

УДК 621.396.677

На правах рукописи

Виленский Артем Рудольфович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
ПЕЧАТНЫХ ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2014

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: Чернышев Сергей Леонидович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Пастернак Юрий Геннадьевич
доктор технических наук, профессор,
профессор Воронежского
университета

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2061630

Виленский А.Р. Исследование и разработка

У2061630

Виленский А.Р.

Исследование и разработка
сверхширокополосных
печатных щелевых антенн
бегущей волны

Пастернак Юрий Геннадьевич
доктор технических наук, профессор,
профессор Воронежского
университета

2061630

Возвратите книгу не позже
обозначенного здесь срока

в здании
библиотеки
05005,

Московского
университета

печатать
на 2-й
странице

Власов

Актуальность темы. Расширение возможностей современных радиоэлектронных систем во многом определено всё более эффективным и полным охватом спектра радиочастот, а также миниатюризацией аппаратуры. В связи с этим закономерным выглядит повышенный интерес к печатным микроволновым сверхширокополосным (СШП) устройствам, особенно возросший после введения Federal Communications Commission в 2002 году нелицензируемых полос использования СШП радиосистем, которые имеют относительную рабочую полосу частот не менее 50 %.

Отдельным вопросом создания СШП радиосистем является разработка антенно-фидерных устройств, так как в большинстве случаев именно данное звено оказывается критическим с точки зрения достижения всей совокупности характеристик в сверхширокой полосе.

Среди многообразия печатных СШП антенн особое место занимают *печатные щелевые антенны бегущей волны* (ПЩАБВ) – класс направленных планарных излучателей, в качестве основных особенностей которых можно выделить: удобство достижения СШП согласования с питающим трактом; неизменное по частоте направление максимума излучения; слабую дисперсию характеристик, малое искажение излучаемого СШП импульса; удобство интеграции на единой печатной плате с другими компонентами радиосистемы; простоту и технологичность конструкции.

Первое открытое упоминание ПЩАБВ датировано 1979 г. в экспериментальной работе П. Гибсона (США). С тех пор опубликовано множество исследований, посвященных развитию методов расчёта, модификации и оптимизации структуры излучателей. Так в работе Д. Шауберта и Д. Позара (США) впервые представлена электродинамическая модель, позволяющая получать характеристики излучения электрически длинных ПЩАБВ, созданных на основе воздушной симметричной щелевой линии передачи (ЛП). Дальнейшее развитие метод получил в работах Р. Джанусвами (США), Д. Шауберта и С.В. Гирича (Россия), где был произведён учёт влияния диэлектрической подложки и конечных размеров поперечной металлизации антенны. Исследованию вопросов анализа балансных СШП ПЩАБВ посвящены исследования В.Б. Авдеева, А.В. Ашихмина, Ю.Г. Пастернака (Россия) и других авторов. Несмотря на это, можно отметить следующие недостатки современных методов анализа и синтеза СШП ПЩАБВ.

- Отсутствие электродинамической модели ПЩАБВ, позволяющей проводить анализ пространственно-временных характеристик излучения (ПВХИ) СШП импульсов.

- Недостаточное развитие аналитических и численных методов синтеза геометрии ПЩАБВ как в частотной, так и во временной областях.

- Неполнота исследования характеристик базовых печатных ЛП, использованных при создании ПЩАБВ, устройств возбуждения, а также других элементов реальных конструкций излучателей.

Настоящая диссертация направлена в первую очередь на устранение указанных недостатков, достигаемое совершенствованием методов анализа и синтеза СШП ПЩАБВ. Практическая значимость данных вопросов позволяет считать выбранную тему диссертации актуальной.

Объектом исследования работы являются одиночные СШП ПЩАБВ, созданные на основе симметричной щелевой ЛП (СЩЛ), балансные ПЩАБВ, созданные на основе двухполосковой ЛП (ДПЛ), а также трактовые устройства возбуждения указанных структур.

Предмет исследования – параметры и конструктивное выполнение СШП ПЩАБВ, определяющие характеристики согласования и излучения антенн в частотной и временной областях, методы анализа и синтеза конструкции излучателей.

Цель работы – развитие методов анализа и синтеза ПЩАБВ на основе создания математической модели уединённого излучателя, позволяющей проводить автоматизированное проектирование СШП ПЩАБВ различной геометрической формы, а также улучшение характеристик антенн как в частотной, так и во временной областях.

В работе поставлены и решены следующие задачи.

- Разработать электродинамическую модель базовых ЛП, лежащих в основе ПЩАБВ, исследовать их дисперсионные характеристики.
- Провести разработку и верификацию вычислительно эффективного метода анализа характеристик согласования и излучения ПЩАБВ в частотной и временной областях.
- Исследовать возможность применения теории плавных нерегулярных ЛП (НЛП) для синтеза на отражение профилей ПЩАБВ в частотной области.
- Исследовать энергетическую направленность и искажение формы излучаемых СШП импульсов для известных из литературы структур ПЩАБВ, сформулировать и решить задачу синтеза ПЩАБВ с максимальной энергетической направленностью.
- Исследовать методы улучшения характеристик согласования и уменьшения нижней рабочей частоты балансных ПЩАБВ, построенных на основе ДПЛ.
- Разработать комплект измерительных СШП ПЩАБВ с декадными полосами частот для просветного измерения характеристик плазмы.

Методы исследования. Для электродинамического моделирования ПЩАБВ используется метод продольной сегментации щелевой апертуры излучателя при учёте характеристик собственных волн каждого сегмента НЛП. Задача на собственные волны базовых ЛП решена методом Галёркина в спектральной области с использованием функций Грина для плоскостной структуры. Поле излучения каждого сегмента отыскивается с применением модели элементарного магнитного диполя на проводящей полуплоскости. Создание расчётных программ проведено с использованием средств среды MatLab. Также для электродинамического моделирования использованы коммерческие системы автоматизированного проектирования (САПР) на

основе метода конечных элементов и метода конечного интегрирования. Экспериментальные исследования характеристик согласования и излучения разработанных прототипов проведены в безэховой камере.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем.

- Впервые проведены исследования полноволновой модели ДПЛ, на основе которых показано, что использование только квазистатической модели ЛП может приводить к неточному вычислению ПВХИ СШП импульсов.

- Предложен приближённый метод учета фазовых искажений поля апертуры ПЩАБВ, созданных на основе СЩЛ. Показано, что для расчёта амплитудно-фазового распределения (АФР) апертуры ПЩАБВ может быть использованы методы теории плавных НЛП.

