



Москва • Минск • Севастополь
2016

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431
С255

Организаторы:

Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ) — проект № 16-07-20068
Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи
(РНТОРЭС) им. А. С. Попова
Крымский научно-технологический центр им. проф. А. С. Попова (Севастополь)
Севастопольский государственный университет,
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности
Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского,
Физико-технический институт (Симферополь)
Крымская астрофизическая обсерватория,
Отдел радиоастрономии и геодинамики (Кацивели)
ОАО «НПП "Исток" им. Шокина» (Фрязино)
ОАО «Интеграл», НТЦ «Белмикросистемы» (Минск)
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск)
НП ОАО «Фаза» (Ростов-на-Дону)
АО «Микроволновые системы» (Москва)
НПП «Системные ресурсы» (Москва)
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
НПФ «Микран» (Томск)
ООО «Радиокомп» (Москва)
Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина (Екатеринбург)
AWR — National Instruments (Москва)
Таркус (Ростов-на-Дону — Севастополь)
Keysight Technologies (Москва)

Техническая и информационная поддержка:

IEEE, Moscow MTT/ED Chapter
IEEE, Moscow AP Chapter
Медиагруппа «Электроника»

26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телеком-
C255 муникационные технологии» (КрыМиКо'2016). Севастополь, 4—10 сентября
2016 г. : материалы конф. в 13 т. — Москва ; Минск ; Севастополь, 2016. —
ISBN 978-966-335-418-7 (тт. 1—13).

Т. 13 : III, 24 [2898—2921] с. : ил. — ISBN 978-966-335-431-6.

В 13-й том включены материалы 4-х докладов, полученных Оргкомитетом после установленного срока.

Материалы конференции изданы также на флеш-накопителе.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области СВЧ-техники и телекоммуникационных технологий. Сборник также будет полезен студентам и аспирантам телекоммуникационных, радиотехнических и радиофизических факультетов вузов.

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431

ISBN 978-966-335-418-7 (тт. 1—13)
ISBN 978-966-335-431-6 (т. 13)

© Оргкомитет КрыМиКо'2016
© КНТЦ им. Попова, 2016

Том 13

INV.5	СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ГИРОТРОНОВ	
	Запевалов В. Е.	2898
1.14	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА ПРИЕМНИКА РАДИОСВЕТА	
	Дмитриев А. С., Ицков В. В., Герасимов М. Ю., Уваров А. В.	2908
3.10p	МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЗДАНИЯХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МИНИМАЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ БЛОКОВ	
	Малый С. В., Орлова А. С.	2913
5a.7p	МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МАТРИЦ РАССЕЯНИЯ	
	Малый С. В., Орлова А. С., Будай А. Г., Кныш В. П.	2918

Modern trends in the development of gyrotrons

Vladimir E. Zapevalov

Federal research center «Institute of Applied Physics RAS»

N. Novgorod, 46 Ulyanov str., 603950, Russia

zapev@appl.sci-nnov.ru

Abstract: *Current state of development of gyrotron, as well as their main applications was reviewed and discussed. Main trends of the gyro-devices development were analyzed. The basic problems impeding the increasing of power, efficiency and frequency of gyrotrons and their promising approaches was observed. It was shown that the possibility of further development of gyro-devices both in continuous and pulsed mode are far from exhausted.*

Keywords: *gyrotron, cyclotron resonance maser, cavity, magnetron-injection gun, microwaves, terahertz, fusion, spectroscopy.*

Современные тенденции развития гиротронов

Запевалов В.Е.

Федеральный исследовательский центр

«Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

г. Нижний Новгород, ул. Ульянова 46, 603950, Российская Федерация

zapev@appl.sci-nnov.ru

Аннотация: *Выполнен обзор современного состояния разработок гиротронов, а также их основных приложений. Проанализированы основные тенденции развития гироприборов, основные проблемы, препятствующие повышению мощности, эффективности и частоты гиротронов, и перспективные подходы к их решению. Показано, что возможности дальнейшего развития гироприборов, как в непрерывном, так и в импульсном режиме далеко не исчерпаны.*

Ключевые слова: *гиротрон, мазер на циклотронном резонансе, резонатор, магнетронно-инжекторная пушка, микроволны, терагерцы, УТС, спектроскопия.*

1. Введение

Мощные источники когерентного электромагнитного излучения см, мм и субмм диапазонов длин волн на основе вакуумных электронных приборов в последние годы все шире используются как для исследовательских (физика плазмы, ускорение элементарных частиц, плазмохимия, биология и др.), так и для прикладных (радиолокация, связь, технология, ме-

Copyright © 2016 for this paper by its authors. Copying permitted for private and academic purposes.

Proceedings of the 26th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2016)
Sevastopol, Russia, September 4—10, 2016

дицина и др.) целей. В настоящее время в мм диапазоне длин волн наибольший уровень средней мощности обеспечивается гиротронами – наиболее развитой разновидностью мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) [1–6]. Конструкция канонического гиротрона (см. Рис. 1а) включает адиабатическую магнетронно-инжекторную электронную пушку (МИП), формирующую трубчатый винтовой электронный пучок (ВЭП), сверхразмерный, слабонерегулярный резонатор с дифракционным выводом излучения, окно вывода излучения и коллектор электронного пучка. Гиротрон высокой мощности, как правило, дополнительно имеет квазиоптический преобразователь и коллектор электронов с рекуперацией остаточной энергии электронного пучка (рис. 1б) [1–5].

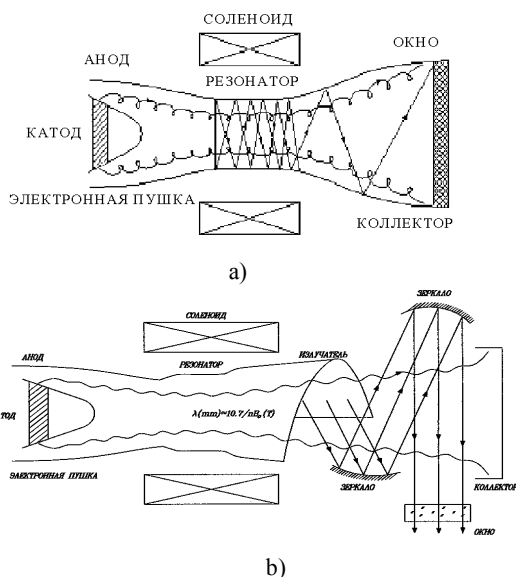


Рис. 1. Общая схема гиротрона:

а) — с осевым выводом мощности, б) — со встроенным квазиоптическим преобразователем и радиальным выводом мощности.

