

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

А.О. Белоусов, В.О. Гордеева

Оптимизация помехозащитных структур
с модальным разложением

Томск
Издательство ТУСУРа
2023

УДК 621.391.8+621.315.2.05

ББК 32.845.8+32.845.6

Б438

Рецензент

Газизов Т. Т., д-р техн. наук

Белоусов, Антон Олегович

Б438 Оптимизация помехозащитных структур с модальным разложением: моногр. / А. О. Белоусов, В. О. Гордеева. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 136 с.

ISBN 978-5-6050216-8-1

Систематизированы основные подходы к оптимизации полосковых и кабельных структур с модальным разложением. Рассмотрены основные методы локальной и глобальной оптимизации. Для каждого метода даны краткое описание, последовательность действий, выполняемых в процессе оптимизации, и математические выражения, лежащие в их основе. Приведена оценка эффективности, достоинств, ограничений и недостатков рассмотренных алгоритмов. Представлены формулировка основных критериев оптимизации и общий вид многокритериальной целевой функции. Показаны результаты одно- и многокритериальной оптимизации полосковых и кабельных структур на примере некоторых описанных алгоритмов по сформулированным критериям.

Для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры, студентов и аспирантов радиотехнических специальностей.

УДК 621.391.8+621.315.2.05

ББК 32.845.8+32.845.6

Научное издание

Белоусов Антон Олегович

Гордеева Виктория Олеговна

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОМЕХОЗАЩИТНЫХ СТРУКТУР

С МОДАЛЬНЫМ РАЗЛОЖЕНИЕМ

Монография

Подписано в печать 20.12.23. Усл. печ. л. 7,91.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз. Заказ № 303.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.

ISBN 978-5-6050216-8-1

© Белоусов А.О., Гордеева В.О., 2023

© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2023

Оглавление

Список сокращений.....	5
Введение.....	6
1 Моделирование и оптимизация помехозащитных структур с модальным разложением.....	9
1.1 Подходы к моделированию распространения электрических сигналов.....	9
1.2 Вычисление временного отклика.....	11
1.3 Помехозащита радиоэлектронных устройств.....	13
1.4 Генерация сверхвысокочастотных импульсов.....	19
1.5 Основные подходы к оптимизации.....	20
1.6 Постановка цели работы.....	22
2 Методы локальной и глобальной оптимизации.....	25
2.1 Эвристический поиск.....	26
2.2 Методы локальной оптимизации.....	29
2.2.1 Градиентный спуск.....	30
2.2.2 Метод сопряженных градиентов.....	32
2.2.3 Метод доверительных областей.....	33
2.2.4 Симплекс-метод Нелдера-Мида.....	36
2.2.5 Классический метод Пауэлла.....	38
2.3 Методы глобальной оптимизации.....	40
2.3.1 Генетический алгоритм.....	41
2.3.2 Эволюционные стратегии.....	45
2.3.3 Метод случайного поиска.....	47
2.3.4 Метод имитации отжига.....	50
2.3.5 Алгоритм роя частиц.....	52
2.4 Выводы.....	53
3 Критерии оптимизации структур с модальным разложением.....	55
3.1 Основные критерии оптимизации.....	55
3.2 Многокритериальная целевая функция.....	58
3.3 Амплитудные критерии.....	59
3.4 Временные критерии.....	60
3.5 Критерий согласования.....	62
3.6 Массогабаритный критерий.....	62
3.7 Стоимостной критерий.....	64
3.8 Частотные критерии.....	66
3.9 Глазковые критерии в общем виде.....	68
3.10 Выводы.....	70

4	Оптимизация структур с модальным разложением.....	71
4.1	Специфика оптимизации полосковых и кабельных структур с модальным разложением.....	71
4.1.1	Полосковые структуры.....	71
4.1.2	Кабельные структуры.....	72
4.2	Однокритериальная оптимизация.....	78
4.2.1	Эвристический поиск.....	78
4.2.2	Последовательная оптимизация полоскового модального фильтра с использованием эвристического поиска и генетического алгоритма.....	81
4.2.3	Генетический алгоритм.....	86
4.2.4	Эволюционные стратегии.....	91
4.2.5	Метод случайного поиска.....	102
4.3	Многокритериальная оптимизация.....	111
4.3.1	Эвристический поиск.....	111
4.3.2	Генетический алгоритм.....	113
4.3.3	Эволюционные стратегии.....	115
4.3.4	Случайный поиск.....	117
4.4	Выводы.....	119
	Заключение.....	121
	Литература.....	124

Список сокращений

- ГА – генетический алгоритм
- МПЛ – микрополосковая линия
- МПЛП – многопроводная линия передачи
- МФ – модальный фильтр
- ПДЭМВ – преднамеренное электромагнитное воздействие
- ПП – печатная плата
- РЭС – радиоэлектронные средства
- СКИ – сверхкороткий импульс
- СП – случайный поиск
- СШП – сверхширокополосный
- ЦС – целостность сигнала
- ЦФ – целевая функция
- ЭМВ – электромагнитное воздействие
- ЭМП – электромагнитные помехи
- ЭМС – электромагнитная совместимость
- ЭП – эвристический поиск
- ЭС – эволюционная стратегия
- ЭСР – электростатический разряд

