— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ —

УДК 520.2.064.4 EDN OPGWNN

Узлы поворота полуэкранированного диэлектрического волновода для устройств связи космических аппаратов

И. Н. Мирошникова, д. т. н., проф., MiroshnikovaIN@mpei.ru ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Российская Федерация

В. В. Крутских, к. т. н., KrutskikhVV@треі.ru ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Российская Федерация

А. Ю. Сизякова, к. т. н., SiziakovaAY@mpei.ru ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Российская Федерация

А. Н. Ушков, UshkovAN@mpei.ru ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Российская Федерация

Д. С. Чукашов, ChukashovDS@mpei.ru ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Российская Федерация

А. Ю. Трофимов, TrofimovAnY@mpei.ru ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Российская Федерация

А. Э. Мирзоян, m.artavazd@yandex.ru AO «НПК "СПП"», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время в космической аппаратуре требования к характеристикам систем связи становятся жестче, что выражается в необходимости проектирования функциональных узлов СВЧ-диапазона с малыми массогабаритными характеристиками и высокими показателями эффективности. Минимизация габаритов самих космических аппаратов требует от узлов канализации электромагнитных волн технической возможности изгиба и поворота, чтобы экономить пространство или использовать узлы в поворотных механизмах. Данная работа посвящена изучению физических явлений и характеристик узлов поворота на базе полуэкранированного диэлектрического волновода, а также выявлению рекомендаций по их применению в космических системах связи в топологической и нормальной плоскостях. В рамках исследования проведен анализ матрицы рассеяния различных конструкций поворота и изгиба на базе полуэкранированного диэлектрического волновода. Для выявления закономерностей и анализа характеристик узлов использовались материалы с различной диэлектрической проницаемостью, пригодные для технологии 3D-печати. Результаты исследования получены при помощи численных методов и физического эксперимента на макете экспериментальной установки. Полученные рекомендации могут быть использованы при конструировании регулируемых поворотных модулей при проектировании устройств на базе полуэкранированного диэлектрического волновода в устройствах космической связи.

Ключевые слова: распространение волн, полуэкранированный диэлектрический волновод, устройство волноводного поворота, микроволновая техника

Для цитирования: Мирошникова И. Н., Крутских В. В., Сизякова А. Ю., Ушков А. Н., Чукашов Д. С., Трофимов А. Ю., Мирзоян А. Э. Узлы поворота полуэкранированного диэлектрического волновода для устройств связи космических аппаратов. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2025. Т. 12. № 2. С. 80–89.

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ —

NRD Waveguide Rotation Nodes for Spacecraft Communication Devices

I. N. Miroshnikova, Dr. Sci. (Engineering), Prof., MiroshnikovaIN@mpei.ru NRU "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation

V. V. Krutskikh, Cand. Sci. (Engineering), KrutskikhVV@mpei.ru NRU "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation

A. Yu. Sizyakova, Cand. Sci. (Engineering), SizyakovaAY@mpei.ru NRU "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation

A. N. Ushkov, UshkovAN@mpei.ru

NRU "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation

D. S. Chukashov, ChukashovDS@mpei.ru

NRU "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation

A. Yu. Trofimov, TrofimovAnY@mpei.ru

NRU "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation

A. E. Mirzoyan, m.artavazd@yandex.ru

Joint-Stock Company "Scientific and Production Corporation "Precision Instrument Engineering Systems",

Moscow, Russian Federation

Abstract. Nowadays, in space equipment, the requirements for the characteristics of communication systems are becoming stricter, which is reflected in the need to design functional units of the microwave range with low weight and size characteristics and a high efficiency. Minimizing the dimensions of spacecraft themselves requires electromagnetic wave channeling nodes to have a technical ability to bend and rotate in order to save space or use nodes in rotation mechanisms. This work is devoted to the study of the physical phenomena and characteristics of rotation nodes based on the non-radiative dielectric (NRD) waveguide as well as the identification of recommendations for their use in spacecraft and communication systems in the topological and normal planes. As part of the study, the scattering matrix of various rotation and bend structures was analyzed based on the NRD waveguide. Materials with a different permittivity suitable for the 3D printing technology were used to identify the patterns and analyze the characteristics of the nodes. The results of the study were obtained using numerical methods and a physical experiment on a mock-up of an experimental setup. The recommendations obtained can be employed in the design of adjustable rotation modules when designing NRD waveguides in space communication devices.

