

М421340

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

МОСКОВСКОГО ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ им. Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

БАЛАНДИН Юрий Павлович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОМЕРНО-МАТРИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ
ЛИНЕЙНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОАГРЕГАТНЫХ ТП
И МАССИВОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Специальность 05.13.01 - Техническая кибернетика
и теория информации

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1984

Работа выполнена на кафедре "Автоматизированных систем управления"
Рязанского радиотехнического института

Научный руководитель -
доктор технических наук, профессор БИРИКОВ В.Ф.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор АГЕЕВ В.М.
кандидат технических наук, доцент КОНЬКОВ В.Г.

Ведущая организация - ЦНИИ Связи (Московское отделение)

Защита состоится "10" 12 1984 г. на заседании
специализированного совета К053.15.12 в Московском высшем
техническом училище им. В.В. Куйбышева 12-й
по адресу: 107005, г. М

С диссертацией мож
высшего технического

Отзывы в 2 экз. с
лать по указанному ад

Автореферат разосл

Ученый секретарь
специализированного
К.Т.Н., доцент

M 42 1340

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Расширение масштабов общественного производства, увеличение выпуска и повышение качества продукции в условиях экономного использования трудовых и материальных ресурсов приводит к все большему усложнению технологических процессов (ТП) и, как следствие, к необходимости создания новых и совершенствования существующих многообъектных автоматизированных систем управления (АСУ) и контроля ТП. Широкие перспективы в этом направлении открылись, с одной стороны, благодаря быстрому развитию электронно-вычислительной техники, в том числе мини- и микро-ЭВМ, с другой стороны – благодаря разработке на основе принципа сложности научно-методического обеспечения систем автоматизированного проектирования (САПР) АСУ ТП. Одной из основных проблем при проектировании АСУ ТП, как многообъектной иерархической системы является проблема формализации математического описания ТП и процессов управления технологическими агрегатами с целью более эффективного использования ЭВМ как на этапе проектирования, так и при эксплуатации АСУ ТП.

Усложнение систем и объектов управления, дискретизация сигналов при использовании ЭВМ сопровождаются увеличением числа и порядков индексов во временных и спектральных характеристиках соответствующих моделей. Наряду с этим многоиндексный характер преобретают также информационные потоки в АСУ ТП за счет внедрения многоканальных измерительных и контролирующих устройств. В условиях погрешностей измерения и дискретизации все более актуальными становятся задачи оценивания многоиндексных характеристик моделей и массивов экспериментальных данных. Одно из эффективных направлений в решении этих задач основано на применении аппарата многомерных матриц, наделенных структурой, как нового алгебраического средства укрупненного представления многоиндексных массивов. При этом возникает необходимость в дальнейшем развитии исследований по использованию структурных свойств многомерно-матричных моделей при проектировании алгоритмов оценивания на основе принципа сложности или методов регуляризации. Недостаточно разработаны также вопросы практической реализуемости многомерно-матричных алгоритмов оценивания.

Цель работы. Основной целью диссертационной работы является разработка и исследование алгоритмов оценивания характеристик



многообъектных систем управления, многомерных сигналов и массивов экспериментальных данных из линейных многомерно-матричных моделей с учетом больших размеров и структурных особенностей наблюдений и оценок, а также ограничений на время обработки и на вычислительные ресурсы ЭВМ средней и малой мощности.

Методы исследования. Решение поставленных задач получено на основе принципа сложности в теории управления, методов регуляризации, многомерно-матричных методов в теории управления и контроля, теории оптимальной фильтрации и оценивания, теории линейных дифференциальных и разностных уравнений, методов цифровой обработки многомерных сигналов. Для подтверждения работоспособности и эффективности разработанных алгоритмов проводились модельные эксперименты на ЭВМ.

Научная новизна. Разработаны методы и правила агрегирования, декомпозиции и структурных преобразований многомерно-матричных выражений, позволяющие проводить на высоком уровне формализации аналитическое проектирование алгоритмов оценивания. Определены операции псевдообращения и сингулярного разложения многомерных матриц, сформулированы понятия многомерных ленточной и теплоцевой матриц, вводится понятие обусловленности многомерной матрицы. Задача оценивания из многомерно-матричной модели наблюдения становится как многомерная обратная задача. Разработаны и исследованы алгоритмы решения многомерных обратных задач на основе принципа сложности или методов регуляризации в разомкнутой и замкнутой (рекуррентной) форме. На основе аппроксимации элементов собственного базиса многомерной теплоцевой матрицы разработаны и исследованы спектральные алгоритмы устойчивого оценивания многоиндексных массивов. Предложены устойчивые замкнутые алгоритмы двумерной и четырехмерной скользящей рекурсии ограниченной сложности, позволяющие решать пространственно-неинвариантные, несепарабельные многомерные обратные задачи в темпе с поступлением данных.