- Разработан метод синтеза геометрии ПЩАБВ в частотной области по заданным отсчётам коэффициента отражения, позволяющий приближённо учесть неоднородность и дисперсию продольного распределения характеристик собственных волн сегментов апертуры.

- Предложен и верифицирован метод отыскания ПВХИ ПЩАБВ. На основе данного метода сформулирована и решена задача синтеза ПЩАБВ с максимальной энергетической направленностью излучения СШП импульса при обеспечении заданного уровня согласования и минимальном искажении формы излучённого сигнала.

- Исследованы основные факторы, влияющие на характеристики согласования СШП балансных ПЩАБВ. Предложена методика оптимизации геометрии излучающих полосков, основанная на применении полноволновой модели ДПЛ.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы определена следующим.

- Разработанный расчётный алгоритм отыскания характеристик собственных волн печатных ЛП позволяет достигнуть точности вычисления коэффициента укорочения (n) не хуже 1%, волнового сопротивления (Z_0) не хуже 2%. Приведены дисперсионные характеристики ДПЛ для широких диапазонов параметров диэлектрической подложки.

- Благодаря использованию предложенной модели фазовых искажений поля апертуры повышена точность расчёта характеристик излучения в Е-плоскости: ошибка расчёта ширины главного лепестка составляет не более 5%, величины коэффициента усиления ($KУ$) – не более 1 дБ.

- Разработанный метод анализа ПЩАБВ позволил на порядок уменьшить время расчёта ПВХИ по сравнению с полноволновыми САПР трёхмерного электродинамического моделирования.

- Показана возможность и предложена методика синтеза совмещённых излучающих и фильтрующих СШП структур, созданных на основе ПЩАБВ.

- В ходе решения задачи параметрической оптимизации разработана конструкция СШП ПЩАБВ, энергетическая направленность которой на 20%

выше, чем у известной из литературы СШП антенны Вивальди, при величине коэффициента стоячей волны не более 1,8.

- Показано, что при помощи предложенного метода оптимизации геометрии полосков балансных ПЩАБВ возможно уменьшить величину коэффициента отражения антенны на (2 – 3) дБ в сверхширокой полосе.

- Рассмотрены методы создания СШП ПЩАБВ с повышенными требованиями к характеристикам направленности в декадных полосах частот. КУ разработанных антенн на нижних границах диапазонов составил не менее 7,5 дБ при размерах излучающей области ПЩАБВ не более $1,2 \times 0,6 \lambda_{\text{max}}^2$.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов анализа характеристик печатных ЛП следует из исследования сходимости решения в зависимости от числа базисных функций, а также из сравнения результатов решения тестовых задач, полученных разработанным методом и методом конечных элементов. Достоверность разработанной электродинамической модели ПЩАБВ подтверждается сравнением полученных результатов расчёта характеристик тестовых ПЩАБВ с результатами анализа методом конечного интегрирования. Достоверность процедур синтеза подтверждена сравнением расчётных характеристик рассмотренных антенн с характеристиками, полученными в ходе измерений изготовленных образцов. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена проведением измерений характеристик антенн в безэховой камере при соблюдении условия дальней зоны, использованием аттестованных измерительных стенов.

Апробация результатов работы. Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на 16-ой, 17-й, 18-й, 19-й и 20-й Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014; 4-ой Международной научно-технической конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». Суздаль, 2011; III Всероссийской конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Муром, 2010; IEEE International Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics (ICMTCE). Qingdao, China, 2013.

Публикации. Содержание диссертации отражено в 15 научных работах, из них 5 работ опубликованы в рекомендованных ВАК РФ изданиях.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы внедрены в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, проводимых в НИИ Радиоэлектронной техники МГТУ имени Н.Э. Баумана. В частности, разработанные СШП измерительные антенны использованы для создания стенов просветного измерения характеристик плазмы; синтезированные ПЩАБВ используются в качестве лабораторных излучателей. Расчётные модели и алгоритмы анализа характеристик собственных волн печатных ЛП использованы в учебном процессе в МГТУ имени Н.Э. Баумана на кафедре «Радиоэлектронные системы и устройства» при создании спецкурса «Электродинамика композитных сред».

Результаты проведённых исследований использованы в совместном Российско-китайском проекте 11-07-91150 по гранту РФФИ «Исследование антенн во временной области»

Структура и объем диссертационной работы. Структурно диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, общих выводов и заключения, списка источников и приложения. Работа изложена на 216 страницах машинописного текста и содержит 151 рисунок и 3 таблицы. Список источников насчитывает 90 наименований.

Личный вклад автора состоит в разработке двумерной электродинамической модели базовых печатных ЛП; в разработке модифицированного двухшагового метода анализа характеристик согласования и излучения ПЩАБВ, в том числе ПВХИ СШП импульсов; в разработке методов оптимизации и синтеза геометрии СШП ПЩАБВ в частотной и временной областях; в создании комплекса расчётных программ, реализующих разработанные методы; в разработке и подготовке к производству синтезированных лабораторных прототипов, а также измерительных ПЩАБВ с декадными полосами частот. Автор принимал непосредственное участие в экспериментальных исследованиях.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанная двумерная электродинамическая модель позволяет с высокой точностью определять характеристики собственных волн базовых печатных ЛП. Полученные дисперсионные характеристики ЛП свидетельствуют о недостаточности применения только квазистатической модели при разработке СШП ПЩАБВ.
2. Предложенный модифицированный двухшаговый метод анализа ПЩАБВ на основе СЦЛ обеспечивает возможность точного расчета характеристик антенн как в частотной, так и во временной областях и может успешно применяться для разработки конструкций СШП излучателей.
3. Предложенный метод синтеза СШП ПЩАБВ в частотной области позволяет создавать конструкции излучателей с заданными частотными характеристиками коэффициента отражения.
4. Рассмотренный метод оптимизации СШП ПЩАБВ во временной области позволяет синтезировать антенны с максимальной энергетической направленностью излучения СШП радиоимпульса.
5. Метод оптимизации геометрии балансных ПЩАБВ, основанный на использовании полноволновой модели ДПЛ, обеспечивает улучшение характеристик согласования антенны в сверхширокой полосе частот.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы; проводится обзор ключевых публикаций; формулируются цель и задачи работы; отмечаются научная новизна, теоретическая и практическая значимость; описываются методы исследования, структура и основные особенности предлагаемого

подхода к анализу ПЩАБВ; приводятся сведения об апробации работы, структуре диссертации и внедрении результатов; формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе исследуются СЩЛ и ДПЛ – базовые структуры, на основе которых построены рассматриваемые в диссертации ПЩАБВ. Геометрии поперечных сечений ЛП приведены на Рис. 1. На рисунках толстыми линиями обозначены области металлизации подложки. Диэлектрическая подложка имеет толщину h и относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_r . Ширина щели СЩЛ обозначена через W . В случае ДПЛ через W обозначена ширина полоска, а через S – ширина зазора между внутренними кромками двух полосков.

