005. – Vol. 53. – № 3. – P. 888 – 894.
21. Combined-phase-shift waveguide polarizer / G. Virone, R. Tascone, O. A. Peverini [et al.] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2008. – Vol. 18. – № 8. – P. 509 – 511.
22. Tucholke U. Field theory design of square waveguide iris polarizers / U. Tucholke, F. Arndt, T. Wriedt // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1986. – Vol. 34. – № 1. – P. 156 – 160.
23. Design and optimization of wide and dual band waveguide polarizer / Y. Liu, F. Li, X. Li [et al.] // Global Symp. Millimeter Waves: symp. proc. – Nanjing, 2008. – P. 384 – 386.
24. Rebollar J. M. Dual-band compact square waveguide corrugated polarizer / J. M. Rebollar, J. de Frutos // IEEE AP-S Int. Symp. : symp. digest. – Orlando, 1999. – P. 962 – 965.
25. Фролов О. П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи / О. П. Фролов, В. В. Вальд. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2008. – 496 с.
26. Малогабаритный волноводный излучатель / Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин [и др.] // Инжиниринг и телекоммуникации – En&T 2021: Сборник тезисов VIII Международной конференции, Долгoprудный, 24 – 25 ноября 2021 года. – Москва ; Долгoprудный : Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 2021. – С. 59 – 62.

27. Modelling of a Small-Sized Waveguide Radiator with Elliptical Polarization / E. Ovchinnikova, E. Gadzhiev, N. D. To [et al.] // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T 2021, Dolgoprudny, 24–25 ноября 2021 года. – Dolgoprudny, 2021. – DOI : 10.1109/EnT50460.2021.9681739.
28. Моделирование антенной решетки из волноводных излучателей на основе септум-поляризаторов / Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин [и др.] // Радиотехника. – 2021. – Т. 85. – № 4. – С. 108 – 118. – DOI 10.18127/j00338486-202104-12.
29. Волноводная антенная решетка X-диапазона с эллиптической поляризацией / Е. В. Овчинникова, Э. В. Гаджиев, Д. Т. Нгуен [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 114 – 115.
30. On-Board X-Band Antenna Array / E. V. Gadzhiev, E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratyeva [et al.] // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings, Moscow, 15 – 17 марта 2022 года. – Moscow, 2022. – DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744339.

Поступила в редакцию 22.08.2022

- Елена Викторовна Овчинникова**, доктор технических наук, доцент, профессор,
т. 8 (915) 323-40-36, e-mail: oea8888@gmail.com.
(Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет);
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана).
- Светлана Геннадьевна Кондратьева**, кандидат технических наук, доцент,
т. 8 (915) 042-94-22, e-mail: kondratieff89@ya.ru.
(Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)).
- Павел Александрович Шмачилин**, кандидат технических наук, доцент,
т. 8 (916) 586-44-32, e-mail: shmachilin@gmail.com.
(Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет);
Российский университет дружбы народов).
- Эльчин Вахидович Гаджиев**, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер,
т. (495) 994-55-84, e-mail: skp579@mcc.vniiem.ru.
(Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет);
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»»).
- Анна Витальевна Ширяева**, ассистент кафедры ОЭПС РТУ МИРЭА,
т. 8 (903) 248-07-37, e-mail: Shiryaeva@mirea.ru.
(МИРЭА – Российский технологический университет).

RADIATOR BASED ON A SQUARE WAVEGUIDE WITH WAVE-SLOWING PLATE STRUCTURE AND PROTRUSIONS

E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratyeva, P. A. Shmachilin,
E. V. Gadzhiev, A. V. Shiryaeva

This article deals with the task of designing a small-sized polarizer based on a waveguide radiator. In the course of analysis of the existing technical solutions, the choice was made to use a waveguide radiator based on a square waveguide with wave-slowing plate structure and protrusions. The design of such radiator that additionally has two protrusions located antisymmetrically with respect to the wave-slowing plate structure (the height and width of the protrusions increase towards the radiator aperture according to the exponential envelope) was shown. Electrodynamic modelling of a waveguide radiator was performed. The obtained results were evaluated. The designed radiator is proposed for use as part of the antenna system of the high-speed radio link of advanced spacecraft.

Key words: on-board antenna, spacecraft, waveguide antenna, standing wave ratio, pattern, ellipticity ratio.