Введение

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) занимают всё более значимое место в жизни человека. Применение РЭС различной степени сложности в разных областях, начиная от бытовой и заканчивая космической, приводит к обострению проблемы обеспечения её электромагнитной совместимости (ЭМС). Важной задачей ЭМС является обеспечение помехозащищенности РЭС. Необходимость обеспечения ЭМС критичных РЭС подтверждается исследованиями в этом направлении, причем в разных секторах (академическом, университетском, отраслевом) инженерных наук, известными научными школами под руководством: Л.Н. Кечиева (Россия, ВШЭ-МГИЭМ), С.А. Сухорукова (Россия, производство), В.Е. Фортова (Россия, РАН), J.L. ter Haseborg (Германия, Гамбургский технологический университет), W. Radasky (США, корпорация, МЭК).

Как известно, электромагнитные помехи (ЭМП) подразделяются в зависимости от пути распространения на излучаемые и кондуктивные. Кондуктивные помехи опасны тем, что проникают в РЭС непосредственно по проводникам, например через сигнальные проводники или цепи питания. Вопросы ЭМС печатных узлов и стойкости полупроводниковых компонентов к воздействию электростатических разрядов, разработки схем и методов защиты от ЭМП, функциональной безопасности РЭС отражены в работах Б.Б. Акбашева, Н.В. Балюка, З.М. Гизатуллина, В.Ю. Кирилова, С.Ф. Чермошнцева. Так, современные исследования отечественных и зарубежных ученых показывают уязвимость РЭС к ЭМП, в особенности к сверхширокополосным ЭМП или сверхкоротким импульсам (СКИ). Их спектр перекрывает большую часть диапазонов работы РЭС, а из-за малой длительности импульса основная энергия генератора расходуется на увеличение его амплитуды, что вызывает значительное повышение напряженности электрического поля. Сильное электрическое поле приводит к пробоем полупроводниковых приборов и конденсаторов в помехоподавляющих фильтрах, а время срабатывания варисторов и разрядников может значительно превышать длительность СКИ. Исследования по созданию генераторов импульсов и оценке устойчивости РЭС к воз-

действию электромагнитных полей, а также разработке методов и средств оценки влияния электромагнитных импульсов отражены в работах А.М. Белянцева, В.П. Беличенко, В.И. Кошелева, Л.О. Мыровой, Ю.В. Парфенова.

В этой связи коллективами научно-исследовательских лабораторий «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» и «Фундаментальные исследования по электромагнитной совместимости» успешно ведутся исследования по разработке устройств для защиты РЭС от СКИ – модальных фильтров (МФ) и защитных меандровых линий. Принцип действия устройств основан на технологии модальной фильтрации (разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды из-за разности задержек мод в полосковых или кабельных структурах с неоднородным диэлектрическим заполнением). Большой вклад в исследование технологии модальной фильтрации внесли Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и др.

Наиболее популярным в научном сообществе сегодня является решение задачи направленного синтеза на основе различных подходов, среди которых есть эволюционные, стохастические и детерминированные методы оптимизации. Большой вклад в исследование их применения в прикладных задачах внесли Z. Altman, E. Altshuler, C.G. Christodoulou, K. Christos, R. Mittra, Y. Rahmat-Samii, K. Sotirios, Л. Гладков, А. Еремеев, В. Курейчик, Т. Панченко и др. Между тем одним из основных этапов проектирования МФ является оптимизация. В процессе оптимизации выполняется ручной или алгоритмический перебор оптимизируемых параметров в указанном диапазоне по одному или нескольким критериям. Однако нередко на этапе оптимизации разработчик сталкивается с различными проблемами: выбор и настройка наиболее эффективного алгоритма, задание подходящих диапазонов оптимизации, требуемого (-ых) критерия (-ев) и др.

Поэтому основная цель монографии – познакомить читателя с результатами многолетней работы её авторов по разработке новых и совершенствованию существующих алгоритмов, критериев и подходов к оптимизации полосковых и кабельных структур с модальным разложением.

Авторы благодарны коллективам научно-исследовательских лабораторий «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» и «Фундаментальные исследования по электромагнитной совместимости», в которых были получены результаты, представленные в монографии.

1 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОМЕХОЗАЩИТНЫХ СТРУКТУР С МОДАЛЬНЫМ РАЗЛОЖЕНИЕМ

1.1 Подходы к моделированию распространения электрических сигналов

Здесь рассмотрены общие подходы к моделированию распространения электрических сигналов, проведен выбор методов вычисления матриц параметров, выполнен обзор исследований по вычислению временного отклика многопроводной линии передачи (МПЛП) [1], а также рассмотрены подходы к задачам оптимизации.

