

На правах рукописи

ШЕВГУНОВ ТИМОФЕЙ ЯКОВЛЕВИЧ

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника,
в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре теоретической радиотехники Московского авиационного института (государственного технического университета) «МАИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Юрий Владимирович Кузнецов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Александр Юрьевич Гринёв
доктор технических наук, профессор
Вадим Николаевич Скосырев

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова
Российской академии наук

Защита диссертации состоится «___» _____ 2008 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2008 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, к.т.н., доцент

М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В современных системах связи государственного и коммерческого применения, использующих микроволновый частотный диапазон, существует тенденция к расширению полосы частот рабочих сигналов, обусловленных применением адаптивных систем модуляции. Подавляющее большинство таких радиоэлектронных систем является цифровыми системами, поэтому микроволновые линии передачи и СВЧ устройства используются в них преимущественно для фильтрации и демодуляции сигнала, принимаемого антенной, и передачи его на вход цифрового сигнального процессора, в котором производится его основная обработка. Требование многофункциональности и миниатюризации современных средств связи (мобильные телефоны, портативные компьютеры т.д.) также ставит задачу разработки микроволновых компонентов, пригодных к одновременному использованию в различных частотных поддиапазонах. Широкое применение при разработке устройств находят новые материалы, обладающие специальными электрическими и магнитными свойствами. Примерами новых разрабатываемых технологий могут служить низкотемпературная сварная керамика (*LTCC*), микроэлектромеханические системы (*MEMS*), сборные многослойные структуры (*Sandwich Structure*), компланарные СВЧ устройства и т.п.

Изготовление миниатюрных СВЧ устройств на основе новых технологий требует точного расчета их геометрических размеров и параметров материалов, обеспечивающих требуемые характеристики. Разработанные аналитические методики анализа и синтеза микроволновых устройств, предназначенных для работы в узкой полосе частот, оказываются неприменимы при проектировании сверхширокополосных микроволновых устройств. Создание точных аналитических моделей для сверхширокополосных устройств оказывается крайне затруднительным и, как правило, приводит к громоздким математическим описаниям с высокой сложностью их последующих преобразований.

В связи с трудностью аналитического описания численное моделирование процессов рассеяния электромагнитного поля оказывается единственным практическим инструментом анализа сверхширокополосных устройств. В настоящее время наиболее развитые средства моделирования представляют собой завершённые программные продукты, включающие в себя средства автоматического проектирования (*CAD*-системы). В основе таких продуктов лежит, как правило, программно-математическое ядро, реализующее методы расчета во временной области, например, метод конечных разностей (*FTDT*), метод матриц линий передачи (*TLM*) и др. Данные методы расчета обеспечивают разработчика результатами, достаточно хорошо согласующимися с экспериментальными измерениями устройств. Однако их применению сопутствуют определенные трудности. Так при увеличении сложности структур, расширении полосы анализа и требуемой точности существенно возрастают процессорное время, требуемое для устойчивой работы метода расчета, и объем машинной памяти, используемой для хранения промежуточных результатов.

Время моделирования становится особенно критичным параметром при решении задач оптимизации характеристик существующих и разработке новых микроволновых устройств, обеспечивающих заданные рабочие характеристики. Такая процедура синтеза потребует многократного запуска численного моделирования устройства для различных значений его оптимизируемых параметров, что потребует привлечения существенных вычислительных мощностей для обеспечения приемлемого времени синтеза.

Одним из возможных путей решения данной научно-технической проблемы является построение таких моделей микроволновых устройств, которые возможно использовать в задачах анализа и синтеза совместно с методами численного расчета электромагнитного поля. Практическим результатом применения таких моделей будет существенное сокращение общих вычислительных затрат при проектировании микроволновых устройств.

В настоящее время существующие подходы к построению моделей можно разделить на три направления, позволяющие получать электродина-

мические, суррогатные и радиотехнические модели. Построение электродинамической модели предполагает разбиение устройства на области, в каждой из которых численный расчет электромагнитного поля может быть выполнен независимо от других. Это позволяет, например, выработать адаптивный подход к анализу электромагнитного поля каждой области в зависимости от её особенностей. Под суррогатными моделями (или метамоделями) принято понимать модели произвольной внутренней структуры, характеристики которых достаточно точно совпадают с характеристиками моделируемых устройств. Внутренне такие модели могут быть иметь различную организацию и быть построены, например, на основе функциональных рядов, нейронных сетей и т.д.