Keywords: wave propagation, NRD waveguide, waveguide rotator, microwave technology

For citation: Miroshnikova I. N., Krutskikh V. V., Sizyakova A. Yu., Ushkov A. N., Chukashov D. S., Trofimov A. Yu., Mirzoyan A. E. NRD Waveguide Rotation Nodes for Spacecraft Communication Devices. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2025. Vol. 12. No. 2. P. 80–89. (in Russian)

Введение

С развитием систем связи и ростом требований к пропускной способности устройств связи, в частности космической радиоаппаратуры, возникает необходимость разработки новой элементной базы для создания стационарных устройств приемапередачи как наземного типа [1], так и в условиях космоса [2]. Для таких задач в Ка- и К-диапазонах частот перспективным решением является полуэкранированный диэлектрический волновод (ПЭДВ). Его конструкция удовлетворяет множеству показателей качества и соответствует критериям оценки облика базового устройства [3]. Благодаря режиму неизлучения ПЭДВ обладает высокими показателями электромагнитной совместимости и представляет собой регулярную линию с малыми потерями. С учетом развития свойств диэлектрических материалов диэлектрические стержни применяются для передачи данных и в субмиллиметровом диапазоне длин волн, что задает потенциал построения устройств терагерцового диапазона на базе ПЭДВ [4].

К тому же ПЭДВ могут быть выполнены при помощи 3D-печати, что облегчает технологию изготовления волноводных трактов и узлов [5]. Так, ключевым условием нехудшей работы ПЭДВ является осевая симметрия, связанная диэлектрическими пластинами. Сам функциональный узел закрепляется между пластинами и выполняется, как правило, из диэлектрических или металлических направляющих конструкций, выступающих в качестве нерегулярностей или узлов связи. Для снижения потерь целесообразно использовать ПЭДВ, формат стержня которого близок к оптимальному. Последний найден экспериментально в работе [6] и рассчитывается по соотношению (1):

$$\Phi_{\text{oht}} = \frac{a}{b} = \arctan(\varepsilon - 0.6) + 0.17, \tag{1}$$

где $\Phi_{\text{опт}}$ — квазиоптимальное соотношение формата ПЭДВ в зависимости от диэлектрической проницаемости стержня, ε — диэлектрическая проницаемость стержня, a — половина ширины стержня волновода, b — половина высоты стержня волновода.

Данное соотношение сторон позволяет снизить уровень поперечного вытекания электромагнитной

волны с диэлектрического стержня и защитить конструкцию от внешнего влияния.

В связи с этим разработка элементной и компонентной базы на основе конструкции ПЭДВ представляет важную задачу. Целью настоящей работы стал поиск оптимальной геометрии конструкции устройства поворота на базе ПЭДВ. Критериями анализа выступают погонные потери в узле и коэффициенты отражения передачи матрицы рассеяния.

Математическое описание физических явлений на участке изгиба

Перед переходом к анализу конструкций поворота на базе ПЭДВ целесообразно рассмотреть математическое описание явлений и представлений о механизмах распространения электромагнитной волны на участке поворота [6].

Отметим, что в общем случае устройство поворота можно представить как плавную нерегулярность, то есть при прохождении малого участка тракта параметры электромагнитной волны слабо изменяются.

При этом наблюдается излучение, которое связано с механикой распространения волны через участок топологического изгиба, что показано на рис. 1.

