

Влияние нерегулярностей на металлодиэлектрический экранированный волновод с малыми потерями для диапазона частот 90–100 ГГц

В.В. Крутских, А.Н. Ушков, Х. Арикат, Д.О. Завитаев, А.Э. Мирзоян

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва,
ул. Красноказарменная, 14

Аннотация – Настоящая статья посвящена исследованию волноведущих металлодиэлектрических структур в диапазоне частот 90–100 ГГц, обладающих малыми потерями до 0,05 дБ/м. В работе рассмотрено влияние резких нерегулярностей на участок регулярной линии, что приводит к изменению параметров металлодиэлектрического экранированного волноводного тракта. С практической точки зрения возникновение нерегулярностей в волноводе неизбежно и оказывает негативное воздействие на прохождение волны. Поэтому в ходе работы были рассмотрены часто встречающиеся в современных устройствах виды нерегулярностей, такие как зазор и поворот плоскости поляризации двух экранированных диэлектрических волноводов на стыке. В результате анализа погонных потерь, вызванных зазором диэлектрического стержня и поворотом плоскости поляризации, были получены аппроксимированные характеристики передаточной функции волноводной линии с указанными нерегулярностями.

Ключевые слова – нерегулярность; экранированный диэлектрический волновод; малые потери; инженерный расчет; регулярные линии; стык.

Введение

В современных радиотехнических устройствах, работающих в КВЧ-диапазоне, активно исследуется вопрос передачи сигнала от генератора к излучающему устройству или от антенны к приемнику. В диапазоне 90–100 ГГц одним из решений такой задачи является применение диэлектрического волновода. Такая линия передачи обладает малыми погонными потерями, менее 1 дБ/м [1], но при этом имеет все недостатки открытой линии. Задачи экранированного диэлектрического волновода (ЭДВ) решаются с 70-х годов прошлого века и отражены в литературе [2; 3]. При этом обычно рассматривается задача анализа влияния различного рода нерегулярностей на протекание электромагнитных волн в ЭДВ с полосой, эквивалентной металлическому волноводу в односигнальном режиме. Данная работа посвящена исследованиям нерегулярностей в широкополосных ЭДВ в диапазоне 90–100 ГГц.

Базовой задачей исследования экранированного ДВ в указанном диапазоне являлась передача двух видов сигналов на расстояние нескольких десятков метров, отраженная в работах [4; 5], где один из сигналов, дуплексный – это сигнал интерферометра, а второй – симплексный, широкополосный сигнал для радиометра.

Создание регулярной линии передачи длиной в несколько метров создает технологические труд-

ности, поэтому стыковка участков ЭДВ неизбежна. И в этом случае особый интерес представляют резкие нерегулярности, которые вызывают сильное изменение параметров волноводной структуры на участке относительно малой протяженности. Например, излом или стык двух участков волновода со смещениями, зазор или перелом. Такие случаи широко распространены на практике и оказывают негативное воздействие [6].

Нетривиальной проблемой изучения данного типа нерегулярностей является сложность их аналитического описания. Поэтому исследуемые в работе волноведущие конструкции рассчитываются и моделируются при помощи приближенных методов расчета, опирающихся на методы, используемые в пакетах симуляции СВЧ-структур [7]. Численный и физический эксперименты были взяты за основу исследования.

Конструкция волноводного тракта и особенность прохождения через него электромагнитных волн

Согласно главной цели исследования, была выбрана конструкция волноведущего тракта, изображенная на рис. 1 и наиболее подробно рассмотренная в работах [1; 2]. Поэтому не будем углубляться в особенности конструкции, а обсудим лишь методы оценки потерь.

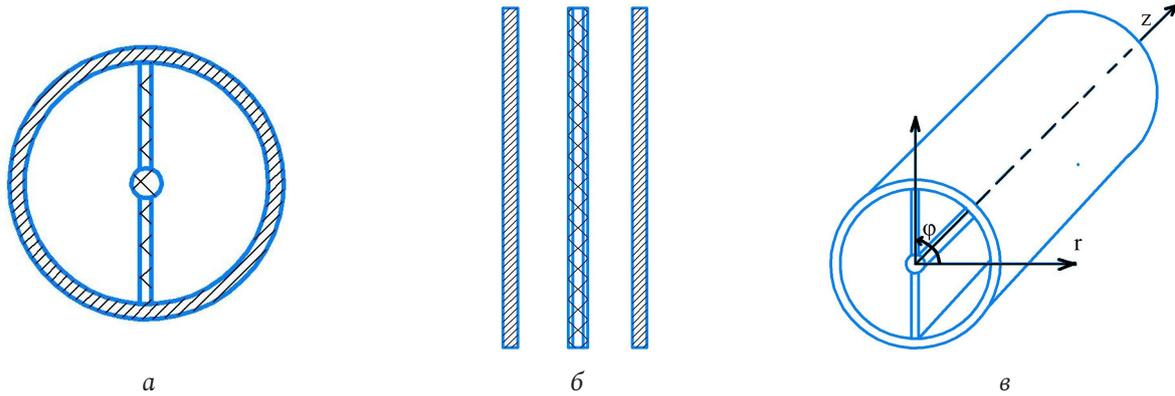


Рис. 1. Базовая конструкция волноведущего тракта: а – поперечное сечение волновода; б – продольное сечение волновода; в – волновод в цилиндрической системе координат
 Fig. 1. The basic design of the waveguide: a – the cross section of the waveguide; b – the longitudinal section of the waveguide; c – the waveguide in a cylindrical coordinate system