Fig. 1. The general scheme of gyrotron:

a) — axial power output, b) — built-in quasi-optical converter and radial power output

Аксиальная симметрия канонического гиротрона и отсутствие в нем мелкомасштабных элементов способствуют его промышленному освоению. Использование сверхразмерных резонаторов с параметром сверхразмерности $S=s/\lambda^2 \gg 1$, (где s – площадь поперечного сечения резонатора, λ — длина волны), позволяет при наличии соответствующих магнитных си-

стем наращивать выходную мощность и повышать рабочую частоту. Работа на квазикритической частоте, при уровне электродинамической селекции, обеспечиваемым резонаторами с дифракционным выводом энергии и электронной селекцией за счет выбора радиуса электронного пучка позволяют в настоящее время работать гиротронам на модах TE_{mp} с $m \sim 30$ и $p \sim 19$ при величинах параметра сверхразмерности S до нескольких сотен.

В ведущих странах созданы мощные высокоэффективные гиротроны, работающие в диапазонах от см до субмм [1—7]. Сформировался ряд фундаментальных научных направлений, успешное развитие которых обусловлено наличием указанных источников. В настоящее время наиболее известны: нагрев, стабилизация и активная диагностика плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС), получение новых материалов, медико-биологические исследования, спектроскопия (системы ЭПР и динамической ядерной поляризации в ЯМР) и многие другие. Эти приложения диктуют направления развития гироприборов, проанализированные в данной работе.

2. Магнитные системы

Для реализации гиротронов необходимы большие магнитные поля,

$$B_0[\text{Тл}] \approx 35.7 \frac{\gamma}{n} f [IT_4] \quad (1),$$

где $\gamma = 1 + U[\text{кВ}] / 511$ — релятивистский фактор, n — номер циклотронной гармоники, на которой происходит взаимодействие. Долгое время практически единственными типами магнитных систем для гироприборов были криомагниты на основе катушек из сверхпроводящего кабеля, погруженных в жидкий гелий для обеспечения требуемой рабочей температуры. К недостаткам указанных систем следует отнести необходимость регулярно подлива в криостат дорогих криогенных жидкостей. В настоящее время все более широкое распространение получают криомагнитные системы имеющие встроенный охладитель и не требующие использования криогенных жидкостей — «сухие» криомагниты. Такие системы изготавливаются многими зарубежными фирмами (Джастек (Japan Superconducting Technology (JASTEC), Япония), Сумитомо (Sumitomo, Япония), Криомагнетикс (Cryomagnetics, США), Оксфорд инструментс (Oxford Instruments, Англия) и другие). В России промышленное производство «сухих» магнитов, отвечающих требованиям работы с гиротронами, пока не налажено, однако, следует отметить появление в 2015 году отечественного варианта

сухого криомагнита с полем до 10 Тл и проходным отверстием 80 мм. Этот магнит, успешно разработанный Криомагнитной лабораторией ФИАН совместно с ООО «РТИ, Криомагнитные системы» соответствует современному мировому уровню.

Максимальные магнитные поля и диаметр проходного отверстия криомагнита определяют предельные значения частоты и мощности гиротронов. Типичные значения потребляемой мощности криомагнитов 10 кВт не оказывает существенного влияния на эффективность гиротронных комплексов большой мощности, однако для комплексов средней и малой мощности это может быть существенным. Для «сухих» криомагнитов с максимальным реализованным полем 13—15 Тл проходное отверстие не превышает 110 мм, что ограничивает частоту на уровне 350—420 ГГц, при работе гиротрона на первой гармонике, и мощность на уровне 300 кВт. Для приложений представляют интерес сухие криомагниты на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Фирмой «Криомагнетикс» разработан ВТСП магнит с полем 3.35Тл при рабочей температуре 35К.

Поля до 35—40 Тл в настоящее время реализованы в «гибридных» магнитных системах (комбинации соленоида с водяным охлаждением и криомагнита), но эти системы пока малоперспективны для гиросприборов, за исключением демонстрационных экспериментов. Определенный оптимизм существует в отношении использования импульсных магнитов для задач, в которых допустим импульсный режим генерации. Компактные магниты с азотным охлаждением, с полем до 50 Тл при частоте следования 1 раз в несколько минут, созданы в ИПФ РАН.

3. Гиротроны большой мощности

Гиротроны большой мощности для УТС работают в условиях основного гирорезонанса ($n=1$). Достижение в этих гиротронах мегаваттного уровня мощности подразумевает работу основных подсистем гиротрона в режиме экстремальных тепловых нагрузок. КПД гиротрона и его предельная мощность определяется предельными возможностями его подсистем: электронно-оптической системы, резонатора, системы преобразования и вывода излучения, коллектора (в т. ч. и с рекуперацией). На рис. 2 показаны фото современных образцов гиротронов для УТС. Все эти гиротроны работают на высоких пространственно-развитых модах $TE_{m,p}$ ($m \gg 1, p \gg 1$).

В мощных гиротронах для УТС на частотах до 170 ГГц уже реализованы непрерывные (порядка 1000 с) высокоэффективные (КПД более 50%) режимы мегаваттного уровня мощности, в том числе и со ступенчатой перестройкой частоты в широких пределах, а также модуляцией вы-

ходной мощности. Окно вывода излучения выполнено, как правило, из синтетического алмаза [1—5].

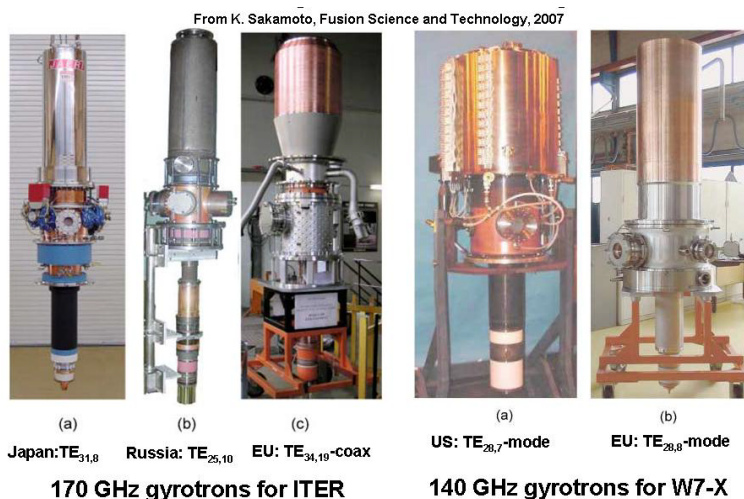


Рис. 2. Гиротроны для УТС мегаваттного уровня мощности.

