

На правах рукописи

ОДНОБОКОВ

Вячеслав Владимирович

**ПОСТАНОВКА И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ
ПРОЕКТИРОВАНИИ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 05.13.01 –Системный анализ, управление и обработка
информации (информатика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Псков 2003

Работа выполнена в Псковском политехническом институте (филиале) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Вертешев Сергей Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Колесников Дмитрий Николаевич
доктор технических наук, профессор
Дегтярев Владимир Михайлович

Ведущая организация: Холдинговая Компания «ЛЕНИНЕЦ» г. Санкт-Петербург

Защита состоится 4 марта 2004 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.18 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, к.9, аудитория 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан 3 февраля 2004 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.229.18

Шашихин В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. За последнее десятилетие сложность технических объектов возросла в несколько раз, традиционные подходы к проектированию вошли в противоречие с возможностями существующих методов и требуют постоянного совершенствования.

Основанием для этого служит развитие общей теории систем и системотехники, с одной стороны, накопление и систематизация опыта создания комплексов определенного назначения - с другой.

Разработка таких комплексов разделяется на два направления:

1) системное проектирование, связанное с выбором принципов построения и функционирования комплекса в целом, с оценкой показателей функционирования, с выбором требований к его элементам, с реализацией процесса разработки;

2) техническое проектирование, связанное с реализацией элементов комплекса, которые должны обладать заданными характеристиками.

Предметом системного проектирования является весь жизненный цикл объекта, включая его создание, использование, развитие и ликвидацию.

Выбор оптимального варианта построения технического комплекса и способа его применения, соответствующих заданным требованиям, осложняется появлением специфических проблем, связанных с высокой степенью неопределенности целей, среды и поведения противника (партнера), поэтапным изменением свойств объекта и условий применения, ограничениями на сроки и стоимость разработки. При этом важным является правильное сочетание аналитических методов, имитационного моделирования и натурных испытаний. В соответствии со сказанным методология системного проектирования включает следующие аспекты:

- классификация принципов построения и функционирования комплексов определенного назначения;
- технология системного проектирования, схема и особенности синтеза;

- структурный анализ и распределение требований к элементам на ранних стадиях системного проектирования;
- принципы и правила построения имитационных моделей проектируемых комплексов;
- методы оценки показателей функционирования проектируемых комплексов в процессе разработки;
- методы параметрического синтеза проектируемых комплексов;
- управление процессами создания новой техники.

Основными проблемами, требующими проработки и определяющими направление исследований трёх последних аспектов системного проектирования, являются:

- 1) классификация и обобщение гипотез о зависимости свойств проектируемого объекта от характеристик его элементов;
- 2) анализ и обобщение методов решения задач распределения;
- 3) обоснование и оценка эффективности методов оптимального распределения ресурсов при поэтапной статистической оценке показателей функционирования при определении требований к элементам, при формировании и реализации программ создания новой техники.

Решению этих проблем и посвящена данная работа.

Цель работы и задачи исследования. Основной целью диссертационной работы является выбор и обоснование общего метода решения задач распределения, возникающих при системном проектировании радиоэлектронных комплексов.

Для достижения этих целей:

- выделены особенности в постановке и в итерационных процедурах решения задач распределения;
- сформулирована и обоснована обобщающая концепция оптимального распределения и введены необходимые понятия, определены условия её

реализации и проверено выполнение этих условий для конкретных типов задач распределения;

- предложен и использован способ оценки эффекта от реализации новой концепции применительно к выделенным типам задач распределения с экстремальными исходными данными.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе используются классические методы математического анализа (исследование поведения функций, представление их отрезком ряда Тейлора, вариационное исчисление), методы теории вероятности и математической статистики, численные методы решения конечных уравнений, теория чувствительности и малого параметра.

На защиту выносятся:

- метод магистрального распределения ресурсов;
- доказательство робастности магистрального решения задач распределения и его оптимальности для выделенных типов задач;
- результаты оценки эффективности оптимального распределения ресурсов для выделенных типов задач распределения.