Практическая ценность. Разработанные правила преобразования многомерно-матричных выражений, а также операции псевдообращения и сингулярного разложения многомерных матриц применяются в практике проектирования алгоритмов оценивания на аналитическом уровне с высокой степенью формализации. Эти правила и операции могут трактоваться как алгоритмы преобразования многомерных массивов экспериментальных данных, ориентированные на машинную реализацию. Построенные для практических задач многомерно-матричные модели

наблюдения количественно отражают сложность моделируемой системы через размерность и порядок оцениваемой матрицы, что позволяет более полно учитывать априорные данные о модели и оценке.

Применение разработанных алгоритмов на основе аппроксимации собственных базисов многомерных теплицевых матриц позволяет повысить точность оценивания с одновременным уменьшением объема вычислений по сравнению с алгоритмами, использующими быстрое преобразование Фурье.

Для субоптимальных алгоритмов двумерной и четырехмерной скользящей рекурсии ограниченной сложности даются практические рекомендации по выбору параметра сложности алгоритмов в зависимости от требований к точности оценивания.

Для предложенных многомерно-матричных преобразований и алгоритмов оценивания разработано программное обеспечение на алгоритмическом языке "ФОРТРАН-IV" и проведена его экспериментальная проверка при решении модельных и практических задач.

Реализация результатов работы. Работа по теме диссертации проводилась на кафедре "САУ" МВТУ им. Н.Э.Баумана и на кафедре "АСУ" Рязанского радиотехнического института в соответствии с планами научно-исследовательских работ по госбюджетным и хозяйственным темам.

Научные результаты и практические рекомендации диссертации используются в следующих работах:

"Разработка многомерно-матричных алгоритмов построения моделей ТП производства вискозы" (Гос.регистрация № 79010242);

"Разработка алгоритмов и программ цифровой фильтрации изображений" (Гос.регистрация № 77008383);

"Разработка и исследование алгоритмов и программ восстановления спектрограмм".

Суммарный годовой экономический эффект по результатам работ подтвержденный актами внедрения, составляет 100 тыс. рублей.

Результаты, полученные автором, включены также в отчеты по НИР (Гос.регистрация № 80016660, 0182.201174, 0183.00 18865) и использованы на предприятии Заказчика.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной конференции "Методы и средства преобразования сигналов" (Рига, 1978), на III Всесоюзной школе-семинаре "Современные проблемы автоматического управления" (Нарва, 1979), на II Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Математическое, алгоритмическое

и техническое обеспечение АСУТП" (Ташкент, 1980), на IX Всесоюзном научно-техническом совещании "Создание и внедрение автоматизированных и автоматических систем управления непрерывными и дискретно-непрерывными ТП" (Ивано-Франковск, 1980), на III Всесоюзном совещании по автоматизации проектирования САУ и АСУТП" (Иваново, 1981), на III Всесоюзном симпозиуме "Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии" (Новосибирск, 1982).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и шести приложений. Работа изложена на 244 страницах, включая 61 рисунок, 2 таблицы, список литературы из 130 наименований, приложения на 30 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и определен круг задач, показана новизна и практическая ценность получаемых результатов.

В первой главе проводится анализ задач оценивания многоиндексных характеристик и массивов экспериментальных данных, возникающих при проектировании и эксплуатации сложных многообъектных систем автоматизированного управления и контроля.

Одним из наиболее распространенных в настоящее время способов увеличения производительности технологических линий является организация параллельной работы нескольких однотипных установок (агрегатов), объединенных по энергомагистралям, источникам сырья и реагентов, а также нагрузкой по выходу. Процесс совместной работы агрегатов представляет собой многоагрегатный ТП.

При проектировании систем автоматизированного управления многоагрегатным ТП возникают задачи идентификации модели многообъектной системы управления, синтеза корректирующих устройств или алгоритмов для управляющих ЭВМ с учетом однотипности агрегатов. Класс линейных стационарных систем с однотипными агрегатами рассматривался ранее в теории однотипных связанных систем регулирования. Однако нестационарность каждого агрегата, а также межагрегатных связей, неидентичность каналов регулирования не позволяют использовать упрощающие положения этой теории. Возникает

необходимость в применении более общих методов анализа и синтеза нестационарных многообъектных систем управления во временной и спектральной областях, разработанных научной школой В.В.Солодовникова, В.Ф.Бирюкова.