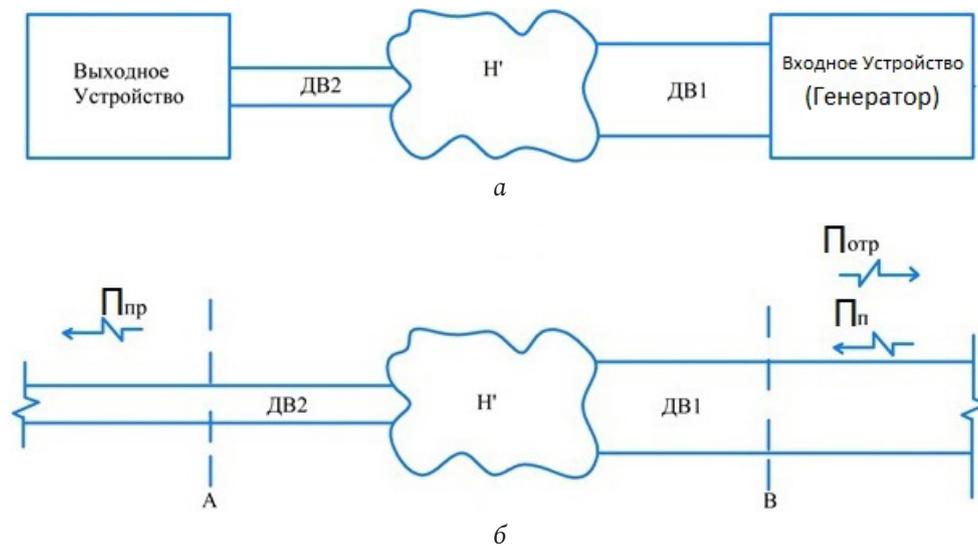


Рис. 2. Модель волноведущего тракта: а – регулярная линия с нерегулярным участком; б – протекание электромагнитных волн через нерегулярный участок
 Fig. 2. Model of the waveguide path: a – regular line with an irregular path; b – the flow of electromagnetic waves through an irregular section

Проводя грубую оценку, потери ЭДВ можно разбить на две составляющих по характеру происхождения: металлические и диэлектрические. Тогда суммарные потери регулярного участка записываются в виде

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{мет}} + \Delta_{\text{диэл}}, \quad (1)$$

где диэлектрические потери также имеют составной характер

$$\Delta_{\text{диэл}} = \Delta_{\text{ст}} + \Delta_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где $\Delta_{\text{ст}}$ – потери в стержне; $\Delta_{\text{пр}}$ – потери в пространстве между экраном и стержнем.

Из [8] известно, что погонные диэлектрические потери для материалов с $\varepsilon < 3$, таких как фторопласт, полиэтилен, воздух, много меньше, чем в металлических конструкциях. Поэтому для оценки диаметра экрана было принято решение опи-

раться только на потери в металле, оцениваемые по общеизвестной формуле, приведенной в [9]:

$$\Delta_{\text{пог}} \approx 8,686 \cdot h'' [\text{дБ/м}], \quad (3)$$

где h'' – коэффициент затухания для конкретных формы сечения металлической трубы и типа распространяющейся в нем волны.

Диэлектрические потери, имеющие преимущественное место в стержне конструкции, рассчитывались по соотношениям для волны основного типа в диэлектрической пластине и окружающем ее пространстве, отмеченным в книге [10].

Затухание энергии волны внутри экрана соответственно имеет следующий вид:

$$\alpha_z = \sum_{i=\varepsilon, \mu} \sum_{k=1,2} \alpha_{k,i} K_{i,k}, \quad (4)$$

где $K_{i,k}$ – структурный коэффициент затухания; $k = \varepsilon, \mu$ – природа затуханий, связанная с диэлек-

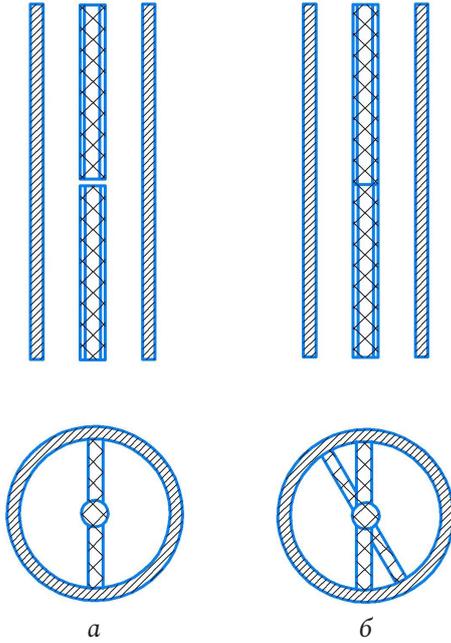


Рис. 3. Исследуемые в работе нерегулярности: *a* – зазор в волноведущем тракте; *b* – поворот плоскости поляризации
Fig. 3. Irregularities investigated in the study: *a* – gap in the waveguide path; *b* – rotation of the polarization plane

трическими и магнитными потерями; $i = 1, 2$ – внутренняя и внешняя среда распространения волны; коэффициент затухания однородной плоской волны в среде с параметрами принимает вид

$$\alpha_{k,i} = \frac{\pi \sqrt{\varepsilon_i \mu_i} \operatorname{tg} \delta_{k,i}}{\lambda}, \quad (5)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс диэлектрических потерь.

