

УДК 621.372.825 EDN NQHTRQ

## Влияние нерегулярности прямоугольного выступа стержня на характеристики полуэкранированного диэлектрического волновода

**В. В. Крутских**, к. т. н., *KrutskikhVV@mpei.ru*

ФГБОУ ВО «НИУ “МЭИ”», Москва, Российская Федерация

**А. Н. Ушков**, *UshkovAN@mpei.ru*

ФГБОУ ВО «НИУ “МЭИ”», Москва, Российская Федерация

**А. Э. Мирзоян**, *m.artavazd@yandex.ru*

АО «НПК “СПП”», Москва, Российская Федерация

ФГБОУ ВО «НИУ “МЭИ”», Москва, Российская Федерация

**А. М. Игнатов**, *IgnatovAM@mpei.ru*

ФГБОУ ВО «НИУ “МЭИ”», Москва, Российская Федерация

**Д. С. Чукашов**, *ChukashovDS@mpei.ru*

ФГБОУ ВО «НИУ “МЭИ”», Москва, Российская Федерация

**А. К. Арикат**, *ArikatAK@mpei.ru*

ФГБОУ ВО «НИУ “МЭИ”», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Развитие систем радиосвязи и устройств позиционирования навигационных систем непосредственно связано с использованием и разработкой новой элементной базы и технологий изготовления различных функциональных узлов. При этом особое внимание стоит уделить выявлению явлений и свойств волновых процессов, протекающих на нерегулярных участках линий передачи, а также формам и обликам исследуемых нерегулярностей. Данная работа нацелена на изучение характеристик полуэкранированного диэлектрического волновода (ПЭДВ) с нерегулярностью типа симметричного выступа прямоугольной формы. В рамках исследования проведен анализ характеристик узла при помощи физического эксперимента на макете узла с нерегулярным участком, а также с использованием методов численного моделирования распределения поля. В работе получены закономерности изменения  $S$ -параметров ПЭДВ в Ка-диапазоне от величины высоты выступа и предложена оценка процессов, протекающих в волноводном тракте. По полученным в работе результатам можно сделать вывод о росте изрезанности передаточной характеристики при увеличении высоты выступа, что связано с отражением падающей на нерегулярный участок волны. Полученные результаты исследования могут быть использованы при построении фильтров на базе периодической структуры ПЭДВ с нерегулярностью в виде симметричного выступа прямоугольной формы.

**Ключевые слова:** нерегулярность, полуэкранированный диэлектрический волновод, малые потери, инженерный расчет, регулярные линии, сдвиг

**Для цитирования:** Крутских В. В., Ушков А. Н., Мирзоян А. Э., Игнатов А. М., Чукашов Д. С., Арикат А. К.. Влияние нерегулярности прямоугольного выступа стержня на характеристики полуэкранированного диэлектрического волновода. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2024. Т. 11. № 3. С. 76–84.

## The Effect of the Irregularity of the Rectangular Protrusion of the Rod on the Characteristics of the NRD-waveguide

**V. V. Krutskikh**, *Cand. Sci. (Engineering)*, [KrutskikhVV@mpei.ru](mailto:KrutskikhVV@mpei.ru)  
*NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation*

**A. N. Ushkov**, [UshkovAN@mpei.ru](mailto:UshkovAN@mpei.ru)  
*NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation*

**A. E. Mirzoyan**, [m.artavazd@yandex.ru](mailto:m.artavazd@yandex.ru)  
*Joint-Stock Company “Research and Production Corporation Precision Instrument Systems”,  
Moscow, Russian Federation*  
*NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation*

**A. M. Ignatov**, [IgnatovAM@mpei.ru](mailto:IgnatovAM@mpei.ru)  
*NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation*

**D. S. Chukashov**, [ChukashovDS@mpei.ru](mailto:ChukashovDS@mpei.ru)  
*NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation*

