

МН32333
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи
УДК 62.505; 519.95

Грешилов Анатолий Антонович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ОСНОВАННЫХ
НА СТОХАСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ С ПОГРЕШНОСТЯМИ
В КООРДИНАТАХ

05.13.01 техническая кибернетика и теория информации

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 1984

Работа выполнена в Московском отделении Центрального научно-исследовательского института связи Министерства связи СССР.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
ШАТАРИН Б.И.
доктор технических наук, профессор
ШАТАЛОВ А.С.
доктор технических наук, профессор
ПУШКОВ К.А.

Ведущая организация - Институт проблем передачи информации
АН СССР.

Защита состоится на заседании специализированного совета Д 053.15.01 при Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана, г.Москва, 2-я Бауманская, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского высшего технического училища им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан 5 октября 1984г

Ученый секретарь специализированного
совета К.Т.Ф

Плотников В.Н.

T-I504

M432333

раз 100.

Актуальность проблемы. В решениях XXVI съезда КПСС и последующих пленумов ЦК КПСС отмечается, что в области естественных и технических наук необходимо сосредоточить усилия на развитии математической теории, на повышении эффективности ее использования в прикладных целях, на совершенствовании вычислительной техники, ее математического обеспечения, средств и систем сбора, передачи и обработки информации. Все это полностью относится к процессу анализа сложных динамических систем.

Актуальным является исследование систем в условиях, характерных для их практической эксплуатации, с учетом множества случайных факторов.

В настоящее время при анализе реальных динамических систем применяются приближенные методы, в которых неопределенность множества факторов сводится к неопределенности одного фактора. Имеются лишь отдельные результаты, не объединенные общностью подхода, когда учитываются погрешности как аргументов, так и функций. Это не позволяет полностью определить параметры реальных систем, что, в свою очередь, приводит к дополнительным затратам и снижает эффективность функционирования систем.

В отличие от традиционного регрессионного анализа в диссертации используется конфликтный анализ, который позволяет исследовать системы при условии, что исходные данные не содержат детерминированных величин.

Рассматриваемая проблема включает решение целого ряда задач параметрической оптимизации и математической статистики, связанных с определением исходных оценок и их доверительных вероятностей; с решением вопросов вычислительной математики при условной и безусловной оптимизации функций; с вопросами разработки программ, реализующих математические алгоритмы; с вопросами автоматизации сбора и обработки исходной информации и анализом реальных систем. Таким образом, решаемая проблема представляет интерес для различных отраслей народного хозяйства и является актуальной.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка теоретических и практических методов анализа динамических систем, описываемых стохастическими параметрическими моделями с погрешностями в исходных данных. Разрабатываемые методы предназначены для получения



М 432.333

точечных и интервальных оценок искомым параметрам моделей в активном и пассивном экспериментах и для решения задач идентификации, обратных задач системного анализа и параметрического оценивания. В процессе разработки методов анализа систем требовалось решить и технические задачи, которые обеспечили бы автоматизацию сбора и передачи информации на ЭВМ.

В соответствии с указанной целью в работе поставлены следующие задачи:

1) разработать единый подход к учету погрешностей в исходной информации при анализе динамических систем. Этот подход должен быть работоспособен для задач идентификации, обратных задач системного анализа и оценивания параметров в пассивных и активных экспериментах, должен позволять измерять количество информации в полученном решении и находить интервальные оценки решения;

2) разработать способ решения получающихся нелинейных задач. Обосновать выбор нулевого приближения искомым оценкам, сходимость итерационных процессов, состоятельность и единственность оценок. Создать алгоритмы получения оценок свободных параметров функций известного вида, решения интегральных уравнений и систем алгебраических уравнений в конформном анализе применительно к анализу физических, технических и экономических систем;

3) разработать методы решения некорректных задач в конформном анализе;

4) создать библиотеку программ, реализующих разработанные алгоритмы;

5) провести исследование предлагаемых методов решения задач идентификации, обратных задач системного анализа и оценивания параметров с целью выяснения особенностей методов и выявления свойств оценок, связанных с нелинейностью задач. Исследовать предлагаемые методы на примерах анализа практических физических, технических и экономических систем;

6) разработать систему преобразований информации для создания помехозащищенных алгоритмов экспресс-обработки данных и нахождения нулевых приближений в сложных процедурах;

7) для целей эпизодических физических экспериментов с импульсными источниками излучения разработать процедуру автоматизированного сбора, передачи и обработки данных.

Объект исследования — класс динамических систем (объектов управления), описываемых стохастическими параметрическими моделями, в которых свойство недетерминированности проявляется через их параметры и координаты. В качестве конкретных примеров рассмотрены методы анализа физических, технических и экономических систем: первая группа включает исследование процессов нестационарной теплоотдачи, определение спектров гамма-излучения и независимых выходов продуктов деления тяжелых ядер, исследование влияния ядерного излучения на поведение кварцевых резонаторов; вторая — задачи восстановления сигналов, искаженных системой передачи данных, и задачи обработки неразрешенных пиков хроматограмм; третья — задачи расчета нормативов, характеризующих развитие связей, на примере расчета показателя изношенности производственной мощности междугородной телефонной связи СССР.

Методы исследования. В основу исследования положен разработанный в диссертации метод анализа динамических систем, базирующийся на конфликтном анализе. Этот метод использует работы советских и зарубежных авторов по теории автоматического управления и анализу динамических систем, по теории вероятностей и математической статистике, вычислительной математике и математической физике (вспомогательные условия и безусловные экстремумы и решение некорректных по А.Н.Тихонову задач), по математическому программированию, программированию на ЭВМ, по системам сбора и передачи информации по телефонным и телеграфным каналам связи. При решении прикладных задач применялся предложенный метод с привлечением работ советских и зарубежных ученых по передаче информации и электрических сигналов по линейным системам, по ядерной физике (прохождение нейтронизирующих излучений в среде, регистрация излучений) и физике деления тяжелых ядер, по спектрометрии ионизирующих и других видов излучений, по теплопередаче и по хроматографии газов.

При сравнительном анализе автор использовал результаты других исследователей.

Научная новизна. В диссертационной работе разработана теория анализа линейных и нелинейных систем, представленных параметрическими моделями, и даны практические рекомендации по решению прикладных задач. В частности, это позволило решить задачи анализа динамических систем при отсутствии детер-

минимизации величин в исходной информации. Предложенный метод включает в себя процедуру объединения погрешностей исходных данных, процедуру оценки истинных значений факторов моделей, процедуру оценки искомых параметров моделей, реализующие эти процедуры программы для ЭВМ и процедуру автоматизированного сбора и передачи информации на ВЦ в эпизодических экспериментах. Метод позволяет решать задачи идентификации, обратные задачи системного анализа и оценивания параметров в активном и пассивном экспериментах. В диссертации исследованы свойства получаемых оценок, разработаны методы получения доверительных интервалов оценок. Общая методика кофлюэнтного анализа подробно проработана для случая оценки параметров функций известного вида, для решения интегральных уравнений I рода и типа свертки, систем линейных алгебраических уравнений.

Разработан алгоритм поиска оценок в кофлюэнтном анализе и соответствующие методы поиска точек экстремума (минимума) функционалов метода максимума правдоподобия. Разработаны Фортран-программы для ЭВМ, реализующие алгоритмы поиска оценок.

Показаны возможности кофлюэнтного анализа для решения задач линейного программирования с неточными исходными данными. На примере $\mathcal{D}$ -оптимальных планов рассмотрены особенности планирования экспериментов в кофлюэнтном анализе, показано, что ортогональное планирование в кофлюэнтном анализе невозможно.

С помощью предложенной системы интегральных преобразований создан ряд помехозащищенных алгоритмов для обработки неразрешенных линий (решение интегральных уравнений типа свертки) и для взаимной фильтрации друг относительно друга наиболее часто встречающихся в практике функций: экспонент, функций Гаусса, полиномов и гармонических функций, описывающих полезные сигналы и помехи. Предложены устройства, реализующие эти алгоритмы.

Разработаны методы решения некорректных задач в кофлюэнтном анализе. Приводятся алгоритмы решения плохообусловленных систем линейных алгебраических уравнений с учетом нестрогого решения и алгоритм получения аналитическим способом интервальных оценок в некорректных задачах.

Разработана процедура автоматизированной передачи по телефонным каналам результатов эпизодических экспериментов, проводимых на удалении от ЭВМ. Предложены и разработаны устройства, позволяющие упростить процесс автоматической обработки данных.

