

На правах рукописи



Мелкозеров Александр Олегович

**АЛГОРИТМЫ, МЕТОДИКА И СИСТЕМА
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель – доктор технических наук
Газизов Тальгат Рашитович
(ТУСУР)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Тимченко Сергей Викторович
заведующий кафедрой прикладной математики и
информатики ТУСУРа

доктор технических наук профессор
Спицын Владимир Григорьевич
профессор кафедры вычислительной техники
Национального исследовательского
Томского политехнического университета

Ведущая организация – Омский государственный технический университет

Защита состоится 27 декабря 2012 г. в 15.15
на заседании диссертационного совета Д 212.268.02
при ТУСУРе по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 76.

Автореферат разослан 26 ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Мещеряков Р.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В проектировании таких сложных технических объектов, как космические аппараты (КА), обязательен учет требований по электромагнитной совместимости (ЭМС), которые постоянно повышаются с ростом плотности монтажа и верхней частоты спектра полезных и помеховых сигналов в бортовой аппаратуре (БА), а также с уменьшением уровней полезных и ростом уровней помеховых сигналов. Обеспечение ЭМС особенно актуально для перспективных КА. Их особенности (унифицированные электронные модули на основе технологии «система-на-кристалле», негерметичная конструкция, повышение срока активного существования до 15 лет и более), выбранные разработчиками в силу ряда их неопровержимых достоинств, ещё более затрудняют как обеспечение, так и моделирование ЭМС. Поэтому актуальна разработка программного обеспечения для математического моделирования ЭМС БА КА.

Вопросам моделирования ЭМС посвящены работы, выполненные под руководством таких исследователей, как Л.Н. Кечиев, К. Пауль, Т. Хюбиг, в т.ч. применительно к БА – В.Ю. Кириллов, С.Ф. Чермошенцев, к КА – Дж.А. Лукаш, П. Перез и Е.Д. Пожидаев.

При оптимизации задач ЭМС БА КА сложность заключается в большом количестве оптимизируемых параметров и локальных экстремумов целевой функции при ресурсоемкости и разнообразии задач анализа. Поэтому актуально создание усовершенствованных алгоритмов эволюционных стратегий (ЭС), способность которых эффективно оптимизировать зашумленные целевые функции с большим количеством параметров доказана теоретически.

Вопросам оптимизации посвящены работы, выполненные под руководством таких исследователей, как А. Оуэнс, Л.А. Растрингин, Л. Фогель, в т.ч. оптимизации эволюционными алгоритмами – Х.-Г. Байер, Л.И. Букатова, И. Рехенберг, Н. Хансен, Х.-П. Швэфель, оптимизации электродинамических задач эволюционными алгоритмами – И. Рахмат-Самии и К.Г. Христовулу.

Структурно-параметрическая оптимизация БА КА при существующих программно-аппаратных средствах затратна и предполагает наличие у разработчиков большого опыта работы с методами оптимизации. Для снижения требований к квалификации разработчиков в этой области актуальна разработка методики оптимизации задач ЭМС БА КА.

Цель работы – разработать алгоритмы, методику и программную систему компьютерного моделирования и оптимизации ЭМС БА КА.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- предложить для целевых функций с большим количеством параметров усовершенствованный алгоритм ЭС;
- разработать программную систему компьютерного моделирования и оптимизации задач ЭМС БА КА и выполнить её тестирование;
- предложить методику оптимизации ЭМС БА КА и провести её тестирование.

В работе применены: компьютерное и экспериментальное моделирование, детерминированный метод анализа ЭС, оптимизация посредством ЭС и генетическими алгоритмами, объектно-ориентированное программирование.

Достоверность результатов подтверждена использованием результатов на практике, их согласованностью с опубликованными результатами других авторов и с результатами вычислительных и натуральных экспериментов.

Научная новизна

1. Предложен усовершенствованный алгоритм эволюционной стратегии, отличающийся совместным использованием взвешенной мультирекомбинации и самоадаптации интенсивности мутации.

2. Получена формула для выбора параметра самообучения, который обеспечивает сходимость усовершенствованного алгоритма эволюционной стратегии к минимуму сферической модели целевой функции за минимальное количество поколений.

3. Впервые предложена методика оптимизации электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры космических аппаратов, которая позволяет с помощью разработанной программной системы выбирать алгоритмы, обеспечивающие оптимизацию задач электромагнитной совместимости за минимальное количество вычислений целевой функции.

4. Разработана программная система моделирования и оптимизации электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры космических аппаратов, отличающаяся от аналогов совокупностью применяемых математических моделей и методов оптимизации.

Практическая значимость

1. Разработан и внедрен аппаратно-программный комплекс для проведения анализа взаимовлияний электрических сигналов БА КА.

2. Расширены возможности программного обеспечения для имитационного моделирования ЭМС унифицированных электронных модулей БА КА, что позволило использовать его для разработки новых технологий ЭМС и выполнить с его помощью предварительный анализ блока радиотехнического.

3. Разработанная программная система внедрена в учебный процесс ТГУ и ТУСУРа и позволила сэкономить средства на приобретение лицензионного ПО.

4. Программная система позволила исследовать возможности использования модальных явлений и запатентовать ряд устройств на их основе.

Использование результатов

1. НИР «Исследование научно-технических принципов и изыскание инженерно-технических решений по созданию широкодиапазонных быстроразворачиваемых антенн ДКМВ диапазона» (отчёт по НИР, тема «Крюшон-Т», хоздоговор 1402, Томск, 2003). Патент на полезную модель.

2. Проект «Разработка системы компьютерного моделирования электромагнитной совместимости» (акт №31315 ввода в эксплуатацию по мероприятию 3.1.3а инновационной программы ТУСУРа, 2006 г. и свидетельство об отраслевой регистрации разработки №8376).

3. Составная часть ОКР «Разработка и поставка аппаратно-программного комплекса для проведения анализа взаимовлияний электрических сигналов бортовой аппаратуры» (шифр «АПК-ТУСУР», хоздоговор 28/08 от 14.04.2008).

