

МЕТОД АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК КРУГЛЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ВОЛНОВОДОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ РАДИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Э. Э. Малов, Ю. Е. Мительман

Институт радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2016 г.

Аннотация. Круглые многослойные волноводы часто используют как части различных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов. Слоистая структура заполнения волновода позволяет более гибко настраивать и оптимизировать параметры устройства. В волноводе с неоднородно заполненным поперечным сечением можно получить критические частоты собственных волн, отличные от критических частот в полом волноводе. В настоящей статье описан новый способ получения дисперсионных характеристик радиально неоднородно заполненных круглых волноводов, основанный на применении условий поперечного резонанса в эквивалентных радиальных линиях передачи. Предлагаемый метод эффективен при составлении дисперсионных уравнений, так как он использует описание теории микроволновых цепей и рекуррентные выражения вместо прямого решения системы уравнений граничных условий.

Ключевые слова: круглый волновод, постоянная распространения, волновое число, коэффициент затухания, коэффициент фазы, неоднородная линия передачи.

Abstract. Circular multilayered waveguides are often used as parts of various devices of the microwave and EHF ranges. The layered structure of the filling of a waveguide allows more flexibility to configure and optimize the parameters of the device. In a waveguide with inhomogeneous cross section, one can obtain different cutoff frequencies of modes than the cutoff frequency of the hollow waveguide. This article describes a new method of obtaining the dispersion characteristics of radially inhomogeneous circular waveguides based on the use of conditions of the transverse resonance in equivalent radial transmission lines. The proposed method is effective

for the preparation of the dispersion equations, as it uses the theory of microwave circuits and recursive expressions instead of directly solving the system of equations that are boundary conditions between layers.

Key words: circular waveguide, propagation constant, wave number, attenuation, phase constant, inhomogeneous transmission line.

1. Введение

Волноводы являются базовыми устройствами для микроволновых резонаторов, фильтров, вращающихся сочленений и многих других. Неоднородно заполненные волноводы могут быть использованы для того, чтобы получить, в том числе, низкую дисперсию и затухание в линии передачи, для создания высокочастотных резонаторов, или могут быть частью волновых фильтров. Особая форма такого заполнения представляет собой кусочно-радиальное неоднородное заполнение цилиндрических линий передачи, таких как круглые волноводы, коаксиальные и оптоволоконные линии и линии Губо. Одной из основных характеристик таких структур является постоянная распространения (волновое число), которая содержит информацию о фазовой постоянной и затухании. Наиболее часто для анализа многослойных волноводов применяют метод, в котором граничные условия между однородными слоями используются для получения частных решений дифференциальных волновых уравнений. Эти уравнения граничных условий формируют систему, которая может быть решена относительно волнового числа. С увеличением числа слоев в волноводе порядок системы также увеличивается, это увеличивает сложность вычисления результата, и найти решение становится все труднее. Следовательно, время расчетов резко увеличивается, в то время как их точность уменьшается с увеличением числа слоев рассматриваемой структуры. Тем не менее, в некоторых статьях описаны способы расчета характеристик волноводов с плавно меняющимися в поперечном сечении параметрами диэлектрического заполнения [1], но только

для осесимметричных волн. В данной статье рассматривается метод составления дисперсионных уравнений на основе модели эквивалентных радиальных линий передачи, частично описанных в [2, 3].

2. Описание метода

Предлагаемый метод использует метод функций Грина для дисперсионных уравнений, составленных для круглого радиально кусочно-неоднородного волновода. Этот метод описан в [4] и успешно применен в [5] и [6] для вопросов излучения и распространения в прямоугольном волноводе с щелями.

