

На правах рукописи

ПАНЧЕНКО Ирина Степановна

**АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ АДДИТИВНЫХ СКАЧКООБРАЗНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ
В ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ СТАТИСТИЧЕСКОЙ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Специальность 05.13.14 – "Системы обработки информации и управления"

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Челябинск - 1997

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Ширяев В.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Щипицын А.Г.,
кандидат технических наук,
доцент Кощеев А.А.

Ведущая организация - НПО "Автоматика".

Защита состоится 19 июня 1997 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д 053.13.06 при Челябинском государственном техническом университете (454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЧГПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского государственного технического университета.

Автореферат разослан "___" 1997 г.

Ученый секретарь совета,
доктор технических наук, профессор

М.Н. Устугов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Диссертация посвящена разработке и практическому применению методов и алгоритмов оценивания аддитивных скачкообразных возмущений в динамических системах в условиях статистической неопределенности. Под аддитивным скачкообразным возмущением понимается скачкообразное изменение координат состояния системы, происходящее в неизвестные моменты времени.

В связи с появлением в последнее время задач, требующих как можно более точного оценивания состояния объекта, стал широко развиваться минимаксно-стохастический подход для решения задач фильтрации и управления. Минимаксно-стохастический подход предполагает присутствие в системе возмущений и помех, как случайных с априори известными статистическими характеристиками, так и неслучайных для которых задаются лишь области их изменения. Подобные статистически неопределенные ситуации широко распространены на практике, что делает развитие и использование этого подхода актуальным.

Проблеме оценивания и управления посвящены работы Б.И. Ананьева, И.А. Богуславского, С.П. Дмитриева, В.С. Кабреева, Р.Е. Калмана, И.Я. Каца, А.А. Красовского, А.Б. Куржанского, В.В. Малышева, В.Г. Репина, Я.З. Цыпкина, Г.С. Черноруцкого, Ф.Л. Черноусько, А.Н. Ширяева, В.И. Ширяева и других.

Вычислительная сложность минимаксно-стохастического подхода состоит в том, что он использует операции над множествами. Даже если исходные множества имеют простую геометрическую форму, то в результате сложения, пересечения, линейного преобразования множеств, могут получаться множества сколь угодно сложной формы. Поэтому актуальной задачей является создание эффективных алгоритмов аппроксимации этих множеств. В диссертации все возникающие множества представляются многогранниками. Операции над многогранниками сводятся при этом к построению фундаментальной системы решений системы линейных неравенств или к построению выпуклой оболочки конечного множества точек. Принципиальный алгоритм решения этой задачи получен С.Н. Черниковым и Н.В. Черниковой. Операции над выпуклыми многогранниками развивались в работах В.М. Кунцевича, А.В. Лотова, О.Л. Черных, Ф. Препараты, Т.С. Моцкина, Х. Райфи и др.

Оценивание состояния и возмущений в динамических системах особенно актуально в таких приложениях, как управление летательными аппаратами, гиро- и радионавигационные системы навигации, автоматизированные си-

стемы управления технологическими процессами, устройства вторичной обработки данных в радиолокационных системах и др. Таким образом, представляется актуальным распространить существующие методы обнаружения и оценивания возмущений в стохастических системах на случай статистически неопределенных ситуаций.

Об актуальности работы также свидетельствует ее поддержка грантом Российского фонда фундаментальных исследований N 96-01-00460, двумя грантами научно-технических программ "Университеты России (Технические университеты)" и "Робототехника для экстремальных ситуаций", а также двумя грантами в области фундаментальных исследований по направлениям: техническая кибернетика и автоматизация технологических процессов.

Цель и задачи работы. Разработать методы и алгоритмы фильтрации, обнаружения и оценивания аддитивных скачкообразных возмущений в линейных динамических системах, функционирующих в условиях статистической неопределенности, не требующих знания априорной информации о возмущении, то есть величины возмущения и момента его возникновения.

Из цели вытекают следующие задачи: разработать методы и алгоритмы гарантированного оценивания состояния линейных динамических статистически неопределенных систем, когда на систему действуют статистические и детерминированные возмущения, а вектор состояния системы принадлежит построенному множеству оценок с заданной вероятностью; разработать алгоритмы и программы построения информационных множеств в виде многогранников и их аппроксимации параллелепипедами; разработать методы и алгоритмы оценивания аддитивных скачкообразных возмущений в динамических системах по результатам текущих измерений вектора состояния системы; разработать программное обеспечение для оценивания аддитивных скачкообразных возмущений в навигационном комплексе.