4. Подготовка и написание нормативного документа и двух национальных стандартов, изготовление и поставка 12 макетов модальных фильтров для защиты сети Fast Ethernet от сверхкоротких импульсов (хоздоговор НИИЦ/НИР/10-01 от 15.01.2010 с ФГУП «ЦентрИнформ», г. Санкт-Петербург).

5. ОКР «Разработка комплекса программных и технических средств для контроля информационных магистралей, обеспечения электромагнитной совместимости и исследования надежности унифицированного ряда электронных модулей на основе технологии "система-на-кристалле" для систем управления и электропитания космических аппаратов связи, навигации и дистанционного зондирования Земли с длительным сроком активного существования» (тема «УЭМ-ТУСУР», хоздоговор №95/10 от 24.11.2010 г.).

6. Учебный процесс Томского государственного университета: целевая подготовка магистрантов физико-технического факультета по программе «Космические промышленные системы» для предприятия «Газпром космические системы», г. Королев.

7. Учебный процесс ТУСУРа: моделирование и оптимизация структур проводников и диэлектриков студентами радиотехнического факультета.

Апробация результатов. Результаты исследований автора позволили победить в конкурсах грантов и успешно выполнить по ним проекты:

1. «Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков с графическим интерфейсом пользователя» – грант ТУСУРа, 2003 г.

2. «Автоматизированное проектирование оптимальных широкополосных антенн с сосредоточенными нагрузками» – грант ТУСУРа, 2005 г.

3. «Исследование новых модальных явлений в структурах многопроводных линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением» – грант РФФИ 2006 г., проект 06-08-0124.

4. «Создание программного обеспечения для синтеза и оптимизации эволюционными стратегиями в задачах ЭМС» – программа «У.М.Н.И.К.» Фонда СРМФП в НТС, 2010–2012 гг.

5. «Теоретический анализ эволюционных стратегий для эллиптической модели целевой функции» – грант РФФИ 2012 г., проект 12-01-31110 (выполняется).

6. «Алгоритмы, комплекс программ и методика оптимизации ЭМС БА перспективных КА эволюционными стратегиями» – стипендия Президента РФ молодым ученым и аспирантам, 2012 г. (выполняется).

Результаты работы докладывались и представлялись в материалах следующих конференций: Всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2003, 2004, 2005, 2010, 2012; Всерос. научно-практ. конф. «Проблемы инф. безопасности государства, общества и личности», г. Томск, 2004, 2005; Межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2004, 2005; Всерос. научно-практ. конф. молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники», г. Красноярск, 2004; Межд. симпозиум по электромагн. совместимости и электромагн. экологии, г. Санкт-Петербург, 2005, 2007, 2011; Межд. конф. по генетическим и эволюционным вычислениям, 2008, г. Атланта, США, 2009,

г. Монреаль, Канада, 2010, г. Портланд, США, 2011, г. Дублин, Ирландия; Межд. конф. PPSN, г. Дортмунд, Германия, 2008; Межд. семинар «Теория эволюционных алгоритмов», г. Вадерн, Германия, 2008 и 2010 гг.; Межд. конф. по защите от молний ICLP, г. Кальяри, Италия, 2010, г. Вена, Австрия, 2012; Межд. конф. EUROEM, г. Тулуза, Франция, 2012.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 44 работы (5 работ без соавторов), в т.ч. 4 статьи в журналах из перечня ВАК, 10 работ в трудах зарубежных конференций, 4 патента на полезную модель и 3 патента на изобретение; 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 главы, заключение, список литературы из 125 наим., приложения. Объём диссертации составляет 209 с., в т.ч. 62 рис. и 10 табл. В гл. 1 выполнен обзор проблемы моделирования и оптимизации ЭМС БА КА. Гл. 2 посвящена анализу усовершенствованного алгоритма ЭС, а также содержит описание геометрических моделей конструктивных элементов печатных плат и корпусов БА КА. В гл. 3 описана программная реализация системы компьютерного моделирования и оптимизации ЭМС БА КА, в том числе модуля ЭС и алгоритма неявного фильтрования. В гл. 4 представлена методика оптимизации ЭМС БА КА и результаты её применения для решения практических задач оптимизации. В заключении сделаны выводы по работе. Далее приведён список литературы. В приложениях представлены копии подтверждающих документов.

Личный вклад. Все результаты работы получены автором лично или при непосредственном его участии. Постановка задач по теоретическому анализу ЭС выполнена под руководством Х.-Г. Байера, вывод формул и программная реализация ЭС выполнены автором лично. Программная реализация ядра, интерпретатора языка скриптов, графического клиента, модулей утилит системы компьютерного моделирования и оптимизации ЭМС БА КА выполнена автором лично, вычислительных модулей – под руководством Т.Р. Газизова совместно с А.М. Заболоцким и С.П. Куксенко. Постановка практических задач оптимизации выполнена совместно с Т.Р. Газизовым. Реализация целевых функций и экспериментальные исследования выполнены автором лично при участии Х.-Г. Байера и А.М. Заболоцкого. Обзор систем электродинамического моделирования выполнен совместно с С.П. Куксенко. Экспериментальное исследование точности результатов имитационного моделирования проведено совместно с А.М. Заболоцким и М.К. Смирновой. Оптимизация параметров математической модели резистора выполнена автором совместно с И.Ф. Калимулиным.

Положения, выносимые на защиту

1. Выбор параметра самообучения по полученной формуле обеспечивает более быструю (в среднем в 1,1–3,8 раза) сходимость усовершенствованной эволюционной стратегии к минимуму сферической модели целевой функции с числом параметров 2–100 по сравнению со стандартной эволюционной стратегией.

2. Методика оптимизации электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры космических аппаратов позволяет с помощью разработанной

программной системы выбирать алгоритмы, обеспечивающие оптимизацию задач за минимальное количество вычислений целевой функции.