Методы исследования воздействия нерегулярности

Для анализа влияния резкой нерегулярности на протекание электромагнитной волны в волноведущем тракте используется представление в виде участка регулярной линии с нерегулярным узлом или несколькими различными регулярными участками и нерегулярного узла, рис. 2.

Обычно ставится задача нахождения отраженной и прошедшей волны того же типа, что и падающая. Поэтому важными компонентами решения задачи будут значения параметров прямой и отраженной волн. При некоторых условиях могут возникнуть и потери на модовое преобразование. Для их определения в работе применены матричные методы описания волноводной линии, примененные в [11]. Оптимальным из них оказался расчет матрицы рассеяния S .

В связи с тем что на практике исследуемые волноводные линии передачи используются в одно-

волновом режиме, в данной работе не производится численный расчет процессов преобразования падающей волны в другие типы волн.

Базой исследований являются наиболее важные и существенные нерегулярности для круглых металлодиэлектрических волноводов, рис. 3, следующих типов:

- зазор в волноведущем тракте;
- поворот плоскости поляризации.

Стоит оговориться, что указанные типы неоднородностей в реальных условиях могут встречаться одновременно на одном и том же участке. При этом в работе они специально рассмотрены независимо друг от друга, что позволяет провести оценку влияния отдельного типа нерегулярности на участок регулярной линии.

Таким образом, следует, что нас больше всего будут интересовать параметры S_{12} и S_{11} , которые характеризуют отношение энергий прошедшей и отраженной волн. Воспользовавшись связью коэффициента передачи и потерь, рассмотренной в работе [12], получим выражение

$$\Delta = 1 - |S_{12}|, \quad (6)$$

где передаточный коэффициент представлен в виде

$$S_{12}^2 = \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{п}}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{п}}$ – мощность волны на входе линии; $P_{\text{пр}}$ – мощность волны на выходе линии.

Таким образом, экспериментальное исследование S_{12} позволяет дать оценку потерь, вносимых за счет нерегулярности определенного типа. Сравнение проходной характеристики регулярного тракта, рис. 4, с трактом обладающим нерегулярностью дает возможность анализа природы возникновения потерь в линии.

Нерегулярность типа «зазор в волноведущем тракте»

Нерегулярность типа «зазор волноводного тракта» и распределение поля в нем отражены на рис. 5. При малых зазорах наблюдается преобразование волны в высшие моды. Также заметна структура распространяющейся волны. Энергия поля преимущественно скапливается в цилиндрическом стержне и незначительно прилегающих пластинах.

Зависимость передаточной характеристики показана на рис. 6. Даже при малых величинах зазора она приобретает изрезанный характер, что связа-

