4	Изготовление второго опытного образца. Проведение межведомственных испытаний. Корректировка КД. Доработка опытных образцов.	30	7
5	Проведение Государственных испытаний	20	8
6	Корректировка КД по итогам ГИ для организации серийного производства. Доработка опытных образцов по результатам ГИ.	5	2
7	Проведение межведомственной комиссии, присвоение изделию литеры «О1»	5	1

Из таблиц видно, что для высокотехнологичных изделий, каким является лазерная БИНС, научно-исследовательская и опытно-конструкторская проработка изделия по времени соизмерима со сроком службы изделия, то есть составляет примерно половину жизненного цикла изделия. Если считать норматив прибыли 20%, а именно такой уровень прибыли согласует Заказчик, то окупаемость проекта наступает примерно на сотом изделии. Приведенный контракт получается не прибыльным, но и не убыточным. Однако, проведя небольшие доработки, и заключив контракт на поставку разработанного БИНС на аналогичный объект, предприятие не только окупит разработку, но и получит прибыль для дальнейшего развития.

***

1. Болотнов А.С. Применение лазерного гироскопа в бесплатформенных инерциальных системах. Политехнический молодежный журнал, 2019, № 10(39).
2. Лазерные гироскопы ГЛ-1Д, ГЛ-2Д, ГЛ-18. electrooptika.ru: веб-сайт. URL: <http://www.electrooptika.ru/index.php/produktsiya/bazovye-elementy> (дата обращения: 24.02.2021).
3. Прокудин В.Н., Манушина А.Е., Уфимцев Е.К. Использование подхода жизненного цикла информационного ракетно-космического комплекса в реализации масштабных проектов перестройки ракетно-космической отрасли // Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Россия, Москва 6 октября 2020 г.

Крутских В.В., Мирзоян А.Э., Ушков А.С.

Устройства поворота на полужкранированных диэлектрических волноводах

*ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет "МЭИ"
АО "НПК"СПП"
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/sr-10-04-2021-31

Аннотация

В статье приводятся результаты исследования конструкций устройств поворота на полужкранированном диэлектрическом волноводе для топологического (в плоскости пластин) и нормального (в плоскости перпендикулярной плоскости пластин) устройства. Эта задача сформирована потребностью создания различных устройств в том числе антенных с сложной формой поверхности. Для решения задачи применялись в основном методы физического и численного моделирования, проверялись физическим экспериментом. Было показано, что нормальный изгиб в отличие от топологического даже на малых радиусах имеет малые потери на излучение и отражение.

Ключевые слова: Полужкранированный диэлектрический волновод, устройства поворота, NRD-waveguide, диэлектрический волновод

Abstract

The article presents the results of a study of the designs of turning devices on a semi-shielded dielectric waveguide for the topological (in the plane of the plates) and normal (in the plane perpendicular to the plane of the plates) devices. This task is formed by the need to

create various devices, including antennas with a complex surface shape. To solve the problem, the methods of physical and numerical modeling were mainly used, and they were verified by a physical experiment. It was shown that normal bending, in contrast to topological bending, even at small radii has small losses to radiation and reflection.

Keywords: Semi-shielded dielectric waveguide, turning devices, NRD-waveguide, NRD, dielectric waveguide

Введение и постановка задачи. С появлением нового стандарта связи 5G потребовались новые КВЧ решения в диапазоне 25-27 ГГц для создания малогабаритных стационарных и мобильных устройств. Для таких систем полужакрытый диэлектрический волновод (ПЭДВ) или NRD-waveguide, как его называют в зарубежной периодике, является хорошим решением, удовлетворяющим множеству показателей качества. Конструкции узлов на ПЭДВ были предложены в работах [1] и [2] еще в 1983 и 1986 году, а пути решения в работе [3] в 2012 г.