**A. K. Arikat**, [ArikatAK@mpei.ru](mailto:ArikatAK@mpei.ru)  
*NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The development of radio communication systems and positioning devices for navigation systems is directly related to the use and development of new EEE components and manufacturing technologies for various functional units. At the same time, special attention should be paid to identifying the phenomena and properties of wave processes occurring on irregular sections of transmission lines, as well as the shapes and features of the irregularities being studied. This work is aimed at studying the characteristics of a none-radiative waveguide (NRD-waveguide) with irregularity such as a symmetrical rectangular protrusion. As part of the study, the characteristics of the node were analyzed using a physical experiment on a mock-up of the node with an irregular section, as well as using methods of numerical modeling of the field distribution. In the work, patterns of changes in the  $S$  parameters of the NRD-waveguide in the Ka-range from the height of the protrusion are obtained and an assessment of the processes occurring in the waveguide path is proposed. Based on the results obtained in the work, it can be concluded that the roughness of the transfer characteristic increases with an increase in the height of the protrusion, which is associated with the reflection of the wave incident on an irregular section. The obtained research results can be used in the construction of filters based on the periodic structure of the NRD-waveguide with irregularity in the form of a symmetrical rectangular protrusion.

**Keywords:** irregularity, NRD-waveguide, small losses, engineering calculation, regular lines, shift

**For citation:** Krutskikh V. V., Ushkov A. N., Mirzoyan A. E., Ignatov A. M., Chukashov D. S., Arikat A. K. The Effect of the Irregularity of the Rectangular Protrusion of the Rod on the Characteristics of the NRD-waveguide. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2024. Vol. 11. No. 3. P. 76–84. (in Russian)

## Введение

Развитие современной СВЧ-техники, используемой для задач канализации электромагнитных волн, напрямую связано с исследованием новых форм и обликов металлодиэлектрических волноводных конструкций КВЧ-диапазона, которые позволяют обеспечить необходимый функционал узла с минимальными энергетическими потерями. Это достигается за счет сочетания металлических и диэлектрических свойств направляющей структуры [1]. При этом важными показателями качества конструкции являются пропускная способность, защищенность от внешних воздействий, простота интеграции в существующие изделия, а также массогабаритные параметры. Одной из перспективных конструкций по указанным критериям является полужанрированный диэлектрический волновод (ПЭДВ), работающий в режиме неизлучения [2]. Он представляет собой прямоугольный диэлектрический стержень, ограниченный сверху и снизу металлическими пластинами, выполняющими роль экранов. Это позволяет избежать потерь на излучение, а также защитить конструкцию от внешнего влияния. При этом расширение функциональных возможностей и элементной базы на основе ПЭДВ представляет особый интерес как для задач фильтрации в системах связи пятого поколения, так и для первичной обработки сигналов спутниковой связи [3]. При этом особое внимание при поиске новых явлений необходимо уделить явлениям взаимодействия электромагнитных волн на участках с резким или плавным изменением параметров регулярной линии передачи.

Отметим, что в научных работах предложен ряд селективных технических устройств на базе нерегулярностей диэлектрического стержня [4], но не методики построения фильтров на ПЭДВ, а также не описана природа протекающих волновых процессов. Изучение фундаментальных основ электродинамических процессов на нерегулярности представляет особый интерес как для задач оптимизации существующих решений [5], так и для создания новых типов и классов устройств на базе ПЭДВ.

Настоящая работа нацелена на поиск явлений и оценку поведения электромагнитного поля

на участке ПЭДВ с симметричным прямоугольным выступом. Важно отметить, что из анализа литературы следует, что изучаемые вопросы позволят улучшить представления передачи широкополосного сигнала в Ка-диапазоне, что может быть применено на практике в интерферометрах [6].

Также стоит отметить, что из-за особенностей аналитического анализа волноводных линий с нерегулярностями целесообразно использовать численные методы [7], опирающиеся на расчет уравнений Максвелла и метод конечных элементов [8]. На базе последнего работает большинство современных пакетов симуляции волновых процессов в СВЧ-устройствах [9, 10].

## Методика анализа волноводного тракта с нерегулярным участком

Прежде чем производить исследование нерегулярности необходимо провести расчет, ПЭДВ параметры которого позволят в квазиоптимальном режиме по ширине частотного диапазона и малым потерям на линейном участке. Для этого по методике [11] предложен расчет квазиоптимального формата волноводного стержня по геометрическим критериям (см. формулу 1) и критериям, связанным электродинамическими свойствами материала (см. формулу 2):

$$\Phi = \frac{a}{b}, \quad (1)$$

где  $a$  — половина ширины стержня волновода,  $b$  — половина высоты стержня волновода;

$$\Phi_{\text{опт}} = \arctg(\varepsilon - 0,6) + 0,17, \quad (2)$$

где  $\Phi_{\text{опт}}$  — квазиоптимальное соотношение формата ПЭДВ в зависимости от диэлектрической проницаемости стержня,  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость стержня.