Создание радиотехнической модели микроволнового устройства заключается в синтезе эквивалентной схемы, реализуемой посредством дискретных радиоэлектронных элементов и линий задержек. Такая модель позволяет с заданной точностью описывать характеристики микроволновых устройств с потерями в широкой рабочей полосе частот. Важной особенностью радиотехнической модели является то, что при её разработке должны учитываться основные физические процессы, протекающие внутри устройства. Так, для упрощения решения задач нестационарной электродинамики К. Баум (*C.E. Baum*) предложил метод сингулярных разложений, основанный на линейной модели взаимодействия электромагнитного поля с объектами сложной геометрической формы. Данный метод позволяет описывать процессы инерционного рассеяния энергии электромагнитного поля с помощью компактной модели, включающей в себя комплексные экспоненты. Линейная система, построенная на основе такой модели, может быть реализована в виде электрической цепи сосредоточенных элементов. Позднее Л. Фелсен (*L.B. Felsen*) предложил метод, позволяющий получить описание начального участка реакции объекта на короткое импульсное воздействие в виде суперпозиции отраженных и рассеянных полей, описываемой геометрической теорией дифракции. Впоследствии было показано, что совместное использование пред-

ставленных выше методов позволяет синтезировать линейную модель, состоящую из двух частей, соединенных параллельно. Эти части соответственно представляют собой динамическую линейную систему, которая связывает входной и выходной сигналы посредством линейного дифференциального уравнения, и распределенную (нединамическую) систему, для описания временных характеристик которой используются функции конечной длительности.

К преимуществам радиотехнических моделей можно отнести их компактность по сравнению с другими моделями, что обеспечивается меньшим числом неизвестных параметров. При этом представление модели в форме эквивалентной электрической схемы сохраняет её реализуемость в виде микроволнового устройства при вариации параметров в процессе оптимизации.

Важнейшим этапом синтеза модели микроволнового устройства является оценка параметров, используемых в модели, по результатам численного моделирования устройства, которое может проводиться во временной или частотной области. При проведении моделирования во временной области используются короткие импульсные сигналы, обладающие очень широким спектром, перекрывающим область рабочих частот устройства. Это позволяет определить частотно-избирательные свойства устройства в желаемой полосе за один запуск программы численного расчета, однако, требует применения специальных методик, позволяющих преодолеть некорректность математической задачи при деконволюции (обращении свертки) выходного и входного сигналов.

Идентификация микроволнового устройства, или оценка параметров линейной модели, используемой для его представления, является нетривиальной задачей. Идентификация сложной двухкомпонентной модели требует разработки новых методик, позволяющих провести разделение общей модели на две части и выполнить последующее раздельное оценивание параметров каждой из частей линейной системы. Критерий минимума среднеквадратической ошибки не позволяет однозначно определить порядок динамической ли-

нейной системы, что обусловлено аппроксимирующим характером существующих методов оценки параметров. Поэтому был предложен новый критерий – критерий стабильности параметров модели. Данный критерий состоит в выявлении устойчивого набора параметров, присутствующего при различных наблюдениях исследуемого процесса.

Учитывая ряд последовательно решаемых задач, составляющих этапы синтеза модели микроволновых устройств, возникает необходимость разработки общей методики параметрической идентификации. Такая методика позволит формализовать и алгоритмизировать основные этапы синтеза линейной радиотехнической модели пассивных микроволновых устройств, что может быть использовано для последующей автоматизации процесса их разработки и оптимизации.

В связи с этим задача параметрической идентификации пассивных линейных микроволновых устройств с потерями, предназначенных для работы в сверхширокой полосе частот, является актуальной.

Целью работы является разработка методики параметрической идентификации пассивных линейных микроволновых устройств, позволяющей использовать полученные модели для сокращения вычислительных затрат, требуемых для моделирования, оптимизации и синтеза устройств в сверхширокой полосе частот.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

1. Синтезирована структура радиотехнической модели пассивных линейных микроволновых устройств с учетом основных физических процессов.
2. Разработан устойчивый алгоритм определения импульсной и частотной характеристик микроволнового устройства по известным входному и выходному сигналам в сверхширокой полосе частот.

3. Разработан алгоритм параметрической идентификации, обеспечивающий раздельное представление динамической и распределенной частей синтезированной линейной модели.

4. Разработаны методы оценки меры близости совокупностей полюсов, заданных координатами в комплексной плоскости, позволяющие автоматизировать процедуру идентификации.

