

Издательский дом

МЕДИА ПАБЛИШЕР

Заказ журналов:

- по каталогу "Роспечать" (индекс 80714)
- в редакции (t-comm@yandex.ru)

Региональные подписные агентства
<http://www.media-publisher.ru/raspr.shtml>

Периодичность выхода — 12 номеров в год
Стоимость одного экземпляра 500 руб.

Целевая аудитория по распространению

- Телекоммуникационные компании
- Дистрибьюторы телекоммуникационного оборудования и услуг
- Разработчики и производители абонентского оборудования
- Энергетические компании
- Автотранспортные предприятия
- Компании, занимающиеся железнодорожными, воздушными и морскими перевозками
- Провайдеры охранно-поисковых услуг
- Геодезические и картографические организации
- Государственные ведомства и организации;
- Строительные компании
- Профильные учебные заведения

Тираж 3000 экз. + Интернет-версия

Адрес редакции

111024, Россия, Москва,
ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514
e-mail: t-comm@yandex.ru
Тел.: +7 (495) 957-77-43

РЕДАКЦИЯ

Издатель

Светлана Дымкова (ds@media-publisher.ru)

Директор отдела развития и рекламы

Ольга Дорошкевич (ovd@media-publisher.ru)

Отдел распространения и подписки

info@media-publisher.ru

Предпочтательная подготовка

ООО "ИД Медиа Паблишер"

Поддержка Интернет-портала

Сергей Алексанян

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС77-27364.
Язык публикации: русский, английский.

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет

Материалы, опубликованные в журнале — собственность ООО "ИД Медиа Паблишер". Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

© ООО "ИД Медиа Паблишер", 2015

Издательство

(495) 957-77-43
(926) 218-82-43
info@media-publisher.ru



полный цикл подготовки книг, периодических изданий и рекламной продукции — эксклюзивный дизайн

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ЛИТЕРАТУРНОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННАЯ ОФСЕТНАЯ И ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ В КРАТЧАЙШИЕ СРОКИ

ДОСТАВКА ГОТОВОГО ТИРАЖА

Индексирование журнала T-Comm



ISSN 2072-8735 (Print) ISSN 2072-8743 (Online)



Подписной индекс Агентства "Роспечать" — 80714

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобрнауки России для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание кандидатских и докторских диссертаций.

Учредитель

ООО "Издательский дом Медиа Паблшер"

Главный редактор

Тихвинский Валерий Олегович

Издатель

Дымкова Светлана Сергеевна
ds@media-publisher.ru

Редакционная коллегия

Аджемов Артём Сергеевич

(д.т.н., профессор, ректор МТУСИ), Россия

Алексеев Евгений Борисович

(д.т.н., профессор, МТУСИ), Россия

Бугаев Александр Степанович

(академик РАН), Россия

Вааль Альберт

(д.т.н., старший научный сотрудник Ганноверского университета им. Лейбница на кафедре коммуникационной техники), Германия

Головачев Юлиус

(управляющий консультант Deitecon International GmbH), Германия

Дулкейтс Эрик

(д.т.н., старший исполнительный директор корпорации Deitecon), Силиконовая долина, США

Зубарев Юрий Борисович

(д.т.н., член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ, зам. председателя экспертного совета ВАК по электронике, радиотехнике и связи), Россия

Кирхгесснер Юрий

(д.т.н., Директор IncotelogyLtd.), Великобритания

Корбетт Ровэлл

(д.т.н., директор по исследованиям в научно-исследовательском центре China Mobile Research Institute, профессор университета Назарбаева), Гон-Конг (Китай), США

Кузовкова Татьяна Алексеевна

(д.э.н., декан экономического факультета МТУСИ), Россия

Кюркчан Александр Гаврилович

(д.ф.м.н., профессор ФГОБУ ВПО МТУСИ), Россия

Сеилов Шахмаран Журсинбекович

(д.э.н., Президент Казахской академии информкоммуникаций), Казахстан

Сысоев Николай Николаевич

(д.ф.м.н., декан физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова), Россия

Шарп Майкл

(д.э.н., вице-президент европейского института стандартизации – ETSI), Великобритания

СОДЕРЖАНИЕ

СВЯЗЬ

Ворожцов А.С., Тутова Н.В., Тутов А.В.

Оптимизация размещения облачных серверов в центрах обработки данных

4

Гребешков А.Ю., Зуев А.В.

Исследование доступа к каналам передачи в реконфигурируемых когнитивных сетях связи следующего поколения

9

Росляков А.В., Лысиков А.А., Халиуллина Ю.Т.

Задачи планирования и оптимизации наложенных сервисных сетей

15

Санников В.Г., Алёшинцев А.В.

Многочастотный модем как один из основных элементов системы "интеллектуальное здание" при удаленном управлении объектами

21

Фролов А.А., Шинаков Ю.С.

Исследование и разработка многочастотной сверхширокополосной системы с ДЧ сигналами

28

Конкин В.В.

Варианты построения единой системы радиоконтроля московского региона

34

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Елизаров А.А., Шаймарданов Р.В.

Анализ методов и устройств для трансуретральной микроволновой термотерапии биотканей

38

Корнюхин В.И., Седов В.М.

Расчет и экспериментальные исследования плоской печатной двухслойной антенны

44

Гайнутдинов Т.А., Гаранкина Н.И., Кочержевский В.Г.

Двухзвенное согласующее устройство длинноволновых радиовещательных антенн

48

Кравченко Н.П., Мухин С.В., Пресняков С.А.

Замедляющие системы миллиметрового диапазона

57

Мозговой Ю.Д., Хриткин С.А.

Особенности взаимодействия встречных электронных потоков в трубе дрейфа

64

Нефедов В.Н., Мамонтов А.В., Симонов В.П., Чебыкин А.Е.

Оценка применимости микроволнового излучения для термообработки базальта и изделий из него

70

ЭКОНОМИКА

Бойченко И.В., Сердотецкая Л.К.