Научная новизна. Научная новизна работы состоит в следующем:

- рассмотрен подход к косвенной оценке вероятности сложного события с максимальной точностью при ограниченном объеме выборки. Доказана сходимости итерационной процедуры при дискретном распределении ресурсов и выполнена её экспериментальная проверка;
- сформулирована задача определения требований к характеристикам устройств, исходя из условия минимума функции стоимости при заданном значении показателя функционирования. Предложены схема итерационного поиска и уточнения начального приближения к решению задачи и выполнена её экспериментальная проверка;

- дана формулировка и способ магистрального решения задачи оптимального распределения ресурсов на реализацию проекта;
- предложен и обоснован общий подход к решению задач оптимального распределения при системном проектировании на основе магистрального решения, проверены условия оптимальности магистрального решения для конкретных типов задач распределения.

Практическая значимость полученных результатов состоит в обосновании нового подхода, применяемого:

- к планированию и обработке данных натурных испытаний образцов новой техники;
- к определению оптимальных характеристик устройств, проектируемых радиоэлектронных комплексов;
- к формированию и реализации проектов создания новой техники, технического развития и т.д.

Реализация результатов работы. Исследования, отражённые в диссертации, использованы в отраслевой НИР «Построение и системное проектирование радиоэлектронных комплексов для летательных аппаратов пятого поколения». Санкт-Петербург, Холдинговая компания «ЛЕНИНЕЦ» 2001-2003г.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись на межотраслевой научно-технической конференции «Многофункциональные радиоэлектронные комплексы для летательных аппаратов пятого поколения» (Санкт-Петербург, Холдинговая компания «ЛЕНИНЕЦ», июнь 2002г.)

Публикации. Основные результаты по материалам диссертационной работы опубликованы в пяти статьях.

Структура работы. Диссертационная работа изложена на 135 страницах и включает в себя введение, три главы основного материала, заключение, список используемой литературы (31 наименование).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении на основе анализа публикаций обоснована важность и актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы и основные задачи, которые необходимо решить для её достижения, характеризуются научные положения и практические рекомендации, выносимые на защиту, и структура работы.

В первой главе диссертации дана постановка трёх классов задач распределения и проведён анализ существующих подходов к их решению.

При изучении систем приходится анализировать большое количество связей элементов и явлений, подвергать их всестороннему исследованию, учитывать взаимодействие частей и целого, связи и взаимодействие системы с окружающей средой.

При этом возникает необходимость использования количественных методов на ранних стадиях разработки, когда данные о комплексе и условия его применения определены не полностью.

Малое количество исходной информации на ранних этапах проектирования вынуждает искать такие модели, которые были бы обеспечены исходными данными, и работали бы при минимуме входной информации. Такой моделью является граф, отражающий структуру системы совместно с совокупностью отношений на ней. Проведение структурного анализа позволяет получить информацию о степени структурной значимости ранга элементов системы, сравнить системы с различными структурами, получить информацию о «слабых местах» системы, что даст возможность своевременно провести доработку структуры системы. Так как объём исходных данных может быть различным, ранжировки элементов будут обладать различной

информативностью (по Эшби). Поэтому разработан метод вычисления максимальной информативности, который позволяет использовать не абсолютное отклонение информативностей для различных ранжировок, а его отношение к максимально возможной информативности.

В данной главе был рассмотрен вопрос о постановке и решении трёх типов задач:

- задачи планирования испытаний;
- задачи распределения требований к элементам комплекса;
- задачи распределения ресурсов по направлениям проекта.

Задача планирования испытаний сведена к задаче поэтапного распределения ресурсов с использованием гипотез или предыдущих результатов.

Проведен качественный анализ особенностей двух предлагаемых методов, и приведены результаты их экспериментальной проверки, наглядно демонстрирующие, что рассмотренная методика всегда дает положительный эффект.