Исходные уравнения, описывающие процесс функционирования многоагрегатного ТП, задаются в виде матрично-индексных дифференциальных уравнений в пространстве состояний

$$\begin{aligned}\dot{\bar{X}}_{\alpha} &= \sum_{\alpha} \bar{A}_{\alpha, \alpha}(t) \bar{X}_{\alpha}(t) + \sum_{\beta} \bar{B}_{\alpha, \beta} \bar{U}_{\beta}(t), \\ \bar{Y}_{\alpha}(t) &= \sum_{\alpha} \bar{H}_{\alpha, \alpha} \bar{X}_{\alpha}(t) + \sum_{\beta} \bar{D}_{\alpha, \beta}(t) \bar{U}_{\beta}(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где $\bar{U}_{\beta}(t)$, $\bar{Y}_{\alpha}(t)$, $\bar{X}_{\alpha}(t)$ - векторы входа, выхода и состояний каждого агрегата; $\bar{A}_{\alpha, \alpha}(t)$, $\bar{B}_{\alpha, \beta}(t)$ - матрицы свободной и вынужденной составляющих динамической части; $\bar{H}_{\alpha, \alpha}$ - матрица наблюдений; $\bar{D}_{\alpha, \beta}(t)$ - матрица коэффициентов передачи статических каналов.

Для спектрального представления многообъектной системы (1) в пространстве состояний выберем базисную динамическую систему (БДС) с легко моделируемой системой дифференциальных уравнений относительно состояний $Z_{\beta \lambda i j}(t)$:

$$\dot{Z}_{\beta \lambda i j}(t) = j Z_{\beta \lambda i j}(t) + \delta_{j0} t^{i-1} U_{\beta \lambda}(t), \quad (2)$$

где δ_{j0} - символ Кронекера; λ - индекс числа входов каждого агрегата; β - индекс числа агрегатов; i, j - индексы, определяющие соответственно нестационарность и динамику БДС.

Двухиндексные состояния $X_{\alpha \beta}(t)$ многоагрегатного ТП связаны с состояниями БДС (2) через шестииндексную характеристику спектров состояний:

$$X_{\alpha \beta}(t) = \sum_{\beta=1}^R \sum_{\lambda=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{\beta \lambda \alpha i j} Z_{\beta \lambda i j}(t). \quad (3)$$

Задачи идентификации и синтеза корректирующих устройств в условиях помех измерения для модели (3) сводятся к оцениванию спектральной характеристики $C_{\beta \lambda \alpha i j}$ или ее сечений.

Число индексов, их размер и структура для всей спектральной характеристики или оцениваемой её части задается априорными сведениями о системе.

Особое внимание уделяется априорно заданным условиям однотипности агрегатов, которые также формулируются в виде линейных многоиндексных соотношений относительно спектральной матрицы. Другой характерной задачей оценивания многоиндексных массивов в АСУ ТП является задача повышения разрешающей способности аналитических приборов растровой спектроскопии для контроля качества

поверхностных свойств выходных продуктов и материалов ТП.

Математическая модель процесса контроля с достаточной точностью аппроксимируется трехиндексным оператором суперпозиции (два индекса по пространственным координатам, один по энергетической):

$$Y_{\omega r} = \sum_{\mu=1}^M \sum_{\nu=1}^N \sum_{\lambda=1}^L h_{\mu\nu\omega r\lambda} X_{\mu\nu\lambda} + V_{\omega r}, \quad (4)$$

где $h_{\mu\nu\omega r\lambda}$ - аппаратная функции, $Y_{\omega r}$ - наблюдения, $X_{\mu\nu\lambda}$ - оцениваемый массив, $V_{\omega r}$ - погрешности наблюдения. Аппаратная функция $h_{\mu\nu\omega r\lambda} = h_{\mu-\mu+1, \omega-\omega+1} \cdot h_{r, r-\nu+1}$, неразделимая по пространственным координатам и нестационарная по энергетической координате задается в конечной области изменения индексов.

Значительная часть раздела посвящена обзору и анализу реализационной сложности существующих алгоритмов оценивания многоиндексных массивов больших размеров. (Г.И.Василенко, В.А.Сойфер, А.К.Джейн, У.Претт, Т.Хуанг).