Fig. 1. Megawatt power level gyrotrons for fusion

Потребности УТС установок нового поколения требуют повышения частоты гиротронов. Прогресс магнитных систем создает предпосылки для таких разработок. Повышение рабочей частоты требует использовать все более высокие рабочие моды в резонаторах. [1—5]. Согласно расчетам, КПД 0.3 ТГц гиротрона с рабочей модой $TE_{44,33}$ на уровне мощности 1 МВт составляет около 30 % без рекуперации и 60 % с одноступенчатой рекуперацией. В JAЕА (Япония) недавно был разработан гиротрон с частотой 0,3 ТГц имеющий аксиальный вывод мощности на рабочей моде $TE_{32,18}$ (т. е. типа Рис. 1а), с использованием 13 Т сухого криомагнита с проходным отверстием 110 мм. В экспериментах с этим гиротроном достигнута выходная мощность 520 кВт с КПД около 20% при ускоряющем напряжении 80 кВ и токе пучка 33,8 А, при длительности импульса 1 мс. Подобный гиротрон на рабочей моде $TE_{22,2}$ с использованием разработан в университета г. Фукуи для диагностики плазмы в стеллараторе LHD (NIFS, Япония) [2]. Аналогичные проекты развиваются в КИТ (Германия) и в нашей стране [1—5]. Программы работ, заявленные ведущими разработчиками гиротронов, демонстрируют устойчивую тенденцию к дальнейшему наращиванию частот и мощности гиротронов [1—4].

4. Гиротроны средней мощности

Основным назначением гиротронов средней мощности является микроволновая обработка материалов (до появления гиротронов такого понятия практически не было) и создание пучков многозарядных ионов. С помощью излучения гиротронов происходит стимулирование высокотемпературных процессов — достигаются температуры достаточные для термически активированного диффузионного массопереноса, даже материалы «прозрачные» для микроволновых печей могут быть успешно нагреты, проблема разбегания тепла становится менее острой, высокая интенсивность поля волновых пучков, может быть легко реализована фокусировкой излучения на площади порядка λ^2 , что делает возможным их использование для «лечения» поверхностных дефектов материалов. Многолетний опыт работы показал, что для широкого распространения гиротронов для технологических приложений необходима автоматизация их работы, повышение эффективности гиротронного комплекса, снижение стоимости и возможность перестройки частоты. Обычно для технологических приложений используются частоты 24—80 ГГц [2], но есть специфика использования более высоких частот. В ИПФ РАН и НПП «Гиком» для университета г. Фукуи, [6] был создан непрерывный гиротрон на частоте 0.3 ТГц ($n=1$). Этот гиротрон работал в «сухом» криомагните с полем до 12 Тл и проходным отверстием 100 мм. В составе технологического комплекса гиротрон был активно использован для исследования новых материалов и биомедицинских приложений.

5. Терагерцовые гиротроны малой мощности

В нашем институте в 70—80-х годах прошлого века созданы непрерывный гиротрон с частотой 0,3 ТГц и рекордной мощностью 1,6 кВт и непрерывный гиротрон с рабочими частотами 0,25 ТГц и 0,28 ТГц [6]. В начале 2000-х работы по освоению ТГц диапазона получили новый импульс, инициированный ростом числа перспективных приложений. В ИПФ РАН в последние годы были достигнуты рекордные значения частоты и мощности (частота 1 ТГц при мощности 1,5 кВт) в импульсном режиме генерации, а также созданы непрерывные высокостабильные гиротроны на частотах около 0,26 ТГц [6]. В зарубежных странах данные работы ведутся в основном: в исследовательском центре по изучению дальнего инфракрасного диапазона (FIR FU, Фукуи, Япония); MIT (США), Университете Мэриленда (UMD), компании CCR (Calabasas Creek Research, Inc., США),

Bridge 12 (США) [2, 6]. Фирмой CPI совместно с Bruker Biospin в США на базе гиротрона с частотой 0.26 ТГц впервые реализован ЯМР (NMR) спектрометр высокого разрешения с динамической поляризацией ядер — ДПЯ (DNP). В настоящее время для таких спектрометров компанией BRUKER-CPI разработаны и промышленно выпускаются гиротроны с мощностью около 50 Вт с частотами 263 ГГц, 395 ГГц, и 527 ГГц для ЯМР/ДПЯ (NMR/DNP) систем фирмы BRUKER. В FIR FU (Фукуи, Япония) создан ряд непрерывных гиротронов, в том числе гиротрон, работающий на частоте 0.89 ТГц ($n=3$) и гиротроны на 0.2—0.4 ТГц ($n=1$ и $n=2$) [6].

ИПФ РАН и НПП «Гиком», впервые в России, был разработан гиротрон для ДПЯ/ЯМР спектроскопии ($n=2$) с частотой 0.258 ТГц и мощностью до 200 Вт при стабильности частоты и мощности генерации за 12 часов не хуже 3×10^{-6} и 10^{-2} , соответственно [6]. Генерация наблюдалась на модах TE_{23} с частотой 0.258 ТГц и TE_{03} с частотой 0.264 ТГц. Частота может в небольших пределах подстраиваться изменением температуры резонатора (около 4 МГц/°С), что было успешно использовано для применения к задачам ЯМР спектроскопии. Эксперименты с использованием этого генератора в ИБФХ Университета И. В. Гете (Франкфурт-на-Майне, Германия) позволили в 80 раз повысить чувствительность и разрешающую способность ЯМР спектрометра [6]. К недостаткам указанного комплекса следует отнести использование заливного криомагнита, и отсутствие автоматизированной системы управления. С целью дальнейшего усовершенствования подобных систем был разработан новый гиротронный комплекс, с частотой 0.263 ТГц ($n=1$) ориентированный на «сухой» криомагнит JMTD 10T100 фирмы JASTEC, с уровнем индукции поля до 10 Тл и проходным отверстием 100 мм [7]. Выходная мощность на рабочей моде TE_{53} , преобразованной внутри лампы в гауссов пучок, достигала уровня 1 кВт (при КПД=17%), что более чем достаточно для всех планируемых приложений этого комплекса. Частота генерации может подстраиваться изменением магнитного поля, ускоряющего напряжения и температуры резонатора для задач спектроскопии. В этом же гиротроне в другом режиме была зарегистрирована генерация с частотой 502 ГГц с выходной мощностью 10 Вт, соответствующая рабочей моде $TE_{10,5}$ ($n=2$) [7].

Оригинальная идея по радикальному упрощению гиротронного комплекса была независимо предложена российскими и американскими разработчиками [6]. Суть ее состоит в использовании магнитной системы ЯМР спектрометра одновременно в качестве магнита для гиротрона. При этом весь комплекс становится очень компактным, упрощается линия передачи и снижаются потери. Эти системы находятся только в самом начале своего развития и их проблемы еще не до конца выяснены.

