



Том VIII. № 5-2016

Издается с 2009 года
Издательская лицензия ПИ № ФС 77-60899
Язык публикаций: русский, английский
Периодичность выхода – 6 номеров в год
Сайт в Интернете: www.H-ES.ru
E-mail: HT-ESResearch@yandex.ru

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ООО «Издательский дом Медиа Паблишер»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:
Константин Легков

ИЗДАТЕЛЬ:
Светлана Дымкова

ПРЕДПЕЧАТНАЯ ПОДГОТОВКА:
ООО «H&ES Research»

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
111024, Россия, Москва,
ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514

194044, Россия, Санкт-Петербург,
Лесной Проспект, 34-36, корп. 1,
Тел.: +7(911) 194-12-42

Журнал H&ES Research зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране
культурного наследия.
Мнения авторов не всегда совпадают с
точкой зрения редакции. За содержание
рекламных материалов редакция ответ-
ственности 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

Всем авторам, желающим разместить
научную статью в журнале, необходимо
оформить ее согласно требованиям и на-
править материалы на электронную почту:
HT-ESResearch@yandex.ru.
С требованиями можно ознакомиться
на сайте: www.H-ES.ru.

© ООО «ИД Медиа Паблишер» 2016

H&ES Research – один из ведущих рецензируемых научных журналов, в котором публикуются основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Журнал освещает достижения и проблемы российских инфокоммуникаций, внедрение последних достижений отрасли в автоматизированных системах управления, развитие технологий в информационной безопасности, исследования космоса, развитие спутникового телевидения и навигации, исследование Арктики. Особое место в издании уделено результатам научных исследований молодых ученых в области создания новых средств и технологий космических исследований Земли.

Научно-технический журнал **H&ES Research** предназначен прежде всего для специалистов в области современных инфокоммуникационных технологий и автоматизированных систем управления, средств космических исследований Земли и информационной безопасности. В журнале публикуются новости о событиях в вышеуказанных областях, репортажи и интервью ведущих компаний, мнения специалистов, новые технологии, инновационные разработки, оборудование и решения, аналитические статьи, маркетинговые исследования и др.

Журнал H&ES Research входит в Перечень ВАК и в систему российского индекса научного цитирования (РИНЦ), а также включен в Международный классификатор периодических изданий (ISSN 2412-1363 (Online), 2409-5419 (Print)).

Тематика публикуемых статей в соответствии с перечнем групп специальностей научных работников по Номенклатуре специальностей:

- 01.01.00 Математика
- 05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника
- 05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы
- 05.12.00 Радиотехника и связь
- 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ

- Вопросы развития автоматизированных систем управления
- Физико-математическое обеспечение разработки новых технологий
- Развитие автоматизированных систем управления технологическим процессом
- Вопросы исследования космоса
- Телекоммуникационные технологии и технические новинки систем подвижной связи
- Перспективы развития единого инфокоммуникационного пространства
- Использование радиочастотного спектра в системах подвижной связи
- Антенно-фидерное оборудование
- Спутниковое телевидение, системы спутниковой навигации, GLONASS, построение навигационных систем GPS
- Вопросы развития геодезии и картографии
- Информационная и кибербезопасность
- Вопросы исследования Арктики
- Волоконно-оптическое оборудование и технологии
- Метрологическое обеспечение
- Программное обеспечение и элементная база для сетей связи
- Производители, поставщики и дистрибьюторы телекоммуникационного оборудования
- Работа отечественных ассоциаций, региональных и координирующих операторов
- Правовое регулирование инфокоммуникаций, законодательство в области связи
- Экономика связи, конвергенция сетей, универсальные коммуникации
- Выставки, форумы, конференции, семинары, интервью (оригинальные и новые проекты, итоги деятельности, проблемы отрасли и пути их решения и т.д.)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- БОБРОВСКИЙ В.И.**, доктор технических наук, доцент
БОРИСОВ В.В., доктор технических наук, профессор, Действительный член академии военных наук РФ
БУДКО П.А., доктор технических наук, профессор
БУДНИКОВ С.А., доктор технических наук, доцент, Действительный член Академии информатизации образования
ВЕРХОВА Г.В., доктор технических наук, профессор
ГОНЧАРОВСКИЙ В.С., доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ
КОМАШИНСКИЙ В.И., доктор технических наук, профессор
КИРПАНЕВ А.В., доктор технических наук, доцент
КУРНОСОВ В.И., доктор технических наук, профессор, академик Арктической академии наук, член-корреспондент Международной академии информатизации, академик Международной академии обороны, безопасности и правопорядка, Действительный член Российской академии естественных наук
МАНУЙЛОВ Ю.С., доктор технических наук, профессор
МОРОЗОВ А.В., доктор технических наук, профессор, Действительный член Академии военных наук РФ
МОШАК Н.Н., доктор технических наук, доцент
ПРОРОК В.Я., доктор технических наук, профессор
СЕМЕНОВ С.С., доктор технических наук, доцент
СИНИЦЫН Е.А., доктор технических наук, профессор
ШАТРАКОВ Ю.Г., доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ

Отдел развития и рекламы: Ольга Дрошкевич, ovd@media-publisher.ru, тел.: 8(916) 951-55-36.