Практическая значимость и реализация результатов. По основным положениям диссертации с участием автора выполнено 8 научно-исследовательских работ. Разработанные математические алгоритмы и программы оценки параметров функций известного вида, а также автоматизированный канал сбора и передачи экспериментальных данных с цифровых регистраторов на ВЦ вошли в 5 практических руководств для анализа результатов экспериментов, разработанных при участии автора для своего Министерства и для смежных организаций.

Прибор типа САВР (автоматический выбор ранга) разработан при участии автора и нашел практическое применение.

Программы для оценки параметров функций известного вида (для однофакторных и многофакторных моделей) использовались при расчете показателей развития связи в теме "Разработка первой очереди подсистемы перспективного планирования развития связи (ОАСУ-Связь)" НИИрадио, Московским отделением ЦНИИ связи и Всесоюзным заочным электротехническим институтом связи Министерства связи СССР; применяются в НИИСиликатобетон, НПО "Черметавтоматика".

Математические алгоритмы и программы для решения систем линейных алгебраических уравнений и оценки параметров элементарных функций использовались в плановых работах ВНИИ хроматографии в "Автоматизированной измерительной системе для анализа атмосферных".

Новизна технических решений защищена девятью авторскими свидетельствами.

7 алгоритмов и программ, представленных в диссертации, зарегистрированы в Государственном фонде алгоритмов и программ и используются рядом организаций.

Разделы по конъюнктному анализу, разработанные в диссертации, вошли в курс "Математическая статистика" кафедры высшей математики Московского лесотехнического института. Материал о системах передачи данных и о способах построения прогнозов, описанный в диссертации, включался в курс лекций для слушателей Института повышения квалификации руководящих работников и специалистов дорожного хозяйства.

Выносятся на защиту: 1) Методы анализа динамических систем при одновременном учете погрешностей исходных данных: в значениях функции и в значениях аргументов; в значениях правых частей систем алгебраических уравнений и интегральных уравнений и в значениях соответственно элементов матриц систем и ядер интегральных уравнений. Методы предназначены для решения задач идентификации, обратных задач системного анализа и оценивания параметров и дают возможность получить точечные и интервальные оценки параметров моделей в активном и пассивном экспериментах.

2) Алгоритм поиска оценок в конфлюэнтном анализе и соответствующие методы поиска точек экстремума образуемых функционалов сложной формы и решения систем нелинейных алгебраических уравнений, в том числе некорректных.

3) Фортран-программы, реализующие математические алгоритмы для широко применяющихся при анализе динамических систем функций известного вида (линейных, полиномов, сигнумов, сплайнов), систем линейных алгебраических уравнений и интегральных уравнений Фредгольма I рода и типа свертки.

4) Теоремы, определяющие свойства получающихся оценок.

5) Решение задачи получения интервальных оценок в методе регуляции А.Н.Тихонова и получения интервальных оценок при решении некорректных задач в конфлюэнтном анализе.

6) Помехозащищенные алгоритмы на базе предложенных преобразований информации для обработки неразрешенных сигналов и взаимной фильтрации друг относительно друга наиболее часто встречающихся в практике анализа функций: экспонент, функций Гаусса, полиномов, гармонических функций и т.п.

7) Процедура автоматизированной передачи данных по телефонным каналам для эпизодических экспериментов, разработанные устройства автоматического выбора интервалов измерений по амплитуде и времени и устройства, реализующие помехозащищенные алгоритмы анализа неразрешенных сигналов и фильтрации экспонент, функций Гаусса, полиномов и гармонических функций друг относительно друга.

8) Результаты анализа систем, представляющие самостоятельную ценность - определение независимых выходов продуктов деления тяжелых ядер; оценка влияния нейтронного и гамма-излучения на

частоту кварцевых резонаторов, конкретные практические результаты, полученные при восстановлении сигналов, искаженных системой передачи, и в процессе решения теплофизических задач; для ВНИИ хроматографии - результаты анализа экспресс-методов газовой хроматографии; для институтов Министерства связи СССР - определение показателя использования производственной мощности междугородной телефонной сети.

А п р о б а ц и я р а б о т ы. Материалы диссертации докладывались: на ХХI Ежегодном совещании по структуре ядра и ядерной спектроскопии, Москва, 1971; на III Всесоюзном совещании по технической диагностике, Минск, 1975; на XIV Всесоюзном совещании по гидравлической автоматике, Владимир, 1976; на II Всесоюзном совещании "Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности", Новосибирск, 1976; на XXXIV Всесоюзной научной сессии ИТОРЭС им. Попова А.С., посвященной Дню радио, Москва, 1979; на Всесоюзном семинаре "Обратные и сопряженные задачи теплообмена", Киев, 1979; на XXXV Всесоюзной научной сессии ИТОРЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио, Москва, 1980; на III Всесоюзном научно-техническом совещании "Развитие систем и средств передачи данных для совершенствования технической базы общегосударственной автоматизированной системы управления народным хозяйством (ОГАС)", Калуга, 1980; на Всесоюзной научной конференции "Методы и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей и их элементов", Харьков, 1980; на IV Всесоюзном семинаре "Обратные задачи и идентификация процессов теплообмена", Москва, 1982; на III Всесоюзном совещании по низкотемпературным теплофизическим измерениям и их метрологическому обеспечению, Москва, 1982; на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов Московского технологического института (1972-1976 гг.) и Московского лесотехнического института (1978 г.); на семинаре научно-исследовательского энергетического института им. Г.М. Кржижановского, Москва, 1978; на семинаре кафедры автоматики Московского энергетического института, 1979; на семинаре НИИЦ МТУ, 1981.

П у б л и к а ц и и. Основные результаты работы опубликованы в печати: изобретений - девять; справочников - два; статей и докладов - двадцать шесть, зарегистрировано в Государственном фонде алгоритмов и программ - семь программ и алгоритмов, депонировано рукописей - пять.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы. Основная часть работы изложена на 254 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка, 16 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируются проблемы, которые возникают при анализе динамических систем, описываемых стохастическими параметрическими моделями с погрешностями в исходных данных: проблема одновременного учета всех погрешностей исходных данных в пассивном и активном экспериментах, проблема оценки истинных значений факторов, проблема создания алгоритмов для получения интервальных оценок искомых параметров и реализация алгоритмов на ЭВМ. Показывается, что такие задачи требуют применения кофлюентного анализа.

В первой главе диссертации приводится общая постановка задачи анализа динамических систем, описываемых недетерминированными параметрическими моделями с погрешностями в исходных данных. Показывается, что большой круг задач анализа динамических систем сводится к оценке свободных параметров функций известного вида, к решению интегральных уравнений I рода и типа свертки, к решению систем линейных алгебраических уравнений.

Общая математическая постановка задачи формулируется следующим образом. Пусть задано статистическое описание входа ξ и выхода η некоторой системы (в общем случае нелинейной) и задана структура системы в виде параметрической модели — операторного уравнения

$$\eta = A(\theta)\xi, \quad (I.1)$$

где оператор $A(\theta)$ ставит в соответствие каждому элементу ξ класса F элемент η класса F_1 . Входное воздействие ξ и отклик η — нестационарные случайные процессы с дискретным временем.

В пассивном эксперименте из-за присутствия помехи не наблюдаются точные значения η и ξ , но наблюдаются соответственно реализации случайных векторов y и x , которые связаны с векторами η и ξ и аддитивными помехами ε и σ следующим образом:

$$y = \eta + \varepsilon; \quad x = \xi + \delta \quad (I.2)$$

В активном эксперименте значение X задается. Получаем:

$$y = \eta + \varepsilon; \quad \xi = x + \delta \quad (I.3)$$

Во многих случаях задачи (I.1)-(I.2) или (I.1), (I.3) сводятся к нахождению оценок и матрицы рассеяния параметров функции известного вида

$$\eta = f(\xi, \theta), \quad (I.4)$$

устанавливающей связь между значениями ξ и η . Функциональное соотношение (I.4) порождает структурное соотношение $y = \psi(x, \theta, \delta)$ или, если помеха аддитивна, то в пассивном эксперименте

$$y = f(x + \delta, \theta) + \varepsilon; \quad (I.5)$$

а в активном эксперименте

$$y = f(x + \delta, \theta) + \varepsilon \quad (I.6)$$

Из структурных соотношений получают оценки θ .