6. Гиротроны с импульсными магнитными полями

В настоящее время диапазон терагерцовых частот может быть достигнут гиротронами на основной гармонике только с помощью импульсных магнитов. Опыт экспериментов с гиротронами, работающими в импульсных магнитных полях [6, 7], показал, что при разработке гиротронов с импульсными соленоидами должен учитываться ряд специфических требований. Основным отличием является экранирование переменного магнитного поля металлическими элементами лампы. По мере укорочения рабочей длины волны гиротрона уменьшается плотность электронного тока пучка на элементарную ячейку взаимодействия, растет доля омических потерь в стенках резонатора и выходной КПД может оказаться существенно меньше электронного, что приходится учитывать при разработке гиротронов для субмм диапазона. Первые успешные эксперименты с гиротронами на базе импульсных соленоидов были выполнены в ИПФ РАН в 80-х годах прошлого века. В этих экспериментах были достигнуты частоты до 0.65 ТГц при мощности до 40 кВт и КПД несколько процентов. В 2006—2007 году ИПФ РАН и FIR FU был преодолен рубеж в 1 ТГц.

7. Гиротроны на высоких гармониках

Одним из наиболее эффективных методов электронной селекции на высших гармониках является использование приосевых винтовых электронных пучков. Эти приборы получили название гиротронов с большой орбитой (ГБО), приосевой электронный пучок эффективно взаимодействует только с модами у которых азимутальный индекс равен номеру циклотронной гармоники. В ИПФ РАН была получена генерация в ГБО в ТГц диапазоне частот на второй и третьей гармониках гирочастоты. При магнитных полях около 15 Тл и напряжении электронного пучка 80 кВ на второй гармонике получена генерация на частоте 0.6 ТГц при мощности до 2 кВт, а на третьей на частоте 1 ТГц при мощности 0.3 кВт и длительности импульса 10 мкс [6]. Успешная реализация этого гиротрона на базе импульсного соленоида послужила основой для проекта по созданию ГБО с непрерывным режимом генерации. Примечателен ГБО в постоянном магните, показавший возможность селективного возбуждения серии мод вплоть до 5 гармоники включительно [6]. На 5ой гармонике получена частота около 0.15 ТГц хотя эксперимент проводился в импульсном режиме, конструкция гиротрона позволяла реализовать непрерывный режим работы. Основной проблемой ГБО остается сложность реализации их электронно-оптических систем.

8. Заключение

Режимы генерации уже успешно реализованы в giroприборах субтерагерцового и терагерцового диапазонов на первой и второй гармониках. Исследуются перспективные направления по созданию приборов на более высоких гармониках, а также перестройки частоты. Исходя из достижений существующих гиротронов мегаваттного уровня мощности можно предположить, что близкие тепловые нагрузки соответствуют уровням мощности порядка 0.3—1 МВт на частотах 0.3 ТГц и 10 кВт на частотах порядка 1 ТГц в непрерывном режиме генерации. Для спектроскопии востребованы долговременная стабильность работы гиротронов и перестройка частоты, повышение КПД, но сложность задачи обостряется проблемой конкуренции мод и высоким уровнем омических потерь. Возможности совершенствования giroприборов далеко не исчерпаны и относительно компактные giroприборы с мощностью 1—10³ Вт и частотой 0,3—1,5 ТГц будут доступны в ближайшее время для многочисленных приложений.

Источники финансирования и выражение признательности

Работы по созданию гиротронов ТГц диапазона в ИПФ РАН с 2014 года ведутся при поддержке проектов РНФ 14-12-00887 и 14-29-00192.

Список литературы

- [1] Litvak A.G., Denisov G.G., Zapevalov V.E. et al. Trends in High-Power Gyrotron. Proc. of 8th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications”. Nizhny Novgorod, 2011. P. 13-14.
- [2] Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Maser”. KIT, Karlsruhe, 2012.
- [4] Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. The Johns Hopkins University Press, Baltimore – London, 2004. 751 p.
- [5] Tsimring Sh. E. Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
- [6] Bratman V., Glyavin M., Kalynov Y., Luchinin A., Zapevalov V., Idehara T., Mitsudo S., Ogawa I., Saito T., Tatematsu Y., Manuilov V. Review of Subterahertz and Terahertz Gyrodevices at IAP RAS and FIR FU. IEEE Trans. on Plasma Science 2009. T. 37. № 1. pp. 36-43.
- [7] Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Запёвалов В.Е., Куфтин А.Н., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Седов А.С., Чирков А.В.. Терагерцовые гиротроны: состояние и перспективы // Радиотехника и электроника. 2014. Том 59. № 8. С. 745-750.

References

- [1] Litvak A.G., Denisov G.G., Zapevalov V.E. et al. Trends in High-Power Gyrotron. Proc. of 8th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications”, Nizhny Novgorod, 2011, pp.13 - 14.

- [2] Thumm M. *State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers*. KIT, Karlsruhe, 2012.
- [4] Nusinovich G.S. *Introduction to the Physics of Gyrotrons*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore – London, 2004. 751 p.
- [5] Tsimring Sh.E. *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics*. John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
- [6] Bratman V., Glyavin M., Kalynov Y., Luchinin A., Zapevalov V., Idehara T., Mitsudo S., Ogawa I., Saito T., Tatematsu Y., Manuilov V. Review Of Subterahertz And Terahertz Gyrodevices at IAP RAS and FIR FU. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2009, vol. 37, no 1. pp. 36 - 43.
- [7] Glyavin M.Yu., Denisov G.G., Zapevalov V.E., Kuftin A.N., Luchinin A.G., Manuilov V.N., Morozkin M.V., Sedov A.S., Chirkov A.V. Terahertz gyrotrons: State of the art and prospects. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2014, vol. 59, no 8. pp. 792 - 797.

Acknowledgements

Research and development of THz gyrotrons in IAP RAS from 2014 conducted with the support of RSF projects 14-12-00887 and 14-29-0019.