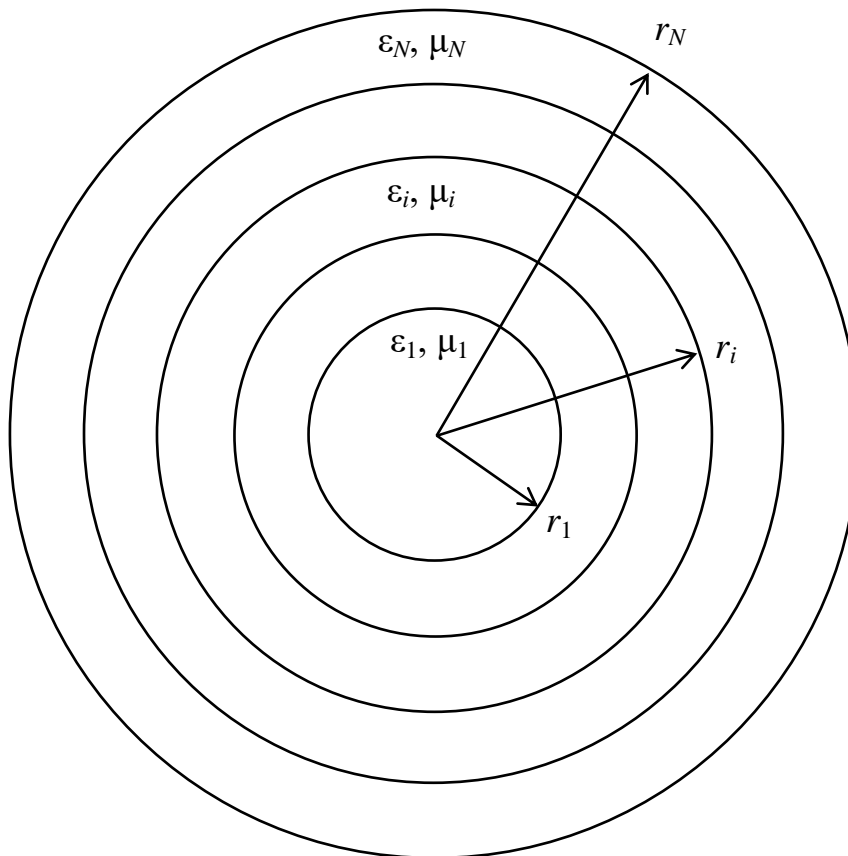


Рисунок 1 – Поперечное сечение неоднородно заполненного круглого волновода.

Идея основана на представлении компонент поля в виде ряда Фурье по азимутальным индексам и интеграла Фурье по волновым числам от спектральных составляющих в цилиндрических структурах:

$$\dot{E}_z = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-jm\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{E}_{z mh}(r) e^{-jh z} dh, \quad (1)$$

$$\dot{H}_z = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-jm\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{H}_{z mh}(r) e^{-jh z} dh, \quad (2)$$

где m – это азимутальный индекс волны, h – продольное волновое число.

Описывая электромагнитное поле как сумму электрических и магнитных волн, распространяющихся вдоль оси z , мы можем преобразовать волновые уравнения к системе из двух уравнений. Например, для E -волн:

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{d}{dr}(\dot{E}_{z mh}^e) &= -j \frac{\gamma^2 Z_0}{\varepsilon r k_0^2} (k_0 r \dot{H}_{\varphi mh}^e) - \frac{h Z_0}{\varepsilon k_0} j_{rmh}^{E\ ex} - j_{\varphi mh}^{M\ ex}, \\ \frac{d}{dr}(k_0 r \dot{H}_{\varphi mh}^e) &= j \frac{\varepsilon k_0^2}{Z_0 \gamma^2} r \left[k^2 - h^2 - \left(\frac{m}{r} \right)^2 \right] \dot{E}_{z mh}^e + \\ &+ k_0 r j_{z mh}^{E\ ex} - \frac{m h k_0}{\gamma^2} j_{\varphi mh}^{E\ ex} + \frac{\varepsilon k_0}{\gamma^2 Z_0} m j_{rmh}^{M\ ex}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где $\dot{H}_{\varphi mh}^e$, $\dot{E}_{z mh}^e$, $j_{rmh}^{E\ ex}$, $j_{z mh}^{E\ ex}$, $j_{rmh}^{M\ ex}$, $j_{\varphi mh}^{M\ ex}$ – спектральные компоненты электрического и магнитного полей, электрический и магнитный сторонние токи, соответственно, γ – волновое число.

Выполняя замену $V_E = \dot{E}_{z mh}^e$, $I_E = -k_0 r \dot{H}_{\varphi mh}^e$, мы можем поставить в соответствие уравнениям (3) систему телеграфных уравнений для радиальной линии передачи

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{d}{dr} V_E &= j Z_E \chi I_E + v_{ex}^E, \\ -\frac{d}{dr} I_E &= j Y_E \chi V_E + i_{ex}^E, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где V_E , I_E , Z_E , Y_E напряжение, ток, сопротивление и проводимость эквивалентной радиальной E -линии, v_{ex}^E и i_{ex}^E являются эквивалентными напряжением и током источников; $\chi = \sqrt{k^2 - h^2 - (m/r)^2}$ постоянная

распространения в эквивалентной радиальной линии передачи. Такие же уравнения мы можем записать для магнитной H -линии. Таким образом, используя методы теории цепей, мы можем заменить неоднородную структуру на эквивалентную цепь, состоящую из двух эквивалентных радиальных линий (рис. 2).