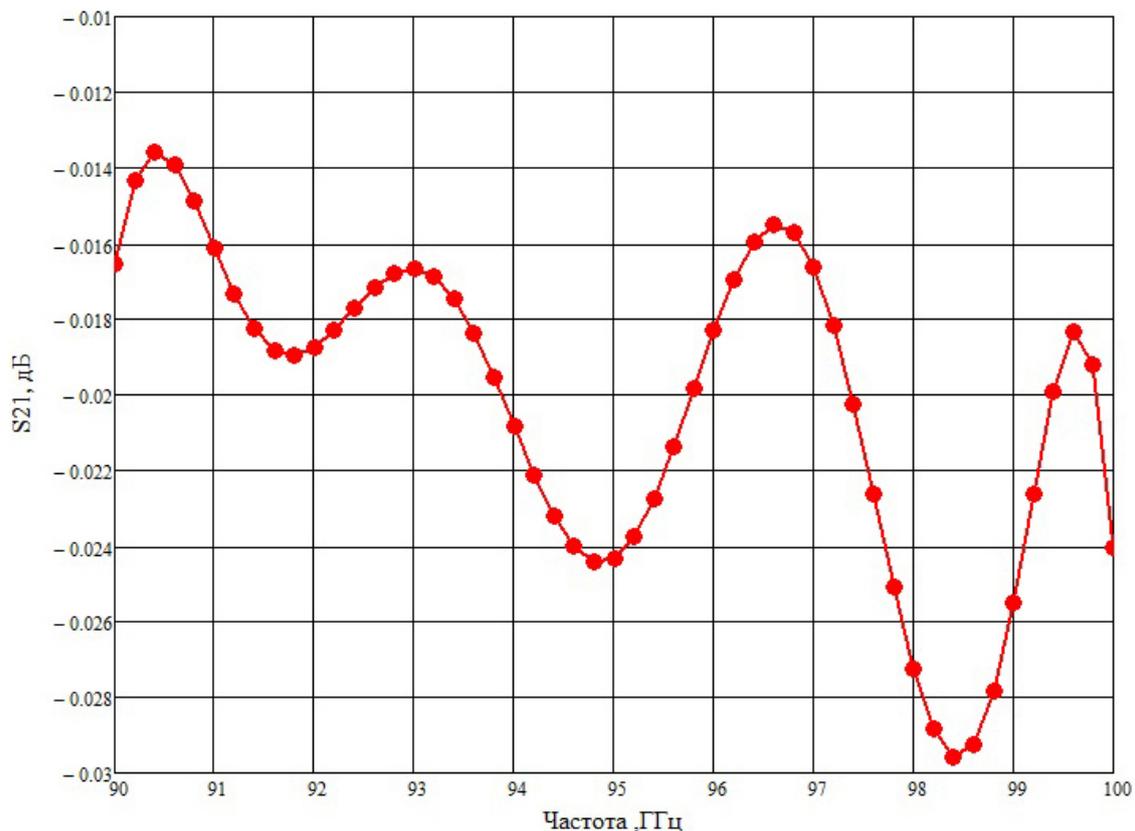


Рис. 4. Передаточная характеристика исследуемой волноводной линии без нерегулярностей
 Fig. 4. Transfer characteristic of the waveguide line under study without irregularities

но с возникающими переотражениями падающей волны от нерегулярности. Вследствие этого порожденная нерегулярностью волна в большинстве случаев оказывается в противофазе по отношению к падающей и при интерференции оказывает негативное воздействие на передаточную характеристику. Увеличение зазора также приводит к появлению большего числа провалов, максимумы которых достигают $-11,5$ дБ.

На рис. 7 отмечена характеристика S_{12} волноводного тракта. Из графика следует, что при величине зазора до $0,1\lambda$ характеристика может быть описана выражением

$$S_{12}(h) = ah + b, \quad (8)$$

где коэффициент $a = -2$, а коэффициент $b = -0,02$.

При увеличении зазора характеристика становится нестабильной и колеблется в диапазоне от $-0,5$ до -4 дБ. В этом случае полученное ранее выражение является аппроксимацией экспериментальных значений S_{12} .

Нерегулярность типа «поворот плоскости поляризации»

Нерегулярность типа «поворот плоскости поляризации» представлена на рис. 8. Из распреде-

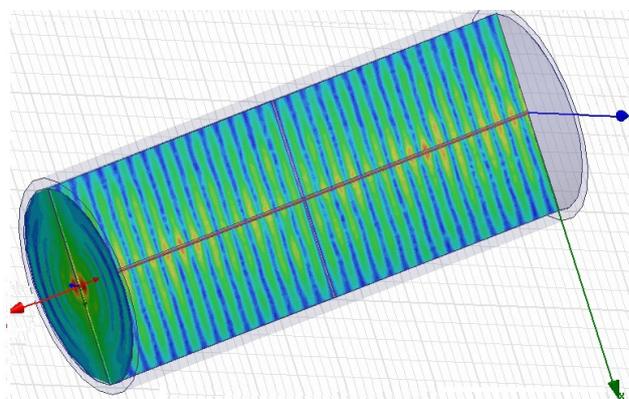


Рис. 5. Металлодиэлектрический волноводный тракт с нерегулярностью типа «зазор»
 Fig. 5. Metal-dielectric waveguide path with a gap-type irregularity

ления поля следует, что при малых отклонениях возникают высшие типы колебаний и характерное разрушение структуры поля. Следствием этого является сильное ослабление энергии поля в тракте до 35 дБ в критических случаях. Среднее ослабление передаточной характеристики составляет 15 дБ, что подтверждает высокие требования к поляризационной устойчивости устройств СВЧ.

Передаточная характеристика S_{12} , представленная на рис. 9, нестабильна и имеет колебательный характер.