Задача распределения требований сводится к задаче поэтапного поиска и уточнения начального приближения; использование гипотезы об экспоненциальной зависимости характеристик устройства от его «стоимости» (подтвержденной типичными случаями) позволяет определить общий вид функции стоимости, параметры которой определяются методом наименьших квадратов на основе обработки данных о прототипах. Получены и проверены условия сходимости соответствующих процедур.

Сформулирована и обоснована концепция итерационного распределения ресурсов, при реализации проекта, для чего определены понятия именного множителя Лагранжа, двух типов магистралей и магистрального решения.

Во второй главе показано, что при выполнении определённых условий итерационная процедура распределения с использованием приближённых градиентов F и Φ приводит к предельному значению функции стоимости, близкому к оптимальному.

Показано, что значение функции стоимости в предельной точке x^* отличается от минимального значения, соответствующего решению задачи, на величину второго порядка малости по сравнению с погрешностью представления градиентов F и Φ этих функций. В силу выпуклости оптимизируемой функции и вогнутости ограничения в нашем случае условия Куна-Таккера являются необходимыми и достаточными. x^* удовлетворяет условиям

$$\begin{cases} f(x^*) + \lambda \tilde{\varphi} = 0 \\ \Phi(x^*) = \Phi_{\text{зад}} \end{cases} ;$$

x^{opt} определяется из условий

$$\begin{cases} f(x^{\text{opt}}) + \lambda \varphi(x^{\text{opt}}) = 0 \\ \Phi(x^{\text{opt}}) = \Phi_{\text{зад}} \end{cases}$$

В общем случае

$$f = \tilde{f} + \mu h^{(1)}, \quad \varphi = \tilde{\varphi} + \mu h^{(2)}, \quad \mu - \text{мало}.$$

Формально из этих соотношений следует, что $x^{\text{opt}} = x(\mu)$, причём $x(0) = x^*$. Отсюда вследствие гладкости функций F и Φ

$$x^{\text{opt}} = x^* + \mu t.$$

Разность значений функции стоимости в предельной и оптимальной точках

$$F(x^*) - F(x^{\text{opt}}) = -(f \cdot \mu t) + o(\mu^2),$$

и по условию Куна-Таккера

$$F(x^*) - F(x^{\text{opt}}) = \lambda'(\varphi \cdot \mu t) + o(\mu^2)$$

Поскольку разность значений функции отклика в предельной и оптимальной точках

$$\Phi(x^*) - \Phi(x^{opt}) = -(\varphi \cdot \mu t) + o(\mu^2)$$

равна нулю, то

$$(\varphi \cdot \mu t) = o(\mu^2)$$

Из этих соотношений следует, что

$$F(x^*) = F(x^{opt}) - o(\mu^2)$$

Это свойство отражает робастность (слабую чувствительность) оптимального решения по отношению к малым искажениям градиента функций стоимости и ограничений в итерационной процедуре. Предложенный метод имеет ряд достоинств.

Во-первых, он реализует процедуру, эквивалентную модифицированному методу Ньютона, и обладает сходимостью, скорость которой определяется точностью приближенного выражения для градиента функции отклика. Опыт показывает, что достаточно 4-5 итераций.

Во-вторых, на каждом шаге достаточно использовать только одно значение функции отклика в предыдущей точке определяемое моделированием.

В-третьих, решаемая на каждом шаге задача оптимизации достаточно проста в силу своей детерминированности и линейности ограничения. Кроме того, аддитивный характер функции стоимости позволяет упростить вычисления, так как основные соотношения вырождаются в n уравнений для каждой компоненты в отдельности.

Сформулированы и обоснованы три положения метода магистрального решения:

- в условиях необратимости затрат их необходимо производить при неравенстве именных множителей Лагранжа только на увеличение параметра с максимальным значением именованного множителя Лагранжа;

- при равенстве наибольших именных множителей Лагранжа на одновременное увеличение параметров, обеспечивая его сохранение до исчерпания ресурсов;
- при обратимости – достаточно выходить вдоль соответствующей координаты или на границу допустимой области и двигаться вдоль нее, сближая крайние (по значениям) именные множители Лагранжа, или на магистраль Лагранжа и двигаться вдоль неё, сохраняя равенство именных множителей Лагранжа.