При получении оценок параметров θ и матрицы рассеяния оценок считается, что законы распределения погрешностей ε и δ и числовые характеристики этих законов распределения известны. Постулирование закона распределения исходных данных позволяет:

- 1) разграничить задачу получения экспериментальных данных и их статистических характеристик и задачу последующей обработки;
- 2) оценить влияние статистических свойств исходной информации на процедуру получения оценок и на свойства оценок.

Если ξ и η сами являются случайными величинами и, как прежде, выполнены предположения (I.1)-(I.3), то, чтобы получить задачу, аналогичную задаче (I.1)-(I.3), необходимо сделать дополнительные предположения о попарной некоррелированности погрешностей измерений всех случайных величин.

В диссертации предполагается, что ξ и η в пассивном эксперименте или X и η в активном являются детерминированными величинами.

Показано, что в подобных случаях нельзя применять методы регрессионного анализа и предлагается эти задачи решать методами кофлюэнтного анализа, который позволяет учитывать как ошиб-

ки в значениях функции, так и ошибки в значениях других переменных (факторов, аргументов). С учетом погрешности в аргументе оценивание свободных параметров функций и определение их доверительных интервалов существенно усложняется.

Предложено процедуру объединения погрешностей аргументов и функции в одном функционале строить на основе метода максимума правдоподобия (ММП). Функционалы ММП дают основу для получения не только точечных, но и интервальных оценок параметров θ . Устанавливается, что ММП в целом ряде практически важных случаев обеспечивает полезные статистические свойства оценок: состоятельность, эффективность, несмещенность и устойчивость оценок.

Отмечаются особенности получения оценок и исследования их свойства в конфлюэнтном анализе. В конфлюэнтном анализе различают два вида оцениваемых параметров: структурные — общие для всех наблюдений (в нашем случае θ), и несущественные — связанные с отдельными наблюдениями (в нашем случае $\{ \xi_{ij} \}$, а в общем случае — дисперсии $\{ \sigma^2(x_{ij}) \}$ и $\{ \sigma^2(y_i) \}$ и математические ожидания ошибок измерений). С каждым новым наблюдением добавляются новые несущественные параметры. Оценки по методу максимума правдоподобия не обязательно состоятельны, если в задаче имеются несущественные параметры. В большинстве случаев оценки искомых параметров в конфлюэнтном анализе получают с использованием итерационных процессов, поэтому записать в явном виде формулы для нахождения оценок и исследовать по ним статистические свойства оценок не всегда удается и свойства оценок в конфлюэнтном анализе в таких случаях предлагается исследовать методом статистических испытаний.

В этой же главе рассматриваются способы получения интервальных оценок с помощью ММП.

Во второй главе диссертации подробно рассматривается пассивный эксперимент в конфлюэнтном анализе. Пассивный эксперимент является наиболее часто встречающимся в процессах получения экспериментального материала (сбора информации). В эту схему входит широкий круг задач анализа динамических систем.

В диссертации задача оценивания параметров в пассивном эксперименте ставится следующим образом. Пусть имеем статистику

ческий ряд экспериментальных значений $X = \{x_i\} \in X$ и соответствующий им ряд значений функции $Y = \{y_i\} \in Y$, $i = 1, 2, \dots, n$; $n \geq m$, где m — число оцениваемых параметров θ . Предполагается, что переменные X и Y не являются детерминированными, но являются выборками из генеральных совокупностей X и Y с известными плотностями функции вероятностей. Переменные X и Y могут быть как статистически зависимы, так и независимы; могут быть как коррелированы, так и не коррелированы. Пусть $P_1(x_i/\theta)$ и $P_2(y_i/\theta)$ — соответственно плотности распределения случайных величин x_i и y_i , если x_i и y_i непрерывны, либо соответственно вероятности значений x_i и y_i , если значения X и Y дискретны; x_i , y_i и соответственно распределения $P_1(x_i/\theta)$ и $P_2(y_i/\theta)$ могут быть как одномерными, так и многомерными.

Главная проблема конъюнктного анализа — введение в рассмотрение одновременно погрешностей значений факторов (аргументов) и функции — решается в диссертации с помощью ММТ. Находится выражение для совместной плотности распределения вероятностей исходных данных, из которого определяют и прочие оценки. Например, если значения ξ_i и η_i связаны функциональной зависимостью, погрешности θ_i и ε_i являются независимыми при переходе от одной точки (x_i, y_i) к другой, то совместная плотность распределения вероятностей получить из статистически независимых точек (x_i, y_i) равна

$$L = \prod_{i=1}^n P_1(x_i/\theta) \cdot P_2(y_i/\theta). \quad (2.1)$$

Аналогично найдены формулы совместной плотности распределения вероятностей для зависимых или коррелированных экспериментальных точек.

Показано, что функционал ММТ действительно определяет оценки искомых параметров θ , т.к. в выражение для совместной плотности распределения вероятностей входят математические ожидания экспериментальных данных, экспериментальные значения и оцениваемые параметры. Причем $P_1(x_i/\theta)$ — функция математического ожидания ξ_i , экспериментальных значений x_i и параметров θ ; $P_2(y_i/\theta)$ — функция математического ожидания η_i , экспериментальных значений y_i , x_i и параметров θ ; кроме того, известны функциональное соотношение (1.4) и структурное соотно-

нение (1.5) между наблюдаемыми случайными величинами X_i и Y_i . Эти данные позволили сформулировать функционал, точки экстремума которого определяют оценки искомых параметров θ .

Если экспериментальные значения X_i и Y_i — случайные величины, каждая из которых имеет ф.п.в., описываемую функцией Гаусса соответственно с математическими ожиданиями ξ_i и η_i , дисперсиями $\sigma^2(X_i)$ и $\sigma^2(Y_i)$ и коэффициентами корреляции $\rho_i = \rho(X_i, Y_i)$, то оценки искомых параметров θ находятся из условия минимума функционала, получаемого из (2.1)

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 - \rho_i^2} \left[\frac{(X_i - \xi_i)^2}{\sigma^2(X_i)} - 2\rho_i \frac{(X_i - \xi_i)(Y_i - \eta_i)}{\sigma(X_i)\sigma(Y_i)} + \frac{(Y_i - \eta_i)^2}{\sigma^2(Y_i)} \right]. \quad (2.2)$$

Для частного случая, когда погрешности δ_i и ε_i некоррелированы, выражение (2.2) принимает вид

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{(X_i - \xi_i)^2}{\sigma^2(X_i)} + \frac{(Y_i - \eta_i)^2}{\sigma^2(Y_i)} \right]. \quad (2.3)$$

Далее рассматривается задача отыскания минимума функционалов типа (2.2)–(2.3) по параметрам θ при условии (1.4). Здесь появляется вторая проблема — в отличие от регрессионного анализа теперь неизвестны истинные значения абсолютов (факторов) ξ экспериментальных точек, а известны только их доверительные области. Причем случайная величина X коррелирована с ошибкой функции η (например, для прямой линии $\eta = \theta_0 + \theta_1 \xi$ ошибка функции η равна $(\varepsilon - \theta_1 \delta)$). Перед тем, как приступить к определению точек минимума функционалов (2.2), (2.3) по θ , требуется определить ξ , а только затем, подставив выражения для ξ и η в функционал, находить точки минимума полученнейшей функции нескольких переменных.

Для нахождения оценок ξ в диссертации предлагается доопределить задачу и оценки ξ_i и θ_j находить из условия:

$$\left. \frac{\partial F}{\partial \xi_i} \right|_{\xi_i = \hat{\xi}_i} = 0; \quad i = \overline{1, n}; \quad (2.4)$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial \theta_j} \right|_{\theta_j = \hat{\theta}_j} = 0; \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.5)$$

Получаемые оценки значений ξ_i должны принадлежать области неопределенности D_i измеренных величин X_i , т.е.

$\xi_i \in D_i$. В условиях, когда известен закон распределения погрешностей значений X_i , это условие выражается в более конкретной форме: при нормальном законе распределения $|x_i - \xi_i| \leq \leq K G(X_i)$, где значение коэффициента K определяется выбранным уровнем доверия.