Уровень излучения с нерегулярности будет зависеть от степени резкости поворота оси диэлек-

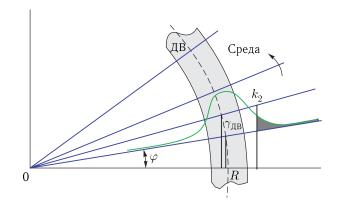


Рис. 1. Механизм распространения электромагнитной волны на участке с топологическим изгибом [7] Fig. 1. Mechanism of electromagnetic wave propagation

on a section with a topological bend [7]

трического стержня и оказывать влияние на постоянную распространения электромагнитной волны. При этом численной характеристикой резкости поворота будет выступать радиус изгиба волновода r_0 . Он связан с коэффициентом замедления электромагнитной волны на участке топологического поворота соотношением (2):

$$\frac{r_0}{R} = U, (2)$$

где U — замедление электромагнитной волны на участке,

 r_0 — радиус изгиба волновода,

R — численный размер ПЭДВ.

Увеличение радиуса изгиба приводит к росту замедления волны и радиационных потерь. Последнее исходит из сравнения волновых чисел и, как следствие, из замедлений для конструкций ПЭДВ и планарного диэлектрического волновода (ПлДВ), который представляет собой две металлические пластины и диэлектрическую среду между ними. При этом замедление волн в ПЭДВ оказывается всегда меньше, чем замедление в ПлДВ. На прямолинейном участке ПЭДВ внешнее волновое число определяется по соотношению (3), отраженному в работе [7]:

$$\alpha_{\rm rad} = 8.2R' \xi_0^{1/2} e^{-11R' \xi_0^{1/2}},$$
(3)

где R' — относительный радиус изгиба, ξ_0 — замедление на прямолинейном участке стержня ПЭДВ.

Опираясь на выражение для затухания волны на прямолинейном участке ПЭДВ и относительного радиуса изгиба, получаем соотношение, характеризующее уровень затухания электромагнитной волны для приведенного радиуса изгиба. Это отражено в выражении (4) и позволяет провести расчет необходимого радиуса для обеспечения заданного уровня потерь:

$$\widetilde{R} = -11R'\xi_0^{3/2},\tag{4}$$

где R' — относительный радиус изгиба, ξ_0 — замедление на прямолинейном участке стержня ПЭДВ.

Так, для сохранения углового затухания на уровне, близком к прямолинейному, требуется увеличение относительного радиуса изгиба R' в 8 раз.

Такое решение вытекает из-за отличия конструкции ПЭДВ и ПлДВ, которое связано с тем, что возникающее на нерегулярности излучение направлено не в свободное пространство, а в область закритической работы между металлическими пластинами ПЭДВ. Вдобавок указанный расчет будет справедлив для случая с осевой и плоскостной симметриями облика конструкции, то есть при условиях отсутствия возможности модового преобразования.

Таким образом, излучение возможно только в волну между пластинами соответствующего типа. Так как в технике СВЧ в большинстве случаев используют основной тип волны, то для ПЭДВ волна основного типа (LSM $_{01}$) будет излучать только одну волну — ПлДВ (H $_{01}$). А так как эти волны являются ускоренными, то их коэффициент замедления можно определить по соотношению (5):

$$U_{\rm pp} = \sqrt{1 - \left(\frac{n}{2g'}\right)^2} < 1,$$
 (5)

где n — индекс волны, g' — относительная высота ПлДВ.

Таким образом, из формулы (2) можно получить условие излучения электромагнитных волн с изгиба:

$$\frac{r_0}{R} = \frac{U}{U_{\text{pp}}} > 1, \tag{6}$$

где $U_{\rm pp}$ — замедление волны ПлДВ, U — замедление электромагнитной волны на участке ПЭДВ, r_0 — радиус изгиба волновода, R — численный размер ПЭДВ.