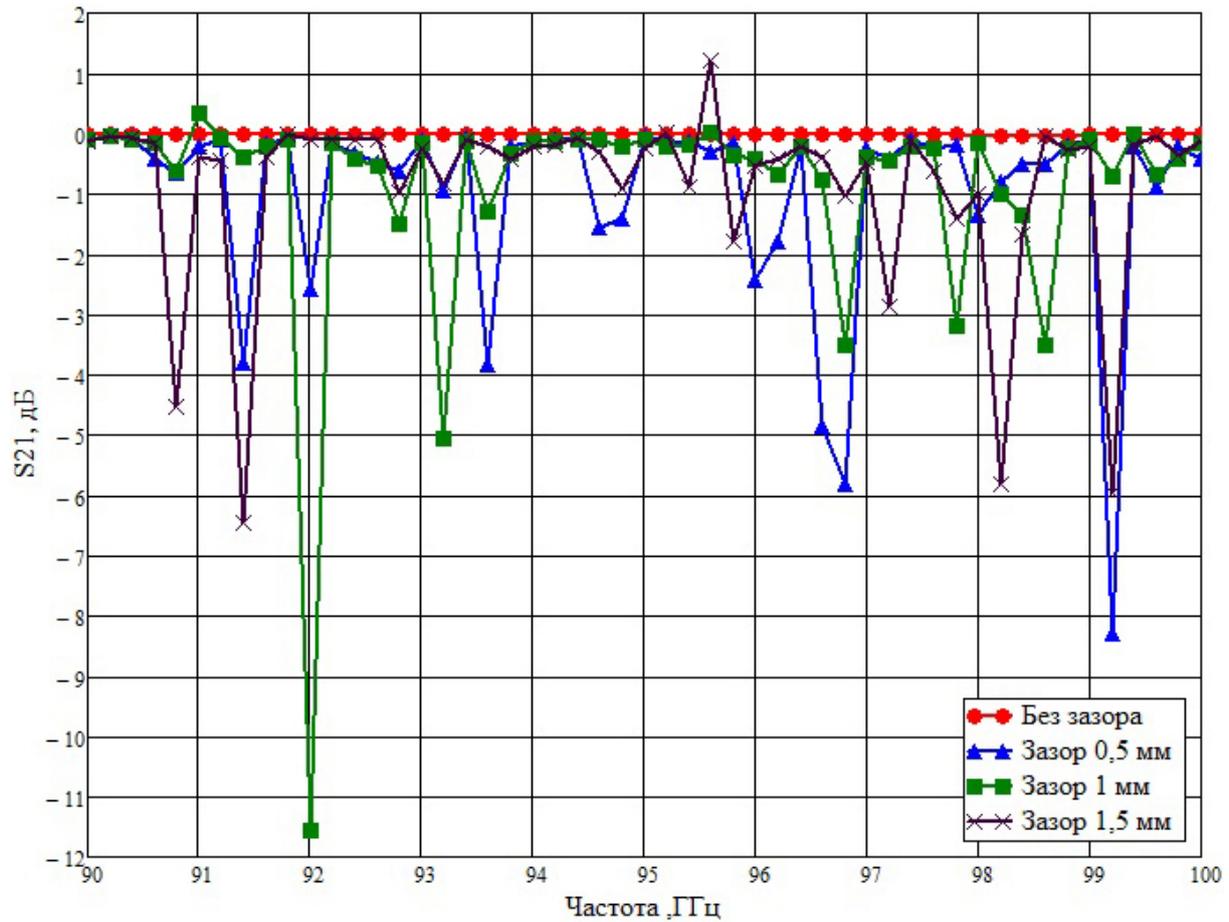


Рис. 6. Передаточная характеристика металлодиэлектрического волноводного тракта с нерегулярностью типа «зазор»
Fig. 6. Transfer characteristic of a metal-dielectric waveguide path with a gap-type irregularity

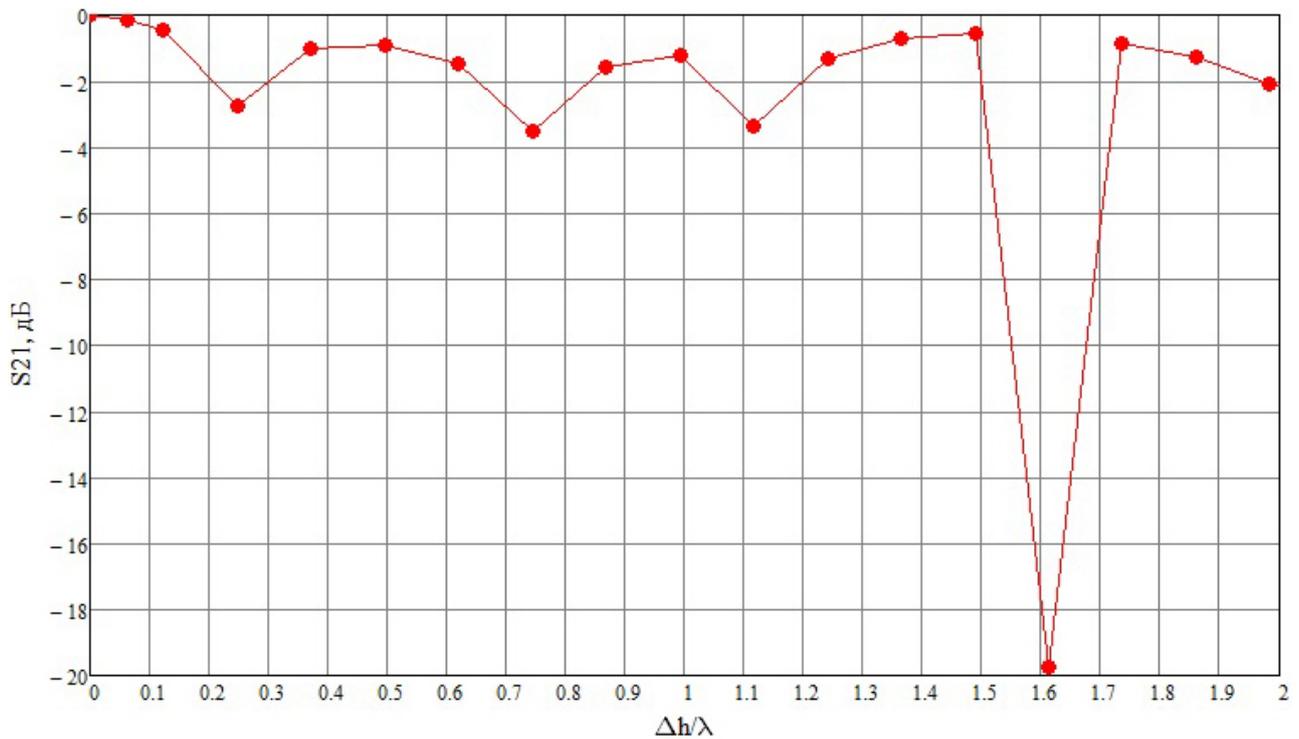


Рис. 7. Зависимость передаточной характеристики от относительной величины зазора
Fig. 7. Dependence of the transfer characteristic on the relative size of the gap