3. Программная система обеспечивает, за счет реализованных моделей (двух- и трехмерные квазистатические модели сложных структур проводников и диэлектриков, электродинамические модели проводных структур) и алгоритмов, моделирование конструктивных элементов бортовой аппаратуры космических аппаратов и позволяет добавлять новые модели и алгоритмы без перекомпиляции.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Достоверное и эффективное математическое моделирование ЭМС БА КА подразумевает использование нескольких видов анализа, в наилучшем случае, всех трех: схемного, квазистатического и электродинамического. В первой части главы выполнен обзор существующих программных продуктов для электродинамического моделирования, основанных на методе моментов (Concept, FEKO, EMC Studio, WIPL-D, Singula, IE3D), методе конечных разностей во временной области (QuickWave, Concerto, Semcad-X, EMPIRE, XFDTD, GEMS, Fidelity), методе матрицы линий передачи (CST Microstripes, MEFiSTo), методе конечных элементов (HFSS), методе конечного интегрирования (CST Microwave Studio) и других методах (ЭДЭМ, KARAT).

Вторая часть главы посвящена обзору ЭС, их истории, описанию канонических вариантов ЭС и методов их анализа.

2. АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В первой части главы для задач оптимизации ЭМС БА КА с большим количеством переменных предложен усовершенствованный алгоритм эволюционной стратегии. Во второй части главы представлены разработанные геометрические модели конструктивных элементов печатных плат и корпусов БА КА и процедура моделирования ЭМС БА КА.

2.1 Теоретический анализ эволюционной стратегии с взвешенной рекомбинацией и самоадаптацией интенсивности мутации для сферической модели целевой функции

Усовершенствованный алгоритм ЭС отличается совместным использованием взвешенной рекомбинации (строка 12 рис. 2.1) и самоадаптации интенсивности мутации и устраняет недостаток стандартной ЭС с усредняющей рекомбинацией и самоадаптацией интенсивности мутации, которая генерирует в каждой итерации λ точек-потомков, но использует в следующей итерации только $\mu < \lambda$ лучших из них.

1 $\sigma^{(0)} \leftarrow \sigma_{init}, \mathbf{y}^{(0)} \leftarrow \mathbf{y}_{init}$	8 $\tilde{F}_l \leftarrow F(\tilde{\mathbf{y}}_l)$
2 $g = 0$	9 конец
3 выполнять	10 $\tilde{\mathbf{F}}_{sort} \leftarrow \text{сортировать}(\tilde{F}_{1..l})$
4 цикл $l = 1, \dots, \lambda$ начать	11 $\sigma^{(g+1)} \leftarrow \frac{1}{\mu} \sum_{m=1}^{\mu} \tilde{\sigma}_{m;\lambda}$
5 $\tilde{\sigma}_l \leftarrow \sigma^{(g)} e^{\tau N_l(0,1)}$	12 $\mathbf{y}^{(g+1)} \leftarrow \mathbf{y}^{(g)} + \sigma^{(g+1)} \sum_{l=1}^{\lambda} \omega_{l;\lambda} \tilde{\mathbf{z}}_{l;\lambda}$
6 $\tilde{\mathbf{z}}_l \leftarrow \mathbf{N}_l(\mathbf{0}, \mathbf{I})$	13 $g = g + 1$
7 $\tilde{\mathbf{y}}_l \leftarrow \mathbf{y}^{(g)} + \tilde{\sigma}_l \tilde{\mathbf{z}}_l$	14 пока условие завершения ложно

Рис. 2.1. ЭС с взвешенной рекомбинацией и самоадаптацией интенсивности мутации

Для предложенной ЭС и сферической модели целевой функции $F(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^N a_i y_i^2$ (N – размерность пространства поиска) получена формула для расчета оптимального значения параметра самоадаптации τ

$$\tau_{opt} = \sqrt{\frac{W_\lambda}{N(2e_{\mu,\lambda}^{1,0} - 2e_{\mu,\lambda}^{1,1} - 1)}}, \quad (1)$$

где $W_\lambda = (e_{l-1;\lambda}^{0,1})^2$. Коэффициенты прогресса $e_{\mu;\lambda}^{a,b}$ вычисляются по формуле

$$e_{\mu;\lambda}^{a,b} = \frac{\lambda - \mu}{\sqrt{2\pi}^{a+1}} \binom{\lambda}{\mu} \int_{-\infty}^{+\infty} t^b e^{-\frac{a+1}{2}t^2} \Phi(t)^{\lambda-\mu-1} (1-\Phi(t))^{\mu-a} dt, \quad (2)$$

где $\Phi(t)$ – функция нормального распределения, μ и λ – количество родителей и потомков.

Рассчитанные по (1) значения τ при сборе данных (усредненные по 100 запускам) для рис. 2.2, где приведена зависимость количества итераций G алгоритма ЭС, необходимых для достижения $F(\mathbf{y}) < 10^{-10}$, от числа параметров N .