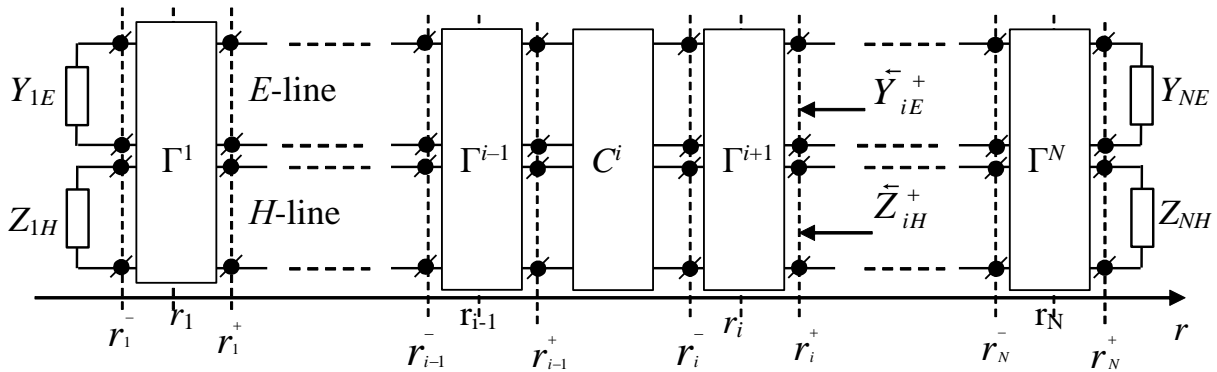


Рисунок 2 – Схема эквивалентных радиальных линий.

Границы и слои в такой цепи могут быть охарактеризованы при помощи многополюсников с матрицами передачи Γ и C соответственно, которые связывают напряжения и токи на портах. Тем же способом мы можем описать концы этих линий через сопротивления (двухполюсники) Z_{1H} , Z_{NH} , и проводимости Y_{1E} , Y_{NE} соответствующие внутренним и внешним слоям структуры.

Описанная модель может применяться, например, для расчетов поля собственных волн в каждом слое многослойного круглого волновода. В этой статье мы применили эту модель для круглого металлического многослойного волновода и рассчитали его дисперсионные характеристики.

3. Расчеты и Результаты

Чтобы определить постоянную распространения в волноводе, можно использовать условие поперечного резонанса, выраженное в уравнениях:

$$\begin{aligned} \vec{Z}_{pH}(m, h) + \vec{Z}_{pH}(m, h) &= 0, \\ \vec{Y}_{pE}(m, h) + \vec{Y}_{pE}(m, h) &= 0, \end{aligned} \tag{5}$$

где p – номер слоя с опорным сечением, от которого рассчитываются модальные направленные сопротивления и проводимости. Решение первого уравнения соответствует E -волнам, а второго H -волнам. Уравнения должны быть решены относительно h на фиксированной частоте.

Описанный метод позволяет создать алгоритм для анализа дисперсионных характеристик цилиндрических линий передачи с теоретически неограниченным числом слоев. Созданная программа позволяет рассчитывать критические частоты собственных волн и строить частотные зависимости постоянной распространения в круглом металлическом волноводе с 12 слоями. Добавление новых слоев влечет незначительное увеличение времени вычислений, потому что для учета очередного слоя необходимо всего лишь добавить два четырехполюсника в эквивалентную радиальную линию. Поскольку расчет ведется по рекуррентным соотношениям, такое добавление повлечет за собой лишь дополнительную итерацию расчета, что линейно увеличит его время.

Для оценки рабочего диапазона частот волновода обычно используют понятие коэффициента перекрытия (отношение критической частоты волны первого высшего типа и критической частоты волны основного типа):

$$T = \frac{f_c^h}{f_c^f}. \quad (6)$$

Были проанализированы следующие типы круглых волноводов: пустой волновод, однородно заполненный диэлектриком волновод, волновод с диэлектрическим стержнем, с диэлектрической втулкой, с зазором в диэлектрике, волновод с параболическим профилем диэлектрика.

Волна H_{11} является основной волной в пустом или заполненном однородным диэлектриком круглом волноводе (рис. 3 и 4). На оси ординат на всех частотных зависимостях представлено нормированное волновое число $\beta = h / k_0$. Коэффициент перекрытия в таких волноводах составляет $T = 1,306$.