Показывается, что для функций, линейных по параметрам θ , система уравнений (2.5) – система линейных алгебраических уравнений. Система (2.4) для линейных по ξ функций представляет собой n не связанных между собой систем из m линейных уравнений. Условие (2.4) для нелинейных функций $\eta = f(\xi, \theta)$ дает соответственно n независимых систем из m нелинейных уравнений, которые решались методом линеаризации. Сходимость итерационного процесса при этом обеспечивалась малостью допустимых интервалов для ξ . Замена нормального закона распределения другим, например, законом Пуассона, Лапласа и др., приводит к системе нелинейных уравнений (2.5). Учет корреляции погрешностей Y_i и X_i не вносит принципиальных трудностей, а лишь усложняет формулы; учет корреляции погрешности значений X_{ik} и X_{ie} в разных точках не позволяет разбить систему из $m \cdot n$ – уравнений на n независимых. В этом случае решались системы линейных уравнений в n раз большей размерности, чем при независимых переменных X_{ik} и X_{ie} .

Нелинейность задачи нахождения оценок θ и сложная форма функционалов F требует определения соответствующего нулевого приближения. В качестве нулевого приближения в диссертации предложено взять решение регрессионной задачи. В этой же главе доказываются теоремы, характеризующие состоятельность и единственность оценок для функций, линейных по параметрам.

Теорема 2.1. Если погрешности δ и ε измеренных случайных величин X и Y статистически независимы и распределены по нормальному закону с известными числовыми характеристиками ф.п.в. и если в качестве нулевого приближения принято решение соответствующей регрессионной задачи, то достаточным условием единственности оценок параметров линейной функции $\eta = \theta_0 + \sum_j \theta_j \xi_j$ является выполнение неравенства $\bar{X}^2 > (1 - m/n) \hat{\sigma}^2(Y)$.

Теорема 2.2. Достаточным условием того, что регрессионное решение при оценке параметров прямой линии $\eta = \theta_0 + \theta_1 \xi$ принад-

лежит строго выпуклой области функционала

$$F = \frac{1}{2(1+\theta_1^2)} \sum_{i=1}^n (y_i - \theta_0 - \theta_1 x_i)^2 \quad (2.6)$$

(и обеспечивает тем самым единственность конфликтных оценок), является

$$\sum_i x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_i x_i \right)^2 > (n-2) \hat{\sigma}^2(y).$$

Указывается, что условия, обеспечивающие попадание регрессионного решения в выпуклую область функционала (2.3), для нелинейных функций несложно проверить на ЭВМ, но достаточно громоздко выразить в явном виде. Кроме того, установлено, что для функций $\eta = f(\xi, \theta)$, линейных по параметрам θ , единственность оценки и сходимость нулевого приближения к оцениваемым параметрам при нормально распределенных исходных данных определяется только способом нахождения значений $\hat{\xi}$, т.к. при фиксированных значениях $\hat{\xi}$ система уравнений (2.5) — система линейных алгебраических уравнений с детерминантом, не равным нулю. Показано, что для этих функций из условия (2.4) может быть найден не единственный набор значений $\hat{\xi}$, каждый из которых принадлежит области возможных значений при заданном наборе значений X . В такой ситуации нет оснований отдать предпочтение какому-либо набору значений $\hat{\xi}$ и решение будет не единственно.

Доказываются теоремы о состоятельности оценок θ в конфликтном анализе, если оценки $\hat{\xi}$ находятся из условия (2.4).

Теорема 2.3. Если оценки параметров прямой $\eta = \theta_0 + \theta_1 \xi$ находятся как точка минимума функционала (2.6), то они равны

$$\hat{\theta}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\theta}_1 x_i);$$

$$\hat{\theta}_1 = \max(\theta_{11}, \theta_{12}),$$

$$\text{где } \theta_{11,12} = \frac{(w-d) \pm \sqrt{(w-d)^2 + 4c^2}}{2c};$$

$$c = \sum_i x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_i x_i \sum_i y_i; \quad w = \frac{1}{n} \left(\sum_i x_i \right)^2;$$

$$d = \sum_i x_i^2 - \sum_i y_i^2 + \frac{1}{n} \left(\sum_i y_i \right)^2.$$

Теорема 2.4. Если оценки параметров прямой $\eta = \theta_0 + \theta_1 \xi$ находятся как точка минимума функционала (2.6), то они состоятельны.

Аналогичная теорема сформулирована для линейной функции

$$\eta = \theta_0 + \sum_{j=1}^m \theta_j \xi_j$$

Теорема 2.5. Если оценки параметров θ в уравнении $\eta = \theta_0 + \sum \theta_j \xi_j$ находятся как точка минимума функционала (2.3) и оценки ξ находятся из условия (2.4), то полученные оценки $\hat{\theta}$ будут состоятельными.

На основе проведенного рассмотрения предлагается общая схема алгоритма получения конфиденциальных оценок:

1 шаг: в качестве "точных" значений переменных ξ берутся значения X и решается регрессионная задача поиска минимума по θ функционала F . Получают первое приближение для оценок искомых параметров;

2 шаг: при найденных приближениях оценок параметров θ пересчитываются оценки точных значений переменных ξ на основании условия (2.4). Для уменьшения числа итераций проверяется принадлежность нового значения ξ_{ij} области возможных значений X_{ij} ;

3 шаг: минимизируется функционал F по θ при новых значениях переменных ξ .

Шаги 2 и 3 выполняются поочередно до тех пор, пока не будет выполнено хотя бы одно из трех условий:

а) на очередном шаге значение функционала (2.3) меньше заданного числа ε_1 ;

б) на соседних итерациях значения функционала F и значения оценок параметров θ отличаются несущественно, т.е.

$$\left| \frac{F_\nu - F_{\nu+1}}{F_\nu} \right| \leq \delta_1; \quad \max \left| \frac{\theta_e^{(\nu)} - \theta_e^{(\nu+1)}}{\theta_e^{(\nu)}} \right| \leq \delta_2;$$

$$e = \overline{1, k},$$

где δ_1 и δ_2 — заданные числа;

в) исчерпан заданный лимит итераций.

4 шаг: после нахождения оценок $\hat{\theta}$ определяются дисперсии оценок, например, с помощью матрицы вторых производных функционалов (2.2), (2.3).

В этой же главе методом статистических испытаний исследуются свойства получаемых оценок и сравниваются значения оценок, полученных аналитически и методом статистических испытаний

На основании результатов, полученных методом статистических испытаний, утверждается, что оценки в функциях, линейных по параметрам, состоятельны в том смысле, что статистика не позволяет отвергнуть гипотезу об их состоятельности, т.е. утверждается, что возможное смещение оценок не выходит за пределы интервальных оценок исследуемых параметров.

Здесь же приводится геометрическая интерпретация задачи получения оценок параметров в конфлюентном анализе пассивного эксперимента. Рассматриваются конкретные алгоритмы получения оценок параметров и матриц рассеяния оценок в конфлюентном анализе для линейных функций, сигнома, полинома, кубических сплайнов, при решении переопределенных систем линейных алгебраических уравнений и интегральных уравнений типа свертки. Рассмотрение сопровождается исследованием методом статистических испытаний функции плотности вероятностей оценок и ее числовых характеристик.

Как следствие теорем 2.1-2.5. при решении задач конфлюентного анализа в том случае, когда закон распределения исходных данных неизвестен, предлагается модифицированный метод наименьших квадратов (минимизируется функционал 2.3).

В третьей главе рассматриваются процедуры оценки параметров моделей динамических систем в активном эксперименте и способы решения некорректных задач в конфлюентном анализе.

Постановка задачи оценивания параметров моделей формулируется следующим образом. Проводится эксперимент, ставящий своей целью определение свободных параметров функции $\eta = f(\xi, \theta)$. Экспериментатор может заставить X принимать любые заданные значения и затем измерить соответствующие значения Y . X и Y описываются соотношениями (1.3). X теперь не является случайной величиной, и ни ε , ни δ не коррелированы с X . Т.е. выражение (1.6) представляет собой обычное уравнение регрессии, к которому без всяких изменений применяются методы регрессионного анализа, например, метод наименьших квадратов. Закон распределения случайной величины в выражении (1.6) определяется по формулам переноса ошибок. Затем в соответствии с полученным законом распределения случайной величины Y составляется функционал метода максимума правдоподобия, координаты точки минимума которого определяют оценки искомых параметров θ . Например, если случайная величина в выражении (1.6) подчиняется нормаль-

ному закону распределения, то для оценки параметров получают функционал метода наименьших квадратов, но дисперсия случайной величины здесь зависит от значений θ , т.е. соответствующие уравнения для определения оценок — нелинейные.