Опираясь на выражение (6), возможно рассмотреть замедление в ПЭДВ через замедление участка ПлДВ. В этом случае замедление можно считать эквивалентным и с его помощью получить соотношения зависимости замедления ξ_{Θ} от высоты ПЭДВ. При этом можно получить зависимости для различных значений замедления планарного ДВ $U_{\rm pl}$.

Выражение эквивалентного замедления продемонстрировано через соотношение (7), а также семейство волн с разным эквивалентным замедлением показано на рис. 2:

$$U_{\Im}^{2} = \frac{U_{\rm pl}^{2} - \left(\frac{n}{2g'}\right)^{2}}{1 - \left(\frac{n}{2g'}\right)^{2}},\tag{7}$$

где n — индекс волны, g' — относительная высота ПлДВ, $U_{\rm pp}$ — замедление волны ПлДВ.

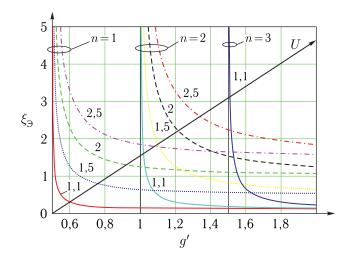


Рис. 2. Зависимости замедления ξ_{\ni} от высоты ПЭДВ при различных значениях замедления ПлДВ [7] Fig. 2. Dependences of the deceleration ξ_{\ni} on the NRD waveguide height at different values of the deceleration of the planar dielectric waveguide

Из графиков зависимости замедления ПЭДВ от относительной высоты стержня следует, что с ростом относительной высоты диэлектрического стержня замедление волны устремляется в определенное постоянное значение. Уменьшение замедления волны показывает, что излучение с изогнутого ПЭДВ близко к излучению эквивалентного планарного ДВ и оказывается всегда меньше, чем излучение с ПлДВ.

На основе полученных зависимостей можно дать качественную оценку потерь на топологическом повороте от значений формата стержня волновода. Для этого необходимо сравнить влияние изгиба разной резкости на радиационное затухание волны.

В работе [7] предложено выразить это через коэффициент изгиба $k_{\Gamma \rm M}$, выражение для которого имеет вид формулы (8).

$$k_{\Gamma \mathrm{H}} = \frac{R_{\mathrm{pl}}}{R_{\mathrm{\Theta}}} = \left(\frac{\xi_{\mathrm{\Theta}}}{\xi_{\mathrm{pl}}}\right)^{3/2},$$
 (8)

где $A=\frac{f_{\Pi\Pi \mbox{\tiny KP}}}{f}, \ f_{\Pi\Pi \mbox{\tiny KP}}$ — критическая частота распространения волны между $\Pi\Pi.$

Так, на рис. З приведены зависимости габаритного коэффициента по изгибам $k_{\Gamma \rm H}$ от $\xi_{\rm pl}$ при разных значениях отстройки по частоте от области за-

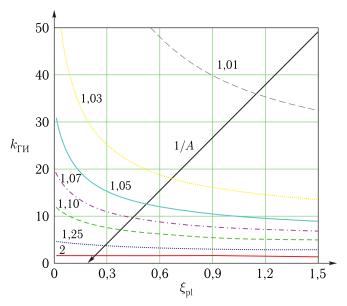


Рис. 3. Зависимости габаритного коэффициента по изгибам $k_{\Gamma \rm H}$ от $\xi_{\rm pl}$ при разных значениях отстройки по частоте от области запирания излучения [7]

Fig. 3. Dependences of the bending dimension coefficient $k_{\rm db}$ on $\xi_{\rm pl}$ at different values of frequency detuning on the radiation blockage region [7]

пирания излучения. Рассматривается случай, когда ПЭДВ будет работать не в режиме неизлучения и влияние замедления волны будет оказывать значительную роль на результирующие потери в узле.

При малых значениях отстройки рабочей частоты от режима неизлучения наблюдается увеличение роли коэффициента изгиба. При увеличении расстройки A на $20\,\%$ и более влияние изгиба можно считать пренебрежимо малым.