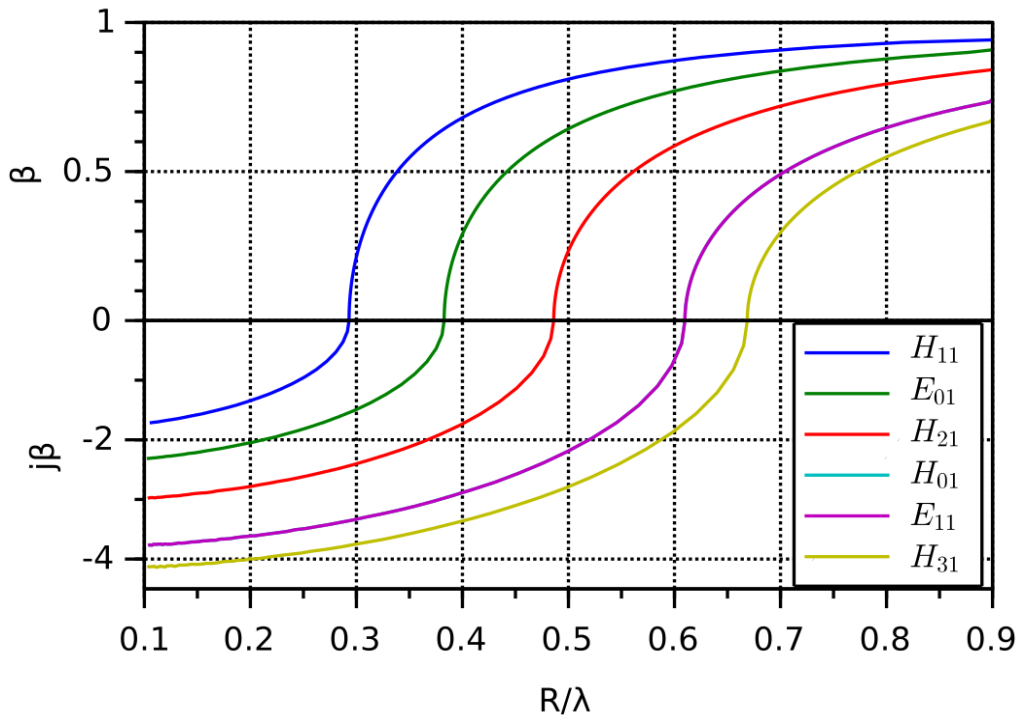


Рисунок 3 – Постоянная распространения в пустом волноводе.

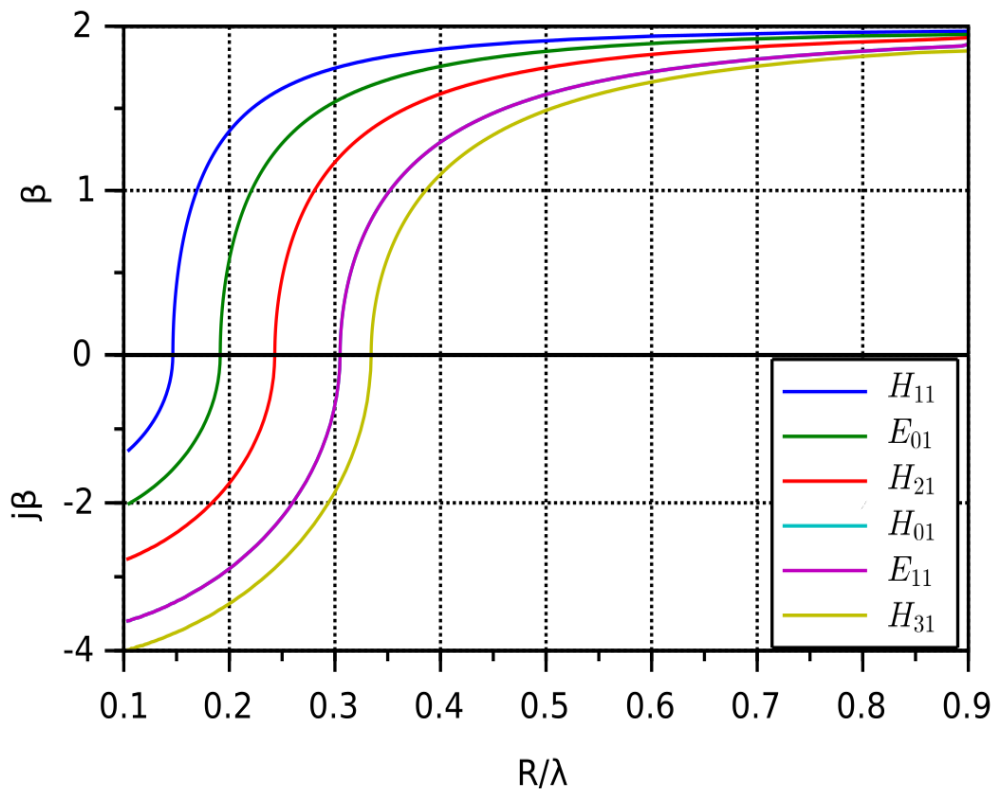


Рисунок 4 – Постоянная распространения в однородно заполненном диэлектриком волноводе.