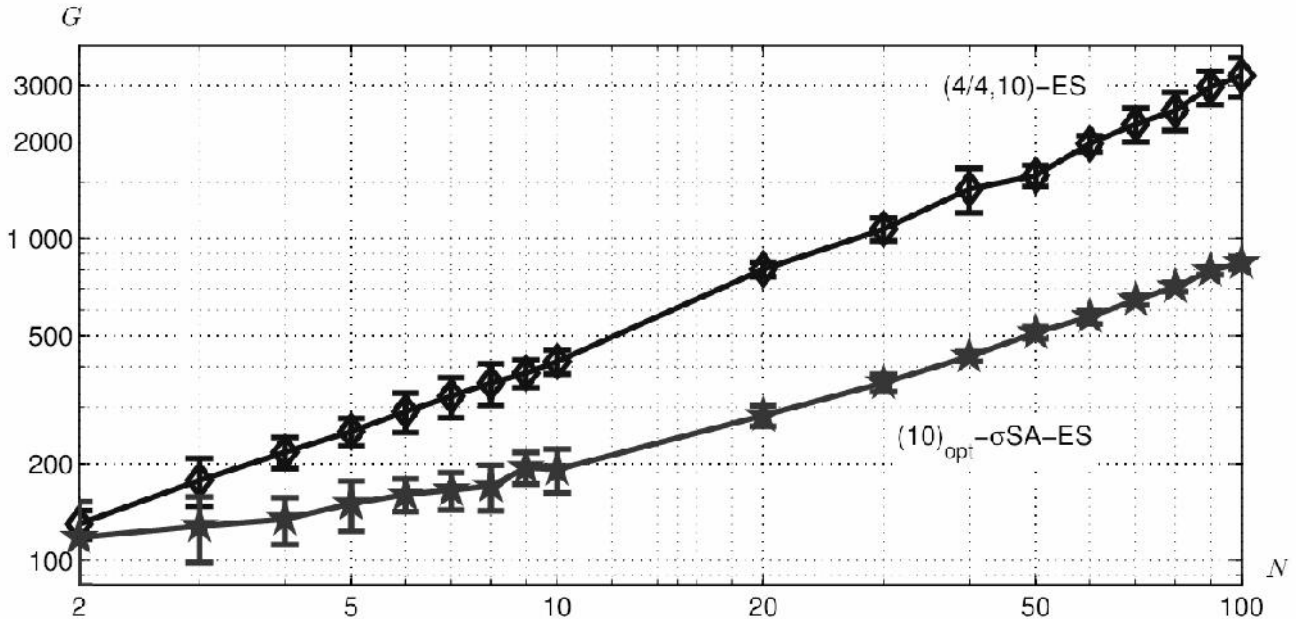


Рис. 2.2. Количество итераций предложенной (*) и стандартной (◇) ЭС в зависимости от N

Из рис. 2.2 следует, что предложенная ЭС сходится к минимуму сферической модели целевой функции с числом параметров 2–100 в среднем в 1,1–3,8 раза быстрее по сравнению со стандартной ЭС.

2.2 Разработка геометрических моделей конструктивных элементов печатных плат и корпусов бортовой аппаратуры космических аппаратов для квазистатического и электродинамического анализа электромагнитной совместимости

Для анализа ЭМС в работе применяются следующие модели: двух- и трехмерные квазистатические модели сложных структур проводников и диэлектриков и трехмерные электродинамические модели проводных структур. Данные алгоритмические модели накладывают требования на формат представления входных данных, который отличается от форматов данных, используемых ПО для проектирования БА КА. Поэтому разработаны геометрические модели, которые обеспечивают представление исходных данных о геометрии ПП и корпусов БА КА в форме, пригодной для обработки алгоритмами анализа ЭМС.

2.3 Моделирование электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры космических аппаратов

Процедура моделирования ЭМС БА КА для печатных плат (ПП) БА КА схематично показана на рис. 2.3.

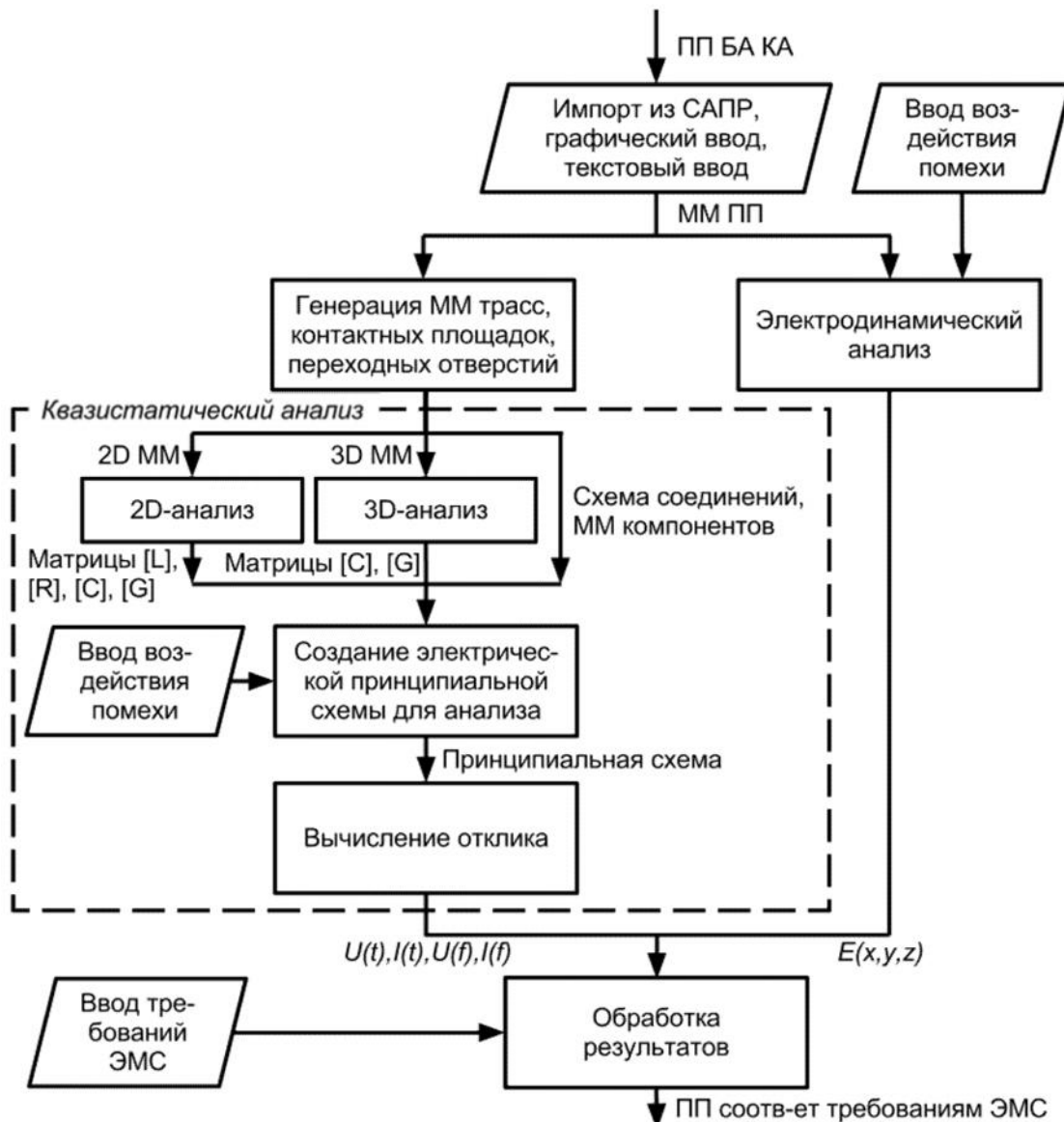


Рис. 2.3. Процедура моделирования ЭМС БА КА

На вход процедуры подаются данные о геометрии, компонентах и материалах ПП блока БА КА, которые либо вводятся пользователем с помощью средств графического или текстового ввода, либо импортируются из файлов формата САПР ПП. Введенная геометрическая математическая модель (ММ) ПП подается на вход двух блоков: блока электродинамического анализа и блока генерации ММ трасс, контактных площадок и переходных отверстий.