5. Выбраны и обоснованы методы синтеза электрической цепи, реализующей комплексное входное сопротивление или проводимость микроволнового устройства с потерями в широкой полосе частот.

6. Проведена экспериментальная проверка разработанных методик для примеров микроволновых устройств с использованием результатов их численного моделирования.

Методы исследований: Для решения поставленных задач использовались методы линейной алгебры, в том числе сингулярное разложение матриц, методы математического анализа и функционального анализа, в том числе обобщенные функции, теория цифрового спектрального анализа и его приложения, методы теории анализа и синтеза линейных цепей.

Научная новизна:

1. Синтезирована линейная модель представления сверхширокополосных микроволновых устройств, состоящая из двух частей, описываемых динамической и распределенной линейными системами.

2. Разработана методика определения порядка динамической линейной системы по её импульсной характеристике с использованием критерия стабильности полюсов.

3. Разработана методика синтеза эквивалентной электрической схемы для микроволновых устройств с потерями, которая позволяет получить цепь минимального порядка, состоящую из пассивных элементов.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что разработанные в диссертации методы и алгоритмы могут быть использованы

в практических задачах описания микроволновых устройств в сверхширокой полосе частот с помощью матриц внешних характеристик, элементы которых представляют собой аналитические выражения. Такое описание существенно упрощает последующий анализ соединения микроволновых устройств между собой и с другими структурными частями радиотехнического средства. Синтезированная радиотехническая модель позволяет сократить время, требуемое для проведения численного моделирования высокочастотных устройств во временной области. Разработанная модель может быть использована при оптимизации характеристик микроволновых устройств, что позволит в несколько раз сократить число необходимых запусков программ численного анализа.

Разработанные методы могут быть использованы при решении задач в других отраслях науки и техники, например, при распознавании целей в сверхширокополосной радиолокации, для неразрушающего контроля и диагностики промышленных конструкций, при определении качества силовых сетей, при оценке параметров канала связи в телекоммуникационных задачах, для идентификации линейных систем в задачах автоматизированного управления, а также при анализе экономических процессов.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы использованы и внедрены в Межотраслевом НТЦ «Радинтех» при выполнении договорных работ. Научные и практические результаты работы использованы при разработке учебно-методических комплексов по дисциплинам цикла «Радиотехника», читаемым на кафедре Теоретической радиотехники Московского авиационного института (государственного технического университета). Акты о внедрении приведены в приложении к диссертации.

Достоверность полученных результатов обуславливается корректностью исходных положений и преобразований, использованием апробированного адекватного математического и статистического аппаратов, компьютер-

ных программ и логической обоснованностью выводов. Полученные результаты подтверждены вычислительными экспериментами и не противоречат сложившимся представлениям в современной радиотехнике.

Апробация результатов работы.

Результаты исследования докладывались и обсуждались на:

Международных научно-технических конференциях: «15-ая, 16-ая и 17-ая Международная конференция по микроволновым устройствам, радиолокации и беспроводной связи (*MIKON*)», Варшава (2004 г.), Краков (2006 г.), Вроцлав (2008 г.), «36-ая Европейская микроволновая конференция (*EuMC*)», Манчестер (2006 г.), «9-ая и 10-ая Международная научно-техническая конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» г. Москва: ИПУ РАН (2007, 2008 гг.),

Международных научно-технических семинарах: «8-й и 9-й научный обменный семинар. Радиотехнические устройства СВЧ диапазона», г. Москва: МАИ (2003 г.), г. Мюнхен: MTU (2004 г.).

Международных научных симпозиумах: «Международный микроволновый симпозиум (*IEEE MTT-S International Microwave Symposium*)», Лос-Анджелес (2005 г.).

Международных научных ассамблеях: «29-ая международная ассамблея Международного союза по радионаукам (*URSI General Assembly*)», Чикаго (2008 г.).

Публикации.

По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, в т.ч 3 научные статьи, 8 текстов докладов на английском языке, 10 текстов докладов на русском языке.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Синтезированная радиотехническая модель пассивного линейного микроволнового устройства учитывает особенности физических процессов взаимодействия электромагнитного поля внутри устройства.

2. Предложенный критерий стабильности позволяет разделить общую реакцию микроволнового устройства на две составляющие, описываемые динамической и распределенной линейными системами, а также оценить порядок динамической системы.