При использовании однородного заполнения длина всех волн уменьшается в $\sqrt{\epsilon}$ раз. Это значит, что использование однородного заполнения

применимо для миниатюризации волноводов. Также уменьшаются фазовая скорость и сопротивление. Чтобы избежать большого затухания из-за диэлектрических потерь приходится использовать дорогостоящие высококачественные материалы.

Волна E_{01} часто используется в устройствах с вращающимися сочленениями волноводов. Она является первым высшим типом в пустом волноводе. Чтобы использовать эту волну, необходимо, как правило, подавить основную волну специальным модовым фильтром. Используя такой фильтр можно достичь коэффициента перекрытия $T = 1.27$.

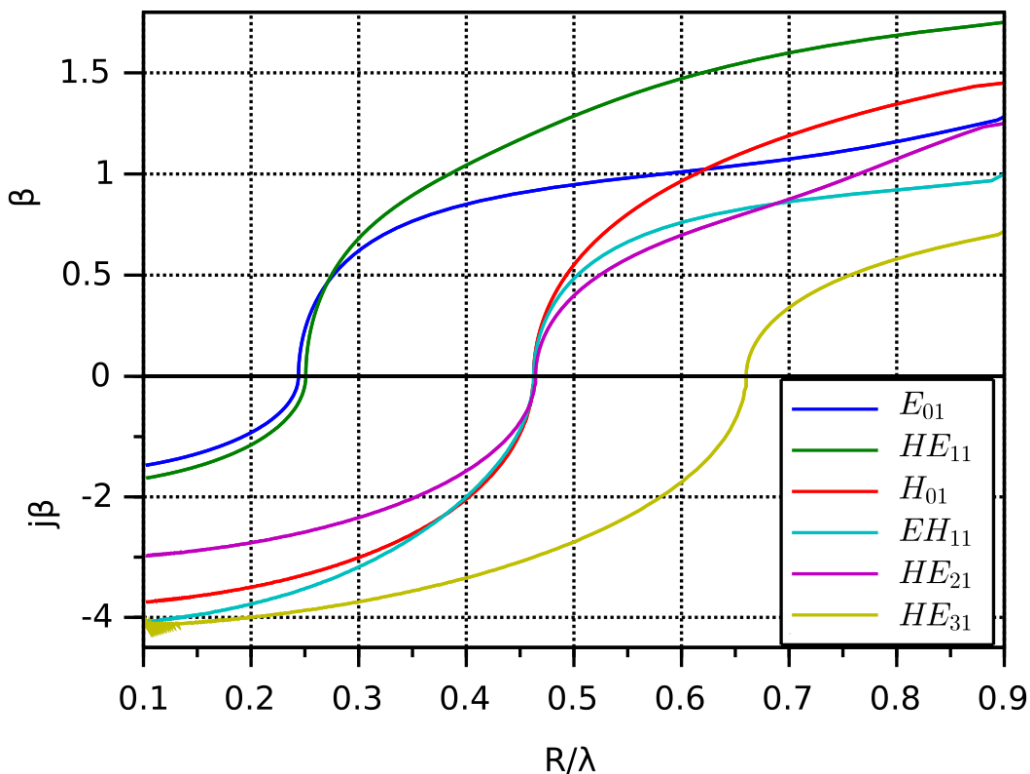


Рисунок 5 – Постоянная распространения в волноводе с диэлектрическим стержнем, $\epsilon = 4$.

Возможно создать условия для того, чтобы волна E_{01} стала основной волной. Для этого используется неоднородное заполнение волновода. На рисунках 5 и 6 показаны зависимости для волновода с диэлектрическим стержнем. Коэффициент перекрытия для основной волны принимает значение $T = 1.04$ (рис. 3) без использования специального фильтра для подавления волны HE_{11} . Однако, если подавить HE_{11} , коэффициент увеличится до значения

$T = 1.89$, а такое значение достаточно большое для круглого волновода. Использование большего значения диэлектрической проницаемости стержня (рис. 6) позволяет увеличить коэффициент до значения $T = 1.4$ без фильтра и до значения $T = 1.97$ при подавлении волны HE_{11} .