В связи со сложностью аналитического расчета и необходимостью подтверждения корректности полученных в ходе экспериментов результатов в работе предлагается изучение исследуемого узла с нерегулярным участком при помощи матрицы рассеяния. При этом за счет режима неизлучения и изучения нерегулярности в диапазоне основной

моды можно пренебречь коэффициентами, связанными с излучением, и записать матрицу для двухпортового волноводного устройства согласно формуле 2:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $S_{11}$  и  $S_{22}$  — коэффициенты отражения падающей волны,  $S_{12}$  и  $S_{21}$  — коэффициенты прохождения падающей волны через тракт с нерегулярностью.

Важно отметить, что в случае анализа симметричных волноводных структур будет достаточно изучения лишь одного из коэффициентов передачи и отражения. При этом за счет волновых взаимодействий на нерегулярности будут возникать дополнительные потери, которые можно учесть при расчете коэффициента передачи по формуле 4:

$$\Delta = 1 - S_{12} - S_{11}, \quad (4)$$

где  $\Delta$  — потери на излучение и модовые преобразование на нерегулярном участке,  $S_{12}$  — коэффициент передачи,  $S_{11}$  — коэффициент отражения.

При этом потери, возникающие в ПЭДВ с симметричным прямоугольным выступом, будут обусловлены потерями в металлических пластинах и диэлектрическом стержне, что отражено в выражении 5:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{пл}} + \Delta_{\text{ст}}, \quad (5)$$

где  $\Delta_{\Sigma}$  — полные потери в ПЭДВ с нерегулярным узлом,  $\Delta_{\text{пл}}$  — потери в металлических пластинах,  $\Delta_{\text{ст}}$  — потери в диэлектрическом стержне.

При этом металлические потери в большей степени обусловлены токами проводимости и зависят от удельной проводимости металлических платин. И, как следствие, они не будут оказывать сильное влияние на суммарную составляющую потерь.

Таким образом, потери в линии имеют преимущественно диэлектрическую природу, связанную с поляризационными эффектами, модовым преобразованием и потерями на переотражение от нерегулярности и интерференцию поля падающей и отраженной волн. Также потери стержня будут зависеть от электродинамических характеристик материала, где основной вклад будет определяться при помощи тангенса угла диэлектрических потерь.

Поэтому в качестве материалов стержня в исследовании были выбраны материалы с диэлектрической проницаемостью в диапазоне от 2,25 до 9,6 и тангенсом угла диэлектрических потерь от  $10^{-4}$  до  $10^{-6}$ , в частности на графиках в настоящей статье представлены численные расчеты для полиэтилена.

Для более точного описания протекающих на нерегулярности волновых процессов в работе предлагается ее изучение при помощи численных методов в современных пакетах симуляции распространения электромагнитных волн. Был спроектирован цифровой двойник ПЭДВ с прямоугольным симметричным выступом, который показан на рис. 1, где  $h$  — высота выступа и  $l$  — длина выступа. При изменении указанных выше параметров проведено исследование их влияния на  $S$ -параметры узла и получена оценка природы волновых процессов по картинам распределения электромагнитных полей. Отдельное внимание в работе уделено адекватности цифрового двойника относительно реального изделия. Поэтому при помощи методики [12] в рамках исследования численные значения сравнивались с результатами физического эксперимента на макете ПЭДВ с прямоугольным выступом, показанном на рис. 2.