References

1. Antenna systems of spacecraft radio data links: current status and prospects for development / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratyeva, P. A. Shmachilin [et al.] // Radiotekhnika. – 2021. – V. 85. – No. 3. – Pp. 86 – 95. – DOI : 10.18127/j00338486-202103-09.
2. Antenna systems of spacecraft radio data links: ways of designing / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratyeva, P. A. Shmachilin [et al.] // Radiotekhnika. – 2022. – V. 86. – No. 6. – Pp. 109 – 128. – DOI 10.18127/j00338486-202206-14.
3. Bakhtin A. A. Analysis of modern capabilities of arrangement of ultra high speed satellite radio links / A. A. Bakhtin, E. V. Omelyanchuk, A. Iu. Semyonova // MAI Proceedings. – 2017. – No. 96. – 18 p.
4. Application of spiral antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Gadzhiev, A. Generalov, A. Zhukov [et al.] // Proceedings – 5th International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT-MIPT 2018 : 5, Moscow, November 15 – 16, 2018. – Moscow, 2018. – Pp. 91 – 93. – DOI : 10.1109/EnT-MIPT.2018.00027.

5. Application of dipole antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Gadzhiev, A. Generalov, M. Salikhov [et al.] // 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT 2019, Dolgoprudny, 20 – November 21, 2019. – Dolgoprudny, 2019. – P. 9030543. – DOI : 10.1109/EnT47717.2019.9030543.
6. Application of horn antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Ovchinnikova, N. D. To, S. Kondratyeva [et al.] // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T 2020, Dolgoprudny, November 25 – 26, 2020. – Dolgoprudny, 2020. – P. 9431308. – DOI : 10.1109/EnT50437.2020.9431308.
7. Zhuk M. S. Designing of lens-type, scanning and wide-band antennas and feeder devices / M. S. Zhuk, Iu. B. Molochkov. – Moscow : Energia, 1973. – 439 p.
8. Low-attenuation properties of corrugated rectangular waveguide / M. B. A1-Hariri, A. D. Olver, P. J. B. Clarricoats // Electron. Lett. – 1974. – Vol. 10. – Pp. 304 – 305.
9. Simmons A.J. Phase shift by periodic loading of waveguide and its application to broad-band circular polarization / A. J. Simmons // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1955. – Vol. 3. – No. 6. – P. 18 – 21. – DOI : 10.1109/TMTT.1955.1124986.
10. Methodological guidelines for laboratory works 3, 4 on the subjects ‘Electrodynamics and radio wave propagation’ and ‘Electromagnetic fields and waves’ / Compiled by I. P. Solovyanova, M. P. Naymushin, S. N. Shabunin. – Yekaterinburg : Ural State Technical University, 2006. – 37 p.
11. Inventor’s Certificate SU No. 1798839 A1 USSR, IPC H01P 1/165. Waveguide polarizer : No. 4757303/09 : appl. dated 09.11.89 : publ. on 28.02.93 / V. M. Antonenko, I. Z. Verlyavskiy, D. V. Vasilyev, A. D. Sidorenko, V. P. Cherepanov. – Bull. No. 8. – [4] p.
12. Inventor’s Certificate SU No. 1793496 A1 USSR, IPC H01P 1/165. Waveguide polarizer : No. 4741159/09 : appl. dated 05.09.89 : publ. on 07.02.93 / A. M. Model, V. M. Antonenko, I. Z. Berlyavskiy. – Bull. No. 5. – [3] p.
13. Electrodynamic model and characteristics of polarizers in square waveguide sections with diagonal square protrusions / L. A. Rud, K. S. Shpachenko // Radiophysics and Electronics. – 2012. – V. 3 (17). – No. 1. – Pp. 3 – 10.
14. Toyama N. A cross-shaped horn and a square waveguide polarizer for a circularly polarized shaped beam antenna for a broadcasting satellite / N. Toyama // IEEE MTT-S Int. Symp.: symp. digest. – Washington, 1980. – Pp. 299 – 301.
15. Levy R. The relationship between dual mode cavity crosscoupling and waveguide polarizers / R. Levy // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1995. – Vol. 43. – No. 11. – Pp. 2614 – 2620.
16. Manuilov M. B. Electrodynamic analysis of finite waveguide antenna arrays, frequency selective and distribution devices on ridged and rectangular waveguides : speciality 01.04.03 ‘Radiophysics’ : Thesis for the Degree of Doctor of Physics and Mathematics / Manuilov Mikhail Borisovich. – Rostov-on-Don, 2007. – 463 p.
17. Patent RU No. 2298862 C2 IPC H01P 1/16 (2006.01), H01P 5/08 (2006.01). Waveguide polarizer :No. 200512224/09 : appl. dated 13.07.2005 : publ. on 10.05.2007 / Belyayev V. V., Bogdanov Iu. N., Mayunov A. T.
18. Patent SU No. 1798839 A1 IPC H01P1/165. Waveguide polarizer : No. 4757303/09 : appl. dated 09.11.89 : publ. on 28.02.93 / Antonenko V. M., Verlyavskiy I. Z., Vasilyev D. V., Sidorenko A. D., Cherepanov V. P. – Bull. No. 8.
19. Rebolgar J. Broad-band corrugated polarisers using different kinds of corrugations / J. Rebolgar // IEEE AP-S Int. Symp.: digest. – Vancouver, 1985. – Pp. 639 – 642.
20. A novel design tool for waveguide polarizers / G. Virone, R. Tascone, M. Baralis [et al.] // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2005. – Vol. 53. – No. 3. – Pp. 888 – 894.
21. Combined-phase-shift waveguide polarizer / G. Virone, R. Tascone, O. A. Peverini [et al.] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2008. – Vol. 18. – No. 8. – Pp. 509 – 511.
22. Tucholke U. Field theory design of square waveguide iris polarizers / U. Tucholke, F. Arndt, T. Wriedt // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1986. – Vol. 34. – No. 1. – Pp. 156 – 160.
23. Design and optimization of wide and dual band waveguide polarizer / Y. Liu, F. Li, X. Li [et al.] // Global Symp. Millimeter Waves: symp. proc. – Nanjing, 2008. – Pp. 384 – 386.
24. Rebolgar J.M. Dual-band compact square waveguide corrugated polarizer / J. M. Rebolgar, J. de Frutos // IEEE AP-S Int. Symp. : symp. digest. – Orlando, 1999. – Pp. 962 – 965.
25. Frolov O. P. Reflector antennas for satellite communications ground stations / O. P. Frolov, V. V. Vald. – Moscow : Hot line – Telecom, 2008. – 496 p.
26. Small-sized waveguide radiator / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratyeva, P. A. Shmachilin [et al.] // Engineering and Telecommunications – En&T 2021: Collected abstracts of proceedings of VIIIth International Conference, Dolgoprudny, November 24 – 25, 2021. – Moscow ; Dolgoprudny : Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 2021. – Pp. 59 – 62.
27. Modelling of a Small-Sized Waveguide Radiator with Elliptical Polarization / E. Ovchinnikova, E. Gadzhiev, N. D. To [et al.] // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T 2021, Dolgoprudny, November 24 – 25, 2021. – Dolgoprudny, 2021. – DOI : 10.1109/EnT50460.2021.9681739.
28. Modelling of antenna array made of waveguide radiators based on septum polarizers / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratyeva, P. A. Shmachilin [et al.] // Radiotekhnika. – 2021. – V. 85. – No. 4. – Pp. 108 – 118. – DOI : 10.18127/j00338486-202104-12.