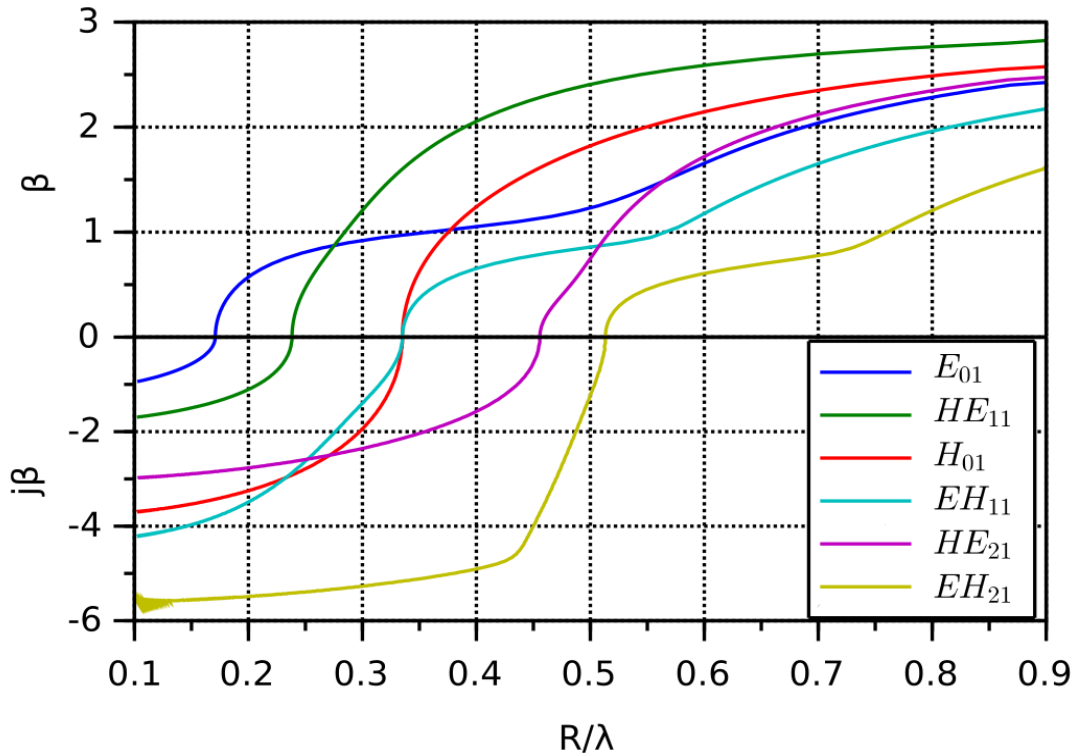


Рисунок 6 – Постоянная распространения в волноводе с диэлектрическим стержнем, $\epsilon = 9$.

Примеры демонстрируют, что параметры заполнения могут быть выбраны так, что становится возможным смена основного типа волны, такое свойство было продемонстрировано и раньше, например, в [7]. Более того, диэлектрический стержень позволяет снизить дисперсию для волны E_{01} и волн семейства EH_{m1} . Снижение дисперсии основного типа волны позволяет передавать широкополосные сигналы с меньшими искажениями.

Использование волны H_{01} в круглом волноводе очень привлекательно в контексте реализации малого затухания. В однородно заполненном волноводе волны H_{0n} и E_{n1} являются вырожденными, то есть их критические частоты и частотные зависимости коэффициента фазы полностью совпадают. Это обстоятельство усложняет использование волны H_{01} , так как она рассеивается

на случайных неоднородностях в волноводе и преобразуется в спектр волн с малыми амплитудами, включая волну E_{01} . И так как скорости распространения волн H_{01} и E_{11} очень схожи, амплитуда волны E_{11} имеет тенденцию накапливаться, пока амплитуды остальных волн все еще малы, поэтому волна H_{01} преобразуется в волну E_{11} .

В неоднородно заполненном волноводе критические частоты волн H_{01} и EH_{11} (E_{11} преобразуется в гибридную волну EH_{11}) все еще равны, но постоянные распространения разные. Это создает условия для более стабильного распространения волны H_{01} . Расщепление волн H_{01} и EH_{11} возможно в неоднородных структурах. Наилучшее расщепление достигается при применении диэлектрического цилиндра (рис. 7).

Созданные программы позволяют рассчитывать характеристики структур с двенадцатислойным заполнением. Диэлектрический профиль (рис. 8) может быть аппроксимирован кусочно-заданной функцией, таким образом, описанный метод может быть применен для изучения вопросов стратификации. Результаты моделирования продемонстрированы на рисунке 9.