Методы исследования. Теоретические исследования основывались на применении методов математической статистики и теории случайных процессов, теорий фильтрации Р. Калмана, оценивания в условиях неопределенности, игр, обнаружения и обработки сигналов, обработки информации в инерциальных навигационных комплексах, вычислительной геометрии, математическом и машинном моделировании.

Научная новизна. Разработан последовательный алгоритм, позволяющий обнаруживать и оценивать аддитивные скачкообразные возмущения неиз-

вестной величины, возникающие в неизвестные моменты времени, при заданном уровне ложных тревог.

Предложен способ построения гарантированных оценок вектора состояния системы в статистически неопределенных ситуациях.

Разработаны численные процедуры, выполняющие операции над многогранниками для построения информационных множеств в темпе реального времени.

Создан пакет прикладных программ, позволяющий решать задачи минимаксно-стохастической фильтрации состояния динамических систем с использованием многогранников, задачи обнаружения и идентификации аддитивных скачкообразных возмущений в них.

Практическая ценность и внедрение. Разработанные методы и алгоритмы позволяют эффективно решать задачи оценивания вектора состояния, обнаруживать и идентифицировать аддитивные скачкообразные возмущения в линейных динамических системах в статистически неопределенных ситуациях в темпе реального времени, что дает возможность существенно расширить область их применения для диагностики динамических систем различного назначения.

Предложенные в работе методы и алгоритмы оценивания состояния, обнаружения и идентификации возмущений используются в Государственном научном центре России ЦНИИ "Робототехники и технической кибернетики" (г. С.-Петербург) в составе комплексного моделирующего стенда и в Государственном научном центре России ЦНИИ "Электроприбор" (г. С.-Петербург) для обнаружения нарушений в чувствительных элементах информационно-измерительной системы.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Международном конгрессе по компьютерным системам и прикладной математике (С.-Петербург, 1993); Международной конференции по интервальным и вычислительным алгебраическим методам в науке и технике (С.-Петербург, 1994); 6-й и 7-й Международных научно-технических конференциях "Робототехника для экстремальных условий" (С.-Петербург, 1995, 1996); 3-м Международном семинаре "Негладкие и разрывные задачи управления. Оптимизация и их приложения" (С.-Петербург, 1995); Международном симпозиуме по исследованию операций (Пассау, Германия, 1995); Всероссийской молодежной научно-технической конференции "Информационные и кибернетические системы управления и их элементы" (Уфа, 1995).

Доклады по теме диссертации были приняты на Международную конференцию "Системный анализ, управление и конструирование" (Лион, Франция, 1994), 5-й Международный симпозиум "Системный анализ и моделирование" (Берлин, 1995); Международные конференции "Системный анализ, управление и конструирование. Методология и примеры" (Брюно, Чехия, 1995, 1996) и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ. Материалы диссертации были использованы в 8 отчетах по НИР.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (172 наименования), двух приложений. Основной текст диссертации изложен на 126 машинописных страницах и содержит 79 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель, показаны научная новизна, апробация и внедрение результатов диссертации.

В первой главе приводится обзор литературы, посвященный методам оценивания при различных типах возмущений, действующих на систему и измеритель; численным методам построения информационных множеств, методам оценивания аддитивных скачкообразных возмущений в динамических системах; формулируются постановка задачи и цели исследования.

Повышение эффективности функционирования динамических систем может быть достигнуто за счет улучшения характеристик системы управления, которые в случае цифровых систем управления во многом определяются ее алгоритмическим и программным обеспечением. При решении задачи управления одной из важнейших задач является задача оценивания вектора состояния динамической системы (рис.1.1).

Как известно, одним из перспективных в настоящее время направлений повышения точности оценивания является использование более точных моделей процессов. Наряду с детерминированными и стохастическими возмущениями на систему могут действовать и ступенчатые возмущения. Если эту информацию удастся использовать, то точностные характеристики подсистемы оценивания состояния (рис. 1.1) повысятся, что приведет к повышению эффективности функционирования всей системы управления.

Повышение точностных характеристик алгоритма оценивания будет

рассмотрено на примере оценивания ошибок инерциального навигационного комплекса (ИН), уравнения которых могут быть описаны кусочно-линейными разностными уравнениями.