Подчеркивается, что предлагаемым образом достаточно просто получить функционал ММП для линейных функций. Для функций, линейных по параметрам, функционал ММП становится громоздким и, чтобы упростить задачу получения оценок θ , если это допустимо, предлагается прибегнуть к разложению функций в ряд и получить приближенные оценки.

В третьей главе рассматривается также вопрос о некорректных задачах получения оценок в конъюгентном анализе и об определении аналитически в этом случае интервальных оценок параметров.

Показывается, что для приведенной в диссертации постановки конъюгентных задач последние будут некорректны только на этапе получения оценок θ . Поэтому для решения некорректных конъюгентных задач предлагается применять в общем случае метод регуляризации А.Н.Тихонова со стабилизатором, являющимся функцией θ .

Вопрос об определении аналитическим путем интервальных оценок в методе регуляризации в диссертации рассматривается для регрессионных и конъюгентных задач. Способ получения интервальных оценок аналитическим путем базируется на вспомогательной теореме 3.1.

Теорема 3.1. Если функция $\rho(A\theta, Y)$ для $Y = A\theta + \varepsilon$ может быть записана в виде $(Y - A\theta)^T D^{-1} (Y - A\theta)$, где D — ковариационная матрица погрешности исходных данных, и стабилизатор $R = L\theta - R$, то

1) вектор оценок $\hat{\theta}$ точки минимума функции Тихонова

$$T = (Y - A\theta)^T D^{-1} (Y - A\theta) + \alpha^T (L\theta - R)$$

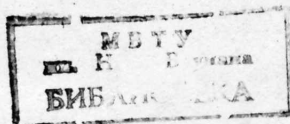
имеет вид $\hat{\theta} = F A^T D^{-1} Y + G^T R$,

2) матрица вторых моментов оценок

$$D(\hat{\theta}) = C^{-1} - C^{-1} L^T (L C^{-1} L^T)^{-1} L C^{-1}, \quad (3.1)$$

3) дисперсия параметра регуляризации α

$$D(\hat{\alpha}) = (L C^{-1} L^T)^{-1}. \quad (3.2)$$



М432333

Здесь $F = C^{-1} - C^{-1} L^T (L C^{-1} L^T)^{-1} L C^{-1}$; $G = (L C^{-1} L^T)^{-1} L C$,
 $C = A^T D^{-1} A$.

Эта теорема применяется для получения интервальных оценок после того, как некоторым другим способом найдены точечные оценки параметра регуляризации α и решения. Для получения интервальных оценок применявшийся при получении точечных оценок стабилизатор $\Omega(\theta)$ линеаризуется в окрестности найденного решения. Тогда интервальные оценки определяют по формулам (3.1), (3.2). Зная величину интервальных оценок, непосредственной проверкой определяют, не внесла ли линеаризация стабилизатора искажений, превышающих погрешность исходных данных. В конъюнктном анализе для получения интервальных оценок заменяют в теореме (3.1) функцию $\rho(A\theta, y)$.

В этой же главе рассмотрен предлагаемый в диссертации метод получения регуляризованного решения плохообусловленных систем линейных алгебраических уравнений, когда параметром регуляризации является число итераций n_0 . Этот метод учитывает неотрицательность исходных данных и позволяет получить неотрицательное решение, что более точно во многих случаях отражает реальную физическую ситуацию. Экспериментальные данные y рассматриваются как дискретные неотрицательные случайные безразмерные величины $N_i = y_i / \Delta y_i$, где Δy_i — "наименьшая" единица измерения случайной величины y_i . Распределение N_i в каждой точке аппроксимируется законом Пуассона. Если ε_i — относительная погрешность y_i , то согласно ММП получают функционал

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_j \xi_{ij} \theta_j - y_i \ln \sum_j \xi_{ij} \theta_j}{\varepsilon_i^2 y_i}, \quad (3.3)$$

точка минимума которого определяет точечные оценки параметров θ .

Теорема 3.2. Функционал (3.3) имеет на выпуклом множестве допустимых решений единственную точку минимума.

Исследования показали, что во многих случаях, например, для обратных задач теплофизики, при восстановлении формы сигналов наиболее приемлемым оказался процесс отыскания точки минимума функционала (3.3) с помощью метода сопряженных градиентов.

Рассматриваемый метод нахождения неотрицательного решения систем линейных алгебраических уравнений является в настоящей

работе базовым при построении алгоритмов решения некорректных задач, в частности, при построении алгоритма решения интегральных уравнений типа свертки с погрешностями в ядре уравнения и в правой части.

Рассмотрены особенности планирования экспериментов в конъюнктном анализе. Показано, что ортогональное планирование в конъюнктном анализе невозможно, как будет выглядеть в конъюнктном анализе $\mathcal{D}$ — оптимальное планирование для функций линейных по параметрам и как конъюнктный анализ можно применить для решения задач линейного программирования при неточных исходных данных.

В четвертой главе приводятся описания Фортран-программ, реализующих на ЭВМ алгоритмы, рассмотренные в главах 2 и 3, и обеспечивающих получение оценок параметров моделей и матриц рассеяния этих оценок для прямой линии; функций, сводящихся путем замены переменных к уравнению прямой линии; линейных функций, полиномов; сигнмов; кубических сплайнов; для решения систем линейных алгебраических уравнений и интегральных уравнений типа свертки в конъюнктном анализе. Здесь же приводится программа для решения плохообусловленных систем линейных алгебраических уравнений. Описания программ содержат описание алгоритмов, описание исходных данных с инструкциями пользователю, инструкции для перфорации и оператору, описание результатов счета, схемы программы и контрольные примеры, т.е. подробную информацию, обеспечивающую применение программ в практических задачах. Программы позволяют получать решение и регрессионных задач. Ограничений на область применения программ практически не имеют. За одно выполнение программы может быть решено произвольное число задач с различными исходными данными и исследовано несколько видов функций (моделей), заданных пользователем, для одних и тех же исходных данных. Точность вычислений и максимальное число итераций задаются пользователем. Программы состоят из программных секций, написанных на языке ФОРТРАН-IV, и предназначены для работы под управлением ДЭС и ОС.

В пятой главе предлагается система преобразования информации для разработки помехозащищенных алгоритмов получения нулевых приближений в сложных процедурах и экспресс-методов анализа систем.

Общий прием, рассмотренный в данной главе, состоит в том, что исходная информация подвергается такому преобразованию, когда влияние помехи уменьшается или исчезает полностью, а полезная информация изменяется по известному закону. В частности, при определении параметров неразрешенных линий оказалось полезным использование модулей Фурье — образов исходных данных. Задача в этом случае сводится к нахождению только оценок амплитуд компонент A_j и оценок интервалов τ_j , на которые смещены эти компоненты. Метод базируется на следующей теореме:

Теорема 5.1. Если форма каждой компоненты неразрешенной спектральной линии $b(t)$ описывается одной и той же функцией $f(t)$, то веса A_j компонент неразрешенных спектральных линий и интервалы τ_j , на которые смещены компоненты относительно друг друга, находятся из условия:

$$\frac{|B(\omega)|}{|G(\omega)||\Phi(\omega)|} = \left| \sum_{j=0}^{n-1} A_{j+1} \exp(-i\omega \tau_j) \right|,$$

где $|B(\omega)|$, $|G(\omega)|$, $|\Phi(\omega)|$ — соответственно модули Фурье-образов $b(t)$, $g(t)$, $f(t)$;

$g(t)$ — импульсная характеристика системы.

Показано, что погрешность вычисления амплитуд A_j и интервалов τ_j зависит в основном от погрешности $\Delta|B(\omega)|$. Величина погрешности $\Delta|B(\omega)|$ определяется значениями $\Delta b(t)$ и конкретным алгоритмом вычисления $|B(\omega)|$. При определенных условиях гармонические помехи не влияют в данном методе на оценки искомых параметров. Рассматриваемый метод позволяет увеличить "разрешение" для случая двух импульсов колоколообразной формы практически на порядок. С помощью предложенных методов удалось получить физически приемлемые результаты без больших затрат даже при значительной неопределенности в ядре интегрального уравнения.