В случае электродинамического анализа пользователь вводит воздействие помехи, после чего выполняются тонкопроводная аппроксимация трасс ПП и электродинамический анализ полученной структуры. Результатом анализа являются значения E напряженности электрического поля в заданных точках ПП. Для этих точек пользователем задаются пороговые значения E_{\max} , которые в блоке обработки результатов сравниваются с расчетными. Если $E < E_{\max}$ для всех заданных точек, то анализируемая ПП удовлетворяет требованиям ЭМС по максимальным значениям напряженности электрического поля.

В случае квазистатического анализа выполняется генерация двумерных геометрических ММ отрезков трасс ПП и трехмерных геометрических ММ контактных площадок и переходных отверстий, а также подготовка схемы соединений и ММ компонентов. Геометрические модели анализируются с целью получения матриц параметров. Затем, с учетом введенного пользователем воздействия помехи, создается электрическая принципиальная схема, для которой вычисляются временной и частотный отклики. В блоке обработки результатов полученные значения $U(t)$, $I(t)$, $U(f)$, $I(f)$ сигналов в узлах принципиальной схемы сравниваются с заданными пользователем пороговыми значениями. Если для всех временных и частотных точек значения $U(t)$, $I(t)$, $U(f)$, $I(f)$ не превышают пороговых, то анализируемая ПП удовлетворяет требованиям ЭМС по максимальным значениям амплитуды сигналов.

3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В главе приведено описание выполненной автором реализации программной системы TALGAT (далее система TALGAT).

3.1 Структура системы

В системе TALGAT действие пользователя над элементом графического интерфейса или ввод текстовой команды преобразуется клиентом системы (исполняемый файл, запускаемый пользователем для начала работы с системой – QtClient.exe или BasiClient.exe) в текстовую команду и передается ядру системы (TLCORE.dll). Ядро системы распознает команду и вызывает ее обработчик, размещенный в соответствующем модуле системы.

3.2 Ядро системы

Представлена реализованная автором структура классов ядра системы TALGAT. Клиенты системы работают с вычислительными модулями через реентерабельные методы классов ядра. Создание нескольких потоков выполнения

с экземплярами классов ядра обеспечивает параллельное вычисление целевых функций на многоядерных процессорах.

3.3 Язык скриптов

Приведено описание встроенного в ядро системы TALGAT языка скриптов с возможностью создания новых команд и поддержкой переменных.

3.4 Динамические модули

Рассмотрена реализация динамических модулей системы TALGAT на примере модуля матричных операций. Описана процедура загрузки модуля, представлены диаграммы взаимодействий во время обработки команд.

При загрузке модули регистрируются в ядре программной системы новые команды, которые затем вызываются через функторы, за счет чего обеспечивается добавление новых моделей и алгоритмов без перекомпиляции.

3.5 Клиенты системы

Описан клиент командной строки и графический клиент системы TALGAT, представлены схемы алгоритма графического потока и алгоритма потока ядра для многопоточной версии графического клиента.

3.6 Тестирование системы

Проведено экспериментальное исследование точности результатов математического моделирования путем сравнения результатов моделирования ПП БА КА с результатами натурального эксперимента. Форма вычисленных сигналов согласуется с результатами натурального эксперимента, различие в амплитуде составляет менее 15%. Выполнено сравнение результатов электродинамического анализа в системах TALGAT и CST MWS на примере корпуса БА КА. В диапазоне частот 0,1...2 ГГц вычислены частотные зависимости входного импеданса несимметричного вибратора длиной 12 см, расположенного в центре корпуса БА. Вычисленные в системах TALGAT и CST MWS значения резонансных частот модуля входного импеданса отличаются не более чем на 12%.

Выполнен анализ одиночной микрополосковой линии и дифференциальной пары. Для параметров полосковой линии и дифференциальной пары получены контурные графики зависимости волнового сопротивления, с помощью которых можно выбрать такие значения параметров, которые соответствуют требуемому волновому сопротивлению.

Таким образом, программная система обеспечивает, за счет реализованных моделей и алгоритмов, моделирование конструктивных элементов бортовой аппаратуры космических аппаратов.

3.7 Программная реализация модуля эволюционных стратегий

Рассмотрена программная реализация модуля ЭС, в т.ч. функциональный состав модуля, принцип работы, представление целевой функции в виде созданной пользователем команды на языке скриптов. Выполнено тестирование реализации путем сравнения с опубликованными результатами. Разработан алгоритм параллельного вычисления целевой функции. Выполнено тестирование алгоритма на задачах оптимизации параметров полосковой линии и нагрузок проводной антенны: для двух потоков выполнения получено сокращение вре-

мени оптимизации соответственно в 1,85 и 1,75 раза (в среднем по 10 независимым запускам) по сравнению с однопоточным алгоритмом.

4. МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В главе представлена методика оптимизации ЭМС БА КА, которая была предложена для разрабатываемых на ОАО «ИСС» УЭМ БА КА и апробирована на ряде примеров оптимизации параметров: полосковых линий, ММ резистора, многопроводной линии передачи, а также структурной оптимизации многокаскадного модального фильтра. Методика применима и для более широкого круга задач ЭМС, что показано на примере решения задачи оптимизации сосредоточенных нагрузок проводных антенн.

Методика состоит из следующих этапов:

1. Создание ММ составной части УЭМ БА КА (описание с помощью языка скриптов, графический ввод или импорт из формата САПР).