Обычно в теории неизлучающих ДВ (NRD-waveguide) рассматриваются топологические изгибы и повороты (Рис. 1 а), однако как таковой теории и закономерностей в этих работах приведено мало или вообще не приведено. Абсолютно не рассмотрены изгибы в в нормальной плоскости к поверхности пластин формирующих ПЭДВ (Рис. 1 б). Изломы (топология которых приведена на рисунке 1 г, е, ж) подробно рассмотрены в работе Э.М. Гутцайта [4].

Все эксперименты проведены, как для численных так и для физических моделей, при следующих условиях: диэлектрические стержни выполнены из полиэтилена ($\varepsilon = 2,25$), измерения проведены на частотах в диапазоне 25 - 37 ГГц, на оборудовании R&S ZVA-50 и P2-65.

Основной задачей исследования было выявление закономерностей появляющихся в топологическом и нормальном изгибах для применения в различных устройствах в том числе с не плоскими параллельными пластинами (поверхностями).

Базовые исследования. Рассмотрим физическую и практическую модели построения устройств на топологических изгибах. Теорию изгиба регулярного (диэлектрического волновода) ДВ разработал еще в 50х годах П.Р. Череп [5], экспериментально проверили В.Ф. Взятыхшев [6] и Б.И. Рябов. Для нашей задачи изгибы ПЭДВ, были рассмотрены в работе Т. Йонеймы в работе [2], при этом результаты ограничены узкой областью частот и размеров волновода. Приведем описание метода, который был предложен автором в работе [7] и в результате был получен патент на устройство поворота [8].

Рисунок 1 - Конструкция топологического (а) и нормального (б) изгиба ПЭДВ, различные конструкции топологий устройств поворота (г-ж)

На рисунке 2 приведен механизм излучения с топологического изгиба. В нашем случае, специфичность «волноводной» внешней для ДВ среды (пространство между пластин) требует ввести еще один параметр, характеризующий свойства волн ПЭДВ.

Рисунок 2 - К пояснению механизма излучения с изгиба ДВ

Физика излучения с изгиба. Механизм формирования излучения, иллюстрированный на рис. 2, обычно связывают с величиной замедления, поскольку:

- именно величина замедления определяет r_0 по соотношению

$$\frac{r_0}{R} = U; \quad (1)$$

- именно замедление определяет внешнее волновое число α , характеризующее экспоненциальное спадание внешнего поля

$$\alpha = k_2 \sqrt{U^2 - 1}. \quad (2)$$

С увеличением r линейная постоянная распространения уменьшается обратно пропорционально r . И при некотором $r = r_0$ она сравнивается с постоянной распространения во второй среде k_2 . Волновые числа (α, β) волн ПЭДВ совпадают с (α, β) планарного ДВ такой же ширины. Следовательно, должен совпадать и закон радиального распределения полей во внешней области. Но замедление волн в ПЭДВ всегда меньше, чем замедление в ПлДВ.

На первый взгляд, кажется, что вследствие уменьшения замедления излучение с изгиба ПЭДВ должно стать больше, чем излучение с изгиба планарного ДВ той же ширины. Действительно, в [9] приведено многократно экспериментально проверенное выражение

$$\alpha_{rad} = 8,2 R'^{\xi_0^{1/2}} e^{-11 R'^{\xi_0^{1/2}}}, \quad (3)$$

где $R' = R / \lambda$ – относительный радиус изгиба,

$$\xi_0 = U_0 - 1 \quad (4)$$

– замедление на прямолинейном участке ДВ.

В соответствии с (4), основным параметром, определяющим величину радиационного затухания, является приведенный радиус изгиба

$$R = R' \xi_0^{3/2}, \quad (5)$$

входящий в показатель экспоненциальной функции в (2). Из характера этого соотношения следует, что для сохранения углового затухания на прежнем уровне требуется уменьшение ξ_0 в 4 раза (например, $U_0 = 1,05$ вместо 1,20) и увеличения радиуса изгиба в 8 раз.