Кроме названного в систему преобразований входят:

$$\begin{aligned} x^{(1)}(t) &= \frac{1}{2a} \int_{-a}^a x(\tau) x(t-\tau) d\tau; & x^{(1)}(t) &= \frac{1}{2} \left[x\left(t - \frac{T}{2}\right) + x\left(t + \frac{T}{2}\right) \right]; \\ x^{(2)}(t) &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t-\tau) d\tau; \\ x^{(3)}(t) &= \frac{1}{2m+1} \sum_{i=-m}^m x(t+iT); & x^{(4)}(t) &= \frac{1}{\kappa T} \int_{-\kappa T}^{\kappa T} x(t-\tau) d\tau \end{aligned}$$

$$- \tau) \sin \frac{2\pi}{T} \tau d\tau; \quad x^{(2)}(t) = \frac{\pi}{4\kappa T} \int_{-\kappa T}^{\kappa T} x(t-\tau) \operatorname{sign} \sin \frac{2\pi\tau}{T} d\tau;$$

$$x^{(2)}(t) = x(t-h) + x(t+h) - 2x(t);$$

$$x^{(2)}(t) = x(t-h) \cdot x(t+h) - x^2(t).$$

В диссертации исследовалось действие этих преобразований на константу; уравнение прямой линии, полином, $x(t) = A \exp(\lambda t)$; $x(t) = A \sin \omega t$; $x(t) = A \cos \omega t$; $x(t) = \operatorname{sh} \lambda t$; $x(t) = \operatorname{ch} \lambda t$; $x(t) = t \exp(\lambda t)$.

Предложенная система интегральных преобразований позволяет проводить фильтрацию функций, описывающих полезные сигналы и помехи, друг относительно друга, что чрезвычайно важно для выделения полезных сигналов на фоне аддитивных помех. Рассмотрение в диссертации свойства преобразований дают возможность предсказать искажения "полезной" информации в процессе "сглаживания" исходных данных с помощью этих преобразований. Система преобразований применялась для оценки параметров разрешенных и неразрешенных сигналов, для получения экспресс-оценок искомого параметра сигналов, для определения нулевых приближений оценок параметров сигналов в более сложных алгоритмах и как основа для построения цифровых регистраторов.

Рассмотренные в данной главе алгоритмы реализованы в аналоговых и цифровых устройствах. Схемы устройств записаны семью авторскими свидетельствами.

В настоящей главе на конкретных практических примерах анализа динамических систем показана работоспособность предложенных автором алгоритмов и программ.

Рассмотрены три группы задач: задачи идентификации, обратные задачи системного анализа и задачи оценивания параметров. Задачи идентификации представлены примерами исследования изменения частоты кварцевого резонатора под действием излучения, определения спектра гамма-излучения импульсного источника, определения состава газовой смеси в экспресс-хроматографии и обработки неразрешенных сигналов. Обратные задачи системного анализа демонстрируются на примере восстановления формы сигнала, искаженного линейной системой передачи с неточно известной импульсной переходной характеристикой, на примере определения независимых выходов продуктов деления и на примере определения граничных ус-

ловий путем решения обратной задачи теплопроводности. Задача оценивания параметров показана на примере применения многофакторных моделей для установления вида функциональной зависимости экономических показателей и построения прогнозов.

Демонстрация работоспособности алгоритмов и программы проведена следующим образом.

Алгоритм и программа решения интегральных уравнений типа овертки с погрешностью в ядре уравнения и в правой части демонстрируется на примере восстановления формы сигнала, прошедшего по линейной системе, и на примере определения граничных условий в обратной задаче теплопроводности. Алгоритм и программа решения системы линейных алгебраических уравнений с погрешностью в элементах системы и в правой части применены для определения спектра гамма-излучения по ослаблению слоями материалов разной толщины и для определения состава газовой смеси в экспресс-хроматографии. Алгоритмы и программы для оценки параметров функций известного вида демонстрируются на примере установления зависимости между изменением частоты кварцевого резонатора и падающим на него потоком нейтронов и на примере определения вида зависимости, связывающей показатель использования производственной мощности междугородной телефонной связи СССР с долей исходящих каналов автоматической системы коммутации, телефонной плотностью местной телефонной сети и долей абонентов городской телефонной сети, имеющих возможность выхода на автоматическую междугородную связь.

Применение интегральных преобразований показано на примере определения интервала и амплитуды двух неразрешенных импульсов.

Здесь же подробно рассмотрен метод нахождения независимых выходов продуктов деления тяжелых ядер по активности продуктов деления и путем определения параметров C и Z_p по экспериментальным выходам продуктов деления. В первом случае задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений с погрешностью в элементах матрицы системы и в правой части, во втором — к оценке параметров функции Гаусса.

Результаты решения физических и физико-технических задач использованы в плановых работах ряда организаций при анализе экспериментов; методы и результаты решения задач хроматографии и обработки неразрешенных пиков хроматограмм и спектрограмм применены в плановых работах ВНИИ хроматографии для анализа

состава газовых смесей; а результаты решения многофакторных задач использованы институтами Министерства связи СССР при разработке перспективных планов развития связи. Предложенные методы позволили автору диссертации дать полный перечень независимых выходов продуктов деления для случаев деления урана-235, урана-238 и плутония-239 нейтронами различных энергетических групп. По настоящее время эти данные используются при работе с продуктами деления тяжелых ядер.

В диссертации показывается, что применение конфлюентного анализа в рассмотренных задачах позволило получить состоятельные оценки параметров моделей динамических систем, а тем самым и адекватные модели их поведения, чего невозможно добиться методами регрессионного анализа без проведения дополнительных экспериментов. Кроме того, во всех случаях приводятся матрицы рассеяния оценок, без которых ценность получаемых решений неизвестна.

В седьмой главе описана процедура автоматизированного сбора и передачи результатов эпизодических экспериментов с импульсными источниками излучения в центр обработки данных. В конфлюентном анализе используются достаточно сложные программы для ЭВМ. И для экспериментов, когда измерения проводятся эпизодически и в разных местах, в диссертации исследован вопрос о передаче данных в центр обработки (ВЦ), имеющий необходимое математическое обеспечение. Рассматриваемая в диссертации постановка эпизодических экспериментов потребовала создания простой системы передачи данных, которая не предъявляла особых требований к линиям связи и была неприхотлива в эксплуатации, но позволяла передавать информацию на любые расстояния. В диссертации обоснована система передачи данных по телефонным линиям связи с помощью серийно выпускаемой аппаратуры передачи данных АПД "Аккорд-1200Ш", доработанной для автоматического ввода информации. Кроме того, для систем передачи данных были разработаны устройство сопряжения и промежуточное ЗУ. Непосредственному участию в опытах предшествовала проверка АПД и линий связи, представлявших собой воздушные телефонные линии, выполненные из биметаллических и стальных проводов диаметром 4 мм. Протяженность линий связи составляла величину 100 км. Далее воздушные провода собирались в многожильный кабель и поступали на городской коммутатор, через который устанавливалась прямая связь с ВЦ.

Информация передавалась по линиям связи на расстояния от 110 до 220 км со скоростью передачи 600 и 1200 Бод при длине блоков передаваемых данных 112 и 240 бит. Проводились также транспортные и механические испытания аппаратуры. В процессе испытаний были получены положительные результаты.

Разработанная система передачи предназначена для работы с цифровыми регистраторами типа СМРЦ-1, имеющими память, рассчитанную на хранение 63-х двадцатиградусных чисел; осциллографическими регистраторами ССП-1 и ССП-2 и амплитудными анализаторами разных типов. Амплитудные анализаторы и цифровой регистратор СМРЦ-1 обладают способностью сохранять информацию длительное время, и скорость передачи данных с них не имеет существенного значения, если не возникает необходимость в быстрой передаче данных по другим причинам. В осциллографических приборах, из которых наиболее совершенен прибор ССП-2, применявшийся для регистрации аналоговых сигналов, информация записывается на запоминающий ЭЛТ, а затем считывается на внешнее устройство в цифровом коде. Время вывода информации с регистратора ССП-2 на внешние устройства имеет существенное значение из-за ограниченной продолжительности хранения ее без разрушений ($\approx 0,1-2$ сек.). Поэтому для передачи данных по существующим телефонным линиям связи потребовалось иметь промежуточное запоминающее устройство (ПЗУ), расположенное вблизи регистраторов и подключенное к каналу связи. Накопленная в таком ЗУ информация передавалась на вычислительный центр (ВЦ) для обработки. Скорость передачи определялась временем обработки одного варианта задачи. Описанное в диссертации ПЗУ было создано на базе накопителя УНО-1024-4 от комплекта многомерного амплитудного анализатора АИ-1024-4. Это ЗУ имело память на 1024-восемнадцатиградусных слова, выход на электронно-лучевую трубку (ЭЛТ); выход на цифровое печатающее устройство типа БЗ-15М, выход на лампы индикации, а также было снабжено соответствующими программами управления, построенными по матричному типу, что увеличивало надежность и гибкость системы. Для записи информации в ЗУ накопителя использовался выход последовательного двоичного 8-разрядного кода комплекта ССП-2. Так как код регистратора 8-разрядный, то для более эффективного использования памяти накопителя его память разбивалась на две части: с 1 - 9 разряд и с 10 - 18 разряд, что дало возможность записать 2048-девятнадцатиградусных слова. ЗУ накопителя УНО-1024-4

позволяло записать информацию с 3 комплектов регистраторов ССТП-2. Показано, что сигналы последовательного двоичного кода ССТП-2 допускают расположение регистраторов на удалении до 5-6 км от накопителя, а дальнейшая передача информации с помощью АПД "Аккорд-120СШ" по телефонным каналам возможна на расстояние до 14000 км.