Во второй главе проводится многомерно-матричная формализация задач оценивания из многоиндексных моделей. Это означает переход от многоиндексных соотношений к многомерно-матричным с последующим преобразованием их к стандартной форме уравнения наблюдения, аналогичной линейному матричному уравнению с неизвестным вектором-столбцом. Указанные операции предполагают разработку правил агрегирования, декомпозиции и структурных преобразований многомерно-матричных выражений на базе операций с многомерными матрицами. Многомерная матрица $A(p, q)^{**}$ является алгебраическим средством укрупненного представления многоиндексного массива

$a_{\bar{k}_1, \bar{\omega}_1, \bar{k}_2, \bar{\omega}_2, \dots}$. Структура $A(p, q)$ задается целыми положительными числами p и q , определяющими соответственно число столбцовых (+) и строчных (-) индексов в массиве. Совокупность столбцовых индексов $(j_1, j_2, \dots)$ составляет мультииндекс $\bar{j}$, строчных $(i_1, i_2, \dots)$ - мультииндекс $\bar{i}$. Старшинство индексов и мультииндексов одного структурного типа определяется слева направо как в обозначениях элементов многоиндексного массива $\{a_{\bar{j}\bar{i}}\}$, так и в обозначениях многомерной матрицы $A(p+r, q+i)$.

^{**} Милов Л.Т. Многомерно-матричные производные при анализе чувствительности САУ. - Автоматика и телемеханика, 1979, № 9, с. 15-25.

Агрегирование и декомпозиция многомерно-матричных выражений. Операция агрегирования представляет собой объединение многоиндексных и блочно-индексных соотношений в многомерно-матричные более высокой размерности. Декомпозиция - обратная операция.

Утверждение 2.1.1. Агрегирование свернутых сомножителей $Y_{\rho\sigma}(p,q) = A_{\rho}(p,\ell) B_{\sigma}(\ell,q)$ по мультииндексам ρ и σ приводит к многомерно-матричному соотношению

$$Y(r+p+s, q) = [A(r+p, \ell) \otimes E(s, s)] B(\ell+s, q) = A(r+p, \ell) B(\ell+s, q), \quad (5)$$

где $E(s, s)$ - единичная многомерная матрица, $\otimes$ - символ кронекеровского умножения.

Утверждение 2.1.2. Многомерно-матричное выражение

$$Y(r+p, q) = A(r, s+m) [E(s, s) \otimes D(m+p, \ell)] B(s+\ell, q) \quad (6)$$

есть результат агрегирования по индексу матрично-индексной суммы

$$Y(r+p, q) = \sum_{\ell} A_{\sigma}(r, m) D(m+p, \ell) B_{\sigma}(\ell, q).$$

Утверждение 2.1.3. Агрегирование кронекеровских сомножителей $Y_{\rho\mu\nu}(p+\ell, q+b) = A_{\rho\sigma}(p, q) \otimes B_{\mu\nu}(\ell, b)$ дает многомерно-матричное соотношение:

$$Y(r+m+p+\ell, s+n+q+b) = [E(r, r) \otimes C(m+p, p+m)] \times [A(r+p, s+q) \otimes B(m+\ell, m+b)] [E(s, s) \otimes C(q+n, n+q)], \quad (7)$$

где $C(m+p, p+m)$, $C(q+n, n+q)$ - многомерные перестановочные матрицы.

Утверждение 2.1.4. Агрегирование суммы кронекеровских сомножителей $Y(p+\ell, q+s) = \sum_{\ell} A_{\rho}(q, q) \otimes B_{\sigma}(\ell, s)$ по мультииндексу ρ дает выражение

$$Y(p+\ell, q+s) = A(p, q+r) [E(q, q) \otimes B(r+\ell, s)]. \quad (8)$$

Разработанные правила позволяют компактно описать различные линейные многоиндексные соотношения и выделить элементы взаимодействующих массивов в отдельные многомерно-матричные сомножители. Это оказывается полезным не только для проектирования алгоритмов оценивания, но и позволяет во многих случаях выявить тип и порядок взаимодействия массивов в физической модели задачи.

Преобразование структуры многомерно-матричных выражений проводится с целью приведения их к стандартной форме уравнения наблюдения, в котором оцениваемая матрица $X(q, 0)$ полностью обрабатывается преобразователем $H(p, q)$, расположена справа от него

и имеет структуру гиперстолбца:

$$Y(p, 0) = H(p, q) X(q, 0). \quad (9)$$

С этой целью разрабатываются правила перегруппировки сомножителей в смешанном произведении, изменения порядка следования кронеровских и смешанных сомножителей, которые сформулированы в утверждениях 2.2.1. - 2.2.7. Среди них выделим наиболее характерное.