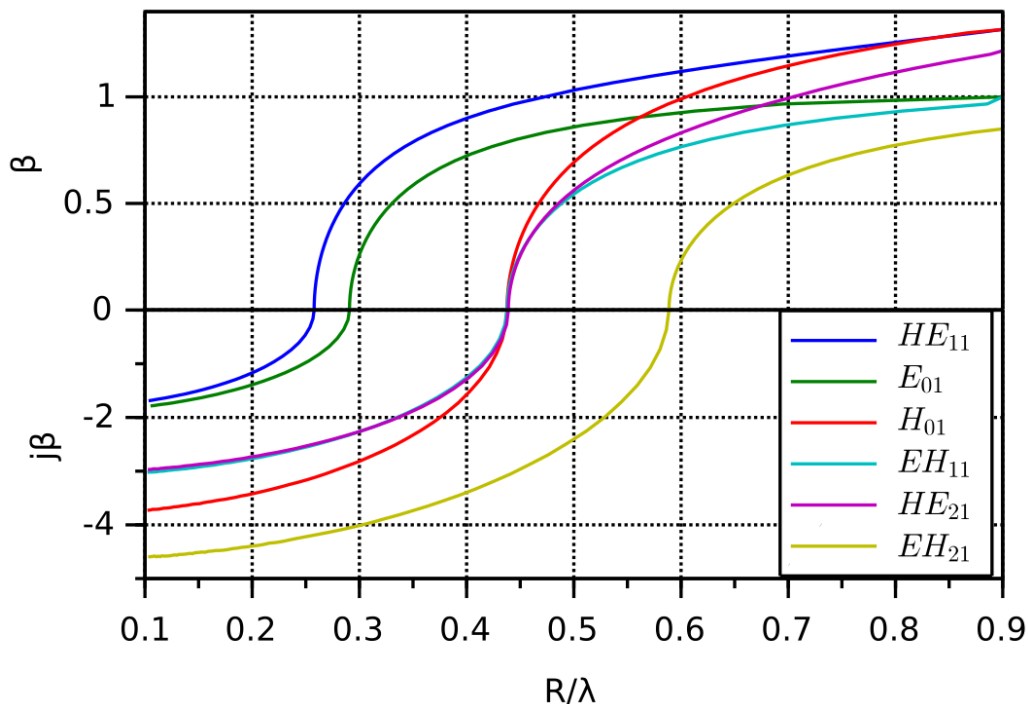


Рисунок 7 – Постоянная распространения в волноводе с диэлектрическим цилиндром.

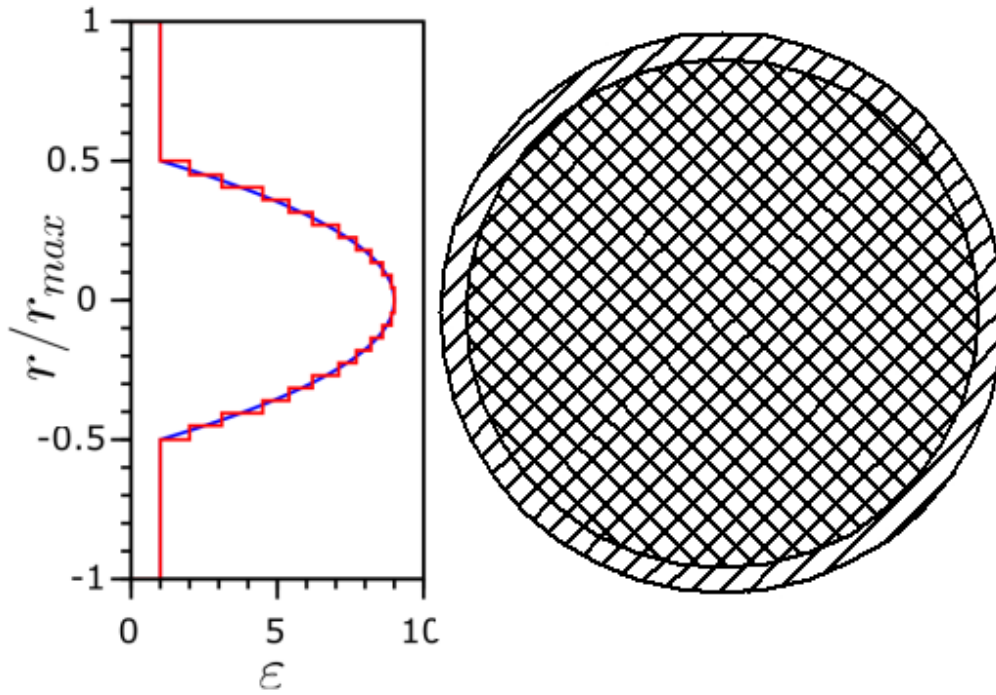


Рисунок 8 – Параболический профиль диэлектрического заполнения волновода.