Массовое внедрение РЭС в различные сферы деятельности, а особенно в управление критичными системами, например, в атомной, военной, транспортной и космической отраслях, сделало жизнь современного общества сильно зависящей от РЭС. Эта зависимость становится все более опасной из-за уязвимости аппаратуры к воздействию электромагнитных помех, поскольку уровни таких помех непрерывно возрастают (из-за роста плотности монтажа, компоновки и трассировки, а также роста уровней и частот воздействия), а уровни восприимчивости компонентов снижаются (с уменьшением запаса помехоустойчивости из-за снижения напряжения питания интегральных схем). Всё чаще возникают ситуации, когда удовлетворительное функционирование систем невозможно, что для критичных систем совершенно недопустимо, поскольку связано с риском огромных материальных потерь, человеческих жертв и даже катастроф.

В общем случае распространение электрических сигналов в межсоединениях описывается уравнениями Максвелла. Следовательно, строгое решение задачи вычислительного моделирования межсоединений требует численного решения уравнений Максвелла для граничных условий, определяемых конфигурацией межсоединений, при начальных значениях, задаваемых электрическими сигналами в межсоединениях. Однако необходимые для этого вычислительные затраты оказываются крайне высокими даже для относительно простых конфигураций. Поэтому такой анализ, назы-

ваемый электродинамическим или полноволновым (поскольку он учитывает все типы волн, возникающие в межсоединениях), используется при анализе межсоединений, как правило, только на частотах в десятки и сотни гигагерц.

При статическом подходе делается упрощающее предположение, что в межсоединениях отсутствуют потери, дисперсия и высшие типы волн и может распространяться только основная, поперечная волна. Это сводит уравнения Максвелла к телеграфным уравнениям, решение которых гораздо проще, но весьма точно для большинства практических межсоединений. При допущении распространения только поперечной волны получаются довольно точные результаты даже при наличии небольших потерь в межсоединениях. Этот случай известен как квазистатический подход. При нём произвольная схема межсоединений представляется обобщенной схемной моделью, напряжения и токи в любой точке которой определяются из телеграфных уравнений для каждого отрезка МПЛП с учётом граничных условий на концах отрезков, задаваемых окончаниями. В результате, благодаря квазистатическому подходу, моделирование распространения электрических сигналов в межсоединениях делится на три задачи, решение которых можно искать независимо друг от друга:

- определение матриц параметров отрезков МПЛП;
- определение параметров неоднородностей;
- определение отклика схемы МПЛП на заданное воздействие.

Показано, что решение любой из этих задач, несмотря на упрощения квазистатического подхода, может оказаться весьма сложным в зависимости от сложности конфигураций отрезков МПЛП, их соединений между собой, сложности конфигураций неоднородностей окончаний и наличия в окончаниях комплексных и нелинейных элементов.

Особо важна первая из этих трёх задач. Действительно, значения параметров матриц играют ключевую роль, поскольку в интегральном виде содержат в себе всю информацию о геометрической конфигурации и электрических свойствах материалов проводников и диэлектриков, составляющих межсоединение. Между тем простые соотношения этих параметров позволяют приближённо определить основные характеристики одиночных и связанных

межсоединений. Наконец, некоторые методы определения параметров отрезков МПЛП пригодны и для решения второй задачи, т.е. позволяют определить и параметры неоднородностей.

Задача определения параметров неоднородностей на стыках и концах отрезков МПЛП сложнее предыдущей, поскольку, как правило, требует вычислительно затратного трёхмерного моделирования сложных конфигураций и разработки для него соответствующих моделей алгоритмов и программ.

Решение заключительной задачи определения отклика схемы МПЛП на заданное воздействие может оказаться довольно сложным, например, при учёте дисперсии или при изменении параметров отрезков межсоединений по длине отрезка. Кроме того, трудности возникают при учёте нелинейного характера окончаний межсоединений, произвольных воздействиях, а также в схемах со сложной конфигурацией соединений отрезков МПЛП. Однако для некоторых важных частных случаев воздействий и конфигураций возможны простые и даже аналитические решения, позволяющие вычислить форму сигнала в заданной точке схемы межсоединений.

1.2 Вычисление временного отклика

Для лучшего понимания принципов линий передачи представлена схема замещения [2] с сосредоточенными элементами для элемента длины 2-проводной линии передачи (третий проводник опорный) (рисунок 1.1).

Обозначения элементов эквивалентной схемы: собственные (L_{11} , L_{22}) и взаимная (L_m) индуктивности проводников структуры; собственные (C_{11} , C_{22}) и взаимная (C_m) емкости; собственные (G_{11} , G_{22}) и взаимная (G_m) проводимости, обусловленные потерями в диэлектриках; собственные (R_{11} , R_{22}) и взаимное (R_m) сопротивления, обусловленные потерями в проводниках.