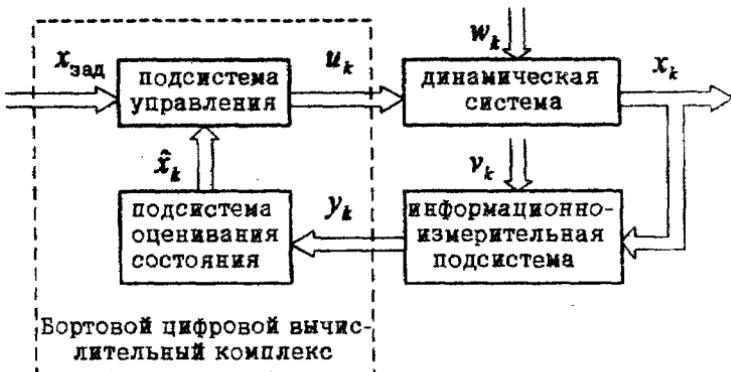


Рис. 1.1. Структурная схема системы управления

В диссертации принята модель динамической системы с уравнениями движения и измерения вида

$$x_{k+1} = Ax_k + C\xi_k + \Gamma w_k + \vartheta_k, \quad k = 0, 1, \dots \quad (1.1)$$

$$y_k = Gx_k + Hv_k + \eta_k, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (1.2)$$

где $x_k \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния системы; $y_{k+1} \in \mathbb{R}^r$ – вектор измерений, $\xi_k \sim N(0, Q)$, $\eta_{k+1} \sim N(0, R)$ – независимые гауссовские случайные последовательности; w_k , v_{k+1} – неизвестные векторы, принадлежащие заданным множествам $W \in \mathbb{R}^p$ и $V \in \mathbb{R}^s$. Начальное состояние x_0 системы – случайный гауссовский вектор с математическим ожиданием $Mx_0 \in X_0$, $\text{Cov}\{x_0\} = P_0 > 0$; все матрицы и множества заданы; ϑ_k моделирует возмущение в системе типа ступенчатой функции (скакок)

$$\vartheta_k = (\vartheta_k^1, \dots, \vartheta_k^n)', \quad \vartheta_k^i = 0, \quad i \neq j, \quad i = \overline{1, n}, \quad \vartheta_k^j = \begin{cases} 0, & k < t; \\ \theta, & k \geq t, \end{cases}$$

где величина скачка θ и время t возникновения неизвестны. В каждый мо-

мент времени может измениться не более чем одна j-я координата вектора x_k состояния системы, т.е. только одна неизвестная координата вектора ϑ_k принимает значение θ , и время между двумя нарушениями достаточно велико для обнаружения скачка. По наблюдениям y_k , $k = 1, 2, \dots$ необходимо обнаружить возмущение ϑ_k в системе и оценить момент его появления t , величину θ и определить номер j координаты, по которой оно произошло.

Отличительной особенностью существующих методов обнаружения и идентификации таких возмущений является знание априорной информации о возмущении, одномерность вектора состояния системы, что на практике не всегда выполнимо. Представляется актуальным разработать такой алгоритм обнаружения аддитивного скачкообразного возмущения и оценки его параметров, который был бы легко реализован на цифровых ЭВМ и не обладал вышеперечисленными недостатками, а также был бы способен работать в более жестких информационных условиях – в случае статистической неопределенности.

Во второй главе рассматривается минимаксно-стохастическая фильтрация в линейных динамических системах вида (1.1), (1.2), результаты которой используются для оценивания аддитивных скачкообразных возмущений.

Требуется по измерениям y_k , $k = 1, 2, \dots$ оценить состояние системы (1.1) за оценку X_k вектора состояния системы (1.1) принимается чебышевский центр информационного множества \bar{X}_k . Наиболее точная оценка информационного множества (третье приближение) строится по следующим соотношениям минимаксно-стохастической фильтрации:

$$\bar{X}_{3k} = \bar{X}_{2k} \cap X[y_k]; \quad (2.1)$$

$$X[y_k] = M[x|y_k, v \in V] = \{x|Gx + Hv = y_k, v \in V\} \quad (2.2)$$

– множество условных средних состояния системы, совместимых с результатами измерения;

$$\bar{X}_{2k} = (E - A_k G) \bar{X}_{k/k-1} + A_k Y_k \quad (2.3)$$

– второе приближение к информационному множеству.

$$X_{k/k-1} = A\bar{X}_{k-1} + \Gamma W \quad (2.4)$$

- множество прогнозов состояний системы,

$$Y_k = \{y_k - Hv \mid v \in V, y_k \in Y_{k/k-1}\} = (y_k - HV) \cap GX_{k/k-1}. \quad (2.5)$$