Таким образом, были получены рекомендации по выбору формата волновода и радиуса изгиба волноводного стержня.

Численный и физический (8) эксперименты

Переходя к практической части, необходимо отметить, что исследуемые форматы диэлектрического стержня волновода подбирались согласно рекомендациям, описанным выше. Для оценки эффективности направляющих структур и выявления особенностей проектирования устройств поворота

на топологическом изгибе был проведен анализ проходных характеристик и коэффициентов отражения узла. Экспериментальные данные были получены на базе физических макетов узлов при помощи векторного анализатора ZVA-50 и цифровых двойников исследуемых узлов.

На основе картин распространения электромагнитных полей был проведен анализ волновых процессов с целью оптимизации конструкции [8]. Влияние протекающих на исследуемом участке процессов оценивалось через матрицу рассеяния как для диссипативного устройства [9] по соотношению (9):

$$\Delta = 1 - |S_{12}|^2 - |S_{11}|^2, \tag{9}$$

где Δ — потери на участке поворота ПЭДВ, S_{12} — коэффициент передачи, S_{11} — коэффициент отражения.

Отметим, что в экспериментальной части работы использовались биконические возбудители для перехода с металлического волновода на ПЭДВ. Указанный тип перехода вносит ослабление передаточной характеристики на 2,5 дБ [10].

При этом в работе производится анализ поворотов стержня исключительно на 90°, что характерно для большинства практических применений [11]. Эксперименты проводились для диэлектрического стержня с $\varepsilon = 2,25$ и печатных волноводов, изготовленных из материала с диэлектрической проницаемостью в диапазоне от $\varepsilon=3,12$ до $\varepsilon=5,2$ при различных форматах. При построении семейств зависимостей преимущество было отдано формату $\Phi = 2,11$ и волноводам на базе полиэтилена, который, в отличие от печатных структур, является однородным и монолитным. Отметим, что печатные волноводы исследовались с целью анализа применимости металлодиэлектрических конструкций в системах космической связи и показали качественно схожие характеристики и зависимости в сравнении с аналогичными однородными конструкциями. При этом необходимо учитывать воздействия космоса на структуру диэлектрического материала и его деградацию [12]. Одним из решений выступает полная герметизация конструкции, так как при режиме неизлучения на расстоянии 5 длин волн поля пренебрежимо мало и его влияние на функциональный узел ничтожно.

Изгиб волноводного стержня в топологической плоскости

Экспериментально доказано, что при использовании радиусов изгиба более шести длин волн ослабление коэффициента передачи не превышает 5%. Уменьшение радиуса изгиба приводит к переотражениям и потерям. Однако их можно уменьшить при уменьшении формата диэлектрического стержня за счет перехода работы в режим неизлучения.

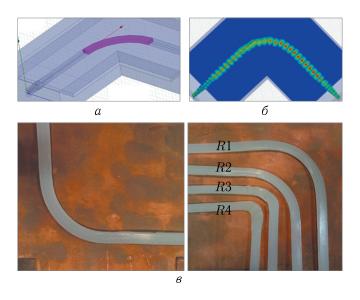


Рис. 4. Топологический изгиб: a — модель [7]; δ — картина интенсивности поля E; ϵ — физический макет исследуемых узлов поворота

Fig. 4. Topological bending: a - model [7]; $\delta - \text{image}$ of the field intensity E; s - physical mock-up of the rotation nodes under study

В результате экспериментальных исследований была получена зависимость усредненной проходной характеристики устройства поворота на ПЭДВ в зависимости от относительного радиуса изгиба R' (выражение (9)):

$$S_{12}(R') = -e^{-aR'-b} - c, (10)$$

где a, b, c — коэффициенты, зависящие от формата ПЭДВ.

Ключевую роль в выражении (10) играют коэффициенты a и b, которые описывают связь передаточной характеристики с форматом волноводного стержня и диэлектрической проницаемостью

материала. Коэффициент c является поправочным и компенсирует потери, вызванные методикой возбуждения волны.