В [3] впервые рассмотрено, как можно использовать непосредственно матричную алгебру для решения с минимальными затратами громоздкой и трудной задачи анализа МПЛП. В [4] приведена МПЛП в установившемся режиме, а в [5] – решение задачи переходного анализа симметрированной МПЛП непосредственно через

определённый интеграл от функции Бесселя, применяя матричную теорию и преобразование Лапласа. В [6] показан вывод телеграфных уравнений, описывающих МПЛП.

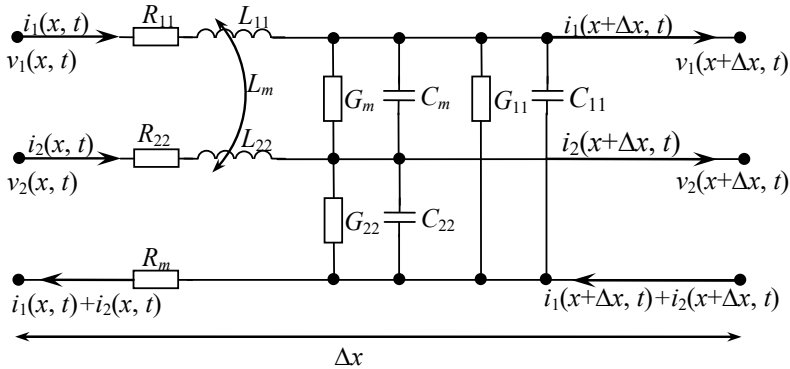


Рисунок 1.1 – Схема замещения элемента длины 2-проводной линии передачи

В [7] проанализированы формы напряжения на выходе МПЛП без потерь, без ограничения двумя линиями и без допущения слабой связи между ними, а также введены важные понятия схемы согласованного окончания и эквивалентной схемы для МПЛП. В [8] с помощью матричного анализа развита теория распространения волн в МПЛП без потерь с неоднородными диэлектриками.

Существенным вкладом в анализ МПЛП является монография [9], в которой, наряду с МПЛП без потерь с однородным диэлектрическим заполнением, показана квази-ТЕМ теория МПЛП с малыми потерями и неоднородным диэлектрическим заполнением. В последней главе книги на примерах линий передачи с неоднородным диэлектриком представлены пределы точности квазистатических аппроксимаций.

Известна посвящённая вычислению временного отклика МПЛП статья [10], которая отличается тем, что в ней рассматриваются и сравниваются несколько методов расчета формы напряжений на выходе линий, основанных на использовании известных параметров теории цепей. К ним относятся методы пошагового во времени решения телеграфных уравнений, нормальных волн во временной

области, нормальных волн в частотной области, а также метод свертки, использующий функции Грина для линии. Последний позволяет исследовать наиболее общий случай линий с потерями, нагруженных нелинейными цепями.

1.3 Помехозащита радиоэлектронных устройств

В настоящее время проблема преднамеренных электромагнитных воздействий (ПДЭМВ) приобретает все большую актуальность в различных глобальных областях жизнедеятельности человека. Так, в [11] эта проблема рассматривается как очевидная угроза непосредственно объектам транспортной инфраструктуры, защита от которой требует как новых технических, так и законодательных решений. Кроме того, согласно [12], реальную угрозу ПДЭМВ отмечают и представители предприятий топливно-энергетического комплекса. По их мнению, неоправданным является отсутствие в законодательстве и в нормативных правовых актах необходимой регламентации вопросов защиты систем информационной инфраструктуры объектов топливно-энергетического комплекса от вмешательства посредством ПДЭМВ. Между тем актуально создание соответствующих устройств защиты сетей связи и питания. Безопасность критичной инфраструктуры очень важна для современного общества, потому что её некорректное функционирование может привести к значительным потерям. Кроме того, угроза ПДЭМВ на РЭС может привести к её сбою или неисправности. Отдельное внимание необходимо уделить мощным преднамеренным электромагнитным импульсам наносекундного и субнаносекундного диапазонов, поскольку они способны проникать в различную РЭС [13, 14]. Особенно опасно воздействие СКИ, так как существующие сетевые фильтры не защищают от них [15]. Известны промышленные устройства, защищающие от СКИ, но большие габариты и высокая стоимость ограничивают радиус их применения [16]. Однако в настоящее время нет эффективной защиты непосредственно против СКИ. Между тем увеличение роли РЭС при функционировании важнейших объектов инфраструктуры делает эту защиту необходимой.

Данный вопрос постоянно обсуждается на конференциях AMEREM/EUROEM/ASIAEM. Например, еще на конференции ASIAEM 2015 выделена отдельная секция «Преднамеренные электромагнитные помехи: угрозы, влияния и защита» и даже созданы отдельные специальные секции «Создание устройств защиты и методов испытания» и «Оценка воздействия преднамеренных электромагнитных помех на критичную инфраструктуру».