H&ES Research – one of leading reviewed scientific journal in whom the main scientific results of the dissertation on competition of a scientific degree of the doctor and the candidate of science are published. The journal covers achievements and problems of the Russian info-communication, introduction of the last achievements of branch in automated control systems, development of technologies in information security, space researches, development of satellite television and navigation, research of the Arctic. The special place in the edition is given to results of scientific researches of young scientists in the field of creation of new means and technologies of space researches of Earth.

H&ES Research – journal for specialists in the field of modern information and communication technologies and automated systems management means for Space Research of the Earth and information security. The journal publishes news about events in the above areas, reports and interviews of the leading companies, the opinions of experts, new technologies, innovations, products and solutions, analytical articles, market research and others.

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. IF of the Russian Science Citation Index.

Subject of published articles according to the list of branches of science and groups of scientific specialties in accordance with the Nomenclature of specialties:

- 01.01.00 Mathematics
- 05.07.00 Aviation, space-rocket hardware
- 05.11.00 Instrument engineering, metrology and information-measuring devices and systems
- 05.12.00 RF technology and communication
- 05.13.00 Informatics, computer engineering and control

TOPICAL COLUMNS

- Automated control systems
- Physical and mathematical software development of new technologies
- Development of automated process control systems
- Questions of space exploration
- Telecommunication technology and technical innovations of mobile systems
- Prospects for unified info communication space
- Use of a radio-frequency range in systems of mobile communication
- Antenna-feeder equipment
- Satellite TV, satellite navigation system, GLONASS, GPS navigation systems construction
- Issues of Geodesy and Cartography
- Information and cyber security
- Questions Arctic research
- Fiber-optic equipment and technology
- Metrological maintenance
- Software and electronic components for communication networks
- Manufacturers, suppliers and distributors of telecommunications equipment
- National associations, regional and coordinating operators
- Legal regulation of Info-comm, legislation in the communication field
- Economy of communications, networks convergence, universal communication
- Exhibitions, forums, conferences, seminars, interview (original and new projects, results of activity, a problem of branch and a way of their decision, etc.)

EDITORIAL BOARD

BOBROWSKY V.I., Ph.D., associate professor

BORISOV V.V., Ph.D., professor

BUDKO P.A., Ph.D., professor

BUDNIKOV S.A., Ph.D., associate professor, Actual Member of the Academy of Education Informatization

VERHOVA G.V., Ph.D., professor

GONCHAREVSKY V.S., Ph.D., professor, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation,

KOMASHINSKIY V.I., Ph.D., professor

KIRPANEV A.V., Ph.D., associate professor

KURNOSOV V.I., Ph.D., professor, Academician of Academy of Sciences of the Arctic, corresponding member of the International Academy of Informatization, International Academy of defense, security, law and order, Member of the Academy of Natural Sciences

MANUILOV Y.S., Ph.D., professor

MOROZOV A.V., Ph.D., professor, Actual Member of the Academy of Military Sciences

MOSHAK N.N., Ph.D., associate professor

PROROK V.Y., Ph.D., professor

SEMIKOV S.S., Ph.D., associate professor

SINICYN E.A., Ph.D., professor

SHATRAKOV Y.G., Ph.D., professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation

Development and advertizing department: Olga Doroshkevich, ovd@media-publisher.ru, tel.: 8(91 6) 95 1-55-36.

H&ES RESEARCH

Vol. VIII. No. 5-2016

It is published since 2009
 Publishing license ПИ № ФС 77-60899
 Language of publications:
 Russian, English
 Periodicity – 6 issues per year
 Site on the Internet: www.H-ES.ru
 E-mail: HT-ESResearch@yandex.ru

FOUNDER: «Media Publisher», LLC

EDITOR IN CHIEF: Konstantin Legkov

PUBLISHER: Svetlana Dymkova

PREPRESS: «H&ES Research», JSC

ADDRESS OF EDITION:
 111024, Russia, Moscow,
 st. Aviamotomaya, 8, office 512-514

194044, Russia, St. Petersburg,
 Lesnoy avenue, 34-36, housing 1,
 Phone: +7 (911) 194-12-42

Journal H&ES Research has been registered by the Federal service on supervision of legislation observance in sphere of mass communications and cultural heritage protection. The opinions of the authors don't always coincide with the point of view of the publisher. For the content of ads, the editorial Board is not responsible. 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

GRADUATE STUDENTS FOR PUBLICATION OF THE MANUSCRIPT WILL NOT BE CHARGED

All authors wishing to post a scientific article in the journal, you must register it according to the requirements and send the materials to your email: HT-ESResearch@yandex.ru. The requirements are available on the website: www.H-ES.ru.