Experimental cell of radiolight receiver

Alexander S. Dmitriev¹, Vadim V. Itskov^{1, 2}, Mark Yu. Gerasimov¹,
Anton V. Uvarov²

¹*Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics of RAS
Moscow, 125009, Russian Federation
chaos@cplire.ru*

²*Moscow Institute of Physics and Technology
Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russian Federation*

Abstract: *We consider a problem of radiolight reception. The proposed elementary cell of radiolight receiver operates on principles close to the idea of the energy detector with wide dynamic range and significant accumulation time. An experimental device of radiolight receiver was created and experimentally tested. It works with UWB signals in the range of 2 to 7 GHz, it is designed as a printed circuit board with a planar antenna.*

Keywords: *radiolight, natural light, microwave radiometer, UWB wireless communication.*

Экспериментальная ячейка приемника радиосвета

А.С. Дмитриев¹, В.В. Ицков^{1, 2}, М.Ю. Герасимов¹, А.В. Уваров²

¹*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
Российская Федерация, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7
chaos@cplire.ru*

²*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Российская Федерация, 141700, г. Долгопрудный,
Московская обл., Институтский пер., д. 9*

Аннотация: *В докладе рассматривается задача приема радиосвета. Предлагается элементарная ячейка для приема, принцип действия которой основан на использовании энергетического детектора с большим динамическим диапазоном и значительным временем накопления. Создано и экспериментально апробировано устройство для приема радиосвета в диапазоне от 2—7 ГГц, выполненное в виде печатной платы с планарной антенной.*

Ключевые слова: *радиосвет, естественный свет, СВЧ радиометр, СШП беспроводная связь.*

1. Введение

Радиоосвещение — локальное искусственно созданное шумовое (шумоподобное) поле широкополосного (сверхширокополосного) некогерентного в пространстве и во времени излучения в радио или микроволновом диапазоне длин волн [1]. Распространяясь в среде микроволновое шумовое (шумоподобное) излучение (радиосвет) частично поглощается в ней, частично проходит через нее, частично отражается. Таким образом, оно несет в себе информацию о среде, с которой взаимодействует. Характер взаимодействия радиосвета со средой подобен обычному (видимому) свету. Это в обоих случаях некогерентное излучение с широким спектром, что исключает эффект интерференции и сводит вопросы наблюдения к оценке мощностных и спектральных характеристик принимаемого сигнала. Принципиальная особенность радиосвета по отношению к обычному свету — разница в характерной области частот примерно на 5 порядков, что означает существенно более низкую разрешающую способность при наблюдении в радиосвете по отношению к наблюдению в обычном свете. Однако высокая проникающая способность в непрозрачных для видимого света средах делает привлекательным применение широкополосного шумоподобного некогерентного излучения в практических целях. Для этого необходимо создание недорогих малогабаритных источников и приемников радиосвета.

2. Постановка задачи

В [1] было предложена и экспериментально реализована идея создания «ламп радиосвета» на основе миниатюрных генераторов сверхширокополосных хаотических колебаний радио- и СВЧ диапазонов. Такие устройства могут иметь мощность излучения от сотен микроватт до сотен милливатт, из них можно образовывать сборки, подобно тому, как это делается в светодиодных средствах освещения, и суммировать некогерентное шумоподобное излучение от нескольких источников в пространстве. Использование ламп радиосвета решает задачу создания поля радиоосвещения.

А как может быть устроен прибор для наблюдения за радиоосвещенной средой? Для видимого света подобным прибором является глаз. Он состоит из множества элементарных ячеек — колбочек и палочек, принимающих свет и производящих первичную обработку принимаемого сигнала. После этого происходит сложная совместная обработка сигналов от множества элементов. В природе у некоторых животных существуют и более простые

типы глаз, которые детектируют только наличие и интенсивность света и состоят всего из одного или нескольких чувствительных элементов.

Рассмотрим задачу создания подобного чувствительного элемента — ячейки приемника радиосвета — для наблюдения за радиоосвещенной средой. Основной функцией такого элемента будет способность оценивать интенсивность принимаемого излучения.

С точки зрения технической реализации можно назвать два типа устройств, которые могут рассматриваться в качестве прототипа ячейки приемника радиосвета. Первый — это классический радиометр СВЧ диапазона [2, 3], который служит для наблюдения относительно медленно меняющихся сигналов в диапазоне температур источников 300—1000 ° К (динамический диапазон изменения сигнала около 5 дБ). Характерное значение постоянной времени для таких устройств составляет 0,1—1 секунду, что позволяет получить чувствительность до 0,1 ° К. Второй — энергетический приемник хаотических радиоимпульсов в беспроводных системах связи на основе динамического хаоса [4]. Он предназначен для приема шумоподобных сверхширокополосных импульсов, следующих с частотой до нескольких миллионов в секунду со временем накопления до сотен наносекунд. Рабочий динамический диапазон таких приемников составляет 50—60 дБ.

При создании ячейки чувствительного элемента будем предполагать, что полоса принимаемого сигнала должна быть не менее 500 МГц, что соответствует определению сверхширокополосного сигнала, время накопления сигнала находится в пределах 0,001—0,1 сек. Динамический диапазон устройства должен позволять работать как со слабыми сигналами, так и с сигналами большой интенсивности вплоть до 0 дБм.

3. Структура и реализация ячейки приемника радиосвета

Структура предлагаемого устройства, которое позволяет получить требуемые параметры по чувствительности, динамическому диапазону и времени накопления показана на рис. 1. Устройство включает в себя антенну, согласованную нагрузку, ключ, мал шумящий усилитель, логарифмический детектор, активный фильтр нижних частот и микроконтроллер со встроенным аналого-цифровым преобразователем. Чтобы получить приемлемую чувствительность ячейки используется согласованная нагрузка. При подключении нагрузки через ключ к усилителю на выходе ячейки формируется постоянное напряжение, значение которого определяется тепловым шумом и соответствует постоянному напряжению на выходе ячейки при отсутствии внешнего сигнала. На вход попеременно по-

ступает один из двух сигналов: с антенны или с согласованной нагрузки. Частота переключения выбирается в зависимости от окружающей обстановки и необходимого времени накопления.

Сигнал с выхода ключа поступает в МШУ, усиливается в нем и попадает в логарифмический детектор с большим динамическим диапазоном.

После логарифмического детектора находится АФНЧ, частота среза которого существенно выше частоты переключения ключа с антенны на согласованную нагрузку, но при этом существенно ниже частот собственных шумов высокочастотной части приемного тракта. Это позволяет уменьшить влияние собственных шумов тракта на выходе, одновременно повышая чувствительность ячейки за счет времени накопления.

С выхода АФНЧ сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь микроконтроллера, где преобразуется в цифровую форму.

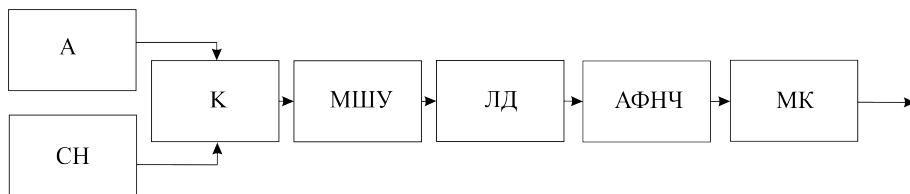


Рис. 1. Структура экспериментальной ячейки приемника радиосвета.