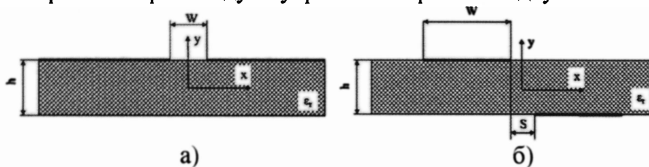


Рис. 1. Поперечные сечения исследуемых ЛП:

а) – симметричная щелевая ЛП; б) – двухполосковая ЛП

Основная задача главы – создание электродинамической модели, позволяющей получать структуру электромагнитного поля (ЭМП) собственных волн печатных ЛП, а также рассчитывать их характеристики – коэффициент укорочения (n) и волновое сопротивление (Z_0). Указанные параметры оказываются ключевыми при анализе ПЩАБВ. Решение данной задачи целесообразно проводить методом системы интегральных уравнений, связывающих электрические токи и напряженность электрического поля в поперечном сечении ЛП через двумерную тензорную функцию Грина для открытой плоскостной структуры вакуум-диэлектрик-вакуум. В общем виде в спектральной области преобразования Фурье по поперечной координате x такая система сводится к системе уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} \bar{Z}_{11}(\alpha, \beta) \cdot \mathbf{J}_1(\alpha) + \bar{Z}_{12}(\alpha, \beta) \cdot \mathbf{J}_2(\alpha) &= \mathbf{E}_1(\alpha), \\ \bar{Z}_{21}(\alpha, \beta) \cdot \mathbf{J}_1(\alpha) + \bar{Z}_{22}(\alpha, \beta) \cdot \mathbf{J}_2(\alpha) &= \mathbf{E}_2(\alpha), \end{aligned} \right\} (1)$$

где $\bar{Z}_{ij}(\alpha, \beta)$ – тензорная функция Грина слоистой структуры в спектральной области α ; β – искомая постоянная распространения собственной волны вдоль оси z ; компоненты функций Грина $Z_{pqij}(\alpha, \beta)$ связывают p -компоненту вектора поля $\mathbf{E}_i(\alpha)$ на границе раздела i с q -компонентой вектора поверхностного тока $\mathbf{J}_j(\alpha)$ на границе j . Здесь для определённости границе раздела $y = h/2$ присвоен номер 1, границе $y = -h/2$ – номер 2. Символом « $\wedge$ » обозначено преобразование Фурье исходной функции.

Компоненты тензорной функции Грина найдены с использованием метода спектральных иммитансов, предложенным Т. Ито. Следует заметить,

что для СЩЛ удобнее ставить задачу относительно электрического поля в щели на границе раздела 1:

$$\bar{Y}(\alpha, \beta) \cdot E(\alpha) = J(\alpha), \quad (2)$$

где $\bar{Y}(\alpha, \beta)$ – тензорная функция, обратная $\bar{Z}_{11}(\alpha, \beta)$. Для получения дисперсионного уравнения используется метод Галёркина в спектральной области. При этом в случае СЩЛ мы задаёмся аппроксимационным выражением для распределения электрического поля в щели:

$$\hat{E}_x(\alpha) \equiv \sum_{i=1}^{N_x} a_i^x \cdot \hat{e}_i^x(\alpha), \quad \hat{E}_z(\alpha) \equiv \sum_{i=1}^{N_z} a_i^z \cdot \hat{e}_i^z(\alpha). \quad (3)$$

где $\hat{e}_i^{x,z}(\alpha)$ – спектральные представления базисных функций; $a_i^{x,z}$ – неизвестные амплитудные коэффициенты разложения. Далее, следуя процедуре метода Галёркина в спектральной области, получаем однородную систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно вектора коэффициентов $\mathbf{A} = [a_1^x \dots a_{N_x}^x, a_1^z \dots a_{N_z}^z]^T$:

$$\begin{bmatrix} [P] & [Q] \\ [R] & [S] \end{bmatrix} \cdot \mathbf{A} = 0, \quad (4)$$

$$P_{i,j} = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{Y}_{xx}(\alpha, \beta) \cdot \hat{e}_j^x(\alpha) \cdot \hat{e}_i^x(\alpha) d\alpha, \quad i = 1 \dots N_x, j = 1 \dots N_x$$

$$Q_{i,j} = R_{j,i} = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{Y}_{xz}(\alpha, \beta) \cdot \hat{e}_j^z(\alpha) \cdot \hat{e}_i^x(\alpha) d\alpha, \quad i = 1 \dots N_x, j = 1 \dots N_z$$

$$S_{i,j} = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{Y}_{zz}(\alpha, \beta) \cdot \hat{e}_j^z(\alpha) \cdot \hat{e}_i^z(\alpha) d\alpha, \quad i = 1 \dots N_z, j = 1 \dots N_z$$

Проводя аналогичную процедуру для ДПЛ, задавшись базисными функциями тока $J_i^{x,z}(\alpha)$ и учитывая симметрию задачи, получаем СЛАУ (4) с коэффициентами

$$P_{i,j} = \int_{-\infty}^{\infty} [\hat{Z}_{xx11}(\alpha, \beta) \cdot \hat{J}_j^x(\alpha) + \hat{Z}_{xx12}(\alpha, \beta) \cdot \hat{J}_j^z(-\alpha)] \cdot \hat{J}_i^{x*}(\alpha) d\alpha,$$

$$Q_{i,j} = \int_{-\infty}^{\infty} [\hat{Z}_{xz11}(\alpha, \beta) \cdot \hat{J}_j^z(\alpha) - \hat{Z}_{xz12}(\alpha, \beta) \cdot \hat{J}_j^x(-\alpha)] \cdot \hat{J}_i^{x*}(\alpha) d\alpha,$$

$$R_{i,j} = \int_{-\infty}^{\infty} [\hat{Z}_{zx11}(\alpha, \beta) \cdot \hat{J}_j^x(\alpha) + \hat{Z}_{zx12}(\alpha, \beta) \cdot \hat{J}_j^z(-\alpha)] \cdot \hat{J}_i^{z*}(\alpha) d\alpha,$$

$$S_{i,j} = \int_{-\infty}^{\infty} [\hat{Z}_{zz11}(\alpha, \beta) \cdot \hat{J}_j^z(\alpha) - \hat{Z}_{zz12}(\alpha, \beta) \cdot \hat{J}_j^x(-\alpha)] \cdot \hat{J}_i^{z*}(\alpha) d\alpha.$$

В данных выражениях индексация аналогична приведённой для случая СЩЛ. Символом «*» обозначена операция комплексного сопряжения.