Оценка взаимосвязи между удовлетворенностью и лояльностью телезрителей как потребителей телевизионной рекламы

74

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

Yahya Al-Naggar.

A novel clustering method for wireless body area sensor networks using fuzzy logic

78

Shuvalov V.P., Minina E.A., Mitroshina N.O.
Reasonability of dependability differentiated service of connection requests

84

CONTENT

COMMUNICATIONS

Vorozhtsov A.S., Tutova N.V., Tutov A.V.

Optimal cloud servers placement
in data centers 4

Grebeshkov A.Y., Zuev A.V.

Exploring access procedure to transmission
channel in the next generation
reconfigurable cognitive networks 9

Roslyakov A.V., Lysikov A.A.,
Haliullina Ju.T.

Planning and optimization problems
of service overlay networks 15

Sannikov V.G., Alyoshintsev A.V.

High frequency modem as one of the main
elements of the "Smart building" system
as part of a remote objects control 21

Frolov A.A., Shinakov Yu.S.

Research and development
of multifrequency uwb systems
with DF signals 28

Konkin V.V.

Options for the construction of a unified
system of radio monitoring in Moscow
region 34

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

Yelizarov A.A., Shaymardanov R.V.

The analysis of methods and devices
for biofabrics transurethral microwave
thermotherapy 38

Kornyukhin V.I., Sedov V.M.

Calculation and pilot studies
of the flat printing two-layer aerial 44

Gainutdinov T.A., Garankina N.I.,
Kocherzhewski V.G.

Two-unit matching device
of the long-wave broadcasting
antennas 48

Kravchenko N.P., Mukhin S.V.,
Presnyakov S.A.

Millimeter-band slow-wave structures 57

Mozgovi Yu.D., Khritkin S.A.

Features of interaction of counter-
propagating electron beams
in the drift tube 64

Nefedov V.N., Mamontov A.V.,
Simonov V.P., Chebykin A.E.

Evaluation of microwave radiation
applicability for the heat treatment
of basalt and its products 70

ECONOMY

Boychenko I.V., Serdotetskaya L.K.

Assessment of relationship between
satisfaction and loyalty of tv audience
as consumers of TV advertising 74

PUBLICATIONS IN ENGLISH

Yahya Al-Naggar.

A novel clustering method
for wireless body area sensor
networks using fuzzy logic 78

Shuvalov V.P., Minina E.A.,
Mitroshina N.O.

Reasonability of dependability
differentiated service of connection
requests 84

T•C o m m

Telecommunications and transport

Volum 9. №6-2015

The journal is included in the list of scientific publications, recommended Higher Attestation Commission Russian Ministry of Education for the publication of scientific works, which reflect the basic scientific content of candidate and doctoral theses.

Founder

"Media Publisher", Ltd.

Publisher

Dymkova Svetlana Sergeevna
ds@media-publisher.ru

Editor in Chief

Dr. Valery Tikhvinskiy

Editorial board

Adzhemov Artem S.

Professor, Rector MTUCI, Russia

Alekseev Evgeny B.

Full Professor, MTUCI, Russia

Bugaev Alexander S.

Academician of the RAS, Russia

Corbett Rowell

Full Professor. Electronic & Electrical Engineering Nazarbayev University, Hong Kong (China), USA

Golovachyov Julius

Managing Consultant Detecon International GmbH, Germany

Dulkeys Eric

Ph.D., chief executive officer of the corporation Detecon, USA

Kirhgeessner Yuri

Ph.D., Director IncotelogyLtd., United Kingdom

Kuzovkova Tatyana A.

PhD, Dean of the Faculty of Economics MTUCI, Russia

Kyurkchan Alexander G.

Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia

Seilov Shakhmaran Zh.

PhD, President of the Kazakh Academy of Infocomm, Kazakhstan

Sharpe Michael

PhD, vice-president of the European Standards Institute – ETSI, United Kingdom

Sysoev Nikolai N.

Doctor of sciences, Dean of the Faculty of Physics of Moscow State University, Lomonosov, Russia

Waal Albert

Ph.D., Senior Research Fellow University of Hanover. Leibniz at the Department of Communications Technology, Germany

Zubarev Yuri B.

Ph.D., corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of Russia, Deputy, Chairman of the Expert Council WAC electronics, radio and communications, Russia

All articles and illustrations are copyright. All rights reserved. No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock Company

© "Media Publisher", 2015

www.media-publisher.ru

ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Кравченко Наталья Павловна,
доцент, к.т.н., Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ),
Москва, Россия, natkrav@inbox.ru

Мухин Сергей Владимирович,
профессор, д.т.н., Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ),
Москва, Россия, mukhin_serгей@yahoo.com

Пресняков Семен Андреевич,
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ),
Москва, Россия, pressnyak@gmail.com

Ключевые слова: замедляющие системы, волноводно-резонаторная модель, электродинамические характеристики, лампа бегущей волны, программа HFSS, миллиметровый диапазон волн.

Рассматривается модель усиления электромагнитных волн миллиметрового диапазона нерелятивистскими электронными потоками в одномерно периодических электродинамических системах. В качестве замедляющих систем исследуются системы типа "петляющий волновод" и типа "встречные штыри", пригодные для работы в миллиметровом диапазоне. Основными направлениями исследования являются:

- разработка модели лампы бегущей волны на основе разностной теории возбуждения электродинамических систем токами;
- моделирование и расчет по упрощенным волноводно-резонаторным моделям электродинамических свойств замедляющих систем типа "петляющий волновод" в миллиметровом диапазоне;
- представление волноводно-резонаторной модели замедляющей системы типа "петляющий волновод", составленной из отрезков прямоугольного и П-образного волновода;
- получение с помощью волноводно-резонаторной модели коэффициентов матрицы передачи, позволяющей провести анализ дисперсии и сопротивления связи в полосе усиливаемых частот;
- исследование замедляющей системы типа "петляющий волновод" с учетом геометрического поворота фазы поля в соседних зазорах с помощью линейной волноводно-резонаторной модели, представляемой цепочкой четырехполюсников, путем противоположного включения наведенного тока в соседних зазорах взаимодействия и с учетом первой пространственной гармоники, используемой в лампах бегущей волны при расчете дисперсии;
- расчет ряда вариантов, характеризующих основные закономерности изменения свойств замедляющей системы "петляющий волновод";
- моделирование свойств замедляющих систем типа "петляющий волновод" с использованием 3D-кодов;
- применение результатов, полученных с использованием 3D кодов, в качестве численного эксперимента для настройки волноводно-резонаторной модели;
- построение моделей штыревых замедляющих систем с использованием волноводно-резонаторной модели, настраиваемой по экспериментальным опорным точкам.