Матрица $\Lambda_k = P_k G' R^{-1}$, где для расчета матрицы ковариаций P_k ошибок оценивания используется алгоритм Джозефа. Отметим, что в соотношениях (2.3), (2.4) под “+” понимается суммирование множеств в смысле Минковского, а в (2.1), (2.5) присутствуют операции пересечения множеств и его линейного преобразования

Далее рассматривается построение гарантированных оценок в задаче минимаксно-стохастической фильтрации. Пусть \bar{X}_k – информационное множество,

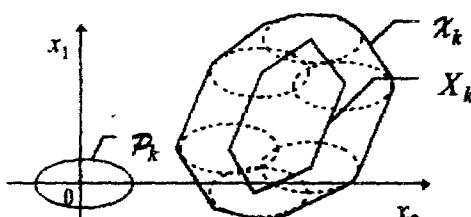


Рис. 2.1 Построение доверительного множества

множество, P_k – ковариационная матрица, построенные по формулам (2.5)–(2.8), если построить эллипсоид правдоподобия

$\mathcal{P}_k = \{x \mid (x, P_k^{-1} x) \leq l^2\}$ с заданной вероятностной мерой l (скобки () означают скалярное произведение векторов);

тогда доверительному множеству $X_k = \bar{X}_k + \mathcal{P}_k$, заведомо будут принадлежать все возможные значения вектора x_k с вероятностью l сигма (рис 2.1). Если при построении гарантированной оценки в шумах преобладает нестационарная составляющая, то для упрощения процесса вычисления доверительное множество можно получить деформированием информационного множества; в случае преобладания статистической составляющей лучше использовать фильтр Калмана с измененной матрицей ковариаций, который требует меньше вычислительных ресурсов

В третьей главе исследуется представление информационных множеств (2.1), (2.3) многогранниками и эллипсоидами в численных алгоритмах минимаксно-стохастической фильтрации. На основе существующих методов, разработаны алгоритмы позволяющие построить информационное множество в виде многогранника. Для этого был разработан алгоритм построения пересечения в (2.1), (2.5) и суммы двух многогранников в (2.3), (2.4) на основе метода двойного описания, линейного преобразования многогранника в (2.3).

(2.4), (2.5), построения множества $X[y_k]$, аппроксимации эллипсоида правдоподобия выпуклым многогранником. Приводится сравнительный анализ аппроксимации информационных множеств эллипсоидами и многогранниками в задаче минимаксно-стохастической фильтрации.

Для сравнения методов был взят пример, описывающий одномерное движение материальной точки под действием внешней силы и $\dot{x}_1 = x_2$, $\dot{x}_2 = u$, $|u| \leq 1$ при измерении координаты x_1 : $y_k = x_{1k} + v_k$, $|v_k| \leq 0.1$. При моделировании работы системы и измерителя полагалось $x_0 = (0, 0)'$ и u изменялось по закону $u = k^{-1} \cos(k)$. Ошибки измерения моделировались по формуле $v_k = 0.1 \sin(k)$.

За начальное множество неопределенности брался 1) единичный круг с центром в 0, 2) единичный квадрат с центром в 0 (рис. 3.1 а). В результате работы фильтра (2.3) строились информационные множества X_{2k} в виде 1) эллипсов $E(a_k, Q_k)$, 2) многогранников (рис. 3.1 б-г). За счет более точного построения операции пересечения информационное множество, представленное многогранником по координате x_1 , в 1.39, а по x_2 в 9.79 раза меньше, чем эллипсoidalное информационное множество. Сумма эллипсов в этом случае находится точно.

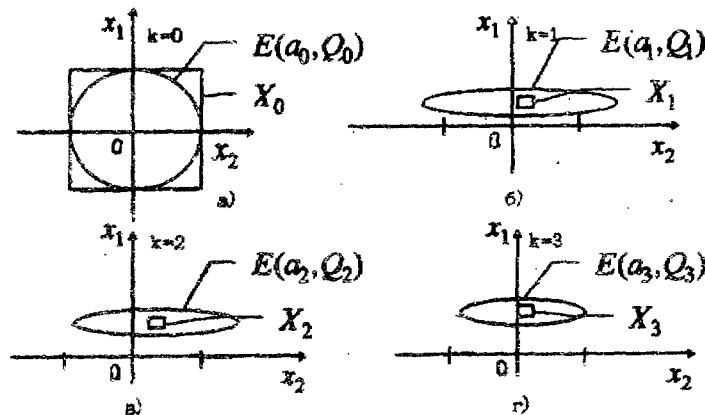


Рис. 3.1

В табл. 3.1 приведено число переменных, необходимых для реализации

операций над множествами в пространстве размерности n , для многогранников с числом вершин m и числом неравенств k .