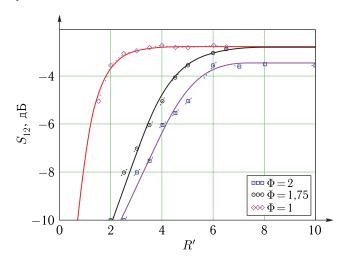


Рис. 5. Зависимость среднего ослабления проходной характеристики от приведенного радиуса топологического изгиба [7]: точки — физический эксперимент, линии — численное моделирование

Fig. 5. Dependence of the average attenuation of the transit characteristic on the mismatch radius of topological bending [7]: points — physical experiment, lines — numerical modeling

Так, при увеличении диэлектрической проницаемости потери будут иметь более резкую зависимость. Аналогичное поведение наблюдается с уменьшением формата Φ диэлектрического стержня, что отражено на рис. 5.

Изгиб волновода в нормальной плоскости

На практике в системах связи бывает необходим поворот направляющей структуры не только в топологической плоскости, но и в нормальной плоскости. Предложенная концепция может уменьшить габариты узла. При этом внимание отводится критериям электромагнитной совместимости и малых габаритных размеров. Для изготовления таких узлов предлагается использовать технологию 3D-печати или нагрева диэлектрика и поворота монолитного стержня.

Отметим, что на больших радиусах кривизны изгиба $R_{
m izg}\gg 10\lambda$ поворот можно рассматривать

как регулярный участок. Потери в узле при этом будут малы. Однако большой радиус изгиба приводит к увеличению габаритов узла. Поэтому были исследованы меньшие радиусы изгиба. Особый интерес отведен участку с изгибом в диапазоне $\lambda < R_{\rm izg} < 5\lambda$. Здесь потери в узле составляют от 2 до 4 дБ. При этом вклад в общие потери оказывает длина устройства поворота, а степень кривизны практически не влияет. Из-за отсутствия осевой симметрии на определенных частотах наблюдается модовое преобразование в высший тип. Так, волна основного типа LSM $_{01}$ может преобразоваться в волну LSM $_{21}$, что отражено на рис. 6.

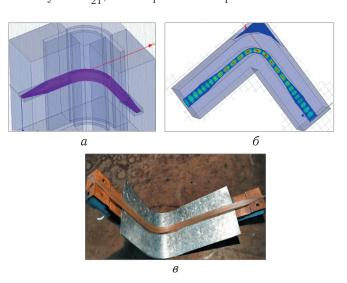


Рис. 6. Нормальный изгиб: a — модель; δ — картина интенсивности поля E; δ — физический макет исследуемых узлов поворота

Fig. 6. Normal bending: a- model; b- image of the field intensity E; b- physical mock-up of the rotation nodes under study

Важно отметить, что преобразование и обратное преобразование оказывается взаимным. При создании устройств нормального поворота целесообразно при уменьшении радиуса изгиба также уменьшать формат диэлектрического стержня.

Излом стержня волновода

Другой характерной конструкцией является излом диэлектрического стержня. При прохождении через него происходит резкое изменение параметров волны [13]. Поэтому излом целесообразно рассматривать как форму резкой нерегулярности. Изменение направления канализации электромагнитной волны осуществляется на площади малых размеров, что создает перспективы к применению конструкций на базе излома не только для устройств поворота, но и во вращающихся сочленениях, применяющихся в устройствах связи космических аппаратов.

Результаты, полученные при моделировании и отраженные на рис. 7, показали, что излом под 90° приводит к дополнительным излучениям с участка излома диэлектрического стержня. Полученные в рамках физического эксперимента S-параметры узла показывают непригодность конструкции для задач поворота в сравнении с аналогами.