© «Media Publisher», LLC 2016

H&ES RESEARCH -
 HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH
 SPACE RESEARCH JOURNAL

WWW.H-ES.RU

 HES_Research  HES-Research
 club55425245

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА С МАГНИТНОЙ СТЕНКОЙ ИЗ ГРИБОВИДНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

Елизаров

Андрей Альбертович,

д.т.н., профессор, Национальный
исследовательский университет
«Высшая школа экономики»,
Департамент электронной инженерии,
г. Москва, Россия,
a.yelizarov@hse.ru

Назаров

Игорь Васильевич,

к.т.н., доцент,
Национальный исследовательский
университет «Высшая школа
экономики», Департамент электронной
инженерии,
г. Москва, Россия,
inazarov@hse.ru

Кухаренко

Александр Сергеевич,

к.т.н., с.н.с., Филиал открытого
акционерного общества
«Объединенная ракетно-космическая
корпорация» – «Научно-
исследовательский институт
космического приборостроения»,
г. Москва, Россия,
alexk.05@mail.ru

Ключевые слова:

прямоугольный волновод; грибовидный
метаматериал; магнитная стенка;
дисперсия.

АННОТАЦИЯ

Современный этап развития микроволновой техники связан с использованием различных видов метаматериалов – композитных материалов, не существующих в природе и отличающихся отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемости, как по отдельности (SNG – single negative), так и одновременно (DNG – double negative). В последнем случае такая среда приобретает новые необычные свойства, а ее применение позволяет управлять законами дисперсии, преломления и отражения электромагнитных волн в известных электродинамических структурах.

Анизотропные свойства метаматериала оказывают различное влияние на характеристики и параметры систем в зависимости от ориентации относительно падающей волны. Так известен эффект обратного распространения волны в волноводных структурах, который происходит, когда продольная магнитная проницаемость положительна, а поперечная отрицательна. При этом на резонансной частоте элементарной ячейки метаматериала волновод поддерживает распространение обратных волн ниже граничной частоты основной моды H_{10} . В таком случае низшая частота распространения волны в волноводе, а, следовательно, возможность уменьшения его габаритных размеров, определяются возможностью создания одноосного метаматериала с отрицательной магнитной проницаемостью в заданном диапазоне частот.

В работе приведены результаты компьютерного моделирования распространения электромагнитных колебаний в стандартном прямоугольном волноводе типа R32 с поперечным сечением $72,14 \times 34,04$ мм, одна из широких стенок которого выполнена в виде магнитной стенки из грибовидного метаматериала. С помощью программных средств Ansoft HFSS ver.13 получены зависимости распределения поля при возбуждении основной моды H_{10} , характеристики комплексных коэффициентов отражения S_{11} и передачи S_{21} от частоты и диаграммы направленности излучения из конца волновода в ближней зоне.

За последние десятилет появилось большое число публикаций, посвященных теоретическому анализу, компьютерному моделированию и экспериментальному исследованию искусственных периодических структур – метаматериалов, на поверхности которых выполняются эквивалентные граничные условия, соответствующие магнитной стенке.

Идеальной магнитной стенкой называется такая стенка, на которой все тангенциальные компоненты магнитного поля и нормальные компоненты электрического поля устанавливаются равными нулю.

Применительно к прямоугольному волноводу, в котором могут распространяться волны электрического и магнитного типа, и для которого характерна дисперсия фазовой скорости, наличие магнитных стенок означает, что его электрическое поле перпендикулярно горизонтальным стенкам и не зависит от координат в плоскости поперечного сечения. Основной волной такого волновода, который называют ТЕМ-волноводом, является Т-волна.

Главной проблемой создания такого ТЕМ-волновода является конструктивная реализация магнитной стенки. На практике магнитная стенка может быть выполнена на основе грибовидного метаматериала, выполненного в виде периодических ячеек, содержащих идентичные металические элементы в виде распределенных колебательных контуров, связанных емкостными зазорами, и имеющих геометрические размеры, много меньшие рабочей длины волны.