29. X-band waveguide antenna array with elliptical polarization / E.V. Ovchinnikova, E.V. Gadzhiev, D.T. Nguyen [et al.] // Microwave and telecommunication technology. – 2021. – No. 3. – Pp. 114 – 115.
30. On-Board X-Band Antenna Array / E. V. Gadzhiev, E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratieva [et al.] // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of On-Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings, Moscow, March 15 – 17, 2022. – Moscow, 2022. – DOI : 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744339.

Elena Viktorovna Ovchinnikova, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Associate Professor, Professor, tel.: +7 (915) 323-40-36, e-mail: oea8888@gmail.com. (Moscow Aviation Institute (National Research University); Bauman Moscow State Technical University).

Svetlana Gennadyevna Kondratyeva, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, tel.: +7 (915) 042-94-22, e-mail: kondratieff89@ya.ru. (Moscow Aviation Institute (National Research University)).

Pavel Aleksandrovich Shmachilin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, tel.: +7 (916) 586-44-32, e-mail: shmachilin@gmail.com. (Moscow Aviation Institute (National Research University); Peoples' Friendship University of Russia).

Elchin Vakhidovich Gadzhiev, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Leading Engineer, tel.: +7 (495) 994-55-84, e-mail: ckp579@mcc.vniiem.ru. (Moscow Aviation Institute (National Research University); (JC «VNIIEM Corporation»).

Anna Vitalyevna Shirayeva, Teaching Assistant of Department of Optoelectronic Instruments and Systems MIREA - Russian Technological University, tel.: +7 (903) 248-07-37, e-mail: Shiryaeva@mirea.ru. (MIREA – Russian Technological University).