Для связи ЗУ с регистраторами ССТП-2 и АПД "Аккорд-120СШ" было разработано устройство сопряжения. Описаны назначение устройства сопряжения, принцип работы и схемы его построения.

В этой же главе обоснован предложенный автором способ регистрации узкодиапазонными регистраторами сигналов, у которых неопределенность значений амплитуды составляет несколько порядков.

В экспериментах с ядерно-физическими установками имеет место большая неопределенность в амплитуде электрического аналога регистрируемого импульса, намного превышающая диапазон чувствительности каналов. Для обеспечения надежной регистрации сигналов в традиционных методах применялись несколько параллельных регистрирующих каналов, отличающихся друг от друга чувствительностью. Такая схема экспериментов требовала много аппаратуры и неудобна с точки зрения автоматической передачи информации - большинство переданной информации не используется в дальнейшей обработке. В диссертации разработаны устройства, исключаящие эти недостатки и обеспечивающие автоматический выбор и изменение в нужных пределах амплитуды электрического аналога регистрируемого сигнала. Показано, что применение разработанных устройств упрощает процесс обработки данных и позволяет сократить более, чем в два раза количество необходимой аппаратуры при сохранении той же надежности получения результатов. Новизна технических решений защищена двумя авторскими свидетельствами.

Основные результаты, полученные в диссертации:

I. Разработана теория и практические методы анализа линейных и нелинейных динамических систем, описываемых стохастическими параметрическими моделями, при решении задач идентификации, обратных задач системного анализа и оценивания параметров в активных и пассивных экспериментах. Метод включает в себя процедуры объединения погрешностей исходных данных, оценки истинных значений факторов (аргументов), оценки искоемых параметров, реализующие их программы и процедуру автоматического сбора, передачи и

обработки информации и позволяет получать точечные и интервальные оценки параметров.

2. Предложен и реализован способ учета реальных законов распределения исходных данных в процедурах анализа динамических систем. Для данных с неизвестным законом распределения предложен модифицированный метод наименьших квадратов.

3. Разработаны методы решения некорректных задач в конфликтном анализе, позволяющие аналитически вычислять матрицу рассеяния оценок и учитывать нестрогость решения плохообусловленных систем линейных алгебраических уравнений.

4. Исследованы свойства получаемых оценок искомым параметром моделей: доказана состоятельность и единственность оценок в линейных функциях, показана методом статистических испытаний состоятельность оценок для функций, линейных по параметрам. Показаны возможные пути развития предложенных методов в задачах линейного программирования при учете статистической природы исходных данных.

5. Предложена система преобразований информации, позволяющая построить помехозащищенные алгоритмы для обработки неразрешенных сигналов и алгоритмы фильтрации процессов, описываемых экспонентами, полиномами, гармоническими и другими функциями друг относительно друга. Эти алгоритмы позволяют получать экспресс-оценки параметров и нулевые приближения оценок для сложных процедур.

6. Обоснована структура системы и выбор аппаратуры передачи данных для процедуры автоматизированного сбора, передачи и обработки данных в эпизодических экспериментах, удаленных на значительные расстояния от ВЦ. Созданы устройства, позволяющие автоматически выбирать интервалы измерений по амплитуде и времени, сокращающие количество необходимой аппаратуры и облегчающие процесс автоматизации обработки данных.

7. Разработанные методы демонстрируются на примерах анализа физических, технических и экономических динамических систем. Рассмотрены задачи: восстановление формы сигналов, искаженных линейной системой передачи с неточно заданной импульсной характеристикой; обработка неразрешенных пиков спектрограмм и хроматограмм; определение граничных условий путем решения обратной задачи теплопроводности; определение спектра гамма-излучения импульсного источника и состава газовой смеси в экспресс-хрома-

тографии; определение независимых выходов продуктов деления; установление вида зависимостей, связывающих экономические показатели и прогнозирование значений экономических показателей; установление связи между изменением частоты кварцевого резонатора и флюенса нейтронов. Эти задачи решались для ВНИИ хроматографии, Московского отделения ЦНИИ связи, институтов, проводивших физические эксперименты, и других организаций.

8. Результаты расчетов, проведенных в диссертации, имеют самостоятельное значение: полученная зависимость изменения частоты кварцевого резонатора от флюенса нейтронов может использоваться при разработке детекторов нейтронов (в том числе при мощном гамма-излучении); рассчитанные независимые выходы продуктов деления являются основой всех проводимых расчетных работ, связанных с использованием урана, плутония и их осколков деления; значения прогнозов экономических показателей развития связи необходимы Министерству связи СССР.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. А.с. 503187 (СССР). Устройство для измерения параметров сигналов /А.А.Грешилов. - Оpubл. в Б.И., 1976, № 6.
2. А.с. 785798 (СССР). Устройство для определения амплитуд серии неразрешенных электрических импульсов и интервалов времени между ними /А.А.Грешилов. - Оpubл. в Б.И., 1980, № 45.
3. А.с. 813222 (СССР). Устройство для измерения параметров экспоненциального сигнала /А.А.Грешилов, Ю.А.Бер. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 10.
4. А.с. 813321 (СССР). Устройство для измерения параметров экспоненциальных импульсов /А.А.Грешилов, Ю.А.Бер. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 10.
5. А.с. 830255 (СССР). Устройство для измерения параметров экспоненциального импульса /А.А.Грешилов, Ю.А.Бер. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 18.
6. А.с. 978078 (СССР). Устройство для определения постоянной спада двух экспоненциальных импульсов /Ю.А.Бер, А.А.Грешилов. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 44.
7. А.с. 980020 (СССР). Устройство для определения постоянной спада функции Гаусса /Ю.А.Бер, А.А.Грешилов. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 45.
8. А.с. 223941 (СССР). Устройство для регистрации излучения /А.А.Грешилов В.М.Колобашкин. - Оpubл. в Б.И., 1968, № 25.

9. А.с. 883800 (СССР). Устройство для регистрации электрических импульсов /А.А.Грешилов. - Опубл. в Б.И., 1981, № 43.
10. Грешилов А.А., Липунов А.Д., Покровский В.В. Регистрация интенсивных потоков с помощью кварцевых резонаторов. - Приборы и техника эксперимента, 1978, № 5, с.75-80.
11. Грешилов А.А. Некоторые задачи определения параметров функции известного вида. - В кн.: Контрольно-измерительная аппаратура и автоматика на предприятиях бытового обслуживания. - М.: МТИ, 1974, № 25, с.54-60.
12. Грешилов А.А., Петухова И.А. Применение метода максимума правдоподобия для определения параметров экспоненциальной функции. - В кн.: Ядерные константы. - М.: Атомиздат, 1974, вып. 15, с.143-153.
13. Грешилов А.А., Агульник А.Р. Оценка параметров линейных моделей в пассивном эксперименте. - Метрология, 1981, № 8, с.11-17.
14. Грешилов А.А., Агульник А.Р. Об оценке свободных параметров в пассивном эксперименте. - Заводская лаборатория, 1982, № 1, с.58-63.
15. Грешилов А.А., Пискарева Л.А. Получение параметров функции Гаусса методом максимума правдоподобия. - В сб. аннотаций: Ядерно-физические исследования в СССР. - М.: Атомиздат, 1974, вып. 19, с.15-17.
16. Грешилов А.А., Тесменецкая Н.Г. Оценка параметров функций, сводящихся к уравнению прямой с учетом погрешности в аргументе и функции. - В сб.: Алгоритмы и программы. Рег. № П004151. - М.: ГосФАП, 1980, № 2.
17. Грешилов А.А., Тесменецкая Н.Г. Оценка параметров прямой линии с учетом погрешности в аргументе и функции. - В сб.: Алгоритмы и программы. Рег. № П004152. - М.: ГосФАП, 1980, № 2.
18. Агульник А.Р., Грешилов А.А. Определение коэффициентов полиномиальной зависимости с учетом погрешностей в значениях функции и аргумента. - В сб.: Алгоритмы и программы. Рег. № П004155. - М.: ГосФАП, 1980, № 2.
19. Агульник А.Р., Грешилов А.А. Оценка параметров многофакторной модели с учетом погрешностей в значениях функции и факторов. - В сб.: Алгоритмы и программы. Рег. № П004154. - М.: ГосФАП, 1980, № 2.