Фундаментальная причина заключается в следующем. Излучение с изгиба ПЭДВ происходит в пространство между пластин, а не в свободное пространство как

для планарного ДВ. Подчеркнем при этом: сказанное справедливо только при симметричной форме сечения ПЭДВ, когда излучение возможно только в волну между пластинами соответствующего типа (например, LSM_{01} волна ПЭДВ излучает только в волну H_{01} ПлМВ). Все эти волны, как уже отмечалось, являются ускоренными. Их коэффициент замедления определяется как

$$U_{pp} = \sqrt{1 - \left(\frac{n}{2g'}\right)^2} < 1 \quad (6)$$

т.е. он всегда меньше единицы. Обратившись еще раз к рис. 2, мы увидим, что излучение в этом случае должно происходить не с радиуса (1), а с радиуса, определяемого соотношением

$$\frac{r_0}{R} = \frac{U}{U_{pp}} > 1; \quad (7)$$

Очевидно, эта величина больше, чем (1). Так что мы имеем основания сделать такие выводы:

- излучение с изогнутого ПЭДВ всегда меньше, чем излучение с планарного ДВ;
- излучение с изогнутого ПЭДВ близко к излучению эквивалентного планарного ДВ, замедление которого

$$\xi_{\mathcal{D}} = U_{\mathcal{D}} - 1 = \frac{U_{\mathcal{D}}}{U_{pp}} - 1. \quad (8)$$

На рис. 3 приведены зависимости замедления $\xi_{\mathcal{D}}$ от высоты ПЭДВ при различных значениях замедления планарного ДВ U_{pl} . Они описываются зависимостью

$$U_{\mathcal{D}}^2 = \frac{U_{pl}^2 - \left(\frac{n}{2g'}\right)^2}{1 - \left(\frac{n}{2g'}\right)^2} \quad (9)$$

Рисунок 3 - Зависимости замедления $\xi_{\mathcal{D}}$ от высоты ПЭДВ при различных значениях замедления планарного ДВ U_{pl} для первых трех вертикальных типов волн

Полезно еще сравнить радиусы изгиба, вызывающие то же самое радиационное затухание (имеющее то же значение приведенного радиуса изгиба). Назовем их отношение «габаритным по изгибу» коэффициентом $k_{ГИ}$. В соответствии с (5), мы получим

$$k_{ГИ} = \frac{R_{pl}}{R_{\mathcal{D}}} = \left(\frac{\xi_{\mathcal{D}}}{\xi_{pl}} \right)^{3/2}. \quad (10)$$

Используя (10), получаем

$$k_{ГИ} = \xi_{pl}^{-3/2} \left(\sqrt{\frac{(1 + \xi_{pl})^2 - A^2}{1 - A^2}} - 1 \right)^{3/2}, \quad (11)$$

где $A = n / 2g' = f_{ППкр} / f$, $f_{ППкр}$ – критическая частота пространства между ПП (для того типа волны, в виде которого будет происходить излучение с изгиба ПЭДВ; в случае волны LSM_{01} и симметричных облучков – это волна H_{01} с критической частотой $f_{cr} = c / 2g$).

Рисунок 4 - Зависимости габаритного коэффициента по изгибам $k_{ГИ}$ от ξ_{pl} при разных значениях отстройки по частоте от области запыраия излучения

Экспериментальное исследование топологического изгиба. Для оценки метода и выявления особенностей проектирования устройств поворота на топологическом изгибе см. рисунок 5 был проведен анализ проходных характеристик и коэффициентов отражения. Нужно, также отметить, что во всех экспериментах исследовался поворот стержня на 90^0 . Который показал, что в случае $R_{изг} / \lambda > 6$)

изменение проходного коэффициента не превышает 5%. При приближении радиуса изгиба к указанной величине появляются сопутствующие переотражения в высокочастотной части диаграммы. Уменьшение радиуса изгиба приводит к резкому увеличению потерь (рисунок 6) и появлению переотражений, резонансная частота которых слабо зависит от радиуса (рис. 5 в,г). Переотражения в этом случае обусловлены участками между изгибом и переходами. Одновременно с этим было выявлено влияние на появление отражений формата волноведущего стержня.