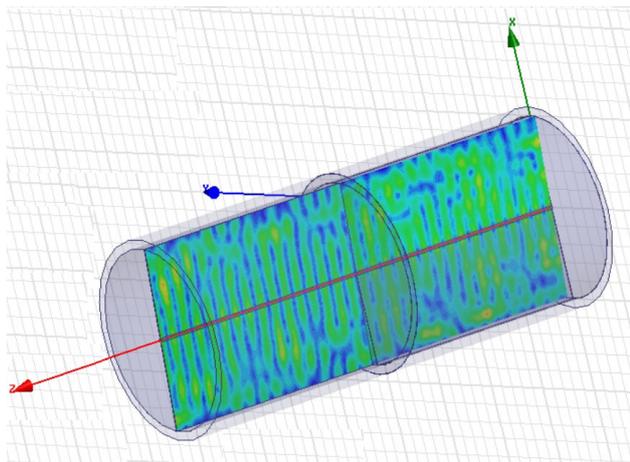


Рис. 8. Металлодиэлектрический волноводный тракт с нерегулярностью в виде поворота оси стержня
 Fig. 8. Metal-dielectric waveguide path with irregularity in the form of rotation of the axis of the rod

Зависимость передаточной характеристики от угла поворота плоскости показана на рис. 10 и имеет выраженную экспоненциальную зависимость. В диапазоне поворота $\Delta\varphi$ от 0° до 3° характеристика может быть описана выражением

$$S_{12}(\varphi) = ae^{\varphi b} + c, \quad (9)$$

где коэффициенты $a = -7,7 \cdot 10^{-3}$, $b = 1,92$ и $c = -5,2 \cdot 10^{-3}$.

В сравнении с ситуацией с зазором данный случай обладает большими потерями в частотной области.

Результаты

1. В ходе проделанной работы были выявлены основные физические принципы возникновения

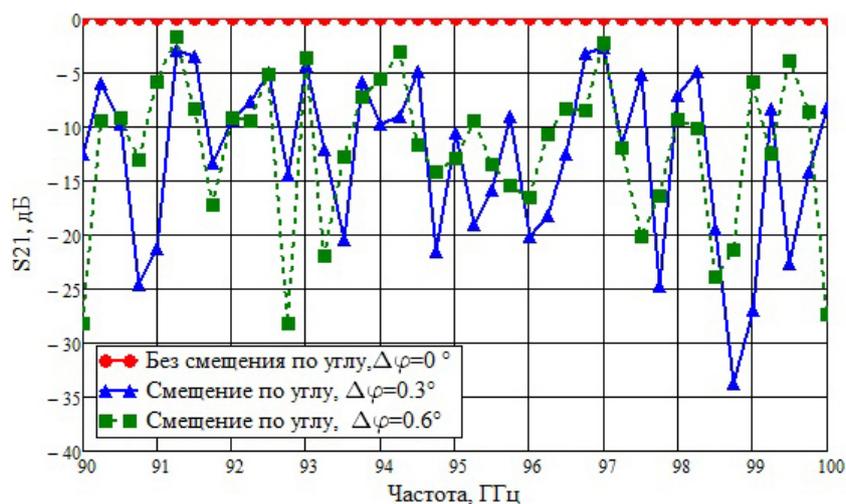


Рис. 9. Передаточная характеристика металлодиэлектрического волноводного тракта с нерегулярностью типа «поворот плоскости поляризации»
 Fig. 9. Transfer characteristic of a metal-dielectric waveguide path with an irregularity of the type of rotation of the polarization plane

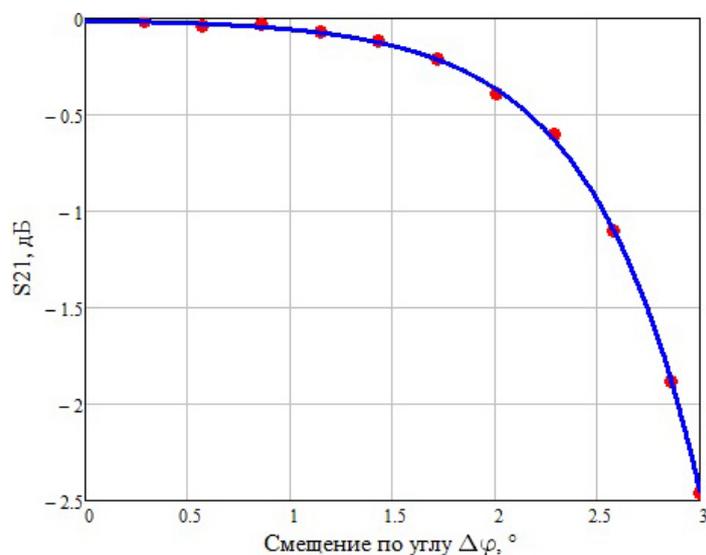


Рис. 10. Зависимость передаточной характеристики от угла поворота плоскости
 Fig. 10. Dependence of the transfer characteristic on the angle of rotation of the plane

потерь в регулярной металлодиэлектрической волноводной линии передачи, большинство из которых связано с интерференцией падающих и отраженных от нерегулярности волн.