В монографии [17] рассмотрены вопросы помехоустойчивости, а также информационной безопасности вычислительной техники при кондуктивных воздействиях непосредственно по сети электропитания. Примечательны результаты экспериментальных исследований, показавшие, что использование широко известных наружных устройств защиты, к примеру сетевых фильтров и источников бесперебойного питания, не позволяет достичь значительного уменьшения уровня электромагнитных помех при воздействии импульса непосредственно по сети электропитания, к тому же с уменьшением длительности импульса уменьшается и его ослабление. Актуальна работа [18], которая весьма полезна для системного подхода к решению задач помехозащиты РЭС. Известна также книга по заземлению [19], изучение которой полезно для понимания не только принципов, но и нюансов грамотного проектирования системы схемной, силовой и корпусной земли. Рассмотрены фундаментальные основы целостности сигнала (ЦС) [20], а также системный подход к анализу ЦС при разработке высокоскоростной аппаратуры [21]. Изложены теоретические основы линий передачи, применяемые для анализа ЦС при конструировании цифровых и аналоговых электронных систем [22, 23]. Представлено электрическое моделирование и проектирование 3D интегральных схем (ИС) [24]. Для изучения специфических вопросов ЭМС ИС полезна работа [25].

Электростатическому разряду (ЭСР) посвящены монографии ученых из МИЭМ, КАИ и МАИ. Описана природа возникновения статического электричества с физической точки зрения и его преобразование в ЭСР, рассмотрен принцип воздействия ЭСР на электронные устройства, методики и средства защиты такой аппаратуры на различных стадиях проектирования и на стадиях изготовления, транспортировки, монтажа непосредственно на объекте,

эксплуатации, а также особая программа для контроля и управления электростатической обстановкой при эксплуатации [26]. Изложены сведения, полезные для понимания явлений ЭСР и практики защиты от его последствий [27, 28]. Известен ряд диссертаций (МИЭМ, МАИ, СПбГТУ) по проблеме ЭСР. В частности, в [29] рассматриваются решения по обеспечению стойкости критичной РЭС к воздействию ЭСР. В кандидатских диссертациях ученых из МАИ изложены простые аналитические оценки временного отклика на воздействие ЭСР в оплетку кабеля [30, 31]. В кандидатской диссертации [32] выполнены оценки воздействия СКИ на сеть Ethernet.

Естественно отметить безусловного лидера публикаций результатов самых новых в мире исследований в области ЭМС, которым был и остается журнал «IEEE Transactions on EMC», в отдельных статьях которого представлено большое количество полезных и актуальных разработок, применимых для создания технологии помехозащиты критичной РЭС, например по исследованию фильтра электромагнитных помех с экстракцией паразитных элементов каждого из его компонентов [33] или экстракции частотной зависимости параметров материалов [34]. Помимо отдельных статей в текущих номерах, примечательны его тематические выпуски, из которых можно отметить посвященные аэрокосмической ЭМС [35], целостности питания и ЭМС на уровне печатных плат (ПП) [36], применению нанотехнологий в ЭМС (нано-ЭМС) [37].

Достоинны внимания работы, опубликованные в авторитетном отечественном журнале «Технологии ЭМС». Ярким примером является юбилейный 50-й номер журнала, основная часть которого содержит статьи, связанные с методами экспериментальной оценки электромагнитной стойкости космических аппаратов [38] и уровня напряжённости электрического поля промышленных радиопомех от линий электропередач в метровом диапазоне длин волн [39], стандартизацией в области ЭМС для военных и гражданских систем [40], развитием многофункциональных информационных систем, функционирующих в сложных электромагнитных средах [41], достижениями функциональной безопасности систем и оборудования в связи с электромагнитными помехами [42].

Традиции Цюрихского симпозиума по ЭМС достойно продолжил Азиатско-Тихоокеанский, например в 2012 г. исследовано влияние паразитной индуктивности на границе контактов соединителя на уровень электромагнитных излучений [43]. Моделирование помехоустойчивости ПП представлено на примере создания на основе измеренных данных модели ИС (последовательный интерфейс ARINC для авионики) в соответствии с документом IEC 62433-4 [44]. Показан метод оценки устойчивости электронных устройств к воздействию повторяющихся коротких электромагнитных импульсов, позволяющий выбрать оптимальные параметры импульсов и предсказать результаты воздействия в зависимости от параметров импульсов [45]. Изложено создание моделей ИС для моделирования ЭСР на системном уровне [46]. Для проектирования сложных электромагнитных систем с учетом ЭМС приведено сравнение производительности пяти эволюционных алгоритмов оптимизации, из которых дифференциальная эволюция и генетический алгоритм (ГА) продемонстрировали наиболее высокую скорость сходимости [47]. На примере оптимизации межсоединений ИС с помощью ГА рассмотрено применение облачной и параллельной систем для моделирования и оптимизации ЭМС ИС [48]. Выполнено экспериментальное сравнение излучений от двух ПП с одинаковыми электрическими схемами, показавшее в диапазоне от 120 МГц до 1 ГГц до 22 дБ меньший уровень излучений платы, спроектированной непосредственно с учетом рекомендаций по ЭМС [49].