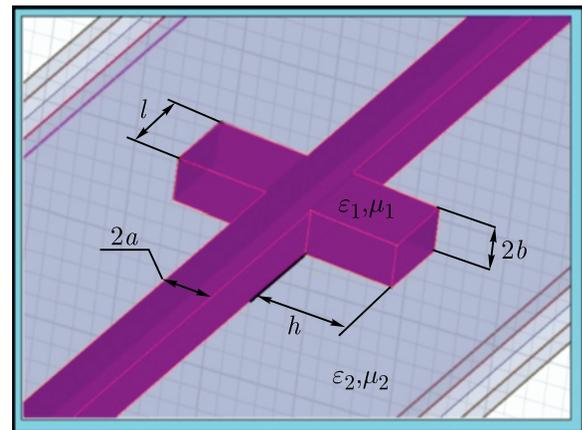


Рис. 1. Параметрическая модель ПЭДВ с нерегулярным участком прямоугольной формы

Fig. 1. Parametric model of an NRD-waveguide with an irregular rectangular section

С практической точки зрения на исследование нерегулярности при помощи численных методов и сравнения с физическим экспериментом

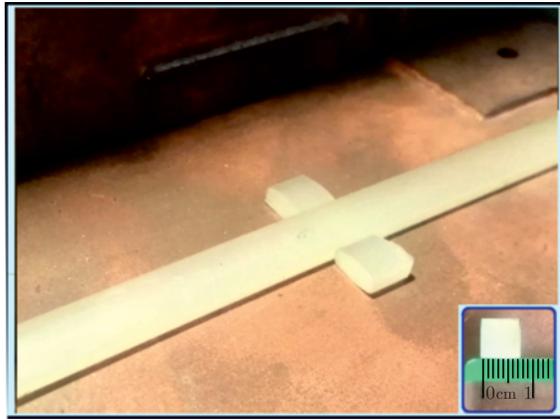


Рис. 2. Физический макет ПЭДВ с симметричным выступом в форме прямоугольника

Fig. 2. Physical mock-up of an NRD-waveguide with a symmetrical protrusion in the shape of a rectangle

целесообразно использовать одномодовый режим работы волновода, который реализуется при помощи волноводных переходов. В связи с использованием биконического волноводного перехода с металлического волновода на ПЭДВ целесообразно учесть ослабление до 2,5 дБ, что отражено в работе [13].

Для минимизации влияния собственных сопротивлений измерительных приборов на характеристики узлов их влияние было учтено по методике [14]. Указанные действия обеспечили расхождение численных и экспериментальных данных не более чем на 5%, что подчеркивает адекватность разработанной модели.

### Влияние высоты выступа диэлектрического стержня

Исследование картин поля в конструкции ПЭДВ с изменением высоты выступа на рабочей частоте 30 ГГц показано на рис. 3. Высота выступа менялась от 0 до  $2\lambda$ , а длина выступа оставалась постоянной, равной  $\lambda$ . Из распределения полей видно, что даже незначительный выступ оказывает влияние на распространяющуюся волну.

При прохождении волны через нерегулярный участок энергия поля падающей волны ослабевает и изменяет свою форму за счет взаимодействия с обратной волной [15]. Указанное явление приводит к формированию высших типов мод.

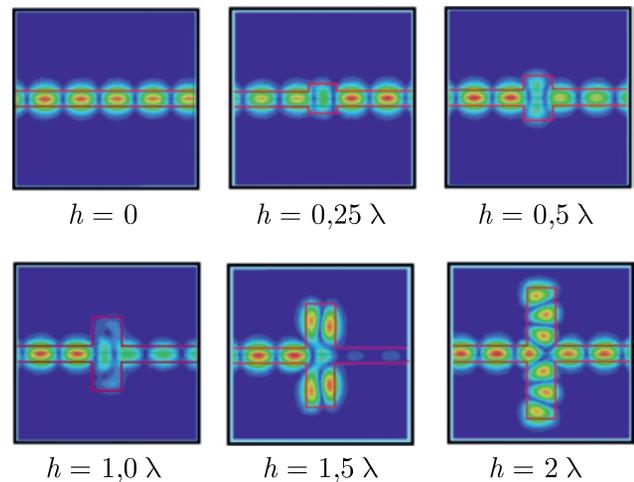


Рис. 3. Распределение поля в ПЭДВ с прямоугольным выступом различной высоты на частоте 30 ГГц

Fig. 3. Field distribution in an NRD-waveguide with a rectangular protrusion of various heights at a frequency of 30 GHz

Также при увеличении высоты выступа замечен рост изрезанности зависимостей  $S_{12}$ , отраженный на рис. 4.