20. Агульников А.Р., Грешников А.А. Решение перераспределенной системы линейных алгебраических уравнений с учетом погрешностей в элементах матрицы и правой части. - В сб.: Алгоритмы и программы. Рег. № П004150. - М.: ГосАИП, 1980, №2.
21. Грешников А.А., Тесменецкая Н.Г. Решение плохообусловленных систем линейных уравнений методом сопряженных градиентов. - В сб.: Алгоритмы и программы. Рег. № П004153. - М.: ГосАИП, 1980, № 2.
22. Грешников А.А. Об определении параметров неразрешенных линий. - Заводская лаборатория, 1981, № 7, с.62-65.
23. Грешников А.А., Махонина В.Н. Численная компенсация нелинейных искажений при регистрации сигналов. - Вопросы атомной науки и техники. Ядерные константы. - М.: ЦНИИатоминформ, 1974, вып. 17, с.44-48.
24. Грешников А.А., Колобашкин В.М., Демантьев С.М. Продукты мгновенного деления урана-235, урана-238, плутония-239 в интервале 0 - 1 час. Справочник. - М.: Атомиздат, 1969. - 106 с.
25. Грешников А.А., Колдобский А.Б. Определение изотопного состава галогенов - продуктов деления. - В кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений /Под ред. Л.Р.Кимеля. - М.: Атомиздат, 1971, вып. 12, с.77-81.
26. Грешников А.А., Колобашкин В.М., Махеев В.А. Простой способ вычисления комptonовского распределения в сцинтилляционном гамма-спектрометре. - В кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений /Под ред. Л.Р.Кимеля. - М.: Атомиздат, 1969, вып. 9, с.156-158.
27. Грешников А.А., Вязицкий Ф.Д. Регистратор активности изотопов, пропускающих каскадные гамма-кванты. В кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений /Под ред. Л.Р.Кимеля. - М.: Атомиздат, 1970, вып. 11, с.175-180.
28. Грешников А.А., Соловьев Ю. Определенные независимых изотопов продуктов деления. - В кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений /Под ред. Л.Р.Кимеля. - М.: Атомиздат, 1971, вып. 12, с.82-87.
29. Грешников А.А. Канал передачи спектрометрических данных на большие расстояния. - Автоматика, 1976, № 2, с.108-109.
30. Грешников А.А., Колобашкин В.М. Регистратор излучения при широком диапазоне изменения амплитуды. - В кн.: Вопросы дози-

метрии и защиты от излучений /Под ред. Л.Р.Кимеля. - М.: Атомиздат, 1969, вып.10, с.180-183.

31. Широкополосный усилитель с автоматической установкой коэффициента усиления /М.В.Брунов, В.П.Головков, В.В.Горбатиш и др. - Приборы и техника эксперимента, 1975, №6, с.137-141.
32. Математическая модель функционирования систем связи; организованных по принципу последовательных операций /Ю.А.Бер, А.А.Грешилов, Г.М.Матлин, В.С.Терехов. - Электросвязь, 1980, №8, с.13-17.
33. Кварцевый монитор больших переносов нейтронов /С.В.Головкин, А.А.Грешилов, Е.А.Крамер-Агеев и др. - В кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений /Под ред. Л.Р.Кимеля и В.К.Сахарова. - М.: Атомиздат, 1975, вып.14, с.130.
34. Грешилов А.А. Об учете погрешности в аргументе функции. - Тез.докл. III Всесоюзного совещания по технической диагностике, г.Минск, сентябрь, 1975. - М.: Наука, 1975, с.172-173.
35. Грешилов А.А. Оценка коэффициентов полинома в конфликтном анализе. - Тез.докл. II Всесоюзного совещания по экспериментальным методам и аппаратуре для исследования турбулентности. Новосибирск, 1976, с.190-195.
36. Грешилов А.А., Агульник А.Р. Программа для конфликтной полиномиальной модели развития связи. - Тез.докл. XXIV Всесоюзной научной сессии, посвященной Дню радио. М., 1979, с.84-85.
37. Грешилов А.А., Ксенда Г.И., Бронштейн В.Я. Об одном алгоритме определения импульсной характеристики гидравлического информационного канала. - Тез.докл. XIV Всесоюзного совещания по гидравлической автоматике, г.Владимир, июнь, 1976. - М.: ИИУ, 1976, с.224-227.
38. Грешилов А.А., Терехов В.С. Конфликтный анализ в задачах теплофизики. - Тез.докл. Всесоюзной научной конференции по методам и средствам машинной диагностики газотурбинных двигателей и их элементов. Харьков, 1980, т.2, с.12-13.
39. Грешилов А.А. О передаче информации по телефонной сети. - Тез.докл. III Всесоюзного научно-технического совещания по развитию систем и средств передачи данных для совершенствования технической базы общегосударственной автоматизированной системы управления народным хозяйством ("ГАС"). Калуга, 1980, с.84-85.

40. Грешников А.А., Агульник А.Р. Построение сплайнов с учетом погрешностей в исходных данных. - В сб.: Алгоритмы и программы. Рег. № П005837. - М.: ГосФАП, 1982, №6.
41. Распределение температур и тепловых потоков в условиях захламивания внутренней жилы коаксиального кабеля /А.А.Грешников, В.С.Терехов, Е.С.Турилина и др. - Тез.докл. III Всесоюзного совещания по низкотемпературным теплофизическим измерениям и их метрологическому обеспечению. М., 1982, с.21-22.
42. Грешников А.А. Некорректные задачи связи с погрешностями в исходных данных. - Электросвязь, 1983, № 9, с.9 - 12.
43. Грешников А.А., Терехов В.С. Статистический подход к решению обратных задач теплопроводности. - В кн.: Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования в теплофизике ядерных реакторов /Под ред. В.И.Субботина. - М.: Энергоатомиздат, 1983, с.75-87.
44. Грешников А.А. Применение экономико-математических методов в анализе хозяйственной деятельности связи. - В кн.: Справочник экономиста предприятий связи /Под ред. О.С.Срапинова. - М.: Радио и связь, 1983, с.310-354.

Вклад автора следующий: во всех работах, написанных в соавторстве, автору диссертации принадлежат постановки задач; в работах 3-8 автор высказал идею изобретений, подтвердил их расчетным и экспериментальным путем, руководил разработкой опытных образцов и оформлением заявок на изобретения; в работах 10, 33 автор обосновал методику проведения эксперимента, руководил проведением эксперимента, разработкой электронных схем, проводил обработку результатов измерений; в работах 12-15, 23 автор разработал теорию изложенных методов и схемы программ, участвовал в написании и отладке программ, под его руководством проводились расчеты на ЭВМ по выданным им конкретным заданиям; в работах 16-21, 36, 40 автор разрабатывал схемы программ и под его руководством писались и отлаживались Фортран-программы для ЭВМ, опираясь на имевшиеся Алгол-программы, ранее написанные автором; в работах 24-28, 30 автор разработал теорию методов определения независимых выходов продуктов деления, обосновал и выбрал цепочки радиоактивных превращений ядер, предложил блок-схемы созданных приборов и руководил проведением расчетов активности продуктов деления и изготовлением приборов; в работе 31 автор разработал блок-

схему, выдал задание и руководил разработкой одной из модификаций САВР; в работах 32, 37, 38, 41, 43 автор исследовал и показал применимость ранее разработанных им методов в связи, в теплофизике и для гидравлических информационных каналов, руководил проведением расчетов и проводил анализ полученных результатов.

В. Г. Бессмерт