Активно исследуются технологии разработки фильтров, интегрированных в структуру ПП. Примечательной является предложенная конструкция фильтра, объединяющего в себе фильтр синфазной моды и корректор (equalizer) дифференциальной моды [50]. Представлены конструкции интегрированных планарных фильтров синфазной моды [51, 54]. Рассматриваются также паразитные и взаимные связи в фильтрах [55]. Изучена экстракция магнитных параметров элементов планарных фильтров [56]. В [57] представлены методы расчета первичных параметров полосковых связанных линий, применение связанных линий для создания корректоров фазочастотных характеристик, а также изложены основы анализа и проектирования таких устройств. Между тем устройства

фазовой обработки сигналов с использованием цепей с распределенными параметрами описаны в классических работах зарубежных исследователей [58, 59] и в ряде работ отечественных исследователей [60–62]. Варианты фильтров поглощающего типа рассмотрены в работах [63–67].

Изучены свойства связанных линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении [68]. Искажения сигнала, возникающие под влиянием неоднородного диэлектрического заполнения, представлены на реальном примере трёх связанных микрополосковых линий (МПЛ) [69], а также на примере двух связанных линий при наличии значительных отражений сигналов [70]. Также показано, что искажения могут проявляться из-за потерь в земле [71, 72].

Приведены искажения сигнала из-за взаимных связей в витках меандровых линий, применяемых в цифровых схемах в качестве линий задержки [73–79]. В качестве сверхвысокочастотных устройств используются связанные структуры в виде С-секций [80–83].

Рассмотрен отрезок многопроводной МПЛ, а также исследованы искажения сигнала в активном проводнике линии, возникающие из-за различия задержек распространяющихся мод [84]. Эти искажения названы модальными и исследуются при отсутствии иных искажений в зависимости от числа связанных линий и характеризующих их параметров. В [85] представлено использование модальных явлений [86–88] для защиты непосредственно от СКИ в линиях передачи. На примере отрезка связанных линий продемонстрировано разложение импульсного сигнала на пару импульсов, имеющих в 2 раза меньшую амплитуду. В [85] показано, что в процессе распространения импульса по отрезку линии с неоднородным диэлектрическим заполнением из N проводников (не считая опорного) на импульс могут воздействовать модальные искажения, это может привести к разложению исходного импульса на N импульсов меньшей амплитуды ввиду различия погонных задержек мод (τ_i) в линии. Представлены общие подходы к проектированию печатного МФ для защиты сетевого порта 100 Мбит/с [89–91]. С этой целью в системе TALGAT [92] разработаны программы

сквозного анализа эффекта модального разложения непосредственно в полосковых структурах. Они позволяют задавать произвольные параметры поперечных сечений; вычислять матрицы погонных коэффициентов электростатической (C) и электромагнитной (L) индукции, погонных сопротивлений (R) для учета потерь в проводниках и погонных проводимостей (G) для оценки потерь в диэлектриках, а также задержки мод связанных линий; выполнять параметрическую оптимизацию поперечного сечения линии с помощью ГА; вычислять частотный отклик и временной отклик на периодические воздействия различной формы для многокаскадных фильтров с учетом потерь и без них; анализировать рассеивание мощности входного воздействия на резисторах пассивного проводника и нагрузке фильтра с учетом потерь и без; моделировать эксперимент и др.

Из вышесказанного следует, что для защиты от СКИ используются различные подходы и устройства. Однако традиционные устройства защиты имеют следующие недостатки: низкое быстродействие (например, газоразрядные устройства при быстром нарастании входного сигнала имеют запаздывающее срабатывание); наличие полупроводниковых компонентов (варисторы, стабилитроны), отличающихся высоким быстродействием, но уязвимых к воздействию радиации, что означает малый срок службы; влияние паразитных индуктивностей выводов (TVS-диоды); сложность проектирования и высокая стоимость. Поэтому одним из перспективных методов защиты видится использование многопроводных МФ на основе обычных микрополосковых линий.

Примечательна работа, в которой описывается тестовая эксплуатация МФ в территориальных органах МЧС России [93]. Помимо преимуществ МФ, в работе отражены сферы внедрения данных устройств. Кроме того, приведены статистические данные эксплуатации тестовых образцов МФ для защиты сетевых адаптеров вычислительной техники и серверного оборудования (5 персональных компьютеров, 3 сервера) в ГУ МЧС России по Томской области. Монтаж МФ для защиты серверного оборудования осуществлялся непосредственно в серверных стойках, а рабочих станций – непосредственно на рабочих местах. Отмечено, что во время эксплуатации произошло около трех скачков напряжения сети энергоснаб-

жения, в результате одного из них вышли из строя коммутатор локальной сети и сетевые адаптеры на двух персональных компьютерах, а оборудование, защищенное МФ, не пострадало.