Таблица 3.1

Требования по объему памяти для реализаций
операций над множествами

| | Метод эллипсодов | Метод многогранников |
|----------------------------------|--|---|
| Пересечение множеств | $(12n+10)n$ | $(n+1)(m_1+k_1+k_2) + m_1k_1+k_1+n+1$ |
| Сумма множеств | $15n^2 + 19n + 16$ | $(k_1+m_1+1)(n+1) + m_2(n+m_1n) + k_1(m_1+1)$ |
| Линейное преобразование множеств | $\left(\frac{7}{2}n + \frac{5}{2}\right)n$ | $(2n+m+k)n+k$ |
| Сдвиг множества на вектор | $\frac{n(n+1)}{2} + n$ | $(m+k+1)n + 2n$ |

В четвертой главе разрабатываются последовательный алгоритм обнаружения аддитивного скачкообразного возмущения (далее просто возмущения или скачка) на основе модифицированного алгоритма кумулятивных сумм и алгоритм оценивания параметров возмущения.

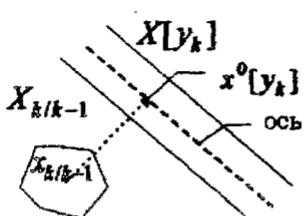


Рис. 4.1

Для обнаружения скачка суммируются разности $x^0[y_{i+1}] - x_{i+1/i}$ за некоторое число шагов N , где $x_{i+1/i}$ – чебышевский центр множества прогнозов $X_{k/k-1}$, состояния системы; $x^0[y_{i+1}]$ – проекция чебышевского центра $x_{k/k-1}$ множества

прогнозов $X_{k/k-1}$ на ось множества состояний $X[y_k]$, совместных с измерением на текущем шаге (рис. 4.1). Проекция $x^0[y_{i+1}]$ берется потому, что множество $X[y_k]$ является неограниченным и его чебышевский центр найти невозможно.

Получено выражение для суммы вида

$$S_k = \sum_{i=k-N+1}^k x^0[y_{i+1}] - x_{i+1/i} = G'(GG')^{-1} \sum_{i=k-N+1}^k (y_{i+1} - Gx_{i+1/i}).$$

Установлено, что $M\{S_k\} = 0$.

$$Cov\{S_k\} = [G'(GG')^{-1} \left(N \cdot R + GVar\left\{\sum_{i=k-N+1}^k x_{i+1/i}\right\} G' \right) [G'(GG')^{-1}]]'.$$

$$\begin{aligned} Cov\left\{\sum_{i=k-N+1}^k x_{i+1/i}\right\} &= A^{k-N+2}(E - A^N)(E - A)^{-1} P_0 [A^{k-N+2}(E - A^N) \cdot \\ &\quad (E - A)^{-1}]' + (N \cdot CQC' - A^{k-N+2}(CQC' - A^N CQC'(A^N)')) \cdot \\ &\quad (A^{k-N+2})'(E - AA')^{-1}(E - AA')^{-1}. \end{aligned}$$

"Ширина окна" N определяется так, чтобы вероятность принятия решения о наличии скачка при условии, что скачка в системе не было (вероятность ложной тревоги F)

$$F = 2(2\pi)^{-\frac{N}{2}} (\det Cov\{S_p\})^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\theta_{\min}^N} \exp(-\frac{1}{2} x' Cov\{S_p\}^{-1} x) dx$$

не превышала заданного значения. Порог определяется из условия $h_{up}^i = N\theta_{\min}^i + U_{\max}^i$, $h_{down}^i = N\theta_{\min}^i + U_{\min}^i$, $i = \overline{1, n}$, где θ_{\min}^i – минимальная обнаруживаемая величина возмущения по i -ой координате, U_{\max}^i – максимальное, U_{\min}^i – минимальное значение i -ой координаты множества $NG'(GG')^{-1}(HV - GTW)$. Скачок будет обнаружен в том случае, когда

$$h_{down}^i \leq S_k^i \leq h_{up}^i. \quad (4.1)$$

где i означает i -ю координату векторов S_k и h

После обнаружения аддитивного скачкообразного возмущения в системе, параллельно с работой фильтра, определяются по известным для всего "скользящего окна" значениям суммы \tilde{S}_i , $i = \overline{k-N+1, k}$ величина θ возмущения, время t и место j его возникновения. С этой целью была выведена функция $S(k, \theta, t)$, зависящая от θ , t и текущего шага k и аппроксими-