К дисперсионному уравнению относительно β переходим, требуя равенства нулю определителя системы (4). Корни уравнения отыскиваются численно с применением модифицированного метода Ньютона-Рафсона при учёте положения полюсов функции Грина. В качестве базисных выбраны функции, удовлетворяющие условию Мейкснера на ребре. Расчёт волнового сопротивления производится после определения структуры поля в поперечном сечении ЛП.

В работе исследована сходимость решения, предложено правило выбора количества базисных функций в зависимости от параметров ЛП. Приведённые аналитические выражения легли в основу созданных расчётных программ. На Рис. 2 продемонстрированы результаты вычисления дисперсионных характеристик для низшего типа волны ДПЛ на диэлектрической подложке с $h/\lambda = 0,04$, $\epsilon_r = 3,55$. Анализ дисперсионных характеристик Z_0 ДПЛ на электрически толстых подложках с высокими W/λ выявил немонотонный характер величины Z_0 .

В главе исследована квазистатическая модель ДПЛ, созданная на основе конечно-разностного решения уравнения Лапласа на неравномерной сетке. Исследование решений показало, что при $S > 0$ результаты, даваемые квазистатической и полноволновой моделями, заметно отличаются, причём величина ошибки увеличивается с ростом S/λ . Верификация алгоритмов проведена с помощью полноволновой САПР Ansys HFSS. Для обеих ЛП точность расчёта n не хуже 1%, Z_0 не хуже 2%.

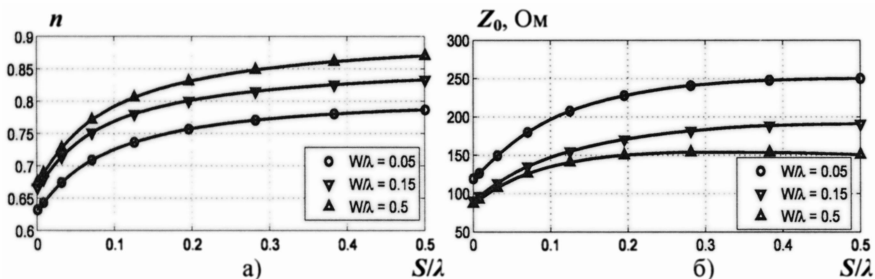


Рис. 2. Дисперсионные характеристики ДПЛ: а) – n ; б) – Z_0

Во второй главе диссертации рассмотрены вопросы исследования и разработки ПЩАБВ на основе СЩЛ. Общий вид антенны продемонстрирован на Рис. 3, где профиль щелевой НЛП осуществляет трансформацию ширины линии от входной W_{in} к выходной W_{out} на длине L_a по закону $W(z)$. Через W_e обозначен размер поперечной металлизации платы антенны.

Основные задачи главы – получение электродинамической модели ПЩАБВ, позволяющей проводить анализ характеристик излучения и согласования, в том числе ПВХИ СШП импульсов; применение модели для

разработки конструкций ПЩАБВ с требуемыми характеристиками в частотной и временной областях. Для решения первой задачи в работе применён модифицированный двухшаговый метод анализа ПЩАБВ. Данный подход в соответствии с названием метод базируется на двух основополагающих этапах: 1) нахождение распределения электрического поля в щелевой линии (апертуре) ПЩАБВ; 2) расчёт характеристик излучения с использованием модели элементарного магнитного вибратора на проводящей полуплоскости. Применение метода направлено на отыскание комплексного пространственно-частотного коэффициента передачи антенны. В результате ПВХИ ПЩАБВ могут быть получены применением обратного преобразования Фурье.

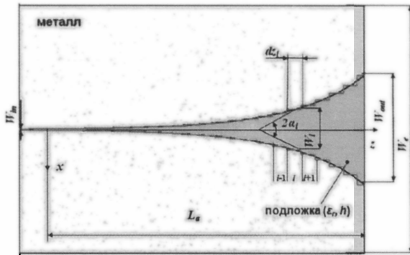


Рис. 3. Общий вид ПЩАБВ на основе СЩЛ

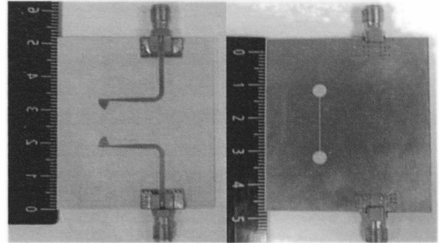


Рис. 4. Фотографии макета СЩП микрополосково-щелевого перехода

При отыскании АФР апертуры используется метод продольной сегментации (декомпозиции) щели на кусочно-регулярные области (Рис. 3). Поле в каждом сегменте представляется суперпозицией прямой и обратной бегущих волн, характеристики которых определяются решением двумерной задачи для соответствующей СЩЛ. В предположении, что соседние сегменты взаимодействуют только на низшем типе волны, для отыскания амплитудных коэффициентов парциальных волн используются методы теории плавных НЛП. При этом попутно удаётся определить характеристики входного коэффициента отражения.

Отдельное внимание в главе уделено методу электродинамического моделирования микрополосково-щелевого перехода. Использованный подход верифицирован при сопоставлении результатов расчёта и эксперимента для четырёхполосника, составленного из двух встречно включённых СЩП переходов – Рис. 4. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учёта S -матрицы перехода при расчёте ПВХИ реальных конструкций ПЩАБВ.