Показано, что для моделирования замедляющих систем типа "петляющий волновод" и "встречные штыри" могут использоваться волноводно-резонаторные модели, настраиваемые по полученным экспериментально опорным точкам. В качестве опорных точек могут также использоваться значения замедления и сопротивления связи, полученные численным экспериментом с помощью программы HFSS. Построенные таким образом волноводно-резонаторные модели достаточно точны и просты. Показано, что эти модели могут успешно применяться при расчете ламп бегущей волны, работающих в миллиметровом диапазоне.

Для цитирования:

Кравченко Н.П., Мухин С.В., Пресняков С.А. Замедляющие системы миллиметрового диапазона // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Том 9. – №6. – С. 57-63.

For citation:

Kravchenko N.P., Mukhin S.V., Presnyakov S.A. Millimeter-band slow-wave structures. T-Comm. 2015. Vol 9. No.6, pp. 57-63. (in Russian).

1. Введение

В последние годы наблюдается быстрое расширение области применения электромагнитных полей миллиметрового диапазона, что стимулирует появление новых типов миллиметровых устройств, развитие компьютерных методов их расчета и проектирования. В свою очередь, появление новых микроволновых генераторов, усилителей, преобразователей, разработка новых материалов, линий передачи, фильтров и других устройств позволяет продвигать миллиметровые технологии в новые области науки и техники.

Для описания ЛБВ (ламп бегущей волны) с дискретным взаимодействием, в которых фаза поля в зазорах взаимодействия в продольном направлении остается постоянной, электродинамически обоснованным является использование разностного уравнения [1]:

$$V_{k+1} - (A_{11} + A_{22})V_k + V_{k-1} = -A_{12}J_k \quad (1)$$

Этому уравнению соответствует шестиполюсник, у которого входы возбуждения полем и током объединены. Секция ЛБВ, возбуждаемая заданным током, в этом случае моделируется цепочкой таких шестиполюсников (рис. 1), что позволяет легко учитывать граничные условия на концах секции и отражения, возникающие при объединении в секцию неидентичных ячеек.

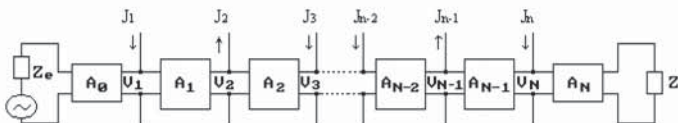


Рис. 1. Модель секции ЛБВ, составленная из шестиполюсников

Адекватность математической модели дискретного взаимодействия определяется точностью задания коэффициентов конечно-разностного уравнения, имеющих определенный электродинамический смысл и задаваемых через коэффициенты матрицы передачи четырехполюсника, который получается из шестиполюсника при отсутствии возбуждающего тока. Этот четырехполюсник, в свою очередь, является математической моделью ячейки резонаторной ЗС. Его коэффициенты определяют точность восстановления электродинамических характеристик моделируемой резонаторной замедляющей системы. Таким образом, их правильный выбор обеспечивает одновременно адекватное описание процессов дискретного взаимодействия в ЛБВ и электродинамических процессов в замедляющей системе.

Поэтому разработка простых и точных моделей ЗС, используемых при моделировании приборов, является актуальной задачей.

При моделировании могут использоваться как волноводно-резонаторная модель, так и результаты трехмерного моделирования с помощью программы HFSS.

2. Расчет дисперсии и сопротивления связи замедляющих систем типа «петляющий волновод» и «встречные штыри» с помощью волноводно-резонаторной модели

Согласно предложенной в [2] волноводно-резонаторной модели (ВРМ) замедляющая система заменяется эквивалентной системой, составленной из отрезков волноводов. В отличие от [3], в ВРМ отрезки волноводов могут быть направлены вдоль и поперек оси ЗС, соответственно направлению потока энергии на данном участке ЗС. Опыт применения ВРМ для моделирования ЛБВ показал возможность хорошего качественного, а при надлежащем выборе размеров волноводов по опорным точкам и количественного описания свойств ЗС [4]. В данной работе дисперсионные свойства, а именно, импеданс связи и дисперсионные характеристики в полосах прозрачности и непрозрачности ЗС рассмотрены с помощью ВРМ для простейшего вида замедляющей системы типа «петляющий волновод», состоящего из трех отрезков волноводов (рис. 2) при учете в каждом из них только одной волны с волновым числом h и волновым сопротивлением Z .

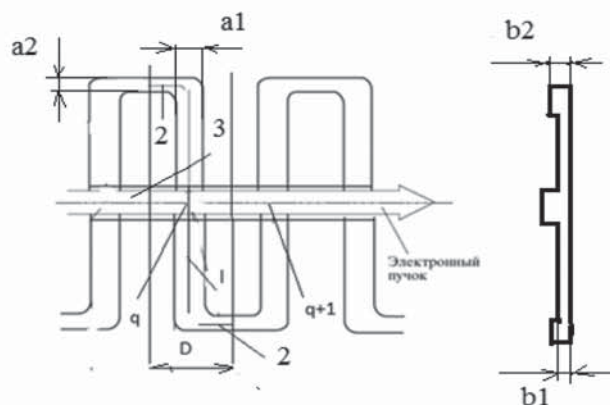


Рис. 2. Схематическое изображение замедляющей системы типа «петляющий волновод» с электронным потоком:
1 – отрезок волновода длины l_1 , шириной a_1 и толщиной b_1 ;
2 – отрезок волновода длиной l_2 , соответствующий половине щели связи, шириной a_2 и толщиной b_2 ;
3 – электронный пучок.