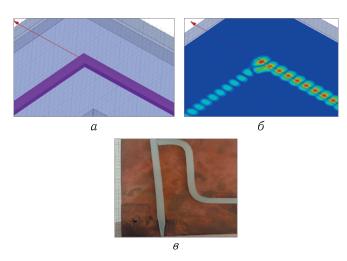


Рис. 7. Излом стержня: a — модель; δ — картина интенсивности поля E; ϵ — физический макет исследуемых узлов поворота

Fig. 7. Fracture of the rod: a- model; b- image of the field intensity E; b- physical mock-up of rotation nodes under study

Однако добавление в конструкцию направляющих структур позволит скомпенсировать излучение и значительно улучшает передаточную характеристику. В качестве такого объекта в работе рассмотрен металлический отражатель, поставленный под углом 45° в область стыковки диэлектрических стержней ПЭДВ. Такая конструкция показана на рис. 8.

Примененное решение позволяет снизить потери на отражении [14] и возвращает часть энергии вытекания электромагнитной волны с узла обратно в систему, выступая экраном. При этом эксперимен-

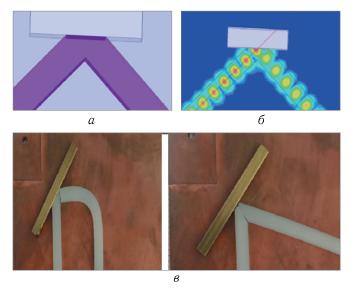


Рис. 8. Излом стержня с отражающим элементом: a — модель; δ — картина интенсивности поля E; ϵ — физический макет исследуемых узлов поворота

Fig. 8. Fracture of a rod with a reflecting element: a- model; $\delta-$ image of the field intensity E; s- physical mock-up of the rotation nodes under study

тально получено, что длина экранирующей металлической пластины должна составлять не менее 4λ и может быть уменьшена с увеличением замедления диэлектрического стержня, что отражено на рис. 9.

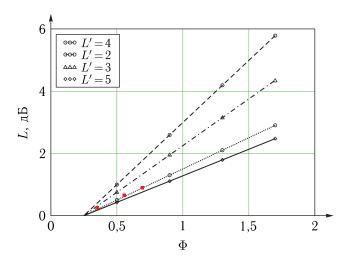


Рис. 9. Зависимость ослабления на изломе с отражателем длиной L' от формата диэлектрического стержня: точки — физический эксперимент, линии — численное моделирование

Fig. 9. Dependence of the attenuation at the fracture with the reflector of the length L' on the dielectric rod format: points — physical experiment, lines — numerical modeling

Также снижения потерь можно добиться путем уменьшения формата диэлектрического стержня, что характерно для ПЭДВ в режиме неизлучения. Характерным отличием конструкции стало то, что в частотной области передаточная характеристика узла S_{12} имеет изрезанный характер, в рамках которого наблюдаются участки со стабильно малыми потерями. Их диапазон достигает до $600~\mathrm{MF}$ ц, что может быть использовано в системах связи.

Результаты

- 1. В аналитической части работы была рассмотрена физика явлений, которая в практической части реализовывалась в конструкциях функциональных устройств на топологических изгибах.
- 2. В результате исследования влияния топологических изгибов на протекание электромагнитной волны было обнаружено, что при увеличении формата появляются дополнительные переотражения и уровень потерь возрастает.
- 3. При изломе 90° без использования отражателя на участке излома наблюдаются большие потери, что делает такую конструкцию малопригодной для реализации устройств.
- 4. При изломе 90° с использованием отражающего элемента эксперимент показал лучшую канализацию волны. Меньшие потери были получены за счет компенсации излучения и снижения уровня отражения от резкой нерегулярности.
- 5. Опираясь на результаты работы, авторы считают, что целесообразно использовать излом с отражательным элементом, размеры которого могут варьироваться от 2 и более длин волн и подстраиваться металлическими клиньями.