1.4 Генерация сверхвысокочастотных импульсов

В настоящее время актуальна задача генерации мощных СВЧ-импульсов из-за все более осознаваемой потребности противодействия робототехническим комплексам, в особенности беспилотным летающим аппаратам [94]. Представляется, что со временем исходящая от таких комплексов угроза будет только возрастать, а это делает актуальными соответствующие исследования и разработки по электромагнитному противодействию [95].

Белянцевым А.М. была проработана концепция нелинейной линии, позволившая создать генератор радиоимпульсов [96]. Автор показал возможность прямого эффективного преобразования униполярного импульса в радиоимпульс при его распространении в линии передачи с ферритом при наличии пространственной дисперсии. Необходимым условием эффективной генерации в таких линиях является фазовый синхронизм между ударным фронтом и возбуждаемой им волной. Это условие в случае стационарного фронта ударной волны означает равенство фазовой скорости излучения и скорости стационарного фронта: $v_r = v_{ph}(\omega)$. Поскольку групповая скорость излучаемой волны меньше фазовой $v_g(\omega) < v_{ph}(\omega)$, ВЧ-энергия оттекает из области фронта со скоростью $v_r - v_g(\omega)$, формируя цуг колебаний. Одним из главных достоинств работы [96] стала экспериментальная демонстрация возможности возбуждения большого числа колебаний в цуге (>10) [97]. Пространственная дисперсия в таких системах сформирована посредством перекрестных емкостных связей, т.е. в их основе лежит не эффект гиромангнитной прецессии, а периодическая структура передающей линии. Как отмечается в [96], длительность генерируемого радиоимпульса и частота заполнения ограничены ВЧ-потерями в передающей линии.

Между тем среди востребованных источников мощных СВЧ-импульсов можно выделить узкополосные приборы, основанные на использовании релятивистского электронного пучка, а также сверхширокополосные (СШП) генераторы на основе полупроводниковых ключей [98–100]. Два данных класса генераторов, несмотря на их преимущества, имеют также определенные недостатки: релятивистские приборы являются достаточно крупногабаритными, а твердотельные СШП-генераторы при их небольших размерах излучают относительно небольшую энергию. Поэтому поиск нового подхода к созданию источников мощных СВЧ-импульсов, в которых сочетаются компактность, характерная для твердотельных генераторов, и высокая излучаемая энергия, достигаемая за счет использования множества твердотельных элементов в одном устройстве, в отличие от СШП-генераторов, где используются единичные обострители, является актуальной задачей. В частности, интерес представляет подход, в котором СВЧ-мощность, формируемая в периодически расположенных обострителях, распределяется между некоторым количеством колебаний (более 10) за счет искусственной дисперсии в передающей линии [101]. Обычно в таком подходе рассматривают двухпроводные линии передачи.

1.5 Основные подходы к оптимизации

Проблема оптимизации сложных систем становится одной из основных в области искусственного интеллекта, потому что включает в себя всевозможные технические, социально-экономические и другие задачи [102]. Она часто представляется в виде целевой функции (ЦФ), которая задает соотношение внутренних и внешних параметров (притом, что задана она не всегда в аналитическом виде, а иногда даже в виде «черного ящика»), и некоторого набора начальных данных и ограничений на решение [103]. Для большого количества этих задач детерминированные методы решения не подходят или же не способны обеспечить необходимую степень точности [104]. Возникает потребность в другом подходе – в использовании эволюционных методов глобальной оптимизации

[105] и намеренном использовании элемента случайности в алгоритме поиска. При этом сама случайность будет применяться для накопления данных о поведении объекта исследования и управления. Основные достоинства этих методов [106, 107]: повышенное быстродействие; значительные надежность и помехоустойчивость; высокая робастность, т.е. малочувствительность к нерегулярностям поведения ЦФ, наличию случайных ошибок при вычислении функции; довольно простая внутренняя реализация; малая чувствительность к росту размерности множества оптимизации; возможность естественного ввода в процесс поиска операции обучения и самообучения; эвристические процедуры адаптации, получившиеся в рамках известных схем случайного поиска, для построения новых алгоритмов.

Оптимизация различных РЭС является ключевым этапом их проектирования, а основные подходы к оптимизации РЭС охватывают широкий спектр технологий и методов, нацеленных на улучшение их производительности, эффективности и надежности. Рассмотрим несколько основных направлений оптимизации современных РЭС.

1. Оптимизация энергопотребления

С учетом развития беспроводных технологий и мобильных устройств снижение энергопотребления РЭС является критически важным. Это включает в себя разработку эффективных методов управления энергией, оптимизацию работы беспроводных модулей и использование энергосберегающих компонентов.

2. Оптимизация частотного спектра

Подходы к оптимизации частотного спектра включают в себя методы управления полосой пропускания, алгоритмы динамического выделения частот и улучшение спектральной эффективности.