Проведено также исследование и расчет дисперсионных свойств замедляющей системы типа «встречные штыри», представленной на рис. 3.

Для моделирования этой ЗС также используется волноводно-резонаторная модель, но более сложная, составленная из большего числа отрезков волноводов.

Для прямоугольного волновода традиционным является представление волной типа H_{10} с компонентами электрического поля:

$$H_z = C \cos k_{sp} x \exp(ihz), H_x = -i \frac{h}{k_{sp}} C \sin k_{sp} x \exp(ihz), \quad (2)$$

$$E_y = iC \frac{k}{k_{sp}} Z_0 \sin k_{sp} x \exp(ihz), E_x = E_z = 0, H_y = 0$$

где $k = \omega/c, Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ – волновое число и импеданс в свободном пространстве, $k_{кр} = \pi/a$ – критическое волновое число волны H_{10} волновода, $h = \sqrt{k^2 - k_{кр}^2}$, оси x, y, z направлены соответственно вдоль широкой стенки размером "а", узкой стенки размером "b" и продольной оси рассматриваемого отрезка волновода.

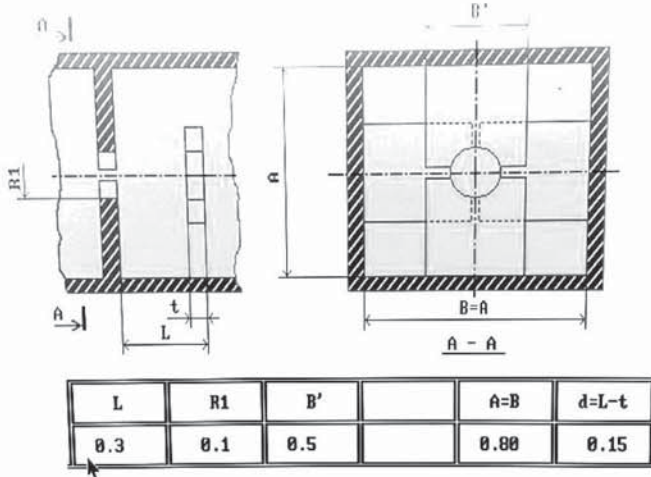


Рис. 3. Замедляющая система типа «встречные штыри» и ее геометрические размеры

В общем случае для составления ВРМ можно использовать отрезки волноводов любого сечения, Н, П-образных или др. Такая волноводно-резонаторная модель приближенно описывает основные свойства замедляющих систем, по крайней мере, в двух полосах прозрачности и непрозрачности для ЗС типа «петляющий волновод», «встречные штыри», «цепочка связанных резонаторов» со щелями связи, повернутыми на 180°, а также для спирального скрученного волновода.

Используем определение волнового сопротивления прямоугольного волновода Z как отношение среднего по x напряжения U к поверхностному току J вдоль оси волновода [5]:

$$Z = \frac{U}{J} = \frac{-\frac{1}{a} \int_0^a E_y b dx}{\int_0^a H_x dx} = Z_0 \frac{b k}{a h} \quad (3)$$

В пренебрежении потерями волновое сопротивление Z является вещественным в полосе прозрачности волновода, когда $k > k_{кр}$ и мнимым вне полосы прозрачности, когда $k < k_{кр}$. При этом оно имеет индуктивный характер для затухающей волны $h = i \sqrt{k_{кр}^2 - k^2}$.

Тогда матрица передачи j-го отрезка волновода геометрической длины l_j и электрической длины $\theta_j = h_j l_j$ имеет вид:

$$\|A_j\| = \begin{vmatrix} \cosh(\theta_j) & -iZ_j \sinh(\theta_j) \\ -\frac{i}{Z_j} \sinh(\theta_j) & \cosh(\theta_j) \end{vmatrix} \quad (4)$$

а матрица передачи участка ЗС между серединами соседних зазоров взаимодействия (рис. 4) получается как произведение трех матриц $\mathbf{A} = \mathbf{A2A1A3}$. Второй и третий отрезки волноводов в нашем случае одинаковы, так что $\mathbf{A2} = \mathbf{A3}$, тогда получаем следующее выражение для компонент:

$$\begin{aligned} A_{11} &= A_{22} = \cosh \theta_1(\lambda) \cosh \theta_2(\lambda)^2 - \\ &- \left(\frac{Z_1(\lambda)}{Z_2(\lambda)} + \frac{Z_2(\lambda)}{Z_1(\lambda)} \right) \sinh \theta_1(\lambda) \sinh \theta_2(\lambda) \cosh \theta_2(\lambda) + \sinh \theta_2(\lambda)^2 \cosh \theta_1(\lambda) \\ A_{22} &= -iZ_2 \left(\frac{Z_1(\lambda)}{Z_2(\lambda)} \sinh \theta_1(\lambda) \cosh \theta_2(\lambda)^2 + \frac{Z_2(\lambda)}{Z_1(\lambda)} \sinh \theta_1(\lambda) \sinh \theta_2(\lambda)^2 + \right. \\ &+ 2 \cosh \theta_1(\lambda) \cosh \theta_2(\lambda) \sinh \theta_2(\lambda) \left. \right) \\ A_{21} &= -\frac{i}{Z_2(\lambda)} \left(\frac{Z_1(\lambda)}{Z_2(\lambda)} \sinh \theta_2(\lambda)^2 \sinh \theta_1(\lambda) + \frac{Z_2(\lambda)}{Z_1(\lambda)} \cosh \theta_2^2 \sinh \theta_1(\lambda) + \right. \\ &+ 2 \sinh \theta_2(\lambda) \cosh \theta_1(\lambda) \cosh \theta_2(\lambda) \left. \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Полученные с помощью ВРМ выражения (5) позволяют провести анализ дисперсии и сопротивления связи в полосе частот. Рассматривалась ЗС типа «петляющий волновод» с учетом геометрического поворота фазы поля в соседних зазорах, что в линейной ВРМ, представляемой цепочкой четырехполюсников, можно учесть путем противоположного включения наведенного тока в соседних зазорах. Расчет дисперсии проводился для обычно используемой в ЛБВ первой пространственной гармоники по формулам:

$$\cos \varphi_s = A_{11}, \varphi_{s,1} = \varphi_s + \pi, \frac{c}{V_{s,1}} = \frac{h_{s,1}}{k} = \frac{\varphi_{s,1}}{kD}, \quad (6)$$

где φ_s – набег фазы на шаге D, $\varphi_{s,0} = \varphi_s - \pi \leq 0$ – набег фазы основной пространственной гармоники с учетом геометрического поворота, $\varphi_{s,1} = \varphi_{s,0} + 2\pi$ – набег фазы первой пространственной гармоники, $h_{s,1} = \varphi_{s,1}/D$ – ее волновое число. Для вычисления сопротивления связи Z могут использоваться выражения:

$$\text{Re } Z = M_p \text{Re} \sqrt{\frac{A_{12}}{A_{21}}}, \text{Im } Z = M_p \text{Im} \sqrt{\frac{A_{12}}{A_{21}}} \quad (7)$$

рассчитанные с использованием формул (5) и формулы, определяющей коэффициент формы зазора

$$M_p = R_M \frac{\sin \frac{\varphi_s d}{2D}}{\frac{\varphi_s d}{2D}} \quad (8)$$

Рассмотрим ряд вариантов расчетов, характеризующих основные закономерности изменения свойств замедляющей системы типа «петляющий волновод».

Свойства замедляющей системы типа «петляющий волновод» определяются её геометрией, и при определенных размерах такая система становится пригодной для миллиметрового диапазона. На следующих рисунках даны результаты расчета для этого случая.

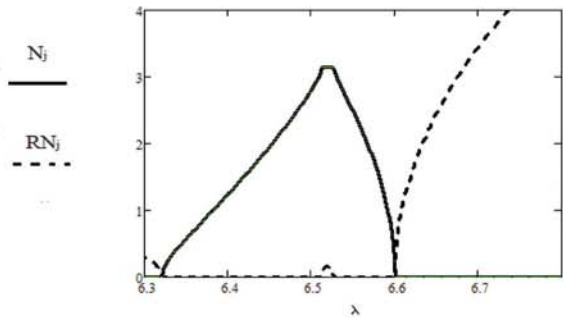


Рис. 4. Замедление N_j и реактивное затухание RN_j (пунктир) ЗС с размерами: $l_1=18.6\text{мм}$; $a_1= a_2=a_3=3.3\text{ мм}$; $l_2=l_3=1.1\text{мм}$; $b_1=1\text{мм}$; $b_2=b_3=1.6\text{ мм}$ для длин волн от 6.4 до 6.8 мм

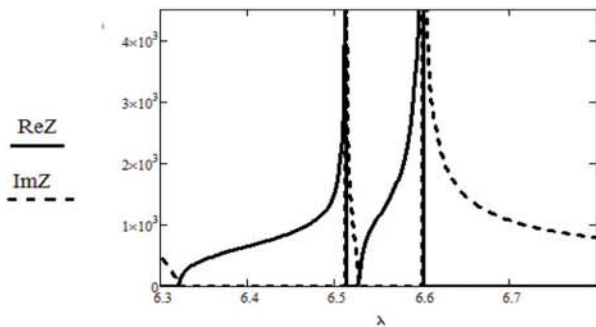


Рис. 5. Действительная ReZ и мнимая ImZ (пунктир) части сопротивления связи, рассчитанные с помощью ВРМ, для ЗС с указанными на рис. 4 размерами

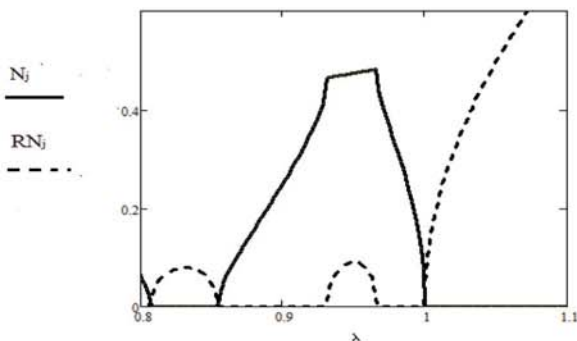


Рис. 6. Замедление N_j и реактивное затухание RN_j (пунктиром) ЗС с геометрическими размерами: $l_1=1\text{мм}$; $l_2=l_3=0,25\text{мм}$; $a_1=a_2=a_3=0.5\text{мм}$; $b_1=0.25\text{мм}$; $b_2=0.5\text{мм}$

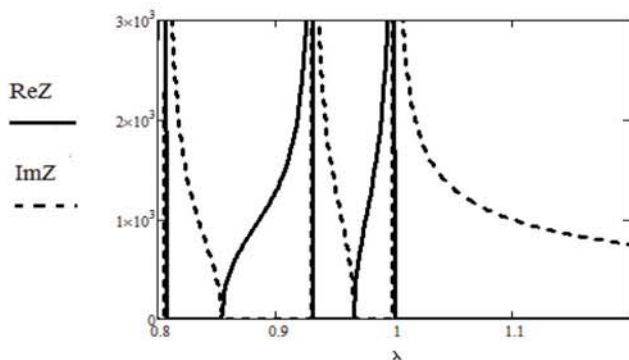


Рис. 7. Действительная ReZ и мнимая ImZ (пунктир) части сопротивления связи петляющего волновода миллиметрового диапазона

3. Расчет опорных точек с помощью трехмерного моделирования

Теперь обратимся к моделированию и расчетам с использованием программы HFSS. Программа позволяет осуществить трехмерное моделирование интересующих нас систем. Проведенные для данных моделей расчеты позволят впоследствии установить соответствие и выявить особенности по сравнению с результатами, полученными ранее с помощью волноводно-резонаторной модели.