А — антенна, СН — согласованная нагрузка, К — ключ, МШУ — малозумящий усилитель СВЧ, ЛД — логарифмический детектор, АФНЧ — активный фильтр низких частот второго порядка, МК — микроконтроллер со встроенным АЦП

На основе предложенной структуры был разработан и протестирован экспериментальный образец ячейки, который реализован на печатной плате размером $17,5\text{ см}^2$ с компонентами для поверхностного монтажа и планарной печатной антенной. Устройство работает в диапазоне от 2 до 7 ГГц, имеет динамический диапазон до 60дБ и рассчитано на максимальную входную мощность около 0 дБм. Характерное время модуляции составляет 0,1 секунды. На выходе устройства формируется зависимость мощности принимаемого сигнала как функция времени, имеющая вид меандра. Разница уровней меандра характеризует полезную принимаемую мощность и определяет интенсивность радиосвета.

4. Заключение

В докладе рассмотрена задача построения чувствительного элемента ячейки приемника радиосвета. Сформулированы требования на характеристики ячейки и предложена обеспечивающая их реализацию структура

устройства. Описан экспериментальный образец, который был разработан в соответствии с предложенной структурой, и представлены предварительные результаты его работы.

Источники финансирования и выражение признательности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00084).

Список литературы

- [1] Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Герасимов М.Ю., Ицков В.В. Радиосвечение на основе сверхширокополосных генераторов динамического хаоса // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 10. (В печати).
- [2] Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. В 2-х томах. Т 1. М: ИКИ РАН, 2014.
- [3] Armand N.A., Polyakov V.M. *Radio Propagation and Remote Sensing of the Environment*. New York: CRC Press, 2005.
- [4] Ефремова Е.В., Лазарев В.А. Анализ энергопотребления приемопередатчиков для сверхширокополосных беспроводных сенсорных сетей // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 3. С. 43-54.

References

- [1] Dmitriev A.S., Efremova E.V., Gerasimov M.Yu., Itskov V.V. Radiolight based on UWB generators of dynamic chaos. *Radiotekhnika i elektronika*, 2016, vol. 61, no. 10 (in Russian).
- [2] Sharkov E.A., *Radiothermal remote probing of the Earth: physical fundaments*. 2 volumes. M: IKI RAN, 2014, vol. 1.
- [3] Armand N.A., Polyakov V.M. *Radio Propagation and Remote Sensing of the Environment*. New York: CRC Press, 2005.
- [4] Efremova E.V., Lazarev V.A. Energy consumption analysis of transceivers for UWB wireless sensor networks. *Uspehi sovremennoi radioelektroniki*, 2013, no. 3, pp. 43 - 54 (in Russian).

Acknowledgements

The study was performed by a grant from the Russian Science Foundation (Project № 16-19-00084).

Моделирование электромагнитных и акустических полей в зданиях на основе метода минимальных автономных блоков

Малый С.В., Орлова А.С.

Белорусский государственный университет

г. Минск, 220030, Республика Беларусь

maly@bsu.by

Аннотация: На основе метода минимальных автономных блоков разработаны методики расчета волновых полей (электромагнитных и акустических) в зданиях и сооружениях. В основе методик лежит комбинация рекомпозиционного и итерационного алгоритмов реализации метода минимальных автономных блоков. Предложены способы повышения вычислительной эффективности моделей за счет их ориентации на решение задач многовариантного анализа, а также определения электромагнитных полей в системе заданных подобластей и на разреженных пространственных сетках.

Ключевые слова: метод минимальных автономных блоков, электромагнитные поля, здания и сооружения, многовариантный анализ.

1. Введение

Расчет волновых полей (электромагнитных и акустических) в зданиях и сооружениях необходим для решения широкого класса прикладных проблем: проектирования и оптимизация беспроводных каналов связи, электромагнитная совместимость, радиоэкология, защита информации. Для решения указанных задач используются различные по точности и вычислительной эффективности подходы, которые можно разделить на следующие группы: прямые численные методы (метод конечных разностей во временной области, метод конечных элементов, метод конечных интегралов); асимптотические методы (метод геометрической оптики, метод геометрической теории дифракции); гибридные методы, сочетающие в рамках единого подхода прямые и итерационные методы. Прямые методы позволяют рассчитывать волновые поля во всей исследуемой пространственной области, но их вычислительная эффективность резко уменьшается с ростом размеров этих областей. Асимптотические методы являются приближенными, а их эффективность зависит от количества точек, в которых рассчитываются поля.

2. Методики расчета волновых полей в зданиях на основе метода МАБ

В общем случае расчет волновых полей в зданиях и сооружениях сводится к определению полей, возбуждаемых локальными или удаленными источниками, в пространственной области с произвольным распределением материальных параметров. Рассмотрим потенциальные возможности метода МАБ [1-3] для расчета волновых полей в зданиях и сооружениях. Во-первых, для метода МАБ максимальный уровень пространственной дискретизации составляет 0.25λ , что существенно превосходит соответствующий уровень для метода FD-TD, который равен 0.1λ . Во-вторых, метод МАБ допускает эффективный гибридный подход, когда свойства стандартных или типовых для данного здания конструктивных элементов могут быть описаны с использованием матриц рассеяния многоканальных блоков. Итерационный алгоритм является основным для расчета распределения полей в зданиях методом МАБ. Метод МАБ применим для решения электромагнитных и акустических задач. Различие между ними состоит в порядке матриц рассеяния элементарных блоков и значениях их элементов. Рассмотрим дополнительные возможности сочетания рекомпозиционного и итерационного алгоритмов при расчете волновых полей в зданиях методом МАБ.

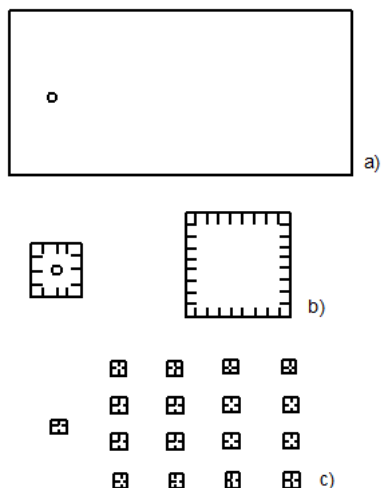


Рис. 1. Методики расчета волновых полей

(а) исходная задача; б) связанные подобласти; в) прореженная пространственная сетка)

На рисунке 1 а) показана исходная задача о распределении поля локального источника в прямоугольной области. На внешних границах области задаются граничные условия, соответствующие типу решаемой задачи (внутренней, внешней). Для решения этой задачи область разбивается на систему МАБ. Поле рассчитывается с использованием итерационного алгоритма, моделирующего процесс многократного рассеяния канальных волн на системе МАБ или прямым решением системы линейных алгебраических уравнений с разреженной матрицей.