Распределенные колебательные контуры метаматериала со «шляпками грибов», имеющими форму, похожую на мальтийский крест, показаны на рис. 1 а. Контуры могут быть представлены эквивалентной схемой, показанной на рис. 1 б, и содержащей индуктивности, образованные металическими ножками, соединенными с экраном, и емкости, сформированные между соседними контурами. Такая конструкция представляет собой линию передачи с отрицательной дисперсией, обладающую отрицательной фазовой скоростью и положительной групповой скоростью. При изменении геометрических размеров каждый из колебательных контуров, образующих магнитную стенку из метаматериала, обладает

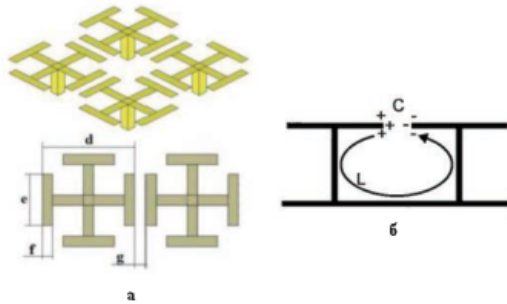


Рис. 1. Грибовидная структура со «шляпками грибов» в форме мальтийского креста (а) и образование эквивалентных индуктивности и емкости между ее соседними контурами (б); габаритные размеры отдельного контура (гриба) $d = 8$ мм, $e = 5$ мм, $g = f = 1$ мм, высот ножки гриба $b = 6$ мм

собственной добротностью $Q > 100$ и может иметь резонансную частоту от десятых долей до сотен ГГц.

Заменим рассмотренной грибовидной структурой одну из широких стенок отрезка стандартного прямоугольного волновода типа R32 с поперечным сечением $72,14 \times 34,04$ мм и критической частотой 2,079 ГГц. На рис. 2 показана модель такой магнитной стенки в программе Ansoft HFSS ver.13.

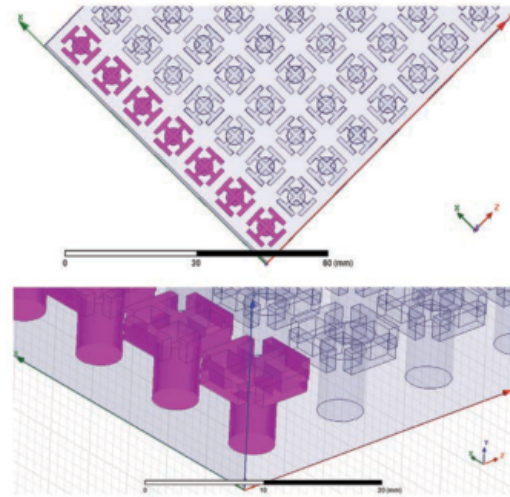


Рис. 2. Модель магнитной стенки прямоугольного волновода на основе грибовидной структуры в программе Ansoft HFSS ver.13

Результаты моделирования комплексных коэффициентов отражения S_{11} и передачи S_{21} и КСВН от частоты при возбуждении основной моды H_{10} в волноводной структуре с широкой магнитной стенкой представлены на рис. 3 (а, б).

Анализ полученных на рис. 3 (а, б) зависимостей показывает, что частота отсечки такого волновода зависит от резонансных свойств метаматериала и находится вблизи 4 ГГц, где рассматриваемая электродинамическая структура может выполнять функции волноводного режакторного фильтра, обеспечивающего заглушение 21-24 дБ при ширине полосы заграждения не хуже 500 МГц.

Проанализируем далее полученные также в программе Ansoft HFSS ver.13 и показанные рис. 4 (а, б) – б (а, б, в), 3D-зависимости распределения поля и диаграммы направленности излучения из конца рассматриваемого волновода, полученные в ближней зоне на частотах 4,0 – 4,6 ГГц.

Результаты компьютерного моделирования 3D-характеристик распределения поля наглядно демонстрируют минимальное заглушение колебаний на частоте 4,0 ГГц и его быстрый рост с увеличением частоты. Этот физический процесс подтверждается также анализом диаграммы направленности. Так на частоте 4,0 ГГц наблюдается один лепесток с максимальной интенсивностью излучения, на частоте 4,3 ГГц