Утверждение 2.2.5. Если матрица $X(p, 0)$ взаимодействует только со старшими блоками правого и левого сомножителей:

$$A(\ell, p+r) X(p, q) B(q+r, m) = Y(\ell, m) \quad , \quad (10)$$

то

$$A(\ell, p+r) [E(p, p) \otimes B(r+m, q)] X(p+q, 0) = Y(\ell+m, 0) \quad . \quad (11)$$

Результат нескольких этапов преобразования сложного многомерно-матричного выражения

$$A(\ell, r+a) [B(r, s) \otimes G(a, p) X(p, q) Q(q, b)] D(s+b, m) = Y(\ell, m) \quad (12)$$

относительно $X(p, q)$ будет иметь вид

$$A(\ell, r+a) [G(a, p) \otimes B(r, s) D(s+m, b) Q(b, q)] X(p+q, 0) = Y(\ell+m, 0). \quad (13)$$

Преобразование (12) и (13) является примером приведения оцениваемого массива ко входу линейного оператора. Левый сомножитель перед $X(p+q, 0)$ фактически задает алгоритм формирования многомерно-матричного оператора наблюдения из исходных и априорных данных.

Агрегирование и структурные преобразования спектральной модели многоагрегатного ТП, моделей суперпозиции и свертки с ограниченным ядром приводят к уравнениям наблюдения с многомерной ленточной и многомерной теплоцевой матрицами, определенными в работе. Свойства этих матриц эффективно используются в дальнейшем при разработке алгоритмов оценивания. Определены понятия обусловленности многомерной матрицы, на основании чего задача получения устойчивых оценок $X(q, 0)$ из модели наблюдения

$$Y(p, 0) = H(p, q) X(q, 0) + V(p, 0) \quad (14)$$

при плохой обусловленности матрицы $B(q, q) = H^T(p, q) H(p, q)$ сформулирована как многомерная обратная задача. Общее решение многомерной обратной задачи может быть выражено через операции псевдообращения и сингулярного разложения многомерных матриц, определенные в разделе.

В третьей главе разрабатываются и исследуются многомерно-матричные алгоритмы решения обратных задач на основе принципа сложности, когда оцениваемые характеристики реализуются в виде устройств и моделей минимальной сложности, или на основе метода регуляризации, когда получаемые оценки являются конечным результатом процесса обработки, например, при восстановлении измерительной информации.

Разомкнутые устойчивые алгоритмы.

1. Пусть на линейном нормированном пространстве X задан вещественный неотрицательный функционал сложности

$$N(X) = [X(q, 0) - X^*(q, 0)]^T [X(q, 0) - X^*(q, 0)] \quad (15)$$

такой, что система подмножеств $X_\alpha = \{X \in X; N(X) \leq \alpha\}$ образует непрерывную шкалу сложности. Фиксированный элемент $X^*(q, 0)$ (прототип) наименьшей сложности без ограничений принадлежит X_α . Выражение для элемента минимальной сложности при ограничении на функционал качества

$$J(X) = [N(p, q)X(q, 0) - Y(p, 0)]^T R_v^{-1}(p, p) [N(p, q)X(q, 0) - Y(p, 0)] \quad (16)$$

где $R_v^{-1}(p, p)$ - корреляционная матрица помехи в модели (14), будет иметь вид

$$X_\alpha(q, 0) = [N^T(p, q) R_v^{-1}(p, p) N(p, q) + \alpha E(q, q)]^{-1} [N^T(p, q) Y(p, 0) + \alpha X^*(q, 0)] \quad (17)$$

2. Пусть на основе априорной информации о решении задан стабилизирующий функционал $Q(X) = X(0, q) \Gamma(q, q) X(q, 0)$, где матрица $\Gamma(q, q)$ сформированная из моделей многоиндексных конечных разностей является симметричной многомерной тензорной матрицей, и определен функционал качества (16). Многомерно-матричный регуляризирующий алгоритм, безусловно минимизирующий функционал $E(X) = J(X) + \alpha N(X)$, запишется в виде

$$X_\alpha(q, 0) = [N^T(p, q) R_v^{-1}(p, p) N(p, q) + \alpha \Gamma(q, q)]^{-1} N^T(p, q) R_v^{-1}(p, p) Y(p, 0) \quad (18)$$

3. Если, в отличие от предыдущего алгоритма, априорно задан не стабилизатор решения, а корреляционная матрица $R_x(q, q)$, то оценка при этом не зависит от α и имеет вид

$$X^0(q, 0) = [N^T(p, q) R_v^{-1}(p, p) N(p, q) + R_x^{-1}(q, q)]^{-1} N^T(p, q) R_v^{-1}(p, p) Y(p, 0) \quad (19)$$

Кроме приведенных здесь алгоритмов, в разделе, разработан алгоритм, учитывающий погрешность в задании $N(p, q)$, а также алгоритм с линейными многомерно-матричными ограничениями типа равенств.

Замкнутая форма алгоритмов устойчивого решения многомерной обратной задачи разрабатывается для алгоритма (18) при $R_v(p, p) = E(p, p)$.