Алгоритм реализации магистрального решения при выполнении достаточных условий всегда обеспечивает максимальное улучшение функции стоимости с заданными затратами на каждом шаге итерации.

Получен вид магистралей Лагранжа и ограничений для выделенных типов задач распределения.

В третьей главе дан анализ эффекта параметрической оптимизации. Оценка эффективности основана на сравнении результатов оптимального распределения с результатами другого распределения, заданного из практических соображений, при определённых (экстремальных) данных. Для задач, связанных с виртуальным распределением, например, задачи распределения требований к элементам проектируемого комплекса или ресурсов по направлениям развития предприятия при формировании соответствующей программы, необходимо найти x из условий

$$\begin{aligned} F(x, a) - \min \\ \Phi(x, a) \leq \Phi_{\text{зад}} \end{aligned}$$

где a - вектор неконтролируемых параметров. Пусть $x' = x'(a)$ - решение исходной задачи с дополнительным ограничением $x \in X'$; таковыми могут быть условия равенства компонент x между собой или их пропорциональности в отдельных группах.

Тогда для оценки эффекта можно использовать отношение

$$H = \frac{F(x'(a), a)}{F(x^{opt}(a), a)} > 1.$$

Эффективность параметрической оптимизации целесообразно оценивать отклонением $H(a)$ от 1 при экстремальных исходных данных a^* , соответствующих максимальному значению $H(a)$ или максимальному разнообразию начальных значений именных множителей Лагранжа.

Для задач, связанных с необратимым распределением ресурсов, например, при проведении испытаний или реализации программы развития, оптимальное решение (x^{opt}) можно находить из условий

$$\begin{aligned} F(x^0, a) - F(x, a) - \max \\ \Phi(x, a) - \Phi(x^0, a) \leq g(t) \end{aligned}$$

где x^0 – начальные условия задачи оптимизации, t – параметр, определяющий текущие затраты.

При выполнении достаточных условий сходимости оптимальным решением этой задачи является магистральное решение $x^{opt} = x(x^0, a, t)$, для которого $F_{\min} = F(x^0, a, t)$. При другом (директивном) распределении $x' = x'(x^0, a, t')$ значения критериальной функции и функции ограничений также зависят от начальных условий x^0 , неконтролируемых параметров a и t' , определяющего текущие затраты $F'(x^0, a, t')$ и $\Phi'(x^0, a, t')$.

Тогда эффективность магистрального и директивного распределения можно характеризовать выражениями

$$T(x^0, a, t) = \frac{F_0 - F_{\min}}{\Phi - \Phi_0} \text{ и } T'(x^0, a, t') = \frac{F_0 - F'}{\Phi' - \phi_0},$$

и их отношением при равенстве затрат:

$$H(x^0, a, t) = \frac{F_0 - F_{\min}}{F_0 - F'}$$

при $\Phi(x^0, a, t) = \Phi'(x^0, a, t')$.

Эффект можно оценить отличием от единицы отношения T/T' при одинаковом увеличении затрат.

Для типовых задач определены экстремальные значения неконтролируемых параметров, при которых максимален или эффект, или разброс начальных значений именных множителей Лагранжа (которые в ходе итерационной процедуры должны стать равными) и аналитическое выражение для расчета максимального эффекта.

Выполнены расчеты, которые подтверждают работоспособность нового подхода и практическую значимость рекомендаций по проведению параметрического синтеза и натурных испытаний проектируемых комплексов, по формированию и реализации программы научно-производственной деятельности предприятий крупного НПО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обзор публикаций по постановке и методам решения задач оптимального распределения ресурсов, особенно работ, выполненных учеными ИИСТ в 1998-2003 г.:

- по классификации гипотез при построении исходных функциональных зависимостей,

- по разработке и экспериментальной оценке итерационных процедур решения задач, -

показал ограниченность существующих подходов и актуальность выбранной темы исследований, направленных на разработку, обоснование и оценку общего подхода к постановке и решению задач оптимального распределения с учетом их особенностей.