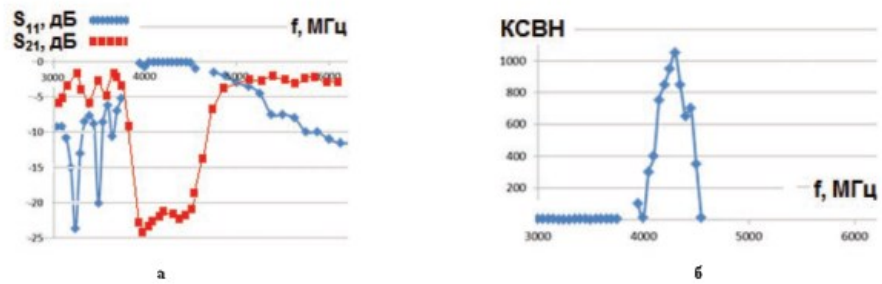
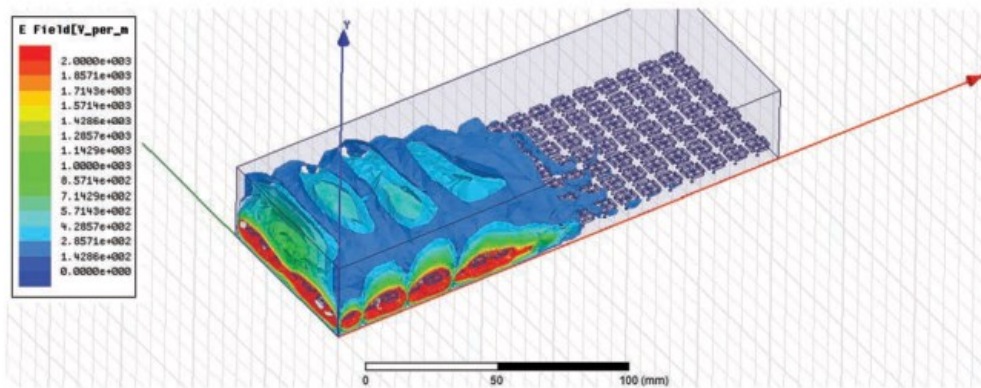
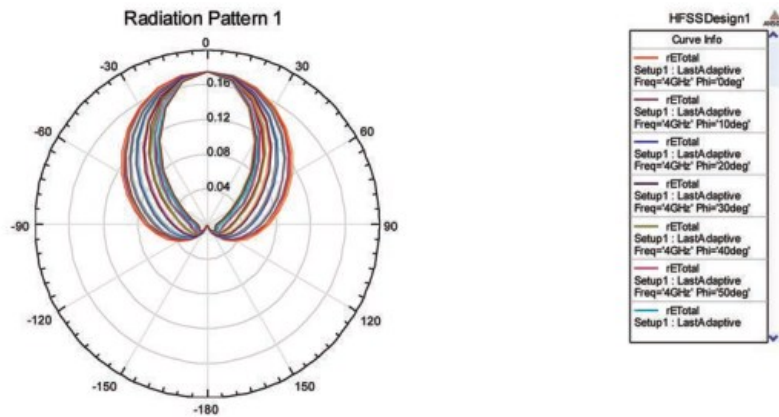


Рис. 3. Зависимости комплексных коэффициентов отражения S_{11} и передачи S_{21} (а), КСВН (б) от частоты для прямоугольного волновода с широкой магнитной стенкой