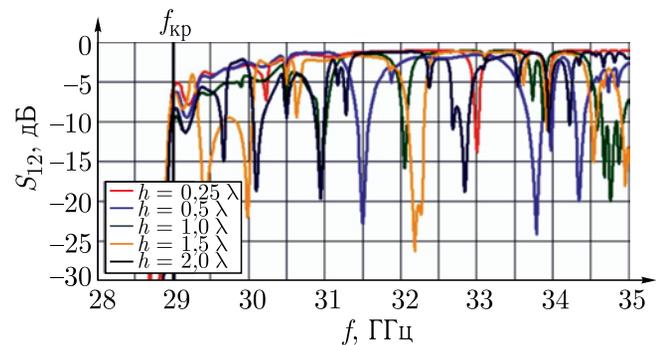


Рис. 4. Семейство передаточных характеристик ПЭДВ с различной длиной симметричного выступа

Fig. 4. A set of transfer characteristics of an NRD-waveguide with different lengths of symmetrical protrusion

Он связан с появлением поперечного распространения компонент электромагнитной волны на участке нерегулярности [16]. Это приводит к тому, что начиная от  $h = 1,5\lambda$  нерегулярность проявляет резонансные свойства, что приводит к большей нестабильности. Это явление также отражено на рис. 5, где показано семейство коэффициентов отражения  $S_{11}$  в частотном диапазоне.

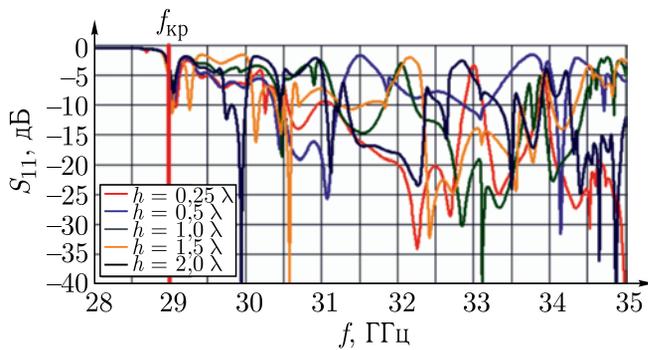


Рис. 5. Семейство коэффициентов отражения ПЭДВ с различной длиной симметричного выступа

Fig. 5. A set of reflection coefficients of an NRD-waveguide with different lengths of symmetrical protrusion

Из графиков семейства коэффициентов отражения видно, что при усреднении значений с увеличением высоты нерегулярности растет величина отраженной волны. При этом из рис. 6 следует рост потерь и фазовой скорости при увеличении высоты выступа.

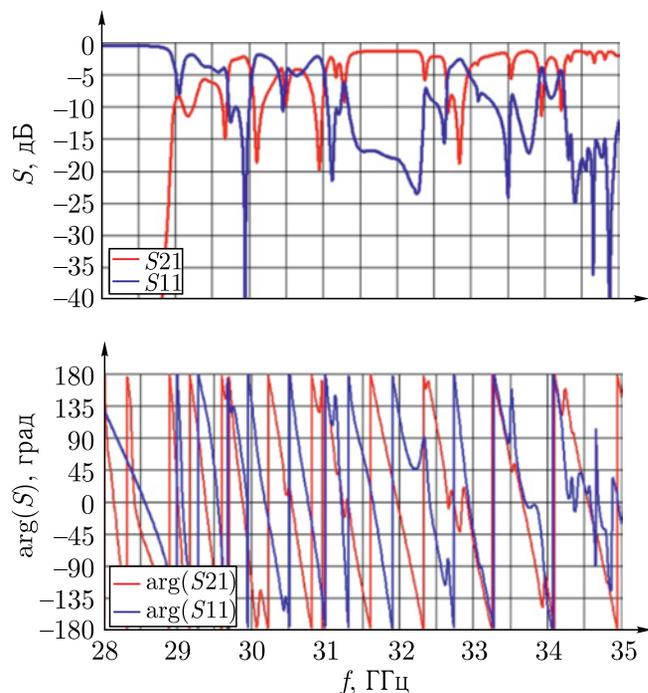


Рис. 6. Частотные и фазовые характеристики ПЭДВ с прямоугольным выступом с длиной  $2\lambda$

Fig. 6. Frequency and phase characteristics of an NRD-waveguide with a rectangular protrusion with a length of  $2\lambda$

Таким образом, следует выделить диапазон выступов от 0 до  $25 \cdot \lambda$ , так как на нем наблюдаются избирательные свойства структуры при малых потерях. Одним из объяснений явления будет то, что коэффициент замедления не превышает величины 1,4. Последнее обеспечивает переход волны с незначительными потерями на преобразование.