Рассмотрим основные соотношения двухшагового метода. Поле излучения основной поляризации регулярного сегмента ПЩАБВ в частотной области определяется поверхностным интегралом вида

$$E_{\theta}^i(R_m, \theta_m, \phi_m) = \int_{-W_l/2}^{W_l/2} \int_{x_{m1}}^{x_{m2}} E_{a,z}^i(x_m, z_m) \cdot G_{\theta,z}(R_m, \theta_m, \phi_m, x_m, z_m) dx_m dz_m, \quad (5)$$

где $G_{\theta,z}(R_m, \theta_m, \phi_m, x_m, z_m)$ – компонента функции Грина магнитного источника на идеально проводящей полуплоскости (здесь и далее зависимость от частоты опущена); $E'_{a,z}(x_m, z_m)$ – распределение электрического поля i -го сегмента апертуры шириной W_i с координатами концов x_{m1}^i, x_{m2}^i . В выражении (5) использована система координат задачи о поле элементарного излучателя. После проведения интегрирования с использованием асимптотики функции Грина в дальней зоне получены следующие выражения:

$$E_{\theta}^i(R_m, \theta_m, \phi_m) = E_{\theta}^{i+}(R_m, \theta_m, \phi_m) + E_{\theta}^{i-}(R_m, \theta_m, \phi_m), \quad (6)$$

$$E_{\theta}^{i+}(R_m, \theta_m, \phi_m) = \frac{k}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot A_{0i} \cdot \hat{E}_{a,z}^i(k \cdot \cos(\theta_m)) \cdot I_{\Sigma}^{i+} \cdot e^{-j \cdot \beta_i \cdot x_{m2}^i} \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot R_m}}{R_m},$$

$$E_{\theta}^{i-}(R_m, \theta_m, \phi_m) = \frac{k}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot B_{0i} \cdot \hat{E}_{a,z}^i(k \cdot \cos(\theta_m)) \cdot I_{\Sigma}^{i-} \cdot e^{-j \cdot \beta_i \cdot x_{m2}^i} \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot R_m}}{R_m},$$

где k – волновое число; A_{0i}, B_{0i} – амплитуды прямой и обратной волн сегмента; $\hat{E}_{a,z}^i$ – спектральное представление поперечного поля апертуры; $I_{\Sigma}^{i+/-}$ – дифракционные интегралы прямой и обратной волн. Суммируя выражения (6) для всех сегментов, получаем результирующее поле излучения ПЩАБВ:

$$E_{\theta}(R_m, \theta_m, \phi_m) = \sum_i [E_{\theta}^{i+}(R_m, \theta_m, \phi_m) + E_{\theta}^{i-}(R_m, \theta_m, \phi_m)]. \quad (7)$$

Соотношения между A_{0i}, B_{0i} рассчитываются в предположении о малости отражений от открытого конца ПЩАБВ, что на практике справедливо при $W_{out} \geq \lambda/2$. Основу для построения поперечного распределения поля сегментов апертуры даёт решение двумерной задачи на собственные волны для СЩЛ. Однако для корректного описания картины поля необходимо учесть фазовые искажения волнового фронта, возникающие за счёт нерегулярности СЩЛ апертуры. В соответствии с предложенной в работе моделью фазовых ошибок поперечное распределение поля i -го сегмента может быть записано в виде

$$E'_{a,x}(x) = \frac{E_x^i(x, y = h/2)}{C_n^i} \cdot \frac{z'_{0i}}{\sqrt{x^2 + z_{0i}^2}} \cdot e^{j \cdot \Phi^i(x)}, \quad x \in [-W_i/2, W_i/2],$$

где $E_x^i(x, y = h/2)$ – поперечное распределение поля СЩЛ, найденное при решении двумерной задачи (использована система координат с Рис. 1); C_n^i – константа нормировки поперечной компоненты к 1 В напряжению; $\Phi^i(x)$ – распределение фазы в поперечном сечении; z'_{0i} – скорректированный радиус цилиндрического волнового фронта сегмента.

Временные формы излучённых сигналов отыскиваются с помощью обратного преобразования Фурье от (7). В качестве сигнала возбуждения в работе используется СШП радиоимпульс с гауссовской огибающей, параметры которой выбираются для обеспечения 20 дБ относительного спада спектральной плотности мощности сигнала на границах частотного диапазона.

Также интерес представляет рассмотрение интегральных ПВХИ ПЩАБВ: энергетической диаграммы направленности (ЭДН) и максимального коэффициента кросс-корреляции (КК) между сигналом излучения и заданным опорным сигналом $u_{ref}(t)$.

$$F_E(\theta_m, \phi_m) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |E_\theta(t, \theta_m, \phi_m)|^2 dt}{\max_{\theta_m, \phi_m} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} |E_\theta(t, \theta, \phi)|^2 dt \right\}}; \quad k_s(\theta_m, \phi_m) = \max_{\tau} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E_\theta(t, \theta_m, \phi_m) \cdot u_{ref}(t - \tau) dt}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |E_\theta(t, \theta, \phi)|^2 dt} \cdot \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |u_{ref}(t)|^2 dt}}.$$

Описанная расчётная модель легла в основу созданных программ анализа ПЩАБВ. Верификация алгоритмов проведена сопоставлением с результатами анализа тестовых геометрий в CST MWS.

Вторая часть главы посвящена рассмотрению вопросов разработки ПЩАБВ с требуемыми частотно-временными характеристиками. Предложена процедура синтеза геометрии ПЩАБВ по заданным отсчётам коэффициента отражения в частотной области. Практическая важность получения заданных частотных характеристик антенн обусловлена необходимостью достижения согласования антенны в заданном СШП диапазоне при одновременном обеспечении режекторных свойств в требуемых полосах частот.

На основе аналитического решения дифференциального уравнения НЛП типа Риккати в работах Чернышева С.Л. было получено выражение, связывающее входной коэффициент отражения с преобразованием Фурье функции местных отражений НЛП – F_{11} . Используя это выражение, задавшись отсчётами коэффициента отражения на реперных частотах f_k и применяя аппроксимацию F_{11} рядом Котельникова, можно отыскать продольное распределение волнового сопротивления:

$$Z_0(\tau) = Z_0(0) \cdot e^{\sum_{m=1}^M \frac{2|C_m|}{\pi \cdot f_m} \{ \sin(2\pi \cdot f_m \cdot \tau + \arg(C_m)) - \sin(\arg(C_m)) \} + 2C_0 \cdot \tau} \quad (8)$$

$$\tau(z) = 2 \cdot \frac{\int_0^z \beta(y) \cdot dy}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad \theta = \tau(L_{a1}), \quad C_m = \frac{F_{11}(f_k, \theta)}{\theta}, \quad C_0 = 2 \cdot \frac{F_{11}(f_k, \theta)}{\theta}, \quad f_k = \frac{k}{\theta},$$

где L_{a1} – длина синтезируемого участка. Существенным затруднением при синтезе оказывается зависимость β от локальной геометрии ПЩАБВ. В связи с этим при априорно неизвестной структуре щели переход в (8) из области τ в область z , строго говоря, неосуществим. В работе показано, что требуемых результатов синтеза можно достичь, если в качестве первого приближения геометрии НЛП выбрать экспоненциальный профиль Z_0 с коэффициентом $2 \cdot C_0$, которому достаточно точно соответствует экспоненциальный геометрический профиль щели с продольным распределением $\beta'(y)$.