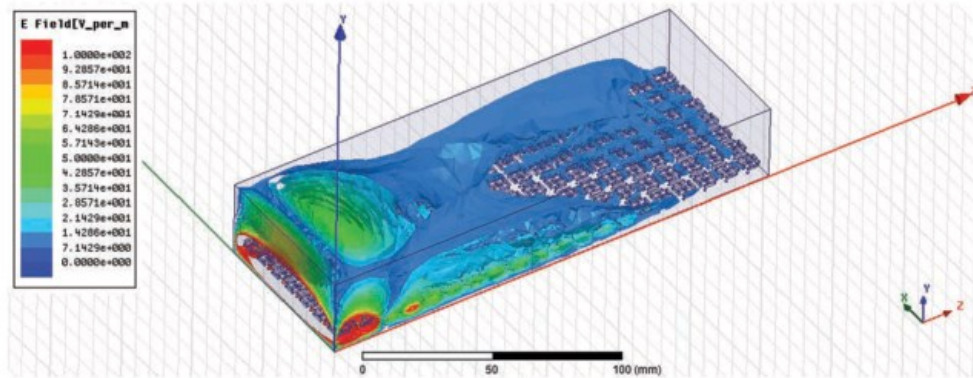


а

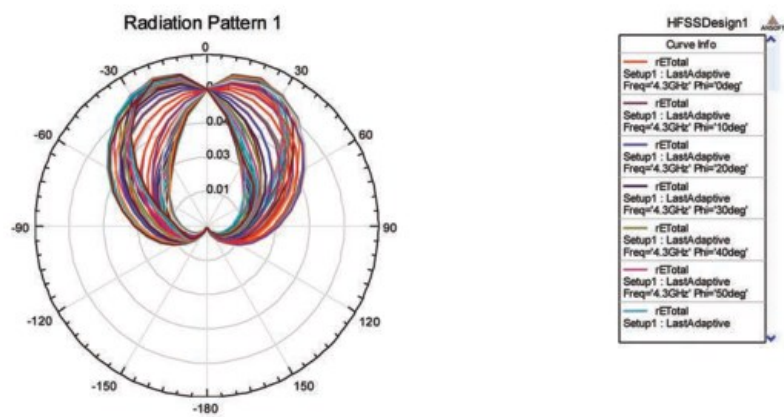


б

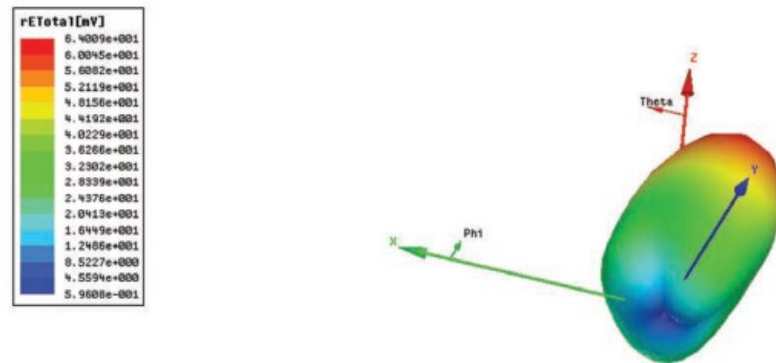
Рис. 4. 3D – характеристика распределения поля (а) и диаграмма направленности (б) излучения из конца прямоугольного волновода с широкой магнитной стенкой на частоте 4,0 ГГц