## Влияние длины нерегулярного участка

Исследование картин поля в конструкции ПЭДВ с изменением длины выступа на рабочей частоте 30 ГГц показано на рис. 7. Высота выступа менялась от 0 до  $2\lambda$ , а длина выступа оставалась постоянной, равной  $0,5\lambda$ . Из распределения полей видно, что даже незначительный выступ оказывает влияние на распространяющуюся волну. При этом основная часть энергии поля сосредоточена в области диэлектрического стержня и значительно ослабевает к его краям, что в большей степени выражено высотой нерегулярности.

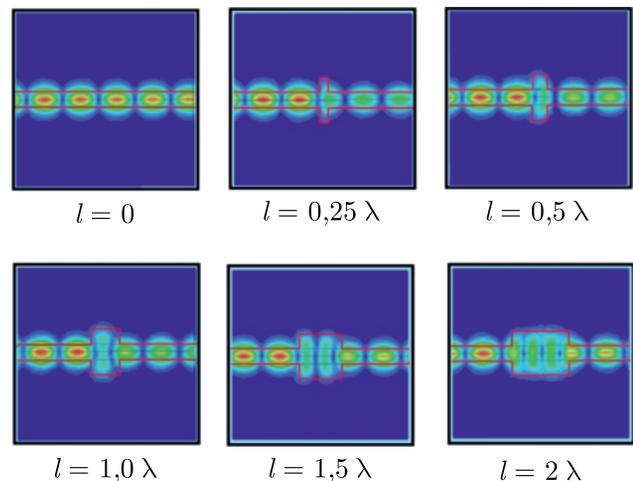


Рис. 7. Распределение поля в ПЭДВ с прямоугольным выступом различной длины на частоте 30 ГГц

Fig. 7. Field distribution in an NRD-waveguide with a rectangular protrusion of various lengths at a frequency of 30 GHz

Увеличение длины выступа уменьшает глубину провалов передаточной характеристики  $S_{12}$  за счет ослабления отраженной на нерегулярном участке волны. Необходимо отметить, что с ростом длины происходит ослабление среднего

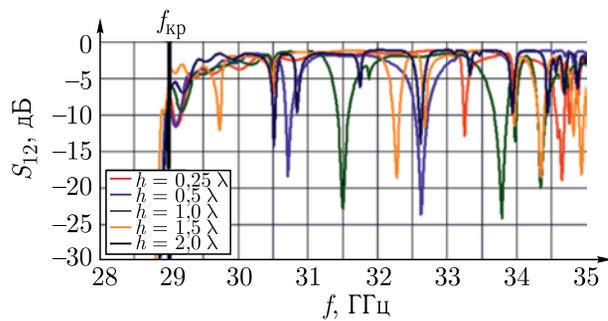


Рис. 8. Семейство коэффициентов ПЭДВ с различной высотой симметричного выступа

Fig. 8. A set of NRD-waveguide coefficients with different heights of symmetrical protrusion

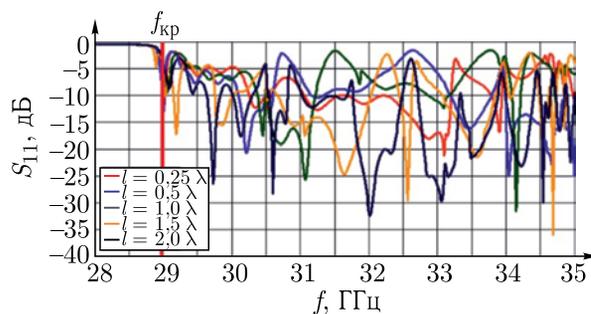


Рис. 9. Семейство коэффициентов отражения ПЭДВ с различной высотой симметричного выступа

Fig. 9. A set of reflection coefficients of an NRD-waveguide with different heights of symmetrical protrusion

коэффициента отражения и увеличение коэффициента передачи, что показано на рис. 8 и 9.