2. Проверка корректности ММ путем моделирования в диапазоне параметров и сравнения результатов моделирования с контрольными значениями (в качестве контрольных значений используются результаты измерений, опубликованные данные, результаты моделирования в других программных продуктах, вычисления по аналитическим формулам).

3. Определение критерия оптимальности параметров ММ (в случае нескольких критериев необходимо либо выполнить скаляризацию задачи оптимизации, либо использовать алгоритмы многокритериальной оптимизации).

4. Разработка целевой функции (ЦФ) в виде динамической команды языка скриптов системы TALGAT с повторным использованием кода ММ (в качестве результата ЦФ должна возвращать вещественное число).

5. Исследование характеристик и оценка сложности ЦФ путем сбора статистических данных о свойствах ЦФ, построения одномерных или двумерных графиков зависимости значений ЦФ от одного или двух параметров при фиксированных остальных параметрах (фиксированные значения параметров выбираются либо на основании экспертных рекомендаций, либо из середины диапазона допустимых значений; при необходимости, в частности, в случае большой сложности рельефа ЦФ, большого количества локальных экстремумов используется несколько наборов фиксированных значений).

6. Обработка ограничений ЦФ: в задачах ЭМС в большинстве случаев параметры имеют двусторонние ограничения, которые могут обрабатываться с помощью штрафных функций или функций-декодеров (если границы значений различных параметров отличаются на несколько порядков, для алгоритмов оптимизации с адаптивным шагом может применяться преобразование значений параметров ЦФ в диапазон $[0,1]$ с целью ускорения сходимости на первоначальном этапе оптимизации).

7. Выбор начальной точки поиска: использование генераторов случайных чисел, выборки латинского гиперкуба, рекомендаций экспертов, результатов

предыдущих запусков алгоритма оптимизации, полученных на этапе 5 сведений о рельефе ЦФ (для таких популяционных алгоритмов оптимизации, как ЭС и ГА возможен выбор нескольких начальных точек поиска).

8. Выбор алгоритма оптимизации на основании характеристик ЦФ, результатов запусков алгоритмов оптимизации для небольшого количества итераций или упрощенных версий ЦФ (упрощение выполняется путем фиксации параметров, снижения точности ММ, использования менее точных алгоритмов моделирования и решения СЛАУ, уменьшения количества рассматриваемых точек в случае применения в ЦФ анализа во временном или частотном диапазоне).

9. Подбор параметров алгоритма оптимизации: использование рекомендованных в литературе значений, выбор значений на основании эмпирических данных, вычисление по аналитическим формулам, автоматический выбор параметров, реализуемый за счет использования эволюционных алгоритмов).

10. Запуск алгоритма оптимизации: если используемый компьютер имеет многоядерную и/или многопроцессорную архитектуру, то система TALGAT позволяет сократить время оптимизации за счет вычисления целевой функции в несколько потоков.

11. Анализ полученного решения задачи оптимизации: при необходимости, построение графиков изменения значений ЦФ в процессе оптимизации для оценки сходимости алгоритма оптимизации, статистический анализ чувствительности найденного оптимального решения к отклонениям реальных параметров от расчетных, например, с помощью метода Монте-Карло.

Так как отдельные этапы приведенной методики оптимизации ЭМС БА КА тесно взаимосвязаны, допускается их выполнение в другой последовательности, а также возврат к предыдущим этапам в случае выявления в процессе работы над отдельными этапами новых сведений о характеристиках ЦФ, поведении алгоритма оптимизации и т.п.

С помощью предложенной методики оптимизации получена оптимальная конфигурация полосковой линии (за 45 вычислений целевой функции получена разница емкостной и индуктивной связей для подвешенной и обращенной полосковой линий менее 10^{-3}) и оптимальные параметры нагрузок широкодиапазонной быстроразворачиваемой модифицированной вибраторной антенны (за 900 вычислений целевой функции максимальный КСВ в диапазоне 10–30 МГц снижен с 11,4 до 6,36). Для данных задач выполнено сравнение производительности НФ, ГА, предложенной в работе ЭС, стандартной ЭС и ЭС с адаптацией ковариационной матрицы, которое показало, что для оптимизации параметров полосковой линии целесообразно использовать алгоритм НФ, а для оптимизации параметров антенной структуры – ЭС с адаптацией ковариационной матрицы. Для первой задачи с помощью ЭС автоматически выбран набор параметров алгоритма НФ, который при одинаковом бюджете вычислений целевой функции обеспечил более высокую точность решения задачи по сравнению с исходными параметрами НФ.

Выполнена оптимизация параметров широкополосной ММ низкочастотного резистора с помощью ЭС с адаптацией ковариационной матрицы. За 10^4 вы-

числений целевой функции получено среднеквадратичное отклонение $2,23 \cdot 10^{-4}$ от экспериментального модуля коэффициента отражения в диапазоне до 20 ГГц. Выполнена оптимизация конфигурации многопроводной линии передачи с числом проводников от 3 до 9, требуемый характеристический импеданс с погрешностью менее 1 Ом получен менее чем за $1,2 \cdot 10^4$ вычислений целевой функции. Рассмотрена задача структурной и параметрической оптимизации многокаскадного модального фильтра по двум критериям, синтезированы модальные фильтры с улучшенными характеристиками по сравнению с фильтрами, предложенными на основе экспертной оценки.

Таким образом, предложенная методика позволяет с помощью разработанной программной системы выбирать алгоритмы, обеспечивающие оптимизацию задач за минимальное количество вычислений целевой функции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационной работы получены оригинальные результаты одновременно из трех областей исследований по паспорту специальности 05.13.18:

1. **Комплекс программ:** разработана система компьютерного моделирования (система TALGAT для моделирования ЭМС БА КА).

2. **Численные методы:** реализованы эффективные численные методы и алгоритмы (ГА, алгоритм неявного фильтрования, усовершенствованные ЭС) в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента (по моделированию и оптимизации ЭМС БА КА).

3. **Математическое моделирование:** предложена методика оптимизации ЭМС БА перспективных КА с применением современной технологии математического моделирования (компьютерное моделирование).