2. В результате исследования было выявлено, что характер зависимостей S_{12} от ширины зазора носит строго линейный характер в пределах от 0 до $0,1\lambda$ и близкий к линейному вне этого участка.

3. В результате исследования обнаружилось, что наибольшие потери, до 35 дБ, наблюдаются при повороте плоскости поляризации, поэтому для создания регулярной линии с малыми потерями необходима высокая точность изготовления волноводного тракта.

4. Для нерегулярностей всех рассматриваемых типов характерны потери на преобразование моды и возникновение неустойчивости передаточной характеристики, вызванное фазовым распределением волн в области нерегулярности.

Заключение

Диэлектрические волноводы ограничено применяются в радиолокационных системах, а также

устройствах связи. Задача канализации энергии в КВЧ-диапазоне от генератора к передающей части и от антенной системы к приемнику является наиболее перспективной. При проектировании волноводных линий особое внимание уделяется точности изготовления функционального узла. Отклонения от заданной конструкции и дефекты при стыковке оказывают сильное влияние на работу устройства. В этой статье предложена новая информация о воздействии нерегулярности на характеристики экранированного диэлектрического волновода. В работе рассмотрены нерегулярности в виде зазора и поворота плоскости поляризации, а также проведена оценка физического происхождения потерь. Опираясь на экспериментальные данные и результаты моделирования, авторы получили приближенные зависимости передаточной функции от величины нерегулярности. Результаты этой работы позволят оценить потери влияния величины нерегулярности, а также выдвигают требования к точности разрабатываемых металлодиэлектрических конструкций.

Список литературы

1. Взятых В.Ф. Диэлектрические волноводы. М.: Сов. радио, 1970. 216 с.
2. Агаян Ю.М. Теоретическое и экспериментальное исследование резких нерегулярностей в диэлектрических волноводах: дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 163 с.
3. Patent US6445355B2. Non-radiative hybrid dielectric line transition and apparatus incorporating the same / N. Kitamori, I. Takakuwa. App. 28.12.2000, publ. 03.09.2002.
4. Ichinose K., Kuroki F. A consideration on velocity detection using NRD guide pulse radar at 60 GHz // 2011 China-Japan Joint Microwave Conference. 2011. P. 1–4.
5. Reduction of range finding error in NRD guide pulse radar system at 60 GHz / F. Kuroki [et al.] // 2009 European Radar Conference (EuRAD). 2009. P. 266–269.
6. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970. 440 с.
7. Банков С.Е., Гутцайт Э.М., Курушин А.А. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS. М.: ООО «Оркада», 2012. 250 с.
8. Крутских В.В. Функциональные узлы на полужанрированных диэлектрических волноводах: дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 207 с.
9. Широкополосный металлодиэлектрический волноводный тракт с малыми потерями КВЧ-диапазона / В.В. Крутских [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8, № 3. С. 89–98.
10. Металлодиэлектрический экранированный волновод с малыми потерями для диапазона частот 90–100 ГГц / В.В. Крутских [и др.] // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 2 (37). С. 7–14.
11. Орехов Ю.И. Преобразователи поляризации на диэлектрических волноводах: дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 174 с.
12. Al Attari J.A. Innovative millimeter-wave components based on mixed substrate integrated dielectric-metallic waveguides: Thèse de doctorat. Montréal, 2013. 119 p. URL: <https://publications.polymtl.ca/1165/>

References

1. Vzyatyshev V.F. *Dielectric Waveguides*. Moscow: Sov. radio, 1970, 216 p. (In Russ.)
2. Agayan Yu.M. Theoretical and experimental study of sharp irregularities in dielectric waveguides: dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 1974, 163 p. (In Russ.)
3. Patent US6445355B2. Non-radiative hybrid dielectric line transition and apparatus incorporating the same / N. Kitamori, I. Takakuwa. App. 28.12.2000, publ. 03.09.2002.
4. Ichinose K., Kuroki F. A consideration on velocity detection using NRD guide pulse radar at 60 GHz. *2011 China-Japan Joint Microwave Conference*, 2011, pp. 1–4.

5. Kuroki F. et al. Reduction of range finding error in NRD guide pulse radar system at 60 GHz. *2009 European Radar Conference (EuRAD)*, 2009, pp. 266–269.
6. Lebedev I.V. *Technique and Microwave Devices*. Moscow: Vysshaya shkola, 1970, 440 p. (In Russ.)
7. Bankov S.E., Guttsayt E.M., Kurushin A.A. *Solving Optical and Microwave Problems Using HFSS*. Moscow: OOO «Orkada», 2012, 250 p. (In Russ.)
8. Krutskikh V.V. Functional nodes on semi-shielded dielectric waveguides: dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 2005, 207 p.
9. Krutskikh V.V. et al. Broadband metal-dielectric waveguide path with low losses in the EHF range. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2021, vol. 8, no. 3, pp. 89–98. (In Russ.)
10. Krutskikh V.V. et al. Low-loss shielded metal-dielectric waveguide for the frequency range 90–100 GHz // *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antey»*, 2021, no. 2 (37), pp. 7–14. (In Russ.)
11. Orekhov Yu.I. Polarization converters on dielectric waveguides: dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 1975, 174 p.
12. Al Attari J.A. Innovative millimeter-wave components based on mixed substrate integrated dielectric-metallic waveguides: Thèse de doctorat. Montréal, 2013. 119 p. URL: <https://publications.polymtl.ca/1165/>