Также следует отметить, что с ростом длины нерегулярного участка отчетливо видно преобразование длины волны рабочего колебания, которое пропорционально следующему соотношению волновых чисел:

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot a}{2 \cdot a + 2 \cdot h}}, \quad (6)$$

где  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  — волновые числа до перехода и после него;  $a$  — половина ширины стержня волновода;  $h$  — высота выступа.

Указанное соотношение отчетливо видно при длине участка от  $1,5\lambda$ , где происходит стабилизация параметров волны, связанная с взаимодействием на расширении и сужении стержня ПЭДВ. Также по фазочастотной характеристике узла, показанной на рис. 10, можно увидеть уменьшение

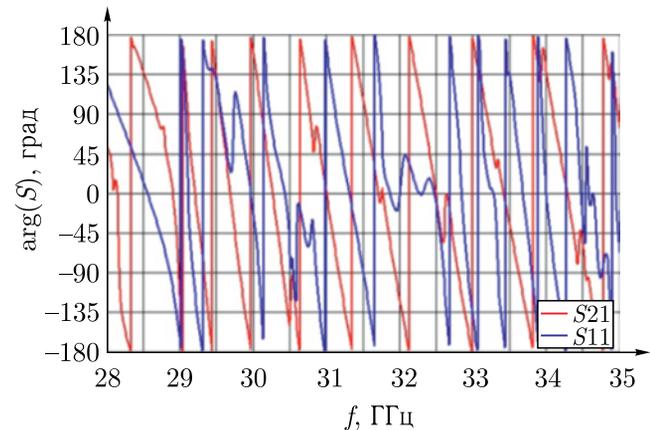
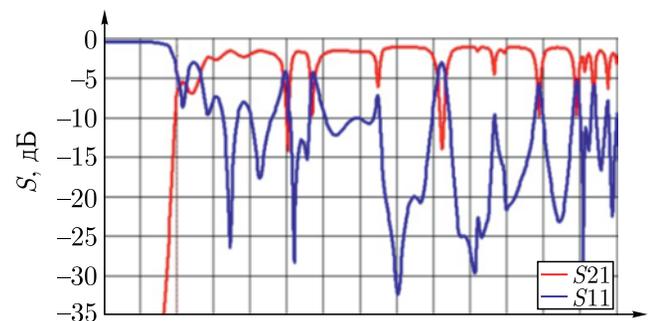


Рис. 10. Частотные и фазовые характеристики ПЭДВ с прямоугольным выступом с высотой  $2\lambda$

Fig. 10. Frequency and phase characteristics of an NRD-waveguide with a rectangular protrusion with a height of  $2\lambda$

фазовой скорости протекающей через нерегулярность волны и увеличение частотного диапазона с линейной характеристикой.

Таким образом, следует отметить, что увеличение длины выступа способствует стабилизации фазочастотной характеристики для устройств с шириной рабочей полосы до 2 ГГц в Ка-диапазоне [17].

## Результаты

1. В обзорной части работы был выявлен интерес научного сообщества к изучению явлений и построению на их основе функциональных узлов на базе ПЭДВ в КВЧ-диапазоне с целью использования в интегральных платах, в частности в качестве фильтров и устройств первичной обработки.

2. В результате исследования влияния высоты нерегулярности выявлено, что при увеличении

высоты выступа наблюдается поперечное распространение падающей электромагнитной волны, что приводит к изрезанности передаточной характеристики и значительным потерям, связанным с модовыми преобразованиями и собственными резонансными явлениями на нерегулярном участке.

3. Наиболее эффективным для построения одномодовых функциональных устройств на базе симметричного прямоугольного выступа является диапазон высоты  $h$  от 0 до  $25\lambda$ , относительно центральной частоты рабочего частотного диапазона. При этом на рассматриваемом участке наблюдается изменение коэффициента замедления, пропорциональное корню отношения ширины стержня и ширины стержня в месте выступа.

4. Увеличение длины нерегулярного участка приводит к росту числа провалов передаточной характеристики, что связано с переотражением электромагнитных волн в стержне. При этом ослабление уровня пиковых провалов передаточной характеристики объясняется увеличением плавности перехода нерегулярного участка.