Если поле необходимо рассчитать только в пределах нескольких подобластей, можно применить следующую методику. С использованием рекомпозиционного алгоритма объединяются каналы всех соседних блоков, не входящих в выделенные подобласти, за исключением каналов, выходящих на границы этих подобластей, как показано на рисунке 1 б). Полученная таким образом многоканальная система описывается матрицей рассеяния по отношению к каналам на границах подобластей. Каналы на внешних границах полной области исключаются с использованием соответствующих граничных условий. Полученная многоканальная система выполняет две функции: граничные условия для подобластей; взаимосвязь подобластей. Для расчета полей в подобластях используется итерационный вариант метода МАБ. Применение методики эффективно для осуществления многовариантного анализа, когда моделируемую систему можно разделить на стационарную и варьруемую части.

Минимально возможные размеры подобластей определяются размерами отдельных МАБ. В случае, когда необходимо рассчитать поле в заданном дискретном наборе пространственных координат возможно использовать методику, в рамках которой формируется система подобластей, включающих область источника и подобласти, окружающие точки, в которых необходимо определение полей. После рекомпозиции получаем многополюсник, изображенный на рисунке 1 с). Волновые свойства многополюсника описываются матрицей рассеяния, а поле в подобластях рассчитывается с использованием итерационного алгоритма. Распределение подобластей в пределах полной области может быть произвольным. Для повышения эффективности методики возможна модификация матрицы рассеяния многоканальной системы за счет ограничения взаимодействия между подобластями. Это возможно и целесообразно при моделировании полей в больших пространственных областях, когда взаимодействием между удаленными подобластями можно пренебречь.

Описанные методики могут применяться так же для решения одномерных и трехмерных задач.

3. Вычислительный эксперимент

С целью иллюстрации возможностей описанных выше методик рассмотрим двухмерную модель помещения, эскиз которой представлен на рисунке 2. Решается электродинамическая задача.

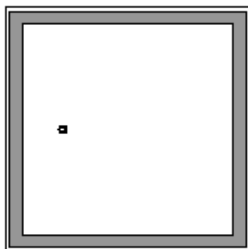


Рис. 2. Двухмерная модель помещения

Моделирование осуществляется в области с размерами 4x4 м. Помещение состоит из одной комнаты и имеет внешние размеры 3.8x3.8 м. Стенки имеют толщину 20 см и выполнены из диэлектрического материала с $\varepsilon = 4$. Точечный источник с изотропной диаграммой направленности расположен на расстоянии 100 см от границы области. Рассматривался случай Е-поляризации. Моделирование проводилось для длины волны $\lambda = 20$ см. Область моделирования разбивалась на систему одинаковых квадратных блоков размером 1 см. Задача определения распределения электромагнитного поля в помещении решалась методом МАБ с использованием прямого моделирования во всей области, а также с использованием и описанных выше методик. Для всех вариантов решения параметры задачи были одинаковы.

Результаты моделирования представлены ниже в виде пространственного распределения амплитуды электрического поля. На рисунке 3 показано распределение амплитуды электрического поля для прямого моделирования в полной области на основе итерационного метода МАБ. На рисунке 4 представлены результаты моделирования с использованием методик подобластей. На рисунке 4 а) показано распределение поля в двух подобластях размерами 50x50 см, а на рисунке 4 б) – на сетке их 31 подобласти с размерами 3x3 см каждая.

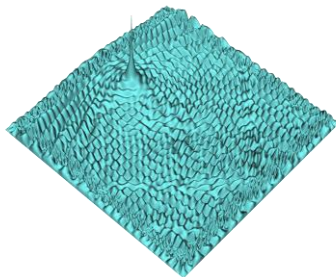
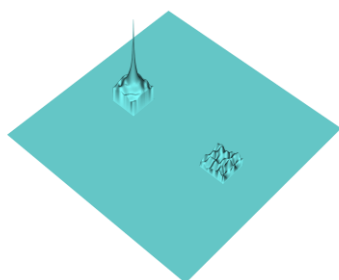
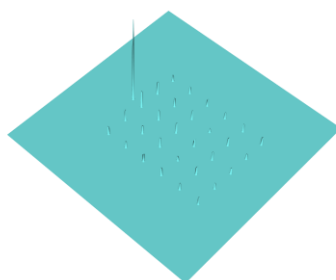


Рис. 3. Распределение электрического поля. Моделирование в полной области.



a)



b)

Рис. 4. Распределение электрического поля.

a) две подобласти; b) сетка подобластей размером в 3x3 МАБ.

4. Заключение

На основе метода МАБ разработаны методики расчета волновых полей (электромагнитных и акустических) в зданиях, ориентированные на эффективное решение задач многовариантного анализа. Методики базируются на сочетании итерационного и рекомпозиционного алгоритмов.

Список литературы

- [1] Никольский В.В. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. М. : Наука, 1983. 304 с.
- [2] Maly S.V. The electrodynamic analysis of composites and metamaterials on the basis of the method of minimal autonomous blocks // Abstracts of the International conference "DAYS ON DIFFRACTION'2011". – Russia, Saint Petersburg, May 30 – June 3, 2011. P. 145.
- [3] Орлова А.С. Применение метода минимальных автономных блоков для решения акустических задач // Вестник БГУ. Серия 1. – 2015. - №3. – С. 50 – 55.

Моделирование радиопоглощающих покрытий на основе многоканальных матриц рассеяния

¹Малый С.В., ¹Орлова А.С., ²Будай А.Г., ²Кныш В.П.

¹Белорусский государственный университет
г. Минск, 220030, Республика Беларусь
maly@bsu.by

²НИУ НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
г. Минск, 220045, Республика Беларусь
anatbudai@gmail.com

Аннотация: Предложена эффективная методика описания электромагнитных характеристик радиопоглощающих покрытий, инвариантная по отношению к типам источников электромагнитного излучения. Методика базируется на методе минимальных автономных блоков и сводится к расчету матрицы рассеяния многоканальной системы на границе радиопоглощающего покрытия. Численно исследована структура матриц рассеяния и электромагнитная связь каналов для покрытий различных типов. Приводятся примеры использования методики для решения тестовых задач.

Ключевые слова: радиопоглощающее покрытие, метод минимальных автономных блоков, многоканальная матрица рассеяния, электромагнитная волна, локальный источник.

1. Введение

Радиопоглощающие материалы и покрытия (РПП) применяются для решения широкого класса задач прикладной электродинамики и оптики. Для описания электромагнитных свойств РПП используется коэффициент отражения плоской линейно поляризованной электромагнитной волны, который определяется структурой и материальным составом покрытий, зависит от частоты, направления распространения и поляризации падающего излучения. Использование коэффициента отражения для описания электромагнитных свойств РПП возможно для удаленных источников, поле которых аппроксимируется плоской электромагнитной волной. В общем случае, падающее на РПП электромагнитное поле возбуждается системой источников, которые могут находиться на произвольных волновых расстояниях от покрытия. Размеры объектов и кривизна поверхностей, на которых размещаются РПП, могут быть произвольными, что ограничивает возможности использования асимптотических методов.