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2022, vol. 25, no. 3, pp. 58–66

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.3.58-66

Received 13 March 2022
Accepted 14 April 2022

Irregularities in a metal-dielectric shielded waveguide with low losses for the frequency range 90–100 GHz

Vladislav V. Krutskikh, Andrey N. Ushkov, Husam Ariqat,
Denis O. Zavitaev, Artavazd E. Mirzoyan

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
14, Krasnokazarmennaya Street,
Moscow, 111250, Russia

Abstract – This article is devoted to the study of waveguide metal-dielectric structures in the frequency range of 90–100 GHz with low losses up to 0,05 dB/m. The paper considers the effect of sharp irregularities on a section of a regular line, which leads to a change in the parameters of a metal-dielectric closed waveguide path. In practice, irregularities have a negative impact on the transfer characteristic of the waveguide. Therefore, the types of irregularities often found in modern devices were investigated. As a result of the analysis of the losses caused by the rupture of the dielectric rod and the rotation of the polarization plane, the approximated characteristics of the transfer function of the waveguide line with irregularity were obtained.

Keywords – irregularity; shielded dielectric waveguide; small losses; engineering calculation; regular lines; joint.

Информация об авторах

Крутских Владислав Викторович, 1979 г. р. (г. Тамбов), кандидат технических наук, доцент кафедры основ радиотехники Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия. Окончил МЭИ (ТУ) в 2002 г. Защитил диссертацию кандидата технических наук в 2005 г. Имеет более 80 научных работ.

Область научных интересов: диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы и узлы на их базе, датчики и системы измерений, измерительные комплексы систем интернета вещей.

E-mail: KrutskichVV@mpei.ru

Ушков Андрей Николаевич, 1999 г. р. (г. Москва), студент Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия. Имеет научные труды в области полужанрированных диэлектрических волноводов.

Область научных интересов: диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы и узлы на их базе, датчики и системы измерений.

E-mail: UshkovAN@mpei.ru

Арикат Хусам, 1971 г. р. (г. Зарка, Иордания), аспирант Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия. Окончил Московский технический университет связи и информатики со степенью магистра технических наук в области радиовещания, радиосвязи и телевидения в 1995 г. Имеет множество исследовательских работ в области синхронизации OFDM и радиостатистики.

Область научных интересов: диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы и узлы на их базе, датчики и системы измерений, измерительные комплексы систем интернета вещей.

E-mail: ArikatAK@mpei.ru

Завитаев Денис Олегович, 2000 г. р. (г. Москва), студент Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия.

Область научных интересов: диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы и узлы на их базе, датчики и системы измерений.

E-mail: ZavitayevDO@mpei.ru

Мирзоян Артавазд Эдуардович, 1990 г. р. (г. Москва), аспирант Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия. Окончил НИУ МЭИ, защитив магистерскую диссертацию в 2013 г. Имеет научные труды в области полужащищенных диэлектрических волноводов.

Область научных интересов: диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы и узлы на их базе, датчики и системы измерений, измерительные комплексы систем интернета вещей.

E-mail: MirzoyanAE@mpei.ru

Information about the Authors

Vladislav V. Krutskikh, born in 1979 (Tambov), Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Fundamentals of Radio Engineering of the V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia. Graduated from MPEI (TU) in 2002. Defended his thesis of Candidate of Technical Sciences in 2005. He has more than 80 scientific papers.

Research interests: dielectric and metal-dielectric waveguides and nodes based on them, sensors and measurement systems, measuring complexes of Internet of things systems.

E-mail: KrutskichVV@mpei.ru

Andrey N. Ushkov, born in 1999 (Moscow), student of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia. He has scientific works in the field of semi-shielded dielectric waveguides.

Research interests: dielectric and metal-dielectric waveguides and assemblies based on them, sensors and measurement systems.

E-mail: UshkovAN@mpei.ru

Husam Ariqat, born in 1971 (Zarqa, Jordan), postgraduate student of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia. Graduated from Moscow technical university of communication and informatics with an engineering degree of Ms of Science in Radio Broadcasting, Radio Communication & Television in 1995. He had multiple research works in OFDM synchronization & Radio statistics.

Research interests: dielectric and metal-dielectric waveguides and nodes, advance measurements of sensor systems for IOT applications.

E-mail: ArikatAK@mpei.ru

Denis O. Zavitaev, born in 2000 (Moscow), student of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia.

Research interests: dielectric and metal-dielectric waveguides and assemblies based on them, sensors and measurement systems.

E-mail: ZavitayevDO@mpei.ru

Artavazd E. Mirzoyan, born in 1990 (Moscow), postgraduate student of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia. He graduated from the NRU MPEI, having defended his master's thesis in 2013. He has scientific works in the field of semi-shielded dielectric waveguides.

Research interests: dielectric and metal-dielectric waveguides and nodes based on them, sensors and measurement systems, measuring complexes of Internet of things systems.

E-mail: MirzoyanAE@mpei.ru