3. Использование метода Бруне позволяет синтезировать эквивалентную электрическую схему минимального порядка для микроволновых устройств с потерями в сверхширокой полосе частот.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа изложена на 164 машинописных страницах и состоит из введения, пяти глав, одного приложения, заключения и списка литературы. Иллюстративный материал представлен в виде 35 рисунков и 4 таблиц. Список литературы включает 79 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность разработки методики параметрической идентификации линейных пассивных микроволновых устройств, сформулированы цель и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, представлена структура диссертации.

В **первой главе** выполнен обзор литературы по материалам отечественных и зарубежных источников по тематике исследования. По результатам обзора был сделан вывод, что методы, традиционно применяемые для описания цепей сосредоточенных элементов, могут быть использованы для анализа устройств микроволнового диапазона. Однако для этого необходимо провести специальное обобщение таких методов, которое позволит описывать указанной моделью внешние характеристики устройств, в основе действия которых лежат электромагнитные волновые процессы. В основе такого обобщения может лежать общая методика построения моделей для широкого класса устройств.

Проведенный сравнительный анализ современных методов численного анализа электромагнитного поля позволил выделить три универсальных ме-

тогда: конечных разностей (*FTDT*), конечных элементов (*FEM*) и матриц линий передач (*TLM*), положенных в основу большинства программных продуктов, выполняющих моделирование устройств во временной области. Здесь же следует отметить, что существует ряд приложений со свободной лицензией, реализующих данные методы.

В главе также представлено описание линейных микроволновых устройств с использованием аппарата линейной алгебры. Особенностью описания сверхширокополосных устройств является то, что каждый элемент матриц сопротивлений, проводимости и рассеяния может рассматриваться как частотная характеристика (ЧХ), связывающая как передаточная функция спектры соответствующих физических величин. Дуальным частотному является временное представление, при котором для описания устройства используются матрицы, составленные из импульсных характеристик (ИХ), связанных преобразованием Фурье с соответствующими ЧХ. При этом для связи временных функций используется операция свертки.

Во **второй главе** была синтезирована линейная радиотехническая модель микроволнового устройства (рис. 1), состоящая из двух частей. Одна из этих систем предназначена для описания процессов распространения волн, описываемого геометрической теорией дифракции, и представляет собой распределенную (нединамическую) линейную систему, обладающую импульсной характеристикой конечной длительности. Другая система (модель сосредоточенных элементов) описывает процессы инерционного рассеяния электромагнитной энергии, запасаемой полем внутри устройства, и представляет собой динамическую линейную систему. Линия задержки учитывает время, необходимое для полного заполнения устройства электромагнитным полем.

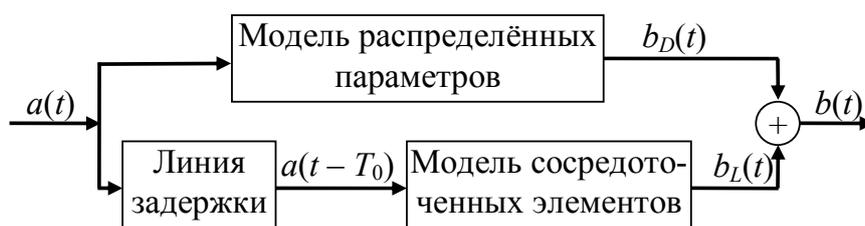


Рис. 1. Радиотехническая модель микроволнового устройства

Частотная характеристика рассматриваемой линейной системы связывает спектры падающей и отражённой волн и определяется как

$$H(f) = \frac{B(f)}{A(f)} = H_D(f) + H_L(f) \times \exp(-j2\pi f T_0), \quad (1)$$

где $H_D(f)$ – ЧХ системы с распределёнными параметрами. $H_L(f)$ – ЧХ системы с сосредоточенными элементами; время T_0 характеризует среднее время задержки, учитывающее распространение волны по линии передачи и время распространения волны в микроволновой структуре до полного заполнения её внутреннего объёма электромагнитным полем.

Модель сосредоточенных элементов представляет собой линейную динамическую систему, описываемую дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Системная функция и ИХ такой системы могут быть выражены через полюса p_k и вычеты B_k :

$$H_L(p) = \sum_{k=1}^K \frac{B_k}{p - p_k}, \quad h_L(t) = \sum_{k=1}^K B_k \exp(p_k t) u(t), \quad (2)$$

где K – порядок динамической системы, а $u(t)$ – функция Хэвисайда.