Разработка замкнутых алгоритмов предполагает декомпозицию многомерно-матричной модели по индексам замыкания любого уровня иерархии, которые путем структурных преобразований выводятся в старшие. Рассматривается алгоритм двумерной рекурсии с нарастающим размером $X(q, 0)$, рассчитанный на ленточную структуру матрицы $H(p, q)$. Исходное уравнение (14) после декомпозиции по двум индексам примет вид

$$Y_p(p, 0) = H_{p\gamma}(p, q) X_\gamma(q, 0) + V_p(p, 0). \quad (20)$$

Учитывая, что индексы γ, p связаны через ширину ленты R в $H(p, q)$, соотношением $p = \gamma + R - 1$, оставим в обозначении только индекс γ . Решение на каждом шаге можно записать через алгоритм (18):

$$\hat{X}_\gamma(q, 0) = C_\gamma(q, q) H_\gamma^T(p, q) Y_\gamma(p, 0), \quad (21)$$

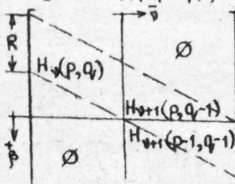
где $C_\gamma(q, q) = [B_\gamma(q, q)]^{-1} = [H_\gamma^T(p, q) H_\gamma(p, q) + \alpha I_\gamma(q, q)]^{-1}$.

Запишем (21) в эквивалентной рекуррентной форме:

$$\hat{X}_\gamma(q, 0) = \left[\frac{\hat{X}_\gamma(q, 0)}{0} \right] + \left[\frac{C_{\gamma+1}(q, q-1)}{C_{\gamma+1}(q-1, q-1)} \right] \cdot [d_{\gamma+1}(q-1, 0) - b_{\gamma+1}(q-1, q) \hat{X}_\gamma(q, 0)], \quad (22)$$

где $d_{\gamma+1}(q-1, 0) = H_{\gamma+1}^T(p, q-1) Y_\gamma(p, 0) + H_{\gamma+1}(p-1, q-1) Y_{\gamma+1}(p-1, 0)$,

суть остальных обозначений ясна из блочного представления матриц $H_{\gamma+1}(p, q)$, $B_{\gamma+1}(q, q)$, $C_{\gamma+1}(q, q)$:



$$B_{\gamma+1}(q, q) = \begin{bmatrix} B_{\gamma+1}(q, q-1) & B_{\gamma+1}(q, q) \\ B_{\gamma+1}(q-1, q-1) & B_{\gamma+1}(q-1, q) \end{bmatrix}, \quad C_{\gamma+1}(q, q) = \begin{bmatrix} C_{\gamma+1}(q, q-1) & C_{\gamma+1}(q, q) \\ C_{\gamma+1}(q-1, q-1) & C_{\gamma+1}(q-1, q) \end{bmatrix}.$$

Далее выведены условия сходимости разработанных алгоритмов на основе второго метода Ляпунова. Проведен анализ погрешностей при решении многомерной обратной задачи. Даны рекомендации по выбору параметров регуляризации.

В четвертой главе на базе устойчивых и оптимальных в смысле минимума выбранных функционалов алгоритмов предыдущего раздела разрабатываются и исследуются алгоритмы решения многомерных обратных задач ограниченной сложности. Сложность практической реализации алгоритмов характеризуется числом основных операций (сложе-

ние плюс умножение) и числом необходимых элементов памяти. Технические ограничения на время обработки и тип используемых ЭВМ при больших размерах обрабатываемых массивов приводят к необходимости синтеза алгоритмов пропорциональной сложности, то есть таких, для которых характеристики сложности линейно зависят от общего объема $(N+R-1)$ обрабатываемых массивов экспериментальных данных. Для пространственно-инвариантных моделей это достигается применением быстрых спектральных преобразований. Многомерные обратные задачи с пространственно-неинвариантным ядром решаются путем применения разрабатываемых субоптимальных рекуррентных алгоритмов ограниченной сложности.

Разработке спектральных алгоритмов предшествует исследование многомерной теплоцевой матрицы, построенной для разных типовых аппаратных функций измерительных и контролируемых устройств. Показано, что любое ее двумерное сечение, полученное путем декомпозиции, диагонализуется быстрым вещественным синусоидальным дискретным преобразованием, близким к собственному.