2. Модель радиопоглощающего покрытия на основе метода минимальных автономных блоков

Метод минимальных автономных блоков (МAB) широко используется для решения электромагнитных задач в частотной области [1-3]. Он базируется на теории многополюсников и описании электромагнитных свойств систем с помощью матриц рассеяния многоканальных блоков. Базовый блок заполнен однородным материалом и имеет форму прямоугольника (двухмерная задача) или прямоугольного параллелепипеда (трехмерная задача). На практике для реализации метода МAB используются рекомпозиционный, итерационные и гибридные алгоритмы.

Рассмотрим основные положения методики описания электромагнитных свойств РПП с использованием многоканальной матрицы рассеяния на примере конечного фрагмента покрытия с профилированной поверхностью, расположенного на плоском проводящем экране. Структура покрытия и источник электромагнитного излучения показаны на рисунке 1.

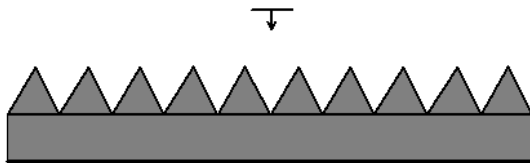


Рис. 1. Радиопоглощающее покрытие на проводящем экране.

Для построения МAB-модели РПП его конечный фрагмент декомпозируется на систему блоков (МAB), как показано на рисунке 2.

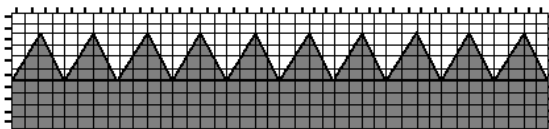


Рис. 2. МAB-модель радиопоглощающего покрытия.

Для каждого МAB рассчитывается матрица рассеяния. В результате рекомпозиции внутренних каналов получаем многополюсник, электромагнитные свойства которого описываются матрицей рассеяния, порядок которой равен числу внешних каналов. Матрица рассеяния описывает свойства конечного фрагмента РПП при любых режимах его возбуждения.

Эта матрица может быть использована при моделировании методом МАБ произвольных электродинамических систем, в состав которых входит РПП.

Для повышения вычислительной эффективности расчета матрицы рассеяния фрагмента РПП больших волновых размеров предлагается использовать следующие подходы:

- ограничение зоны взаимодействия каналов;
- формирование матрицы рассеяния покрытия произвольных размеров по матрице рассеяния модельного фрагмента РПП с учетом особенностей каналов в центральной и краевых областях.

Учет более сложных конфигураций размещения РПП предполагает расчет матриц рассеяния для дополнительных модельных конфигураций (изломы, большая кривизна несущей поверхности, стык РПП различных типов).

3. Вычислительный эксперимент

Рассмотрим двухмерную электродинамическую задачу, представленную на рисунке 1. На поверхности плоского идеально проводящего экрана расположено РПП с профилированной поверхностью. Толщина плоского слоя равна 10 см. Период профилирования равен 11 см, толщина профилированного слоя равна 10 см. РПП сформирован из однородного поглощающего материала с электромагнитными параметрами: $\varepsilon = 1.5 - j0.5$; $\mu = 1.0 - j0.0$. Ширина металлического экрана равна 6 метрам. На высоте 20 см от поверхности РПП находится линейный источник шириной 10 см. Он состоит из 10 источников Гюйгенса, излучение которых направлено в сторону РПП. Рассматривается случай Н-поляризации, когда вектор электрического поля лежит в плоскости рисунка. Расчет проводился на длине волны, равной 20 см.

Область моделирования, размеры которой составляли 600x300 см, декомпозировалась на систему одинаковых квадратных блоков с размерами 1 см. Для решения задачи использовался итерационный метод МАБ. На внешних границах области моделирования применялись «поглощающие» граничные условия. Расчеты проводились в двух режимах: прямое моделирование с учетом структуры и состава РПП; моделирование с использованием МАБ-модели РПП. Результаты моделирования в виде пространственного распределения амплитуды магнитного поля представлены соответственно на рисунках 3 и 4. В МАБ-модели покрытия учитывалось взаимодействие между 30 ближайшими каналами.

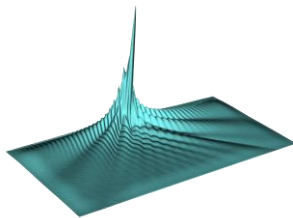


Рис. 3. Распределение амплитуды магнитного поля. Прямое моделирование РПП.

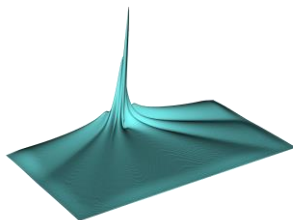


Рис. 4. Распределение амплитуды магнитного поля. Использование МАБ-модели.

Анализ результатов подтверждает работоспособность предложенной методики моделирования РПП. Аналогичный подход может быть реализован для трехмерных электродинамических задач.

4. Заключение

На основе метода МАБ разработана эффективная модель РПП. Она применима для произвольного размещения источников электромагнитного поля относительно поверхности РПП. Модель может использоваться при моделировании на основе метода МАБ электромагнитных систем, в состав которых входят РПП.

Список литературы

- [1] Никольский В.В. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. М. : Наука, 1983. 304 с.
- [2] Nikolskii V.V., Nikolskaya T.I. Method MAD: 3-D problems including scattering by chiral elements in waveguide // Proc. 23 European Microwave Conf., 1993. P. 646–648.
- [3] Maly, S.V. The electrodynamic analysis of composites and metamaterials on the basis of the method of minimal autonomous blocks // Abstracts of the International conference "DAYS ON DIFFRACTION'2011". – Russia, Saint Petersburg, May 30 – June 3, 2011. P. 145.

Научное издание

26-я Международная
Крымская конференция
«СВЧ-техника
и телекоммуникационные
технологии»:
Материалы конференции
(на русском и английском языках)

Том 13

Ответственный за издание
П. П. Ермолов

Компьютерная верстка
Н. А. Морозович

Редактирование текста
на английском языке
С. В. Павлов

Подписано в печать 24.05.2016
Формат 32×45/4
Условн. печ. л. 1,87
Уч.-изд. л. 1,8
Зак. 4565/13. Тир. 100

Отпечатано в типогр. Printex
ул. Кулакова, 59, оф. А
Севастополь, 299011
Тел.:
+7 978 704 51 11
+7 8692 464 744
+7 8692 455 678