рующая значения \tilde{S}_k . Место возникновения возмущения (координата) j определяется по нарушению j -го неравенства в (4.1).

$$S(k, \theta, t) = ((k-t+1)E - A(E - A^{k-t+1})(E - A)^{-1})(E - A)^{-1} \cdot \theta + \\ + A^2(E - A^{k-t})(E - A)^{-1} \bar{x}_{t-1} - A \cdot \sum_{i=t}^{k-1} \bar{x}_i.$$

Далее решается задача интерполяции. Параметры θ и t подбираются так чтобы ошибка их нахождения была минимальной

$$\sum_{i=k-N+1}^k (S(i, \theta, t) - \tilde{S}_i)^2 \rightarrow \min_{\theta, t}$$

В пятой главе рассматривается применение разработанных методов и алгоритмов для оценивания аддитивных скачкообразных возмущений в уравнениях ошибок определения навигационных параметров. Рассматривается НК, содержащий две ИНС и относительный лаг, с централизованной обработкой измерений (рис. 5.1).

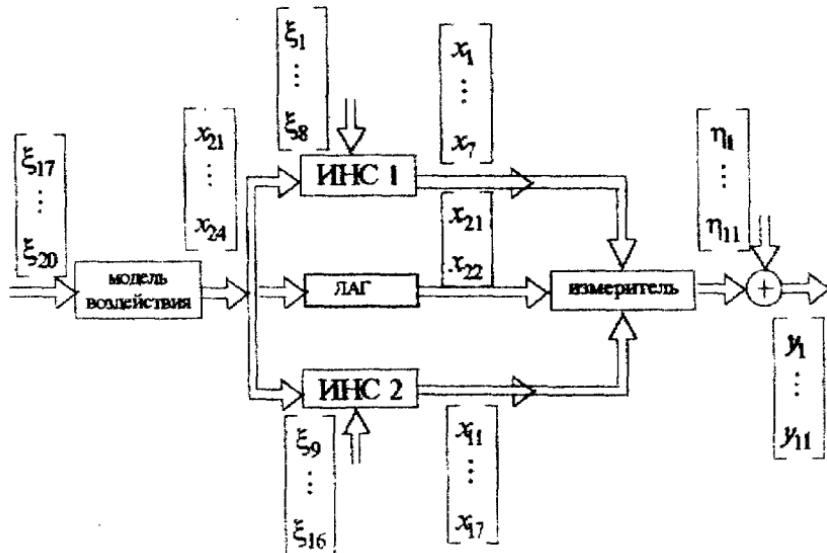


Рис. 5.1.

Рис. 5.1 Структурная схема инерциального навигационного комплекса

Для оценивания состояния ошибок ИНК используется минимаксно-стохастический фильтр (2.1)-(2.5), для этого уравнения системы приводятся к виду (1.1), (1.2), где $x_k \in \mathbb{R}^{24}$ – вектор фазовых координат, состоящий из ошибок навигационных параметров, ошибок моделирования инерциального трехгранника и построителя вертикали, скорости дрейфов гироскопов для первой и второй ИНС, а также ошибок внешних воздействий; $\xi_k \in \mathbb{R}^{20}$, $\eta_k \in \mathbb{R}^{11}$ – независимые белые шумы системы и измерений с ковариационными матрицами $Q_{20 \times 20} = \text{diag}(0.005)$ и

$$R_{11 \times 11} = \text{diag}(0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.006, 0.006, 9, 9, 0.006, 0.006, 28);$$

$$v_k \in V = \{ |x_i| \leq 0.2, i = \overline{1, 4}; |x_i| \leq 0.1, i = \overline{5, 9, 10}; |x_i| \leq 9, i = \overline{7, 8}; |x_{10}| \leq 10 \};$$

$$w_k \in W = \{ |x_i| \leq 0.17, i = \overline{1, 20} \}.$$

Переходная матрица А в (1.1) размерности [24x24] представлена в блочном виде

$$A = \begin{bmatrix} S & 0 & a \\ 0 & S & a \\ 0 & 0 & A_B \end{bmatrix},$$

где отличные от нуля элементы матрицы S размерности [10x10] равны
 $S_{1,1} = S_{2,2} = S_{3,3} = S_{4,4} = S_{5,5} = S_{6,6} = S_{7,7} = S_{8,8} = S_{9,9} = S_{10,10} = 0.993$; $-S_{2,1} = S_{1,2} = S_{4,2} = 0.0000073$; $S_{1,8} = S_{2,10} = S_{3,9} = S_{4,8} = S_{6,8} = 1$; $S_{1,10} = -S_{2,7} = S_{4,10} = 0.0000365$; $S_{4,5} = S_{7,6} = 0.0000001$; $S_{5,4} = -S_{7,8} = 0.0000154$; $S_{5,8} = S_{7,9} = 0.00000077$.