5. Для исследуемых структур скорость изменения фазовой характеристики увеличивается с ростом высоты и уменьшением длины прямоугольного выступа. Указанные зависимости рекомендуется учитывать при построении фазоустойчивых в рабочей полосе функциональных устройств на ПЭДВ с прямоугольным выступом.

## Заключение

Проведенный в обзорной части анализ современных исследований и разработок в направлении надежных устройств канализации электромагнитной волны показал перспективность ПЭДВ и интерес к изучению явлений и взаимодействий на его основе. При помощи численного и физического эксперимента были получены семейства частотных и фазовых характеристик ПЭДВ с нерегулярностью в виде прямоугольного симметричного выступа. На их основании была изучена природа волновых взаимодействий и предложены рекомендации по проектированию фильтров на базе ПЭДВ в КВЧ-диапазоне. Так, при увеличении высоты более чем на  $25 \cdot \lambda$  передаточная характеристика ста-

новится значительно изрезанной и значительная часть энергии отражается. При увеличении длины увеличивается изрезанность при сохранении того же уровня ослабления.

Опираясь на результаты работы, авторы рекомендуют использовать выступы высотой не более  $25 \cdot \lambda$  и при помощи длины нерегулярного участка подбирать полосу пропускания с линейным участком изменения фазы.

## Список литературы

1. *Vytourov 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. *Wu K.E., Bozzi M., Fonseca N.J.G.* Substrate integrated transmission lines: Review and applications // IEEE Journal of Microwaves. 2021. Т. 1. № 1. P. 345–363.
3. *Baskakov A., Khtu S. et al.* Reflection features and calculation of energy characteristics for designing an onboard radar for safe helicopter landing // Radio engineering and telecommunication systems. 2011. No. 2. P. 49–55.
4. *Yoneyama T., Kuroki F., Nakamura S. and Fukuchi T.* NRD guide P-I-N diode devices for automotive radars at 77 GHz, in Microwave Conference, 2002. 32-nd European, 2002. P. 1–3.
5. *Раевский С.Б., Капустин С.А., Раевский А.С.* Интегральные представления в краевых задачах о расчете устройств СВЧ-и КВЧ-диапазонов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23. № 4. С. 8–18.
6. *Крутских В.В. и др.* Широкополосный металлодиэлектрический волноводный тракт с малыми потерями КВЧ-диапазона // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8. № 3. С. 89–98.
7. *Barabanova E.A. et al.* Methods of analysis of information-measuring system performance under fault conditions // Journal of Communications Technology and Electronics. 2023. Т. 68. № Supply 3. P. S368–S376.
8. *Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д.* Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS // Солон-Пресс. 2010. 216 с.

9. *Bogdanovich B.Y., Buyanov G.O. Nesterovich A.V.* Calculation of a system for forming a bremsstrahlung beam in discretely falling magnetic field // Atomic Energy. 2022. Т. 131. № 6. P. 348–353.
10. *Bankov S.E. and Kurushin A.A.* Electrodynamics for CAD microwave users. SOLON-Press, 2017.
11. *Krutskikh V.V. et al.* 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). IEEE, 2023. P. 1–7.
12. *Агаян Ю.М.* Теоретическое и экспериментальное исследование резких нерегулярностей в диэлектрических волноводах. М.: МЭИ. 1974.
13. *Roy C., Wu K.* Surrogate Model-Based Filter Optimization by a Field-Circuit Model Mapping // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2023.
14. *Гурьянов А.Ю., Крутских В.В.* Инженерный расчет и оптимизация параметров полужкранированного диэлектрического волновода в неизлучающем режиме // Вестник МЭИ. 2017. № 1. С. 92–97.
15. *Krutskikh V.V. et al.* Significant irregularities in the NRD waveguide // 2022 4th international youth conference on radio electronics, electrical and power engineering (REEPE). IEEE. 2022. P. 1–5.
16. *Monsoriu J.A. et al.* Analysis of inhomogeneously dielectric filled cavities coupled to dielectric-loaded waveguides: Application to the study of NRD-guide components // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2004. Т. 52, № 7. P. 1693–1701.
17. *Sanchez A. and Oliner A. A.* A new leaky waveguide for millimeter waves using nonradiative dielectric (NRD) waveguide-part i: Accurate theory // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 1987. Vol. 35, No. 8, P. 737–747.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 30.05.2024  
Дата принятия рукописи  
в печать 23.08.2024