Результаты диссертации внедрены на ФГУП «ЦентрИнформ» и ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», а также в учебный процесс ТГУ и ТУСУРа. Совокупность полученных результатов, широко опубликованных, апробированных и внедренных, позволяет считать цель работы достигнутой. Таким образом, в диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача создания алгоритмов, комплекса программ и методики для математического моделирования и оптимизации ЭМС БА КА численными методами, имеющая существенное значение для отечественной ракетно-космической отрасли.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Мелкозеров А.О. Методика оптимизации электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры перспективных космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. №9/3. – С. 91–95.
2. Мелкозеров А.О. Структурная оптимизация многокаскадного модального фильтра по двум критериям/ А.О. Мелкозеров, И.Е. Сомотин, Р.И. Аширбакиев// Доклады ТУСУРа. 2010. №2(22), ч. 1. С. 70–72.

3. Лежнин Е.В. Улучшение пользовательского интерфейса системы TALGAT/ Е.В. Лежнин, А.О. Мелкозеров// Доклады ТУСУРа. 2011. №2(24), ч. 1. С. 137–140.
4. Газизов Т.Р. Компьютерное моделирование сложных структур проводников при проектировании телевизионно-вычислительных систем/ Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко// Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – №10. – С. 63–66.

Тезисы и доклады в зарубежных конференциях

5. Melkozerov A.O. On the Analysis of Self-Adaptive Evolution Strategies on Elliptic Model: First Results/ A.O. Melkozerov, H.-G. Beyer// In: GECCO '10: Proc. of the 11th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, pp. 369–376. Portland, USA (2010).
6. Beyer H.-G. Mutative σ -Self-Adaptation Can Beat Cumulative Step Size Adaptation when Using Weighted Recombination/ Beyer, H.-G., Melkozerov A.O.// In: GECCO '08: Proc. of the 9th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, pp. 487–494, Atlanta, GA, USA, ACM (2008).
7. Beyer H.-G. σ -Self-Adaptive Weighted Multirecombination Evolution Strategy with Scaled Weights on the Noisy Sphere/ Beyer, H.-G., Melkozerov A.O.// In: Proc. of the 10th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN 2008), pp. 11–20, Berlin, 2008, Springer.
8. Arnold D.V. On the Behaviour of Weighted Multi-recombination Evolution Strategies Optimising Noisy Cigar Functions/ Arnold, D.V., Beyer, H.-G., Melkozerov A.O.// In: GECCO '09: Proc. of the 10th Annual Conf. on Genetic and Evolutionary Computation, pp. 483–490. Montreal, Canada, ACM (2009).
9. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M., Melkozerov A.O., Samotin I.E. Simple and free mitigation of short pulse lightning effects by flat power cables // Proc. of 30-th Int. conf. on lightning protection. Sept. 13–17, 2010. Cagliari, Italy, pp. 993-1–993-3.
10. Gazizov T.R., Samotin I.E., Melkozerov A.O., Zabolotsky A.M. Design of printed modal filters for computer network protection // там же, pp. 1246-1–1246-3.
11. Finck S. Noisy optimization: a theoretical strategy comparison of ES, EGS, SPSA & IF on the noisy sphere/ Finck S., Beyer H.-G., Melkozerov A.O.// In: GECCO '11: Proc. of the 12th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. Dublin, Ireland (2011), pp. 813–820.
12. T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, A.O. Melkozerov, P.E. Orlov, I.G. Bevzenko, E.S. Dolganov. Evaluations of Protection Methods Using TVS-array and Modal Filter// Book of abstracts EUROEM 2012. Toulouse, France, p. 106.
13. T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, A.O. Melkozerov, E.S. Dolganov, P.E. Orlov. Analysis of power dissipation in resistive terminations of single- and multistage modal filters. // Proc. of 31-th Int. conf. on lightning protection. Vienna, Austria (2012).
14. T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, A.O. Melkozerov, E.S. Dolganov, P.E. Orlov. Improved design of modal filter for electronics protection. // там же.

Патенты и свидетельства

15. Патент РФ на полезную модель №66613. Малютин Н.Д., Газизов Т.Т., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Р., Лошилов А.Г., Семенов Э.В., Рыбин А.П. Широкополосная антенная система для работы в декаметровом диапазоне. Заявка №2007114313. Приоритет полезной модели 16 апреля 2007 г. Опубликовано 10.09.2007 Бюл. №25.
16. Патент РФ на полезную модель №79355. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Модальный фильтр. Заявка №2008127527/22(033781). Приоритет полезной модели 07.07.2008. Опубликовано 27.12.2008 Бюл. №36.
17. Патент РФ на полезную модель №79213. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Устройство воздействия на аппаратуру. Заявка №2008127574/22(033831). Приоритет полезной модели 07.07.2008. Опубликовано 20.12.2008 Бюл. №35.
18. Патент РФ на полезную модель. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Устройство модального зондирования. Заявка №2008127580/22(033837). Приоритет полезной модели 07.07.2008.
19. Патент РФ на изобретение №2386964. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Орлов П.Е., Самотин И.Е., Бевзенко И.Г., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Устройство обнаружения, идентификации и диагностики многопроводных линий передачи. Заявка №2009108905/28(011919). Приоритет изобретения 10.03.2009. Опубл. 20.04.2010 Бюл. №11.
20. Патент РФ на изобретение №2431912. Газизов Т.Р., Бевзенко И.Г., Мелкозеров А.О., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Устройство для нарушения работы аппаратуры за счет разложения и восстановления импульсов. Заявка №2010108518/07(012013). Приоритет изобретения 9.03.2010. Опубликовано 20.10.2011 Бюл. №29.
21. Патент РФ на изобретение №2431897. Газизов Т.Р., Бевзенко И.Г., Мелкозеров А.О., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Устройство защиты от импульсных сигналов. Заявка №2010108520/07(012016). Приоритет изобретения 9.03.2010. Опубликовано 20.10.2011 Бюл. №29.
22. Свид. об отраслевой регистрации разработки №8376 от 24.05.2007 г. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков TALGAT.
23. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009614871. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., TALGAT 2008. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 8 сентября 2009 г.

24. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010613497. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П. TALGAT 2009. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 28 мая 2010 г.
25. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012610712. Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., Аширбакиев Р.И., Вершинин Е.А., Салов В.К., Лежнин Е.В. TALGAT 2010. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 13 января 2012 г.

Тезисы и доклады в отечественных изданиях

26. Мелкозеров А.О. Применение методов обобщенного программирования в разработке системы компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков/ А.О. Мелкозеров// Матер. научно-технической конф. студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2003», 13–15 мая 2003 г. – Томск, 2003. – В трех частях. – Ч. 1. – С. 117–120.
27. Мелкозеров А.О. Исследование точности вычисления емкостных матриц конфигурации из двух проводов малого диаметра/ А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов// Матер. Всерос. научно-техн. конф. молодых ученых и студентов «Совр. проблемы радиоэлектроники». – Красноярск, 2004. – С. 669–672.
28. Мелкозеров А.О. Реализация генетического алгоритма в системе компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков/ А.О. Мелкозеров// Матер. Всерос. научно-техн. конф. студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2004», 18–20 мая 2004 г. – Томск, 2004. – В трех частях. – Ч. 1. – С. 105–107.
29. Мелкозеров А.О. Структурно-параметрическая оптимизация генетическими алгоритмами/ А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов// Матер. Всерос. научно-практ. конф. «Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности», 2–4 июня 2004 г. – Томск, 2004. – С. 122–124.
30. Малютин Н.Д. Широкодиапазонные приемопередающие комбинированные антенны. Принципы построения. Решение внутренней задачи/ Н.Д. Малютин, Л.Я. Серебренников, А.О. Мелкозеров, Г.Г. Гошин, А.П. Рыбин, А.Г. Лоцилов, Т.Р. Газизов, Т.Т. Газизов, Э.В. Семенов, А.В. Семенов// Матер. Международной научно-практической конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 6–8 октября 2004 г. Томск: Издательство Института оптики атмосферы СО РАН, 2004 – С. 107–111.
31. Мелкозеров А.О. Структурная оптимизация генетическими алгоритмами системы полуволновых диполей/ А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов// Матер. Всерос. научно-практ. конф. «Проблемы инф. безопасности государства, общества и личности», 16–18 февраля 2005 г. – Томск, 2005. – С. 57–61.
32. Газизов Т.Т. Электродинамическое моделирование произвольных проводных структур/ Т.Т. Газизов, Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров// там же. С. 47–51.
33. Мелкозеров А.О. Исследование точности нахождения оптимальных параметров полосковых линий с помощью генетических алгоритмов/ А.О. Мелкозеров// Матер. Всерос. научно-техн. конф. студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2005», 26–28 апреля 2005 г. – Томск, 2005 – В четырех частях. – Ч. 1. – С. 126–129.

34. Газизов Т.Р. Комплексная оптимизация генетическими алгоритмами для обеспечения ЭМС (Статья)/ Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко// 6-й Междунар. симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: сб. науч. докл. / г. Санкт-Петербург, 21–24 июня 2005 г. – С. 160–164.
35. Газизов Т.Т. Автоматизированное проектирование оптимальных антенн с сосредоточенными нагрузками/ Т.Т. Газизов, А.О. Мелкозеров// Матер. Международной научно-практической конф. «Электронные средства и системы управления», 12–14 октября 2005 г. – Томск, 2005 – С. 149–152.
36. Газизов Т.Р. Возможности применения новых модальных явлений в целях электромагн. терроризма и для защиты от него (Статья)/ Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко, Е.П. Горин, И.Г. Бевзенко// 7-й Междунар. Симп. по электромагнитной совместимости и электромагн. экологии: сборник трудов / Санкт-Петербург, 26–29 июня 2007 г. – С. 266–269.
37. Газизов Т.Р. Система комп. моделирования сложных структур проводников и диэлектриков TALGAT / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко, И.С. Костарев// Компьютерные учебные программы и инновации. М: ГОСКООРЦЕНТР, МФЮА, РУИ. – 2007. – №10. – С. 89–90.
38. Мелкозеров А.О. Реализация модуля эволюционных стратегий в системе комп. моделирования сложных структур проводников и диэлектриков/ А.О. Мелкозеров// Научная сессия ТУСУР-2010: Матер. докладов Всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 4–7 мая 2010 г.: В пяти частях. Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2010. С. 160–163.
39. Газизов Т.Р. Защита от кондуктивных помех на основе модальной фильтрации: состояние дел и перспективы/ Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, П.Е. Орлов, И.Г. Бевзенко, Е.С. Долганов, Р.И. Аширбакиев// 9-й Междунар. Симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: сборник трудов / Санкт-Петербург, 13–16 сентября 2011 г. – С. 261–264.
40. Газизов Т.Р. Квазистатический анализ многопроводных электрических соединений в системе TALGAT/ Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Р.И. Аширбакиев// там же. С. 265–268.
41. Салов В.К. Ускорение вычислений в задачах моделирования ЭМС/ В.К. Салов, С.П. Куксенко, А.О. Мелкозеров, М.Е. Комнатнов, Р.Р. Ахунов, Р.И. Аширбакиев, Т.Р. Газизов// там же. С. 265–268.
42. Аширбакиев Р.И. Реализация модуля импорта геометрических и электрических параметров из формата Altium Designer/Protel ASCII в формат системы TALGAT/ Р.И. Аширбакиев, Ег.В. Лежнин, А.О. Мелкозеров// Научная сессия ТУСУР-2012: Матер. докладов Всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 2012. С.72–75.
43. Лежнин Ев.В. Редактор двумерных конф-ций проводников и диэлектриков в системе TALGAT/ Ев.В. Лежнин, А.О. Мелкозеров// там же. С. 106–109.
44. Суровцев Р.С. Выбор оптимальных параметров дифференциальной пары на печатной плате/ Р.С. Суровцев, А.О. Мелкозеров// там же. С. 123–126.