Модель распределенных параметров может быть описана ИХ конечной длительности $h_D(t)$, что соответствует представлению её ЧХ в виде целой функции. Таким образом, для общей ИХ сложной линейной системы можно определить момент времени T_{LTB} , известный как граница поздневременной части. Начиная с этого момента времени, ИХ всей системы совпадает с ИХ динамической системы: $h(t > T_{LTB}) = h_D(t > T_{LTB})$. Параметры динамической системы могут быть оценены по любому участку ИХ в пределах поздневременной части, однако, выбор начала этого участка как можно ближе к границе обеспечит большую точность оценки полюсов и вычетов динамической системы.

Важной проблемой является задача определения ИХ или ЧХ линейной системы по известным сигналам на её входе и выходе, представляющим временные зависимости напряжений и токов или падающих и отраженных волн. В ряде случаев вычисление ЧХ путём формального деления спектров выход-

ного и входного сигналов не дает результата, приемлемого для дальнейшего использования. Решение данной проблемы во временной области известно как проблема деконволюции, или обращения свертки, которая при обработке в дискретном времени приводит к плохо обусловленной системе линейных алгебраических уравнений. При решении такой системы на практике используется алгоритм псевдоинверсии матрицы воздействия на основе свойств сингулярного разложения матриц. Показано, что одновременное использование оптимального критерия отбора максимальных собственных чисел и спектрального критерия отбора собственных векторов обеспечивает точное восстановление ЧХ устройства в рабочей полосе частот. При этом обеспечивается каузальность ИХ системы и аналитичность (непрерывность функции и её производных) ЧХ как в полосе анализа, так и за её пределами.

В **третьей главе** проведен обзор современных методов оценки параметров динамических линейных систем по их временным и частотным характеристикам. Для решения поставленной задачи по отсчётам комплексной частотной характеристики выбран метод векторной аппроксимации. Данный метод позволяет оценить параметры модели, заданной передаточной функцией вида

$$H(p) = Ep + D + \sum_{k=1}^K \frac{B_k}{p - p_k}, \quad (3)$$

где D и E – коэффициенты пропорционального и дифференцирующего звеньев, а p_k и B_k – полюса и вычеты исследуемой системы. Метод является итеративным и легко поддается алгоритмизации; на каждой итерации для реализации метода используется последовательность стандартных операций линейной алгебры. Обладая возможностью определения параметров пропорционального и дифференцирующего звена системной функции, метод может быть применен как для анализа элементов матрицы рассеяния, так и элементов матриц сопротивлений и проводимости. К преимуществам метода следует также отнести то, что он не накладывает ограничений на равномерность шага наблюдения или измерения исходных отсчётов частотной характеристики.

Наибольшей точностью среди существующих методов оценки полюсов во временной области обладает метод матричных пучков, основанный на отыскании обобщённых собственных чисел специальных матриц, составленных из сечений ИХ, заданных своими отсчетами $h[n]$. Использование свойств сингулярного разложения даёт возможность оптимально сократить ранг матрицы до числа экспонент равного порядку линейной системы. Анализ состава сингулярных чисел в разложении позволяет оценить максимальное число комплексных экспонент, достаточное для описания последовательности отсчетов. Ортогонализация, обеспечиваемая свойствами сингулярного разложения матриц, позволяет провести отдельное оценивание каждого из полюсов ИХ, что повышает точность такой оценки по сравнению с другими методами, например, методом Прони.

В четвертой главе представлен алгоритм параметрической идентификации линейной системы, разработанной в главе 2. Принципиальной особенностью предложенного алгоритма является разделение характеристик устройства на сумму двух частей, описываемых динамической и распределенными системами. Для этого выполняется оценка порядка динамической системы и границы позднейшей части по ИХ устройства с использованием трех критериев. Критерий точности состоит в минимизации среднеквадратической ошибки аппроксимации характеристик устройства характеристиками модели:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} |h[n] - g[n]|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |h[n]|^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^{N-1} |H[m] - G[m]|^2}{\sum_{m=0}^{N-1} |H[m]|^2}}, \quad (4)$$

где $h[n]$ и $H[m]$ – отсчеты ИХ и ЧХ устройства, а $g[n]$ и $G[m]$ – отсчеты ИХ и ЧХ модели соответственно, а N – длительность (в отсчетах) цифровых сигналов и спектров. Критерий устойчивости модели является следствием требования пассивности рассматриваемых микроволновых устройств и накладывает ограничения на возможные оценки положений полюсов в комплексной z -плоскости: $|z_k| < 1$.