Из графиков приведенных на рисунке 6 видна характерная зависимость средних потерь от радиуса изгиба в диапазоне длин волн 8 - 12 мм, при этом для всех экспериментов характерно снижение уровня мощности на 2,5 дБ, эту величину можно считать методической погрешностью и вычитать из полученных результатов.

Было замечено, что при уменьшении формата до единицы, переотражения уменьшаются, а при ряде условий могут отсутствовать вовсе. Что позволяет, варьируя параметры стержня, создавать устройства поворота с малыми переотражениями, даже при радиусах изгиба меньше 6λ , при этом частотный диапазон остается таким же широким, как и при больших радиусах.

Рисунок 5 - Модель топологического изгиба: а – конструкция; б – картина интенсивности поля E ; в, г – проходная характеристика S_{12} для различных форматов стержня из полиэтилена и высотой 2 мм

Эксперименты проводились для диэлектрического стержня с $\varepsilon = 2,25$ при различных форматах, но преимущество было отдано формату $\Phi = 2,11$ поскольку этот формат соответствует стандартному полиэтиленовому диэлектрическому волноводу ПДВ-8. В результате была получена зависимость усредненной проходной характеристики от нормированного радиуса изгиба R'

$$S_{12}(R') = -e^{-a \cdot R'^{-b}} - c, \quad (12)$$

где коэффициенты a, b, c зависят от формата диэлектрического стержня. Коэффициент c - предельное минимальное ослабление проходной характеристики обусловленное потерями в участке устройства и на возбуждателях, а коэффициенты a и b зависят от формата ДС и диэлектрической проницаемости. Эти коэффициенты получены опытным путем и приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты формулы (12)

Φ	a	b	c
1.00	1.6	3.1	2.7
1.25	1.2	3.3	2.8
1.50	0.9	3.4	2.8
1.75	0.8	3.8	2.9
2.00	0.8	4.0	3.5

Рисунок 6 - Зависимость среднего ослабления проходной характеристики от приведенного радиуса топологического изгиба

Изгибы в плоскости нормальной к ПП. На рисунках 1 б и 7 а отображен так называемый “нормальный изгиб.” Ранее его не рассматривали по причине отсутствия надобности, ведь устройства СВЧ миллиметрового диапазона обычно изготавливали на плоскости и расчет устройств на нелинейной поверхности это отдельная сложная задача. Если же еще учитывать технологию изготовления, то вопрос о создании не плоскостных устройств даже не стоял.

Если принять во внимание, то что в каждом сечении вдоль линии распространения волны облик волновода не изменяется, то не должны изменяться и волновые числа. И к изогнутому в нормальной плоскости волноводу можно было бы отнестись как к “псевдорегулярному.” Действительно, на больших радиусах кривизны изгиба ($R_{izg} \gg 10\lambda$) волновод можно считать регулярным, а отражение от участка с изгибом будет иметь второй порядок малости по сравнению с прочими потерями.

Но, все же, наибольший интерес возникает, когда радиусы изгиба лежат в диапазоне $\lambda < R_{izg} < 5\lambda$. Как поведет себя устройство поворота? Какие могут быть препятствия для реализации таких устройств?

Чтобы ответить на этот вопрос был проведен физический и численные эксперименты показавшие, что для узла рис. 7 а значения ослабления проходного коэффициента составляет от 2 до 4 дБ (см. рис. 7). Фактически не зависят от кривизны радиуса изгиба, но очень чувствительны к длине устройства (при увеличении радиуса изгиба коэффициент прохождения S_{12} уменьшается линейно). Резкие выбросы на этом графике определяются переотражениями в высокочастотной части, поскольку при некоторых соотношениях размеров стержня и радиуса может возникать следующий тип волны с индексом 2, как по диэлектрической, так и металлической отсечке. Также эти выбросы могут возникать за счет переотражения от устройств возбуждения. Что