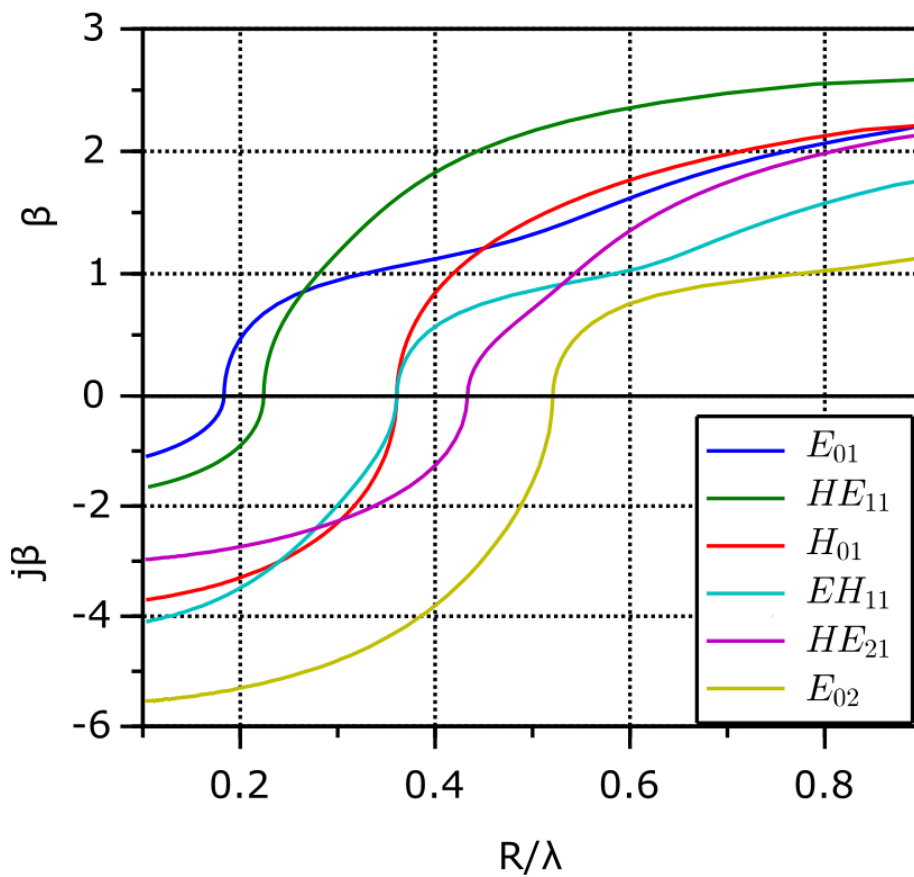


Рисунок 9 – Постоянная распространения в волноводе с параболическим профилем диэлектрического заполнения.

4. Заключение

В статье был описан новый эффективный метод для решения проблем, связанных с вычислением дисперсионных характеристик круглого металлического волновода с неоднородным заполнением. Показано, что возможен расчет не только фазовой константы, но и затухания в многомодовом волноводе. Был аппроксимирован диэлектрический профиль, а значит метод пригоден для решения вопросов оптимальной стратификации неоднородно заполненных линий. В этом случае, эффективность метода обеспечена его матричной формой и использованием рекуррентных уравнений теории цепей.

Литература

- [1] Kiang, Jean-Fu “Axisymmetric modes in an inhomogeneous circular waveguide” (1996) IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest), Vol. 2, pp. 976-979.
- [2] Мительман Ю.Е., Шабунин С.Н. Определение постоянных распространения в круглом слоистом волноводе. Вестник УГТУ-УПИ. Серия радиотехническая. Теория и практика радиолокации земной поверхности. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. № 19 (71). С. 165-169.
- [3] Князев С.Т., Мительман Ю.Е., Шабунин С.Н. Применение аппарата функций Грина радиально слоистых структур к решению задач возбуждения, излучения и дифракции волн. Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 4. С. 31-37.
- [4] Knyazev, S., Lesnaya, L., Shabunin, S. “Green's functions of multilayered cylindrical structures and their application for radiation, propagation and scattering problems solving” (2011) SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings, pp. 748-752.
- [5] Abdullin, R.R., Mitelman, Yu.E. “Using of partially filled rectangular waveguide for leaky-wave antenna design” CriMiCo 2014 - 24th International

Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings, pp. 543-544.

[6] Abdullin, R.R., Mitelman, Y.E., Shabunin, S.N. “Velocity factor of leaky-wave antenna based on partially filled rectangular waveguide” 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 - Proceedings, pp. 406-409.

[7] Tsandoulas, G.N.; Ince, W.J. “Modal Inversion in Circular Waveguides - Part I: Theory and Phenomenology” Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 1971, Vol. 19, Iss. 4. Pp. 386 – 392.