Отличительной особенностью предложенной методики является использование критерия стабильности параметров модели. Стабильность параметров модели состоит в том, что набор полюсов, оцениваемый по любому участку в пределах поздневременной части ИХ, практически одинаков в том случае, если порядок метода оценки равен истинному порядку динамической системы, физически описывающей процессы рассеяния электромагнитной энергии. Критерий стабильности предписывает использовать при описании динамической линейной системы только устойчивые (физические) полюса и не включать в него неустойчивые (математические) полюса, найденные исключительно как результат аппроксимации, характерной для параметрических методов оценки.

Для автоматизации процедуры выбора порядка динамической системы с использованием критерия стабильности были разработаны математические алгоритмы, позволяющие количественно оценить меру различия двух совокупностей полюсов. Одним из таких алгоритмов является сигнатурный метод сравнения, состоящий в представлении сравниваемых совокупностей полюсов $\mathbf{Z}^{(1)} = \{z_1^{(1)}, z_2^{(1)}, \dots, z_K^{(1)}\}$ и $\mathbf{Z}^{(2)} = \{z_1^{(2)}, z_2^{(2)}, \dots, z_K^{(2)}\}$ точками в K -мерном комплексном пространстве и последующем вычислении расстояния между ними

$$d = \|\mathbf{Z}^{(1)} - \mathbf{Z}^{(2)}\| = \sqrt{\sum_{k=1}^K |z_k^{(1)} - z_k^{(2)}|^2}. \quad (5)$$

Основной трудностью при вычислении нормы является правильное упорядочение элементов в наборах полюсов. Оптимальным следует считать упорядочение, который даст минимальное значение расстояние среди всех возможных способов упорядочения набора. Алгоритмически такое решение может быть найдено только перебором из K -факториал комбинаций. Для достижения приемлемого времени работы были предложены две модификации сигнатурного алгоритма, состоящие в предварительном частотном ранжировании полюсов в наборах и последовательном выборе ближайших друг к другу полюсов.

Альтернативный алгоритм оценки меры различия совокупностей полюсов был разработан на основе метода дискретного Е-импульса. Было показано, что характеристическое число Е-импульса может быть использовано как мера различия совокупностей полюсов. При этом синтез Е-импульса проводится в частотной области по одному из сравниваемых наборов полюсов:

$$\tilde{E}(z) = D(z) \cdot \prod_{k=1}^K (z - z_k^{(1)}), \quad (6)$$

где $D(z)$ – полином специального вида, выбор нулей которого определяет избирательные свойства Е-импульса. Преимуществом алгоритма на основе Е-импульса является его высокое быстродействие, обеспечиваемое реализацией в виде цифрового КИХ-фильтра.

В **пятой главе** предложена обобщенная структурная схема разработанной методики синтеза линейной радиотехнической модели микроволнового устройства по результатам его численного моделирования. Основными этапами предложенной методики являются:

1. расчёт электромагнитного поля внутри микроволнового устройства с использованием методов численного моделирования во временной области;
2. определение временных и спектральных представлений токов и напряжений, падающих и отраженных волн в заданных портах устройства;
3. описание микроволнового устройства с помощью матриц сопротивлений, проводимости и рассеяния, каждый элемент которых является функцией времени или частоты;
4. разделение элементов матрицы рассеяния на части, соответствующие динамическим и распределенным линейным системам;
5. оценка параметров динамических систем по их частотным или импульсным характеристикам;
6. синтез эквивалентной электрической схемы с сосредоточенными элементами, реализующей динамическую линейную систему;
7. оценка параметров линейных систем с распределёнными параметрами;
8. верификация синтезированной модели микроволнового устройства.

Также в главе представлена методика синтеза эквивалентной электрической цепи, реализующей линейную динамическую систему. Методика позволяет выполнить синтез цепи минимального порядка для широкополосного микроволнового устройства с потерями по его входному комплексному сопротивлению или проводимости. В качестве способа решения данной задачи предложено использовать метод декомпозиции, который заключается в выделении из функции полного сопротивления простых звеньев, сопротивления которых описываются дробно-рациональными функциями низкого порядка. В тех случаях, когда декомпозиция оказывается невозможной, предложено использовать метод Бруне. Признаком такой ситуации является характерное поведение зависимости действительной части сопротивления от частоты, состоящее в том, что её минимальное значение меньше асимптотических значений при бесконечно большой и бесконечно малой частотах. В таких случаях метод Бруне позволяет выделить звено специального вида, содержащее взаимную индуктивную связь, рассчитать его параметры и продолжить синтез оставшейся части цепи с использованием метода декомпозиции.