Рассматриваемые в настоящей работе резонаторные замедляющие системы могут быть представлены четырехполюсниками, которые моделируются в HFSS ячейками с двумя портами (рис. 7).

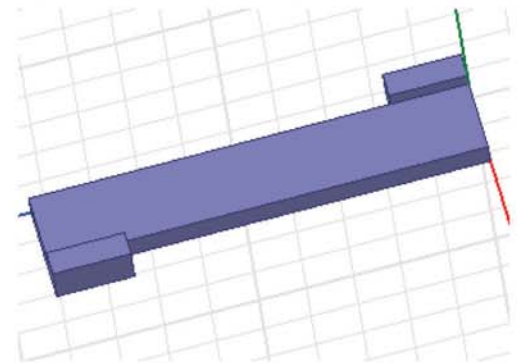


Рис. 7. Модель ЗС с двумя портами

В качестве исходных данных могут быть использованы наборы S , Z и T матриц, полученных для заданного в HFSS набора частот.

Алгоритм обработки данных трехмерного моделирования включает:

1. Ввод исходных данных из файла.
2. Преобразование исходной S , Z или T матрицы в A матрицу.
3. Определение собственных чисел A матрицы.
4. Определение собственных векторов A матрицы.
5. Расчет замедления и характеристического сопротивления ЗС.
6. Представление графических материалов.

В качестве программной среды используется MathCAD. Данный математический пакет обладает всеми необходимыми функциями для решения поставленной нами задачи, а именно: считывание данных из файлов, операции с матрицами, расчет собственных значений и векторов матриц, построение графиков.

В случае рассмотрения ЗС с двумя портами матрица перехода к A матрице соответствует четырехполюснику [4,6]. После получения нужной A -матрицы рассчитываются ее собственные значения, используя функцию `eigenvals` [6].

Собственные значения являются комплексными числами. В данном простейшем случае A -матрица имеет размерность 2×2 , в результате чего мы получаем два собственных значения $e^{\alpha \pm j\varphi}$, причем они будут комплексно сопряженными. Мнимая часть логарифма собственного значения соответствует набегу фазы на

ячейку. Действительная часть логарифма соответствует реактивному затуханию. Если мы возьмем логарифм от двух комплексно сопряженных собственных значений, то результат будет отличаться только знаком. Поэтому для удобства построения графиков, значения набега фазы и затухания берутся по модулю. После того, как мы получили значения фазы, мы можем приступить к расчету характеристического сопротивления. Для этого мы находим собственные вектора, соответствующие двум собственным значениям, каждому собственному значению соответствует один собственный вектор, определяющий напряжение и ток в сечении порта.

Отношение этих величин, соответственно для первого и второго собственного значения, дает значение характеристического сопротивления, которое так же является комплексным числом и имеет действительную и мнимую части. Следующий этап расчета – получение коэффициента замедления. Для этого нам требуется взять произведение фазы и длины волны, поделенное на $2\pi L$, где L – период системы. Результаты расчетов представлены на рис. 8-11.

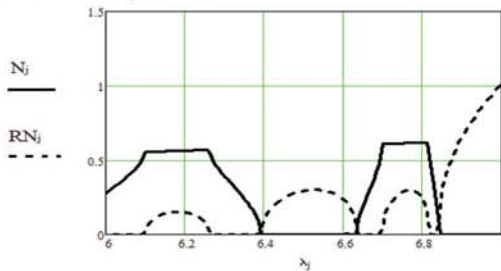


Рис. 8. Замедление N_j и реактивное затухание RN_j (пунктир) ЗС с: $l_1=18.6\text{мм}$; $l_2=l_3=1.1\text{мм}$; $a_1=a_2=a_3=3.3\text{мм}$; $b_1=1\text{мм}$; $b_2=1.6\text{мм}$

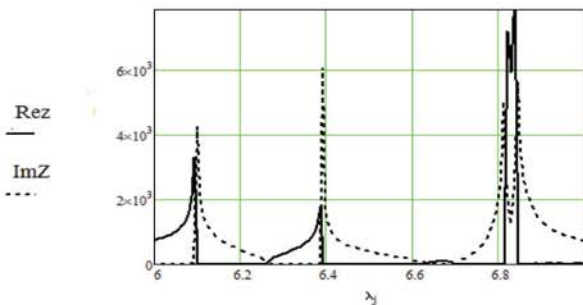


Рис. 9. Действительная ReZ и мнимая ImZ (пунктир) части сопротивления связи петляющего волновода

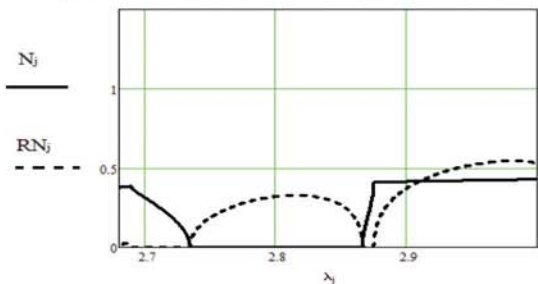


Рис. 10. Замедление N_j и реактивное затухание RN_j (пунктир) ЗС с: $l_1=9.3\text{мм}$; $l_2=l_3=1.1\text{мм}$; $a_1=a_2=a_3=1.3\text{мм}$; $b_1=1\text{мм}$; $b_2=1.3\text{мм}$