На основе предложенной процедуры проведён синтез ПЩАБВ в диапазоне (3 – 12) ГГц со следующими начальными данными: $W_{in} = 0,35$ мм, $W_{out1} = 35$ мм, $W_{out} = 60$ мм, $L_{a1} = 190$ мм, $L_a = 210$ мм, $W_e = 150$ мм, $\varepsilon_r = 3,55$,

$h = 0,508$ мм. При синтезе ненулевым задан $m = 14$ отсчёт $S_{11}(f_m, \theta) = 1/\sqrt{2}$, $f_m = m/\theta' = 9,78$ ГГц. Синтезированный профиль Z_0 показан на Рис. 5. В конструкцию дополнительно введена экспоненциальная секция согласования, расширяющаяся от W_{out1} до W_{out} . Фотография изготовленных антенн показана на Рис. 6, на Рис. 7, 8 сопоставлены расчётные и измеренные характеристики согласования и КУ. Результаты расчёта и измерений продемонстрировали высокую идентичность.

Также в главе рассмотрена задача синтеза ПЩАБВ с максимальной энергетической направленностью излучения СШП импульса. Созданные расчётные модули включены в общий алгоритм параметрического синтеза геометрии щелевого профиля ПЩАБВ.

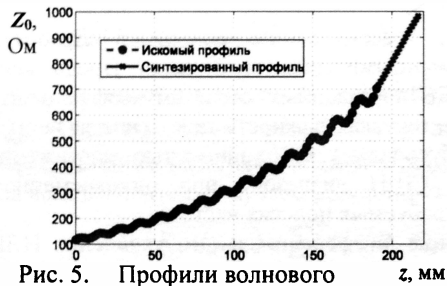


Рис. 5. Профили волнового сопротивления антенны на частоте 10 ГГц

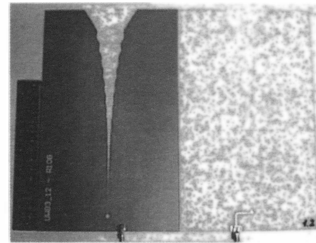


Рис. 6. Фотография синтезированной антенны на отражение ПЩАБВ

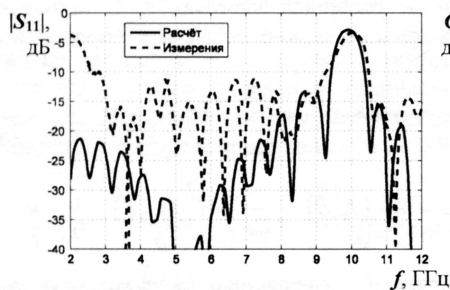


Рис. 7. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения

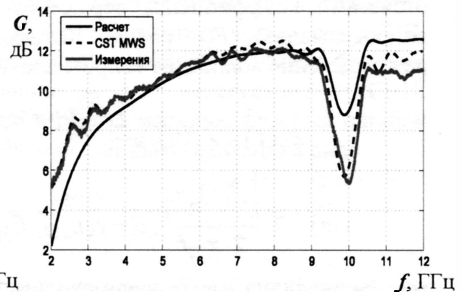


Рис. 8. Частотные зависимости КУ синтезированной ПЩАБВ

В качестве целевой функции, подлежащей максимизации, выбран мультипликативный критерий, включающий характеристики энергетической направленности, степени неискажённости излучаемого СШП импульса и уровня согласования с питающим трактом. Процедура синтеза сведена к параметрической оптимизации щелевого профиля, определяемого функцией Ферми-Дирака со свободно варьируемым параметром.

Синтез проведён в полосе частот (3–12) ГГц. Длина излучателя выбрана, исходя из критерия Вудьярда-Хансена на центральной частоте диапазона. На

Рис. 9 показана фотография синтезированной антенны. На Рис. 10 приведены модельный и измеренный коэффициенты отражения. Сопоставление рассчитанных и измеренных ЭДН и КК с сигналом возбуждения продемонстрированы на Рис. 11, 12. Исследования показали, что энергетическая направленность синтезированной ПЩАБВ более чем на 20% выше, чем у антенны Вивальди тех же габаритов.

В главе представлены результаты разработки СШП ПЩАБВ с полосой частот (1–10) ГГц, предназначенной для просветного измерения характеристик плазмы и обладающей повышенными требованиями к характеристикам направленности при ограниченных геометрических размерах. При помощи созданного набора расчётных программ проведено эскизное проектирование антенны, конструкция которой в дальнейшем доработана введением дополнительных диаграммоформирующих элементов для достижения требуемой направленности. Фотография антенны показана на Рис. 13. Измеренные характеристики приведены на Рис. 14 – 16.

В третьей главе работы рассмотрены балансные ПЩАБВ, общий вид которых показан на Рис. 17. Основное внимание в главе уделено разработке подхода к автоматизированному проектированию топологии, позволяющего минимизировать величину коэффициента отражения в сверхширокой полосе. С этой целью предложено использовать методы теории плавных НЛП с учётом полноволновой модели ДПЛ. На основании проведённых исследований показано, что существенной областью рассогласования антенны оказывается зона перехода от симметрирующего трансформатора к излучающей апертуре, где у классической двухэкспоненциальной ПЩАБВ наблюдается резкий скачок погонных параметров ЛП.

Предложена процедура параметрической оптимизации геометрии внешних кромок $W_{e2}(z)$, позволяющая существенно снизить общий уровень коэффициента отражения в сверхширокой полосе частот за счёт сглаживания профиля волнового сопротивления $Z_0(z)$. При помощи предложенного алгоритма показана возможность синтеза балансной ПЩАБВ, средний уровень коэффициента отражения которой на (2 – 3) дБ ниже, чем у известной из литературы двухэкспоненциальной ПЩАБВ тех же габаритных размеров.