Приведены результаты синтеза модели сверхширокополосной антенны-«бабочки» (рис. 2) по результатам её полноволнового TLM-моделирования. В результате найдена электрическая схема (рис. 3), реализующая динамическую линейную систему; определены положения и веса дельта функций, составляющих распределённую систему. Проведенная верификация показала, что в рабочей полосе антенны (1–20 ГГц) характеристики синтезированной модели отличаются не более, чем на 6% от характеристик, рассчитанных с использованием метода TLM и метода моментов.

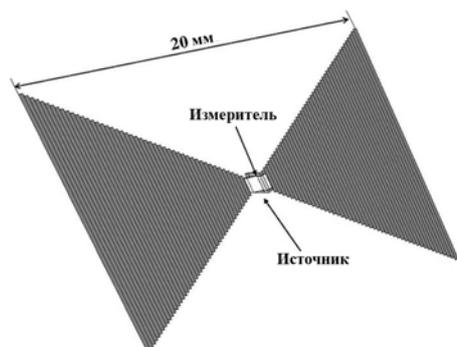


Рис. 2. Антенна-«бабочка»

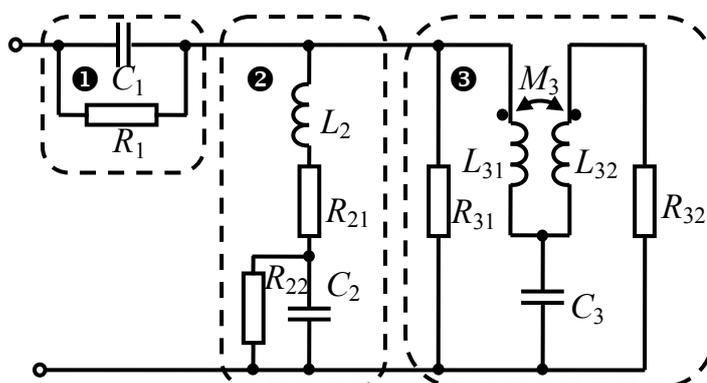


Рис. 3. Эквивалентная схема антенны

В **приложении** представлена методика отыскания решений плохо обусловленных систем линейных алгебраических уравнений с использованием свойств сингулярного разложения матриц.

Заключение.

Данная работа посвящена разработке методики параметрической идентификации сверхширокополосных пассивных линейных микроволновых устройств. Разработанная методика позволяет осуществить синтез радиотехнической модели микроволнового устройства, которая будет использоваться для сокращения вычислительных затрат, требуемых при его численном моделировании и оптимизации его параметров. Проведенный обзор по материалам отечественных и зарубежных источников в области методов синтеза сверхширокополосных микроволновых устройств показал, что выбранное направление исследований является актуальным и перспективным.

В результате исследований, проведенных в рамках поставленной задачи, получены следующие основные результаты.

1. По результатам анализа современных подходов к математическому описанию процессов взаимодействия электромагнитного поля с объектами произвольной формы была синтезирована радиотехническая модель, позволяющая описывать пассивные линейные микроволновые устройства в сверхширокой полосе частот. Данная модель является сложной линейной моделью, включающей в себя части, реализуемые с помощью динамической и распределенной линейных систем.

2. Разработана методика использования устойчивого алгоритма обращения свертки цифровых сигналов с использованием свойств сингулярного разложения матриц. Особенностью данной методики является одновременное использование критериев отбора максимальных сингулярных чисел и частотным отбором собственных векторов

3. На основе критерия стабильности параметров модели разработана методика, позволяющая провести разделение импульсной характеристики устройства на части, реализуемые динамической и распределенной линейными системами, а также определить порядок динамической системы.

4. Разработаны алгоритмы количественной оценки меры различия совокупностей полюсов системных функций, основанные на методе сигнатур и модифицированном методе дискретного посекционного E-импульса. Данные алгоритмы позволили автоматизировать процедуру оценки порядка динамической модели и границы поздневременной части.

5. Разработана процедура синтеза электрической цепи минимального порядка для широкополосного микроволнового устройства с потерями по его входному комплексному сопротивлению или проводимости с использованием метода Бруне.

С использованием полученных результатов была разработана инженерная методика параметрической идентификации, позволяющая осуществить синтез радиотехнических моделей микроволновых устройств по результатам их численного моделирования. Полученная в результате такой процедуры линейная модель является практическим инструментом, позволяющим сократить время оптимизации характеристик проектируемых устройств. В работе приведены результаты экспериментального исследования разработанной инженерной методики для синтеза модели широкополосной микрополосковой антенны типа «бабочка». Проведенная верификация показала, что отличие частотных зависимостей входного сопротивления антенны, рассчитанных с использованием синтезированной модели и различных методов численного

моделирования, составляет в среднем единицы процентов в пределах рабочей полосы антенны.