Отличные от нуля элементы матрицы a размерности [10x4] равны

$$a_{5,3} = -a_{1,4} = 1.015 \cdot 10^{-6}.$$

$$A_B = \text{diag}(0.4066, 0.4066, 0.4066, 0.4066).$$

Элементы матрицы С размерности [24x20] будут иметь значения

$$C_{1,1} = C_{2,3} = C_{3,2} = C_{4,1} = C_{5,4} = C_{6,2} = C_{7,5} = C_{11,9} = C_{12,11} = C_{13,10} = C_{14,9} = C_{15,12} = C_{16,10} = C_{17,13} = 1.78; C_{1,3} = -C_{2,1} = C_{4,3} = C_{11,11} = -C_{12,9} = C_{14,11} = 7.3 \cdot 10^{-5}; C_{1,8} = C_{2,8} = C_{3,7} = C_{4,6} = C_{6,7} = C_{11,14} = C_{12,16} = C_{13,15} = C_{14,14} = C_{16,15} = -0.001; C_{5,1} = -C_{7,2} = C_{15,9} = -C_{17,10} = 1.56 \cdot 10^{-6}; C_{5,19} = -C_{7,20} = C_{15,19} = -$$

$$C_{17,20} = 3.422 \cdot 10^{-6}; -C_{4,4} = C_{6,5} = -C_{14,12} = C_{16,13} = 1 \cdot 10^{-7}; C_{8,7} = C_{9,6} = C_{10,9} = \\ C_{18,14} = C_{19,15} = C_{20,16} = 1.78 \cdot 10^{-3}, C_{21,17} = C_{22,18} = 0.2103, C_{23,19} = C_{24,20} = 3.155.$$

Элементы матрицы G размерности [11x24] будут иметь значения

$$G_{1,5} = G_{2,8} = G_{3,7} = G_{4,9} = G_{5,15} = G_{6,17} = G_{7,14} = G_{8,16} = G_{9,4} = G_{9,11} = G_{10,3} = \\ G_{10,16} = G_{11,12} = 1; G_{1,21} = G_{2,18} = G_{3,22} = G_{4,19} = G_{5,5} = G_{6,7} = G_{7,4} = G_{8,6} = \\ G_{9,1} = G_{9,14} = G_{10,6} = G_{10,13} = G_{11,2} = -1.$$

Остальные элементы матриц С, G равны 0.

Ширина окна N рассматриваемой системы при заданных векторе минимальных обнаруживаемых величин $\Theta_{min} = 0.3$, и вероятности ложной тревоги $F=0.0005$ равна 45.

На рис. 5.2-5.4 показано обнаружение на 80 шаге возмущения, возникшего на 56 шаге по седьмой координате величиной 0.75. Седьмая координата состояния системы измеряется в 3 к 6 координатной измерителя (рис. 5.3). Результаты оценивания: время возникновения возмущения 55.6667 шаг, величина возмущения 0.738613. При этом значение целевой функции $S(\theta, t)$ составило 581.59.

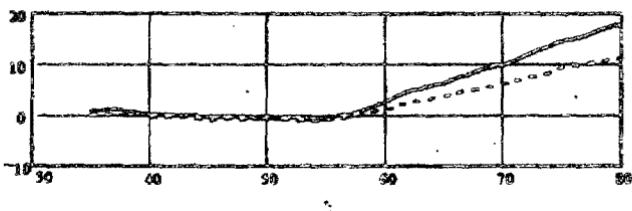


Рис. 5.2. Сплошной линией – реализованвшееся значение седьмой координаты вектора состояния, пунктирной линией – его оценка, К – шаг работы системы

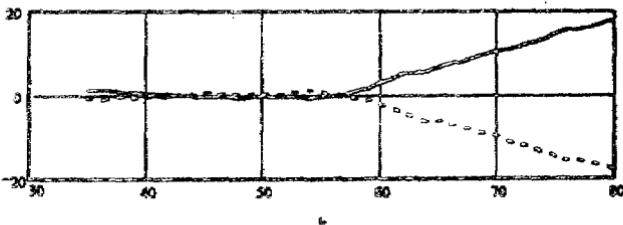


Рис. 5.3. Сплошной линией – третья координата, пунктирной линией – шестая координата вектора измерений, К – шаг работы системы