Заключение

Проведенный в работе анализ конструкций современных устройств поворота на базе ПЭДВ показал перспективность использования в низкочастотной части миллиметрового диапазона конструкций на основе плавных и резких нерегулярностей стержня ПЭДВ. При этом для повышения эффективности работы и характеристик узла с резкими нерегулярностями предлагается добавлять в конструк-

цию сочетания металлических и диэлектрических направленных структур. Для плавных нерегулярностей особый интерес представляет использование дополнительных диэлектрических конструкций и их форм. В топологической плоскости поворота одним из ключевых факторов является формат волновода, при уменьшении которого возможно снизить уровень переотражений и, как следствие, потерь. С уменьшением формата стержня число переотражений возрастает и потери на излучение уменьшаются. Волновод переходит в режим неизлучения, и его характеристики слабо зависят от радиуса изгиба стержня, что позволяет получить стабильную частотную характеристику при изгибе поворота, равном или меньше 6λ . Полученные рекомендации могут быть использованы для проектирования узлов с использованием конструкций поворота на базе ПЭДВ. Также рассмотренные принципы и волновые процессы демонстрируют базовые механизмы для оптимизации конструкций при помощи новых типов обликов узлов поворота и изгиба.

Список литературы

- Vytovtov K. et al. Local Radar Navigation System for Tethered High-Altitude Platforms / 2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). IEEE, 2023. P. 1–5.
- 2. Bogdanovich B. Y., Buyanov G. O., Nesterovich A. V. Calculation of a system for forming a bremsstrah-lung beam in discretely falling magnetic field // Atomic Energy, 2022, vol. 131, № 6. P. 348–353.
- 3. *Wu K.E.*, *Bozzi M.*, *Fonseca N.J.G.* Substrate integrated transmission lines: Review and applications // IEEE Journal of Microwaves, 2021, vol. 1, № 1. P. 345–363.
- 4. *Rahman T. et al.* Comparison of four in vitro test methods to assess nucleus pulposus replacement device expulsion risk // JOR spine, 2024, vol. 7, № 2. P. 1332.
- 5. Permyakov V.A., Mikhailov M.S., Malevich E.S. Analysis of propagation of electromagnetic waves in difficult conditions by the parabolic equation method // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, vol. 67, № 4. P. 2167–2175.
- 6. Krutskikh V. V., Ushkov A. N., Chernikov A. I., Arikat H. and Mirzoyan A. E. Evaluation of the Study of Dielectric and Metal-Dielectric Waveguides

- Using Digital Twins Under Modern Conditions. 2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Astrakhan, Russian Federation, 2023, p. 1–7.
- 7. Крутских В.В., Мирзоян А.Э., Ушков А.Н. Устройства поворота на полуэкранированных диэлектрических волноводах / Наука России: Цели и задачи. Сб. научн. трудов XXVI Международной научн. конференции. Екатеринбург, 2021. С. 125–133.
- 8. *Kazama K. et al.* Study on single-mode transmission in non-radiative dielectric waveguide // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 2024, vol. 37, № 2. C. 3235.
- 9. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ: Уч. для радиотехнических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
- 10. *Крутских В.В.* Функциональные узлы на полуэкранированных диэлектрических волноводах. Автореф. дисс.... к. т. н. по спец. 05.12.04. М., 2005.
- 11. *Hieda N. et al.* Topology Optimization of NRD Guide Devices Using Covariance Matrix Adaptation Evolu-

- tion Strategy / 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). IEEE, 2022. P. 387–389.
- 12. Панасюк М.И., Новиков Л.С. Модель космоса: научно-информационное издание: В 2 т. / Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. Т. 1: Физические условия в космическом пространстве. М.: КДУ, 2007. 872 с.
- 13. Sawada H., Yoneyama T., Kuroki F. A novel design technique of NRD guide bend // Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics), 2005, vol. 88, № 11. C. 37–43.
- 14. *Крутских В.В. и др.* Широкополосный металлодиэлектрический волноводный тракт с малыми потерями КВЧ-диапазона // Радиотехника, 2021, т. 8, № 3. С. 89–98.

Дата поступления рукописи в редакцию 16.01.2025 Дата принятия рукописи в печать 13.05.2025