3. Оптимизация производительности

Для критичных РЭС важна оптимизация времени отклика, скорости передачи данных и общей производительности. Это может включать в себя оптимизацию алгоритмов обработки сигналов, улучшение методов модуляции и демодуляции.

4. Оптимизация антенных систем

Эффективность передачи и приема сигналов существенно зависит от конструкции антенн. Оптимизация антенных систем вклю-

чает в себя выбор подходящей формы и типа антенн, адаптацию к различным условиям распространения сигнала и минимизацию искажений.

5. Оптимизация систем управления

Управление РЭС требует эффективных алгоритмов и систем контроля. Оптимизация систем управления может включать в себя разработку адаптивных и интеллектуальных алгоритмов, способных к адаптации в условиях различных требований.

6. Оптимизация с учетом шумов и помех

Как отмечалось ранее, в условиях сложной электромагнитной обстановки различных РЭС важна оптимизация устройств с учетом возникающих шумов и помех (в т.ч. проблемы ПДЭМВ). Оптимизация по данному направлению включает в себя улучшение методов фильтрации сигналов и отношения сигнал/шум, а также повышение помехозащищенности от внешних воздействий.

1.6 Постановка цели работы

Из краткого обзора, приведённого ранее, следует, что, ввиду увеличения разновидностей и числа РЭС и стремления к их быстрой разработке и миниатюризации, проблема обеспечения ЭМС становится все более актуальной. В то же время из-за значительного увеличения влияния ЭМВ на функционирование РЭС ужесточаются требования к обеспечению ЭМС РЭС. Тенденция к этому возникает из-за конструктивного усложнения РЭС, роста верхних частот полезных и помеховых сигналов, увеличения плотности монтажа ПП, совершенствования возможностей генераторов преднамеренных ЭМВ, а также необходимости учёта взаимовлияний на уровнях элементов, блоков и систем [15].

Как уже отмечено, особое внимание уделяется кондуктивным помехам, распространяющимся по проводникам, например через сигнальные проводники или через цепи питания. Для защиты от них традиционно применяются защитные устройства (например, *LC*- и *RC*-фильтры, варисторы, разрядники, TVS-диоды), подсоединяемые к защищаемой цепи. Однако существуют кондуктивные помехи, длительность которых находится в наносекундном и суб-

наносекундном диапазоне (СКИ). При формировании СКИ из-за его малой длительности основная энергия генератора расходуется на увеличение его амплитуды [108]. Высокая амплитуда помехового импульса приводит к пробоем полупроводниковых приборов [109] и конденсаторов в помехоподавляющих фильтрах на сосредоточенных параметрах, а время срабатывания варисторов и разрядников может значительно превышать длительность СКИ [110], что делает их бесполезными. Кроме того, эти устройства способны ухудшить массогабаритные характеристики защищаемых РЭС. Наконец, при воздействии СКИ на оборудование энергия не успевает распределиться по элементам структуры. Из-за локализации энергии в одной точке увеличивается вероятность отказа в чувствительных областях. В связи с тем что повсеместно применяемые устройства защиты от помех могут оказаться неэффективными из-за особенностей СКИ различной природы в условиях современной электромагнитной обстановки, возникает необходимость в разработке новых защитных устройств.

Решением является применение технологии модальной фильтрации, принцип действия которой заключается в разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Это осуществимо в полосковых и кабельных структурах с неоднородным диэлектрическим заполнением, а само разложение достижимо из-за разности задержек мод, распространяющихся в этих структурах. Такие устройства называют МФ и меандровыми линиями задержки (или защитными меандрами). Условие полного разложения импульса в МФ длиной l заключается в том, чтобы общая длительность импульса t_{Σ} была меньше минимального модуля разности задержек мод $t_{\Sigma} < l_{\min} |\tau_i - \tau_k|$, $i, k = 1, \dots, N, i \neq k$, где $\tau_{i(k)}$ – погонная задержка $i(k)$ -й моды линии. В то же время при проектировании любого МФ целесообразна параметрическая и/или структурная оптимизация для улучшения их защитных характеристик. Первый вид оптимизации подразумевает изменение значений геометрических параметров поперечного сечения конкретного МФ (ширины проводников, расстояния между ними, толщины проводников и диэлектриков и др.), а второй – добавление дополнительных элементов в структуру МФ (проводников, дополнительных

диэлектрических слоев, вырезов и др.). В то время как структурная оптимизация часто выполняется эмпирическим путем (с использованием опыта практического моделирования и оптимизации), параметрическая оптимизация осуществима различными способами: от использования эвристического поиска (ЭП) до методов глобальной оптимизации (эволюционные алгоритмы, детерминированные и стохастические методы оптимизации и др.).

Исследования, посвященные разработке новых и совершенствованию существующих алгоритмов, критериев и подходов к оптимизации полосковых и кабельных МФ, ведутся авторами данной монографии на протяжении многих лет. Таким образом, целью публикации монографии является систематизация результатов многолетних исследований, посвященных различным подходам к оптимизации полосковых и кабельных структур с модальным разложением.