подтверждает график на рис. 8. На рисунке 8 б видно появление компонент волны LSM_{21} . Хотя перетекание в высшую моду и не существенно, но по распределению поля на концах участка с изгибом, можно сделать следующий вывод:

- На нормальном изгибе возможна прямая и обратная трансформации в ближайшую моду высшего типа и обратно. Причем наличие трансформации не зависит от радиуса изгиба, если устройство симметричное относительно оси распространения. Преобразование и обратное преобразование оказывается взаимным и на выходе устройства заметить появление высшей моды крайне сложно.

Поэтому при проектировании нужно придерживаться следующих рекомендаций:

- При уменьшении радиуса изгиба нужно уменьшать формат ДС.
- Изготавливать изгиб с по возможности малыми угловыми секторами и большими радиусами.

Рисунок 7 - Изгиб в нормальной плоскости: а – конструкция; б – картина интенсивности поля E ; в, г – проходная характеристика S_{12} для различных форматов

Рисунок 8 - Распределение поля E в нормальном изгибе а – объемная картина поля; б – распределение вдоль оси X в центре изгиба

Выводы. Топологические изгибы играют определяющую роль при проектировании устройств на ПЭДВ, поэтому наибольший интерес возникает к оценке потерь или (проходного коэффициента S_{21}). В результате работы была экспериментально получена зависимость (12) определяющая ослабление от нормированного радиуса изгиба. А так же установлена связь формата и возникновения резонансов на проходной характеристике S_{12} из-за переотражений. С уменьшением формата число переотражений возрастает, при этом это явление слабо зависит от радиуса изгиба стержня.

Для **нормальных** изгибов, потери связанные с излучением в меньшей степени зависят от радиуса изгиба, но является определяющим фактором возникновения для появления переотражений и мод высших типов. Так же был замечен эффект прямого и обратного модового преобразования при различных форматах и малых радиусах изгиба.

Примерами применения полученных результатов можно считать потребность в создании не только плоских устройств, но и устройств со сложной формой поверхности для установки в интерьеры и на борт подвижных систем. Так например, для создания многолучевой антенной системы бортового РЛС малых размеров возможно плоскую систему свернуть в трубу при этом не потеряв в заданных характеристиках. Так же эта работа будет полезна при проектировании и антенных устройств располагаемых на сложных поверхностях.

***

1. Yoneyama T., Nishida S. Nonradiative dielectric waveguide circuit components // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1983. Vol. 4, № 3. P. 439–449.
2. Yoneyama T., Tamaki H., Nishida S. Analysis and measurements of nonradiative dielectric waveguide bends // Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on. 1986. Vol. 34, № 8. P. 876–882.
3. Взятых В.Ф. et al. Дифракционные устройства и системы КВЧ и СВЧ-диапазонов на базе диэлектрических структур: Принципы построения, волновая элементная база, ключевые явления // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Vol. 55, № 8-3. P. 32–38.
4. Гутцайт Э. М. Свойства h-образного волновода и особенности конструирования электровакуумных приборов миллиметрового диапазона волн для тракта на основе металло-диэлектрического волновода: PhD thesis. Москва: МЭИ, 1960.
5. Череп П. Р. Изгиб диэлектрического волновода // Труды КВИАНУ ВВС. 1958. № 24. P. 56–62.
6. Взятых В. Ф. Основы теории и принципы применения диэлектрических волноводов миллиметрового диапазона: PhD thesis. МЭИ, 1970.
7. Крутских В. В. Функциональные узлы на полужанрированных диэлектрических волноводах: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. -М.: МЭИ(ТУ), 2005.
8. RU49365U1, Устройство поворота диэлектрического волновода// Крутских В.В., Взятых В.Ф., - 2005
9. Взятых В. Ф. Диэлектрические волноводы. \-М:Советское Радио, - 970., -247с.