Следует также отметить, что применение методов параметрической идентификации с использованием сложных линейных моделей в задачах проектирования микроволновых устройств, анализа собственных электромагнитных излучений радиотехнических средств, СКИ и СШП радиолокации может служить направлением для дальнейших теоретических и экспериментальных работ.

Публикации по теме диссертации:

1. T.Shevgunov, A. Baev, Y. Kuznetsov, P. Russer, “Network Oriented Modeling of the One-Port Antenna Structure”, at *the XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science*, Section D05, Chicago, Aug. 2008.

2. T.Shevgunov, A. Baev, Y. Kuznetsov, P. Russer, “Lumped element network synthesis for one-port passive microwave structures”, in *17th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, Wroclaw, Poland, pp. 869–872, May 2008.

3. Шевгунов Т.Я., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., «Оценка импульсной характеристики микроволновых устройств по результатам их численного моделирования», *10-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение»*, М.: ИПУ РАН, стр. 378–380, март 2008 г.

4. Кузнецов Ю.В., Шевгунов Т.Я., Баев А.Б., «Оценивание параметров линейной модели рассеяния электромагнитного поля микроволновыми устройствами», *Вестник МАИ*, том 15, №2, М.: МАИ, стр. 77–89, 2008 г.

5. Шевгунов Т.Я., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., «Идентификация системы по известной частотной характеристике с использованием метода векторной аппроксимации систем», *Информационно-измерительные и управляющие системы*, М.: изд-во «Радиотехника», №11, 2007 г., стр. 55–59.

6. Шевгунов Т.Я., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., «Применение метода векторной аппроксимации для идентификации системы по частотной характери-

стике», *9-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение»*, М.: ИПУ РАН, стр. 251–254, март 2007 г.

7. Y. Kuznetsov, A. Baev, T. Shevgunov, P. Lorenz, P. Russer, “Application of the Stability Criterion to the Passive Electromagnetic Structures Modeling”, in *36-th European Microwave Conference*, Manchester, pp. 13–16, Sept. 2006.

8. Шевгунов Т.Я., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., «Оценка параметров полюсной модели СВЧ устройств», *Юбилейная научно-техническая конференция «Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях»*, стр. 316–326, М.: МАИ, окт. 2006 г.

9. Y. Kuznetsov, A. Baev, T. Shevgunov, P. Lorenz, P. Russer, “System Identification Procedure for Nearly Lossless Passive Microwave Structures”, *Frontiers in Applied Computational Electromagnetics*, June 19–20, 2006, Victoria, BC, Canada.

10. Шевгунов Т.Я., Кузнецов Ю.В., «Выделение импульсной характеристики электромагнитных структур по результатам анализа модели во временной области», *Юбилейная научно-техническая конференция молодых ученых «Информационные технологии и радиоэлектронные системы»*, М.: МАИ, май 2006 г.

11. T. Shevgunov, A. Baev, Y. Kuznetsov, P. Russer, “Improved System Identification Scheme for the Linear Representation of the Passive Electromagnetic Structures”, in *16th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, Krakow, Poland, pp. 988–991, May 2006.

12. A. Aleksandrov, T. Shevgunov, Y. Kuznetsov, A. Baev, “Ultra-wideband Radar Targets Discrimination based on discrete E-pulse synthesis”, in *Journal of telecommunication and information technology*, 2/2005, pp. 3–8, National Institute of Telecommunication, Warszawa, Poland.

13. Y. Kuznetsov, A. Baev, T. Shevgunov, M. Zedler, P. Russer, “Transfer Function Representation of Passive Electromagnetic Structures”, in *IEEE 2005 International Microwave Symposium IMS-2005*, Long Beach, California, USA, June 2005.

14. Шевгунов Т.Я., Кузнецов Ю.В., «Моделирование СВЧ структур на основе метода сингулярного разложения», *Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2005*, Севастополь, апрель 2005 г.

15. A. Aleksandrov, T. Shevgunov, “Ultra Wideband Radar Targets Discrimination Using Frequency Domain E-pulse Method”, in *15th International Conference on Microwaves Radar and Wireless Communications*, Warszawa, pp. 897–900, May 2004.