а

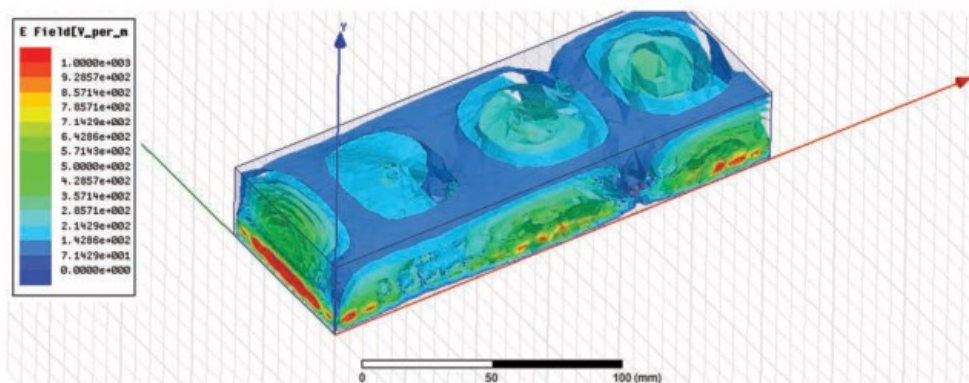


б

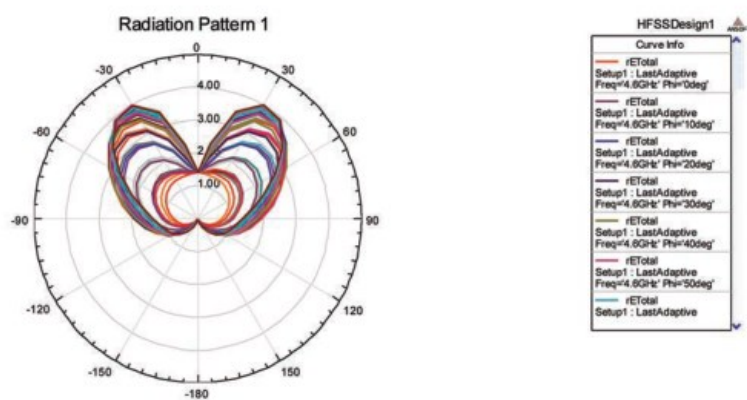


в

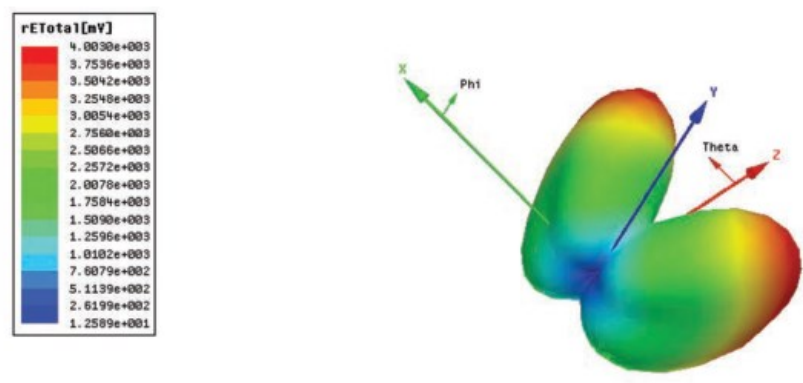
Рис. 5. 3D – характеристика распределения поля (а) и диаграммы направленности (б, в) излучения из конца прямоугольного волновода с широкой магнитной стенкой на частоте 4,3 ГГц



а



б



в

Рис. 6. 3D – характеристика распределения поля (а) и диаграммы направленности (б, в) излучения из конца прямоугольного волновода с широкой магнитной стенкой на частоте 4,6 ГГц

лепесток начинает раздвигаться, и на частоте 4,6 ГГц – получаем симметричное раздвоение лепестка, сопровождаемое разделением интенсивности излучения на две равные части.

Таким образом, проведенный анализ позволяет отметить возможности перспективных направлений использования метаматериалов в волноводной технике – во-первых, это уменьшение габаритных размеров волноводных устройств, а во-вторых, создание волноводных фильтров с улучшенными параметрами и характеристиками.

Статья подготовлена в результате проведения исследования (№ 16-01-0061) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2016–2017 гг. и с использованием средств субсидии на государственную поддержку ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, выделенной НИУ ВШЭ.

Литература

1. Engheta N., Ziolkowsky R. W. *Metamaterials – physics and engineering exploration*. Danvers: John Wiley & Sons Inc., 2006. 414 p.
2. Basharin A.A., Balabukha N.P., Semenenko V.N., Menshikh N.L., Petrin A. (Ed). *Metamaterial waveguides and antennas*, in “Wave propagation” / InTech. 2011. Pp. 241–266.
3. Балабуха Н.П., Башарин А.А., Семенов В.Н. Эффект обратного излучения электромагнитных волн волноводной структурой из метаматериала // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89. Вып. 10. С. 593–598.
4. Hrabar S., Bartolic J., Sipus Z. Waveguide miniaturization using uniaxial negative permeability metamaterial // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2005. Vol. 53. No. 11.
5. Кухаренко А.С., Елизаров А.А. Анализ физических особенностей метаматериалов и частотно-селективных СВЧ устройств на их основе // Т-Сопли: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 5. С. 36–41.
6. Кухаренко А.С., Елизаров А.А. Методы расширения полосы заграждения СВЧ устройств на основе планарных модифицированных грибовидных структур метаматериалов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. No. 2. С. 192–198.
7. Патент РФ 2571385 С1. Развязывающий фильтр на метаматериале / Елизаров А.А., Кухаренко А.С. Заявл. 29.08.2014. Опубл. 20.12.2015. Бюл. № 35.
8. Байко С.Н., Елизаров А.А., Закирова Э.А., Кухаренко А.С. Исследование малогабаритного развязывающего СВЧ фильтра на метаматериале // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2014: материалы Международной научно-технической конференции. Саратов, 2014. Т. 1. С. 218–225.
9. Елизаров А.А., Кухаренко А.С. Широкополосные частотно-селективные СВЧ устройства на основе планарных модифицированных грибовидных метаматериалов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крым-Мико 2015): материалы 25-й Международной Крымской конференции. Севастополь, 2015. Т. 1. С. 586–587.
10. Елизаров А.А., Кухаренко А.С. Частотно-селективная поверхность на основе метаматериала с электронной перестройкой полосы заграждения // Проблемы СВЧ-электроники «МИЭМ НИУ ВШЭ – Инновационные решения» Keyright Technologies: тр. II Всероссийской научной конференции. Москва, 2015. С. 45–48.

Для цитирования:

Елизаров А.А., Назаров И.В., Кухаренко А.С. Исследование прямоугольного волновода с магнитной стенкой из грибовидного метаматериала // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 5. С. 50–56.



RECTANGULAR WAVEGUIDE WITH A MAGNETIC WALL OF THE MUSHROOM-SHAPED METAMATERIAL INVESTIGATION

Andrey A. Yelizarov,

Moscow, Russia, a.yelizarov@hse.ru

Igor V. Nazarov,

Moscow, Russia, inazarov@hse.ru

Alexander S. Kukhareno,

Moscow, Russia, alexk.05@mail.ru

Abstract

The current stage of development a technology is associated with the use of different types of metamaterials – composite materials that do not exist in nature and characterized by negative values of permittivity and magnetic permeability, both separately (SNG – single negative) and simultaneously (DNG double negative). In the latter case, such an environment media new unusual properties, and its application allows you to control the laws of dispersion, refraction and reflection of electromagnetic waves in electrodynamic structures known.