2. С этой целью были выделены особенности постановки и итерационного решения задач, в частности:

- гипотеза о логарифмической зависимости частных показателей от контролируемых параметров, упрощающие гипотезы о связи интегральных и частных показателей, позволяющие строить приближенные аналитические зависимости для функций стоимости и ограничения Φ ,

- дискретность возможных значений контролируемых параметров, необратимый или виртуальный характер распределения ресурсов,

- алгоритмический способ определения значений F и Φ для конкретных значений контролируемых параметров x^k .

3. Известные подходы к итерационному решению задач распределения, основанные на линеаризации в окрестности x^0 уравнений Куна – Таккера для исходной задачи, не учитывают дискретности параметров, необратимости распределения и степени чувствительности решения к искажениям F и Φ при вычислении их градиентов.

4. В работе сформулирована и обоснована общая концепция итерационного решения задач оптимального распределения ресурсов, для чего:

- определены понятия именного множителя Лагранжа, двух типов магистралей и магистрального решения,

- доказано свойство робастности оптимального решения к искажениям градиентов F и Φ , позволяющее упростить алгоритм его построения, получены необходимые и достаточные условия оптимальности магистрального решения. Эти условия имеют аналитический вид, определяемый характером F и Φ , и легко проверяются.

5. Даны формулировка и теоретическое обоснование положений о реализации магистрального решения. При реализации магистрального решения:

- в условиях необратимости затрат их необходимо производить только на увеличение параметра с максимальным значением именного множителя Лагранжа или на одновременное увеличение параметров, обеспечивая равенство наибольших именных множителей Лагранжа;

- при обратимости – достаточно выходить вдоль соответствующей координаты на границу допустимой области и двигаться вдоль нее, сближая крайние (по значениям) именные множители Лагранжа;

Алгоритм реализации магистрального решения при выполнении достаточных условий обеспечивает максимальное улучшение функции стоимости с заданными затратами на каждом шаге итерации.

6. Дан подход к оценке эффекта параметрической оптимизации. Эффективность улучшения функции стоимости, определяемая его отношением T к увеличению затрат, зависит от неконтролируемых параметров, входящих в выражения для F и Φ . Эффект можно оценить отклонением от единицы отношения T/T' при одинаковом увеличении затрат, где T' - эффективность распределения с дополнительным ограничением на выбор контролируемых параметров. Для типовых задач определены экстремальные значения неконтролируемых параметров, при которых максимален или эффект, или разброс начальных значений именных множителей Лагранжа (которые в ходе итерационной процедуры должны стать равными).

7. Для исходных данных, соответствующих реальным объектам (бортовым РЭК), выполнены расчеты, которые подтверждают работоспособность нового подхода и практическую значимость рекомендаций по проведению параметрического синтеза и натурных испытаний проектируемых комплексов, по формированию и реализации программы научно-производственной деятельности предприятий крупного НПО.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Однобоков В.В. Алгоритмы интеллектуальной поддержки анализа решений. // Труды СПИИРАН, т.2-СПб: СПИИРАН, 2002, с. 68-74.
2. Смирнов Ю.М., Поляков А.О., Однобоков В.В. Математические методы внешнего проектирования сложных систем.// Научно-практический журнал «Информационно – управляющие системы». Вып.2-3. СПб.2003, с. 39-44.
3. Однобоков В.В. Обоснование магистрального метода оптимального распределения ресурсов.// Журнал «Научно – технические ведомости СПбГПУ». Вып.4. СПб.2003., с. 55-62.
4. Однобоков В.В. Принятие решений при управлении проектами // в кн. Технология интеллектуальных систем СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003-120 с.