Разработка рекуррентных алгоритмов ограниченной сложности производится для модели с многомерной ленточной матрицей исходя из оптимального алгоритма двумерной рекурсии (20). Ограничение сложности алгоритмов осуществляется введением целого положительного параметра K , связанного с количественными показателями сложности и точности алгоритмов. В качестве такого параметра выбирается количество блоков в гипервекторах наблюдения $Y(p, 0)$ и оценки $X(q, 0)$, участвующих в вычислениях на каждом шаге рекурсии. Выделим в нормальной к (14) системе уравнений два последовательных шага v и $v+1$, $v=1, N$:

$$B_v(q, q; \kappa) X_v(q, 0; \kappa) = H_v^T(p, q; \kappa) Y_v(p, 0; \kappa). \quad (22)$$

Размер гипервекторов $X_v(q, 0; \kappa)$, $X_{v+1}(q, 0; \kappa)$ постоянен и ограничен K блоками. Размер $Y_v(p, 0; \kappa)$, $Y_{v+1}(p, 0; \kappa)$ ограничен $K+R-1$ блоками, где R — ширина ленты многомерной матрицы на верхнем иерархическом уровне. Учитывая обозначения (22) запишем алгоритм вычисления новой оценки $X_v(q, 0; \kappa+1)$, расширенной на один блок по отношению к $X_v(q, 0; \kappa)$:

$$\hat{X}_v(q, 0; \kappa+1) = \left[\frac{\hat{X}_v(q, 0; \kappa)}{\varnothing} \right] + \left[\frac{C_v(q, q-1; \kappa)}{C_v(q-1, q-1)} \right] \times \\ \times [H_v^T(p, q-1) Y_v(p, 0; \kappa+1) - B_v^T(q, q-1; \kappa) \hat{X}_v(q, 0; \kappa)]. \quad (23)$$

Далее от расширенного гипервектора оценок на ν -ом шаге $X_{\nu}(q, 0; k+1)$ переходим к гипервектору оценок из k блоков на $(\nu+1)$ -ом шаге $X_{\nu+1}(q, 0; k)$, взяв k блоков $X_{\nu}(q, 0; k+1)$, начиная со второго. Оставшийся первый блок далее не меняется и может быть выведен из памяти ЭВМ как результат оценки и т.д. Сложность алгоритмов во всех случаях пропорциональна N . Основной вопрос состоит в правильном выборе параметров сложности k при заданных ограничениях на точность и сложность алгоритмов. Даны рекомендации по построению для k дискретных шкал сложности алгоритмов. Показано, что точность оценивания, близкая к оптимальной ($k = N$), достигается для значений $k = R$.

Увеличение глубины рекурсии до двух индексов как по наблюдаемому массиву, так и по массиву оценок с использованием приемов предыдущего алгоритма приводит к алгоритмам четырехмерной скользящей рекурсии с двумя параметрами сложности k, l . Разработанные алгоритмы позволяют проводить вычисления при ограниченной оперативной памяти ЭВМ в темпе с поступлением данных или в режиме последовательного обмена с внешней памятью.

В пятой главе проведено экспериментальное исследование разработанных алгоритмов на модельных задачах оценивания спектральных характеристик многоагрегатных ТП и восстановления входов измерительных и контролирующих систем растрового типа. Экспериментально подтверждена эффективность спектральных регуляризирующих алгоритмов на основе аппроксимации элементов собственного базиса теплицевых матриц вещественным модифицированным синусным преобразованием по сравнению с алгоритмами, использующими быстрое преобразование Фурье. Построены дискретные шкалы сложности для субоптимальных алгоритмов двумерной и четырехмерной скользящей рекурсии. Даны рекомендации по экспериментальному определению параметров сложности алгоритмов и параметров регуляризации. По результатам моделирования показана меньшая чувствительность замкнутых алгоритмов к погрешностям в задании ядра операторов суперпозиции по сравнению с эквивалентными разомкнутыми алгоритмами. Экспериментально исследованы устойчивость и сходимость разработанных рекуррентных алгоритмов.

Показано, что в результате применения разработанных алгоритмов и программ многомерно-матричных преобразований автоматизирован этап проектирования линейной спектральной модели многоагрегатного ТП мерсеризации целлюлозы. Уточнение параметров модели за счет

идентификации межагрегатных связей и оценивания коэффициентов регрессии отжимного пресса позволило увеличить степень стабилизации параметров качества щелочной целлюлозы. Приведены результаты использования программ спектральных регуляризирующих алгоритмов, а также рекуррентных алгоритмов ограниченной сложности для решения задач восстановления спектров обратно-рассеянных ионов низких энергий и растровых ож-электронных спектров средствами мини и микро- ЭВМ.

Решена задача выделения хребтовых линий на цифровой интерферограмме для измерения и контроля рельефа поверхностей.

В приложениях приведены доказательства утверждений, исходные данные и результаты оценивания, описание архива модулей пакета прикладных программ многомерно-матричных алгоритмов оценивания экспериментальных массивов данных, документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем

1. Проведен сравнительный анализ линейных задач с многоиндексными характеристиками и сигналами. Показана необходимость использования при проектировании алгоритмов многомерных матриц, обладающих структурными свойствами.