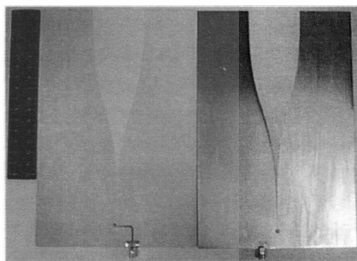


Рис. 9. Фотография синтезированной ПЩАБВ

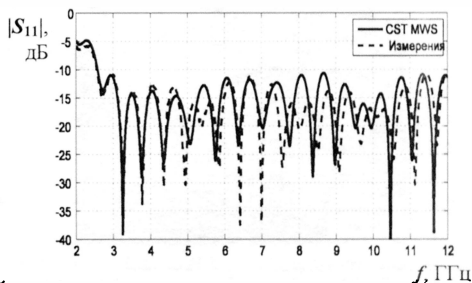


Рис. 10. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения

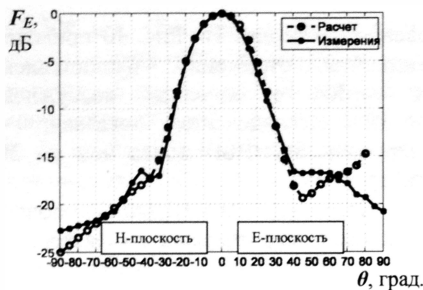


Рис. 11. ЭДН синтезированной ПЩАБВ

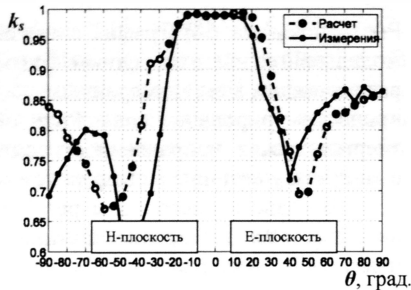


Рис. 12. КК импульсов излучения синтезированной ПЩАБВ

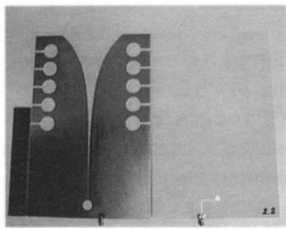


Рис. 13. Фотография измерительной ПЩАБВ (1–10) ГГц

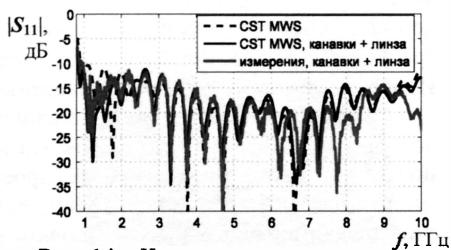


Рис. 14. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения

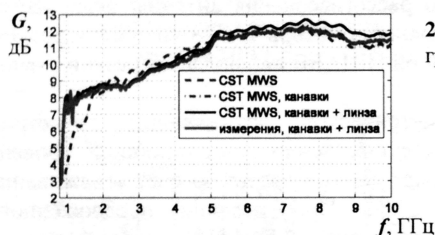


Рис. 15. Частотные зависимости КУ измерительной ПЩАБВ

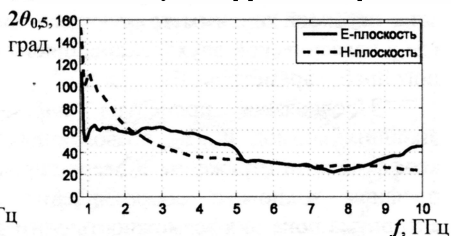


Рис. 16. Частотные зависимости ширины луча измерительной ПЩАБ

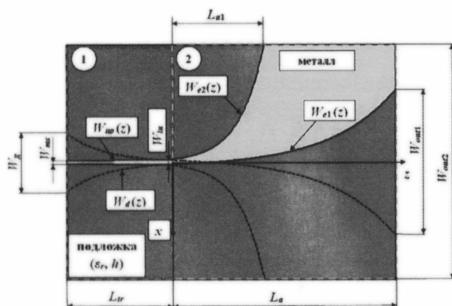


Рис. 17. Общий вид балансной ПЩАБВ на основе ДПЛ

С использованием созданных расчетных алгоритмов разработана измерительная балансная ПЩАБВ диапазона частот (4 – 40) ГГц для просветного измерения характеристик плазмы – Рис. 18. В основу конструкции положен синтезированный по минимуму входного коэффициента отражения профиль.

Измеренные характеристики излучателя показаны на Рис. 19 – 21.

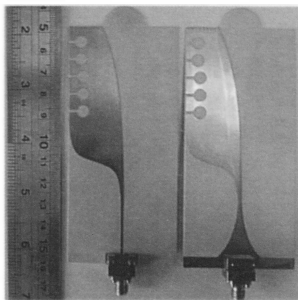


Рис. 18. Фотография измерительной балансной ПЩАБВ (4-40) ГГц

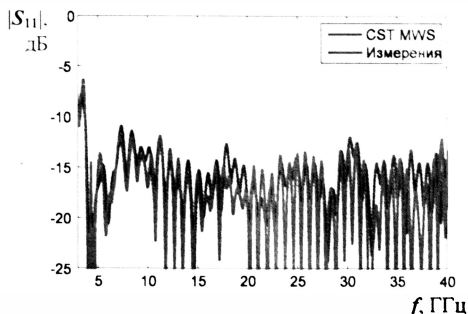


Рис. 19. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения

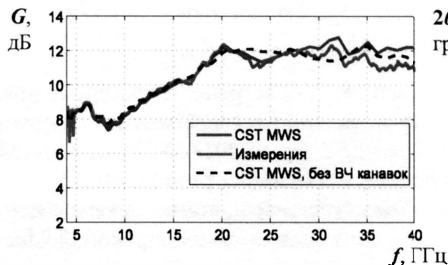


Рис. 20. Частотные зависимости КУ измерительной ПЩАБВ

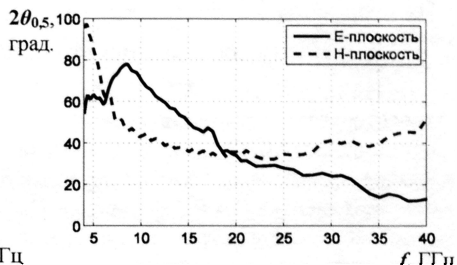


Рис. 21. Частотные зависимости ширины луча измерительной ПЩАБВ

В общих выводах и заключении приведены следующие основные результаты работы.