The anisotropic properties of a metamaterial have a different impact on the characteristics and parameters of systems depending on orientation relative to the incident wave. As well known, the reverse effect of wave propagation in a waveguide structure, which occurs when a longitudinal magnetic permeability-positive, and transverse magnetic permeability- negative. Thus at the resonant frequency of the unit cell of the metamaterial waveguide supports propagation of backward waves below the cutoff frequency of fundamental mode H₁₀. In this case, the lowest frequency wave propagation in the waveguide and, consequently, the possibility of reducing its overall dimensions are determined by the possibility of creating a uniaxial metamaterial with negative magnetic permeability in a given frequency range.

The paper presents the results of computer simulation of electromagnetic wave propagation in a standard rectangular waveguide R32 type with the cross-section 72,14×34,04 mm, one of the wide walls of which are made in the form of the mushroom-shaped metamaterial magnetic wall. Using software Ansoft HFSS ver.13 the dependences of the field distribution during simulation of the fundamental mode H₁₀, the characteristics of the complex reflection coefficient S₁₁ of the frequency and the directional diagram from the end of the waveguide in the near zone are obtained.

Keywords: rectangular waveguide; mushroom-shaped metamaterial; magnetic wall; dispersion.

References

1. Engheta N., Ziolkowsky R.W. Metamaterials – physics and

engineering exploration. Danvers, John Wiley & Sons Inc., 2006. 414 p.

2. Basharin A.A., Balabukha N.P., Semenenko V.N., Menshikh N.L., Petrin A. (Ed). Metamaterial waveguides and antennas, in "Wave propagation". InTech. 2011. Pp. 241–266.

3. Balabukha N.P., Basharin A.A., Semenenko V.N. The effect of backward radiation of electromagnetic waves from the waveguide structure of the metamaterial. JETP Letters. 2009. Vol. 89. No. 10. Pp. 593–598. (In Russian).

4. Hrabar S., Bartolic J., Sipus Z. Waveguide miniaturization using uniaxial negative permeability metamaterial. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2005. Vol. 53. No. 11. (In Russian).

5. Kukhareno S.A., Yelizarov A.A. Analysis of the physical features of metamaterials and frequency-selective microwave devices based on them. T-Comm. 2015. Vol. 9. No. 5. Pp. 36–41. (In Russian).

6. Kukhareno S.A., Yelizarov A.A. Methods for Extension of the Rejection Band of Microwave Devices on the Basis of Planar Modified Mushroom-Shaped Metamaterial. Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61. No. 2. Pp. 204–210. (In Russian).

7. Patent RF 2571385 C1. Decoupling filter on metamaterial. Yelizarov A.A., Kukhareno S.A. Declared 29.08.2014. Published 20.12.2015. Bulletin No. 35 p. (In Russian).

8. Boyko S.N., Yelizarov A.A., Zakirova E.A., Kukhareno A.S. Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya APEP – 2014: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [Proceedings APEDE-2014 conference]. Saratov, 2014. Vol. 1. Pp. 218–225. (In Russian).

9. Yelizarov A.A., Kukhareno S.A. SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii (KryMiKo 2015): materialy 25-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii [Crimean conference "Microwave and telecommunication technology (CriMiCo 2015)"]. Sevastopol, 2015. Vol. 1. Pp. 586–587. (In Russian).

10. Yelizarov A.A., Kukhareno S.A. Problemy SVCh-elektroniki MIEM NIU VShE – "Innovatsionnye resheniya" Keysight Technologies: trudy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii. [Proceedings II Russian scientific conference "Problems of Microwave Electronics" MIEM HSE – "Innovative solutions" Keysight Technologies]. Moscow, 2015. Pp. 45–48. (In Russian).

Information about authors:

Yelizarov A.A., Ph.D., professor, National Research University "Higher School of Economics"; Nazarov I.V., Ph.D., associate professor, National Research University "Higher School of Economics"; Kukhareno A.S., Ph.D., head researcher, Branch of "United Rocket and Space Corporation" "Institute of Space Device Engineering".

For citation:

Yelizarov A.A., Nazarov I.V., Kukhareno A.S. Rectangular waveguide with a magnetic wall of the mushroom-shaped metamaterial investigation. H&ES Research. 2016. Vol. 8. No. 5. Pp. 50–56.