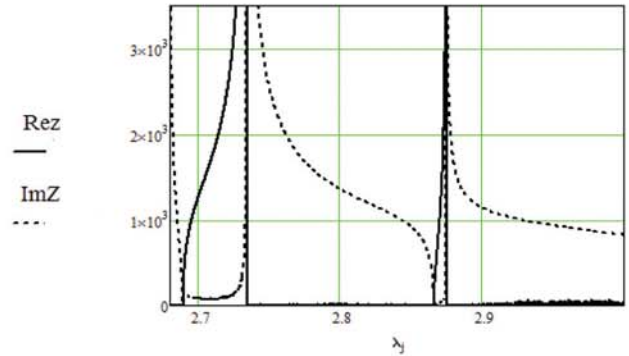


Рис. 11. Действительная ReZ и мнимая ImZ (пунктир) части сопротивления связи петляющего волновода

Как видно из расчетов, результаты, полученные с помощью BPM, несколько отличаются от результатов, полученных с помощью HFSS. Это отличие обусловлено тем, что BPM не учитывает изгибы ЗС в местах соединения отрезков волновода, а также наличие пролетного канала. Результаты расчетов по программе HFSS можно считать более точными, так как они были получены более точным методом и, в свою очередь, могут использоваться в качестве численного эксперимента для настройки BPM.

Для настройки можно использовать три точки по значению замедления, соответствующие π -виду, 2π -виду и $\frac{3\pi}{2}$ – виду, а также одну точку по сопротивлению связи, соответствующую середине полосы пропускания.

В соответствии с методом эквивалентных систем настройка, то есть выбор эквивалентных параметров BPM осуществляется по экспериментально заданным точкам дисперсионной характеристики (опорным точкам) в процессе решения задачи параметрической оптимизации.

Для выбора m эквивалентных параметров BPM $\bar{x}^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)$ требуется задать p опорных точек, к которым относятся замедление $\bar{n}^0 = (n_1^0, n_2^0, \dots, n_p^0)$ и сопротивление связи $\bar{R}^0 = (R_1^0, R_2^0, \dots, R_p^0)$.

Задача параметрической оптимизации в этом случае формулируется следующим образом:

$$\min F(\bar{x}) = F(\bar{x}^0), \text{ при } x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}.$$

Начальное значение варьируемого параметра BPM определяется непосредственно по геометрическим размерам замедляющей системы.

Выделим две аддитивные целевые функции, соответствующие электродинамическим характеристикам ЗС, а именно, замедлению и сопротивлению связи:

$$F^n(\bar{x}) = \sum_{i=1}^p \omega_i F_i^n(\bar{x}, \lambda_i), \quad F^R(\bar{x}) = \sum_{i=1}^p g_i F_i^R(\bar{x}, \lambda_i),$$

где частные целевые функции F_i^n и F_i^R определяются следующим образом:

$$F_i^n(\bar{x}, \lambda_i) = \frac{n_i(\bar{x}, \lambda_i) - n_i^0(\lambda_i)}{n_i^0(\lambda_i)}, \quad F_i^R(\bar{x}, \lambda_i) = \frac{R_i(\bar{x}, \lambda_i) - R_i^0(\lambda_i)}{R_i^0(\lambda_i)}.$$

Здесь $n_i(\bar{x}, \lambda_i)$, $R_i(\bar{x}, \lambda_i)$ – замедление и сопротивление связи, рассчитанные по формулам для BPM; $n_i^0(\lambda_i)$, $R_i^0(\lambda_i)$ – замедление и сопротивление связи, полученные расчетным путем по программе HFSS либо экспериментально; λ_i – длина волны; ω_i , g_i – весовые коэффициенты.

Ввиду того, что в формулу для расчета сопротивления связи входит параметр R_M , который сложно оценить по геометрии ЗС, ищется минимум результирующей целевой функции вида

$$F(\bar{x}) = F^n(\bar{x}) + F^R(\bar{x})$$

Для этого используется метод последовательных укупок. При исследовании замедляющей системы типа «встречные штыри», в отличие от предыдущего примера ЗС, где использовались результаты численного эксперимента, для настройки BPM брались реальные экспериментальные опорные точки. Расчет проводился для указанных на рис. 3 геометрических размеров системы.

На рис. 12 представлены результаты расчета замедления и сопротивления связи (верхняя часть рисунка), а также реактивного затухания для рассматриваемой замедляющей системы.

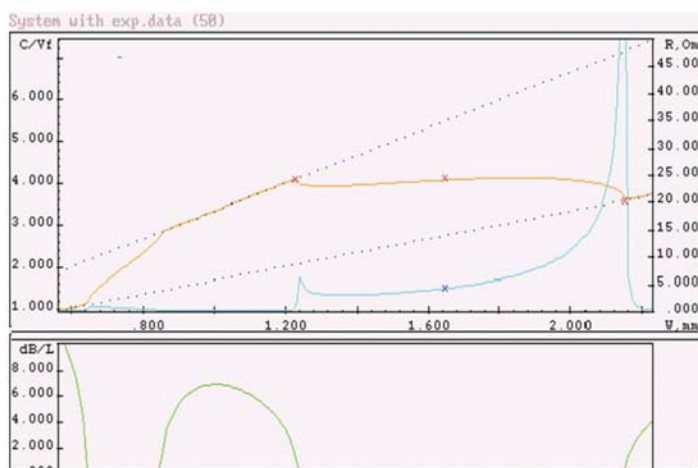


Рис. 12. Дисперсионные характеристики ЗС типа «встречные штыри»

На графике отмечены опорные точки. Как видно, точки достаточно точно совпадают с замедлением π -вида, 2π -вида, $\frac{3\pi}{2}$ -вида и сопротивлением связи в середине полосы пропускания.