1. Разработан и программно реализован метод расчёта характеристик собственных волн базовых печатных ЛП. Достигнутая точность вычисления n не хуже 1%, Z_0 не хуже 2%.

2. Впервые исследованы дисперсионные характеристики ДПЛ, сделаны выводы о влиянии геометрии ЛП на характеристики излучателя СШП импульсов.

3. Разработана математическая модель ПЩАБВ на основе модифицированного двухшагового метода анализа. Предложен и верифицирован метод расчёта ПВХИ ПЩАБВ.

4. Исследовано влияние устройства возбуждения и элементов конструкции на характеристики излучения ПЩАБВ в частотной и временной областях.

5. Предложен алгоритм синтеза шелевых профилей ПЩАБВ по заданным частотным характеристикам коэффициента отражения при учёте дисперсии и неравномерности продольного распределения постоянной распространения. Разработана СШП ПЩАБВ с заданной полосой режекции.

6. Предложена процедура синтеза ПЩАБВ с максимальной энергетической направленностью при обеспечении заданного уровня согласования и минимизации искажений временной формы импульса

излучения. Синтезированный таким образом излучатель продемонстрировал ряд преимуществ перед известными геометриями ПЩАБВ.

7. Исследовано влияние элементов конструкции балансных ПЩАБВ на характеристики согласования. Предложен метод оптимизации топологии антенны, основанный на применении методов теории НЛП с использованием полноволновой модели ДПЛ.

8. Разработаны измерительные СШП ПЩАБВ для диапазонов частот (1 – 10) ГГц и (4 – 40) ГГц. Улучшение направленности излучателей в областях низкочастотной и высокочастотной границ диапазонов достигнуто использованием дополнительных диаграммоформирующих элементов, интегрированных в конструкцию устройств. КУ антенн на нижних границах диапазонов составил не хуже 7,5 дБ при размерах ПЩАБВ не более $1,2 \times 0,6 \lambda^2$.

9. Проведены измерения всех разработанных устройств. Экспериментально подтверждены расчётные и модельные характеристики.

Результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Виленский А.Р. Метод анализа пространственно-временных характеристик излучения печатных щелевых антенн бегущей волны // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. С. 139-154. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/710740.html>. (1 п.л.)

2. Виленский А.Р., Чернышев С.Л. Анализ дисперсионных характеристик погонных параметров элементарных отрезков сверхширокополосных балансных печатных щелевых антенн бегущей волны // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 4. С. 201-216. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/548171.html>. (1 п.л. / 0,6 п.л.)

3. Виленский А.Р., Чернышев С.Л. Исследование балансных печатных щелевых антенн бегущей волны в составе широкополосных антенных решёток Х-диапазона // Радиотехника. 2013. № 11. С. 118-122. (0,31 п.л. / 0,16 п.л.)

4. Разработка и исследование модифицированной антенны Вивальди в составе плоской широкополосной антенной решётки Х-диапазона / А.Р. Виленский [и др.]. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11. С. 1-8. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/247762.html>. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.)

5. Чернышев С.Л., Виленский А.Р. Анализ и синтез сверхширокополосных устройств в частотной области // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. выпуск. Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов. 2009. С.150-156. (0,44 п.л. / 0,22 п.л.)

6. Виленский А.Р. Метод анализа пространственно-временных характеристик излучения печатных щелевых антенн бегущей волны // XX МНТК Радиолокация, навигация, связь. Воронеж. 2014. Т. 1. С. 687-697. (0,69 п.л. / 0,35 п.л.)

7. Виленский А.Р. Синтез сверхширокополосных печатных щелевых антенн бегущей волны в частотной и временной областях // XX МНТК

Радиолокация, навигация, связь. Воронеж. 2014. Т. 1. С. 698-708. (0,69 п.л. / 0,35 п.л.)

8. Виленский А.Р., Чернышев С.Л. Дисперсионная модель элементарных отрезков сверхширокополосных печатных щелевых антенн бегущей волны // XIX МНТК Радиолокация, навигация, связь. Воронеж. 2013. Т. 2. С. 931-941. (0,69 п.л. / 0,35 п.л.)

9. Виленский А.Р., Чернышев С.Л. Сверхширокополосные печатные щелевые излучатели с управляемыми частотными характеристиками // XVIII МНТК Радиолокация, навигация, связь. Воронеж. 2012. Т. 3. С. 3514-3523. (0,63 п.л. / 0,32 п.л.)

10. Виленский А.Р. Чернышев С.Л. Разработка излучателей для сверхкороткоимпульсных антенных решеток X-диапазона // XVII МНТК Радиолокация, навигация, связь. Воронеж. 2011. Т. 3. С. 2159-2169. (0,69 п.л. / 0,35 п.л.)

11. Виленский А.Р., Чернышев С.Л. Разработка широкополосных излучателей для сверхкороткоимпульсных антенных решеток X-диапазона // Труды Российского НТОРЭС им. А.С. Попова. Сер. Акустооптические и радиолокационные методы измерения и обработки информации. Москва. 2011. С. 31-33. (0,19 п.л. / 0,1 п.л.)

12. Виленский А.Р., Чернышев С.Л. Исследование сверхширокополосной модифицированной балансной антенны Вивальди // Труды Российского НТОРЭС им. А.С. Попова. Сер. Акустооптические и радиолокационные методы измерения и обработки информации. Москва. 2011. С. 33-36. (0,25 п.л. / 0,13 п.л.)

13. Vilenskiy A.R., Chernyshev S.L. Investigation of ultra-wideband pulses radiation by aperture stacked patch antennas and linear arrays // IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics (ICMTCE). Qingdao. 2013. P. 179-183. (0,31 п.л. / 0,16 п.л.)

14. Виленский А.Р., Чернышев С.Л. Исследование сверхширокополосной антенны в ближней и дальней зонах // XVI МНТК Радиолокация, навигация, связь. Воронеж. 2010. Т.3. С. 2759-2767. (0,56 п.л. / 0,28 п.л.)

15. Виленский А.Р., Чернышев С.Л. Пространственно-временной анализ характеристик сверхширокополосной антенны // Доклады III Всероссийской конференции Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Муром. 2010. С. 128-136. (0,56 п.л. / 0,28 п.л.)

Подписано в печать: 29.09.2014

Заказ № 317 Тираж: 100 экз.

Отпечатано в типографии «ТриумФ»

125009, г. Москва, Страстной бульвар, д. 6 стр. 1

+7 (495) 393-90-24