2. Разработаны правила агрегирования, декомпозиции, структурных преобразований многомерно-матричных выражений, позволяющие автоматизировать процесс проектирования алгоритмов оценивания многоиндексных характеристик и массивов экспериментальных данных.

3. Сформулирована многомерная обратная задача. На основе принципа сложности или методов регуляризации разработаны устойчивые алгоритмы решения многомерной обратной задачи в разомкнутой и замкнутой формах.

4. Предложены спектральные алгоритмы решения многомерной обратной задачи, обеспечивающие пропорциональную сложность вычислений за счет аппроксимации собственных элементов многомерной теплоцевой матрицы.

5. Синтезирован класс субоптимальных алгоритмов двумерной и четырехмерной скользящей рекурсии ограниченной сложности, позволяющих решать пространственно-инвариантные, неслепящиеся многомерные обратные задачи на ЭВМ малой и средней мощности в реальном масштабе времени.

6. Экспериментально подтверждена эффективность разработан-

ных алгоритмов на модельных задачах, а также при решении практических задач.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации.

1. Баландин Ю.П. Программное обеспечение многомерно-матричных операций при автоматизированном проектировании многообъектных систем управления: Тезисы докладов III Всесоюзного совещания по автоматизации проектирования систем автоматического и автоматизированного управления технологическими процессами. - М.: 1981, с. 162-163.

2. Баландин Ю.П. Псевдообращение многомерных матриц. - Алгоритмические методы и программирование в радиоэлектронике: Межвуз. сб. - Рязань: РРТИ, 1979, с. 128-132.

3. Баландин Ю.П. Оценивание симметрических матриц по многомерному методу наименьших квадратов. - Обработка информации в автоматических системах: Межвуз. сб. - Рязань: РРТИ, 1980, с. 146-149.

4. Баландин Ю.П., Бирюков В.Ф. Рекуррентные алгоритмы ограниченной сложности для устойчивого решения дискретного уравнения свертки. - Математические методы оптимального управления и обработки данных: Межвуз. сб. - Рязань: РРТИ, 1983, с. 3-9.

5. Баландин Ю.П., Бирюков В.Ф., Лабутин Г.И. Аппроксимация собственных базисов линейных операторов искажений при решении многомерных обратных задач измерительной техники. - Автометрия, 1984, № 2, с. 23-28.

6. Баландин Ю.П., Лабутин Г.И., Милов Л.Т. Декомпозиция и агрегирование алгоритмов линейной обработки многомерных массивов данных. - Системы управления, передачи, преобразования и отображения информации: Межвуз. сб. - Рязань: РРТИ, 1980, с.21-26.

7. Баландин Ю.П., Милов Л.Т. Метод наименьших квадратов для многомерных массивов данных. - Управление. Передача, преобразование и отображение информации: Межвуз. сб. - Рязань: РРТИ, 1977, вып. 4, с. 11-16.

8. Баландин Ю.П., Милов Л.Т. Многомерно-матричный подход к задаче кусочно-постоянной аппроксимации многомерных дискретных функций. - Системы управления, передачи, преобразования и отображения информации: Межвуз. сб. - Рязань: РРТИ, 1978, вып.5,

9. Баландин Ю.П., Тетеркин В.Ф. Структурные преобразования многомерных массивов данных. - Системы управления, передачи, преобразования и отображения информации: Межвуз. сб. - Рязань, РРТИ, 1981, с. 83-87.

10. Баландин Ю.П., Туркин В.Е. Алгоритмы двумерной рекурсии при решении обратной задачи оценивания дискретных сигналов. - Системы управления, передачи, преобразования и отображения информации: Межвуз. сб. - Рязань: РРТИ, 1983, с. 113-118.

11. Милов Л.Т., Баландин Ю.П., Кабанов А.Н. Синтез замкнутых оптимальных фильтров для определения разложения сигналов при помехе типа белый шум. - Известия вузов. Приборостроение, 1974, № 9, с. 46-50.

12. Милов Л.Т., Баландин Ю.П., Лабутин Г.И. Элементы линейной многомерно-матричной теории дискретных сигналов: Тезисы доклада I Всесоюзной конференции по методам и средствам преобразования сигналов. - Рига: Зинатне, 1978, с. 134-137.



БАЛАНДИН Юрий Павлович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОМЕРНО-МАТРИЧНЫХ
АЛГОРИТМОВ ЛИНЕЙНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
МНОГОАГРЕГАТНЫХ ТП И МАССИВОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ДАННЫХ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Л-89435 от 24.10.84г.

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. зак. 1473

Бесплатно

Ротапринт типография МВТУ им. Н.Э.Баумана
107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5