Заключение

В работе показано, что замедляющие системы типа «петляющий волновод» и «встречные штыри» пригодны для использования в миллиметровом диапазоне. Для моделирования этих систем могут использоваться волноводно-резонаторные модели, настраиваемые по полученным экспериментально опорным точкам. При этом достаточно выбрать количество опорных точек, не превышающее трех, для расчета замедления, соответственно по границам и середине полосы пропускания, и одной, соответствующей сопротивлению связи в середине полосы.

В качестве опорных точек могут также использоваться значения замедления и сопротивления связи, полученные в результате численного эксперимента с помощью программы HFSS. Построенные таким образом волноводно-резонаторные модели весьма просты и достаточно точны. В данной работе показано, что эти модели могут успешно применяться при расчете ламп бегущей волны, работающих в миллиметровом диапазоне.

Литература

1. Мухин С.В., Никонов Д.Ю., Солнцев В.А. Исследование полосовых свойств локального импеданса связи замедляющих систем // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т.53, №10. – С.1324-1332.
2. Мухин С.В., Ломакин О.Е., Солнцев В.А. Волноводно-резонаторная модель замедляющей системы типа цепочка связанных резонаторов // Радиотехника и электроника. – 1988. – Т.33, №8. – С.1637-1643.
3. Силин Р.А., Чегурных И.П. Расчет замедляющих систем, ячейки которых можно представить в виде сочленения волноводов // Радиотехника и электроника. – 1990. – Т.35, №5. – С.989-997.
4. Кравченко Н.П., Мухин С.В. Анализ дисперсионных характеристик замедляющих систем с пролетным каналом, заполненным плазмой, методом трехмерного моделирования // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал) <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/7/text.html>. – 2014. – №4. – С.1-22.
5. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высшая школа. – 1970, Т.1. – 375 с.
6. Мухин С.В. Анализ дисперсионных характеристик замедляющих систем типа ЦСР вблизи границ полосы пропускания // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т.57, № 12. – С.1301-1311.

MILLIMETER-BAND SLOW-WAVE STRUCTURES

Natalja Kravchenko, Sergey Mukhin, Semen Presnyakov, *Moscow, Russia*

Abstract

This paper considers the model of amplification of electromagnetic millimeter waves by non-relativistic electron beams in one-dimensional periodic electrodynamic systems. As slow-wave structures systems such as "winding waveguide" and "counter-pins"-type suitable for use in the millimeter range are investigated. The main directions of research are:

- development of a traveling-wave tube model on the basis of the differential theory of excitation of electrodynamic systems by currents;
 - modeling and calculation for simplified waveguide-resonator model of electrodynamic properties of slow-wave structures such as "winding waveguide" in the millimeter range;
 - representation of a waveguide-resonator model of "winding waveguide"-type slow-wave structure, composed of segments of rectangular and U-shaped waveguide;
 - obtaining by a waveguide-resonator model coefficients of the transmission matrix, which allows to analyze the dispersion and coupling impedance in the band of amplified frequencies;
 - investigation of "winding waveguide"-type slow-wave structure taking into account the geometric phase rotation field in neighboring gaps by linear waveguide-resonator model represented by a chain of quadripoles by means of opposite switching of the induced current in the neighboring interaction gaps and also the first spatial harmonic used in traveling-wave tubes for the calculation of the dispersion;
 - calculation of a number of options that characterize the basic laws of changes in the properties of "winding waveguide"-type slow-wave structure;
 - modeling the properties of slow-wave structures such as "winding waveguide" using 3D-codes;
 - application of the results obtained using the 3D-codes as the numerical experiment to adjust waveguide-resonator model;
 - model building pin-type slow-wave structures using waveguide-resonator model, adjustable by experimental reference points.
- The paper shows that for modeling slow-wave structures such as "winding waveguide" and "counter-pins" waveguide-resonator model adjustable to the experimentally obtained reference points can be used. As the reference points can also be used the values of deceleration and the coupling impedance obtained by numerical experiment using HFSS. Waveguide resonator models constructed in such way are sufficiently accurate and simple. This paper shows that these models can be successfully used for the calculation of traveling-wave tubes operating in the millimeter range.

Keywords: *slow-wave structures, waveguide-resonator model, electrodynamic characteristics, traveling wave tube, the program HFSS, millimeter-band.*

References

1. Mukhin S.V., Nikonov D.Y. and Solntsev V.A. (2008), Radiotekhnika i Elektronika [J. Communication Technology and Electronics], 2008. V.53. No. 10. P.1324-1332. [*in Russian*]
2. Lomakin O.E., Mukhin S.V. and Solntsev V.A. (1988), Radiotekhnika i Elektronika [J. Communication Technology and Electronics], vol.33, no.8, pp. 1637-1643. [*in Russian*]
3. Silin R.A. and Chepurnykh I.P. (1990), Radiotekhnika i Elektronika [J. Communication Technology and Electronics], vol.35, no.5, pp. 989-997. [*in Russian*]
4. Kravchenko N.P. and Mukhin S.V. (2014), J. Radioelectronics [Electronic], no. 4, pp.1- 22, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/7/text.html> (accessed 14 Apr 2014). [*in Russian*]
5. Lebedev, I.V. Tekhnika i pribory SVCH [Techniques and High Frequency Devices], (1970), Higher School, Moscow, Russia, vol.1, 375 p. [*in Russian*]
6. Mukhin, S.V. (2012), Radiotekhnika i Elektronika [J. Communication Technology and Electronics], vol.57, no.12, pp. 1301-1311. [*in Russian*]

Information about authors:

Natalja Kravchenko, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, National Research University "Higher School of Economics" (NRU HSE), natkra@inbox.ru

Sergey Mukhin, Professor, Doctor of Technical Sciences, National Research University "Higher School of Economics" (NRU HSE), mukhin_sergey@yahoo.com

Semen Presnyakov, student, National Research University "Higher School of Economics" (NRU HSE), pressnyak@gmail.com