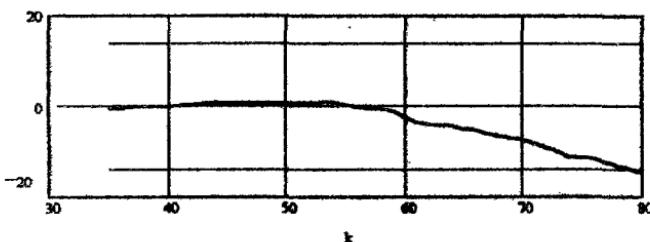


Рис. 5.4. Сплошной линией – седьмая координата вектора суммы, пунктирной линией – порог седьмой координаты, k – шаг работы системы

Статистические испытания алгоритма обнаружения–оценивания показали, что в случае возникновения двух возмущений по различным координатам обнаружение происходит по координате с наибольшей величиной возмущения, среднее время обнаружения уменьшается на 2–10 шагов, оценка величины обнаруженного возмущения занижается на 13%, оценка момента появления возмущения производится точно.

Разработанный алгоритм оценивания аддитивных скачкообразных возмущений позволяет обнаружить и оценить отказ в чувствительном элементе НК алгоритмическим путем, что в дальнейшем позволит скорректировать вырабатываемые им навигационные параметры объекта и неулучшить точность оценки. Возникновение отказа может быть обнаружено еще тогда, когда оно не отразилось на работе НК. Так, отказ акселерометра первой ИНС приведет к скачкообразному увеличению погрешности, что соответствует возникновению аддитивного скачкообразного возмущения по пятой или седьмой координате рассматриваемой модели; алгоритм обнаружит возмущение через 14–37 тактов обработки информации, и в течение нескольких минут (0.5–7) оценит его параметры. Далее возможно принятие решения об отключении первой ИНС или коррекции ее работы. Таким образом, точность выработки параметров объекта ухудшится из–за отключения или ухудшения точностных характеристик первой ИНС, но останется постоянной.

В приложении представлены акты внедрения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1 Разработаны последовательные метод и алгоритм, позволяющие обнаруживать и оценивать аддитивные скачкообразные возмущения при заданном уровне ложных тревог и минимальной величине обнаруживаемого возмуще-

ния в линейных динамических статистически неопределеных системах. Аддитивное скачкообразное возмущение возникает в неизвестные моменты времени по одной – неизвестной координате системы и его величина также неизвестна. Оценивание возмущений на каждом шаге происходит в три этапа. На первом этапе с помощью минимаксно-стохастического фильтра строится прогноз оценки состояния динамической системы на текущем шаге и определяется его чебышевский центр. На втором этапе происходит обработка полученных на предыдущих N шагах данных и измерений для обнаружения возмущения в системе. В случае обнаружения возмущения выполняется третий этап – его оценивание. Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является то, что уравнения системы и измерителя содержат нестатистические возмущения и помехи. Алгоритм осуществляет накопление информации с помощью метода "скользящего окна", использует результаты работы минимаксно-стохастического фильтра и реализуем на ЭВМ для задач большой размерности.

2. Разработан метод и алгоритм построения гарантированной оценки состояния статистически неопределенной линейной динамической системы. По полученным в результате минимаксно-стохастической фильтрации информационному множеству и матрице ковариаций ошибок оценивания строится доверительное множество, которому вектор состояния системы принадлежит с заданной вероятностью.

3. Предложены процедуры выполнения операций над многогранниками позволяющие строить информационные множества в пространстве $n \leq 5$ в темпе реального времени. Для задач большой размерности были разработаны алгоритмы и программы, аппроксимирующие информационные множества прямоугольными параллелепипедами, что существенно снижает требования к вычислительным ресурсам. В этом случае, несмотря на отсутствие точной информации о значении математического ожидания возмущений, действующих на систему, для решения задачи фильтрации требуется всего лишь в два раза больше памяти и времени по сравнению с фильтром Калмана.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Schiryayev W.I., Pelzwerger S.B., Velykova I.S., Burtsev S.M. Convex polyhedrons in dynamic solution taking process under uncertain conditions // International Congress on Computer systems and Applied Mathematics CSAM'93 (St. Petersburg, July 19-23, 1993) / Center of Modern Communications

POLYLOG, 1993. P.101.

2. Велкова И.С., Ширяев В.И. Операции над выпуклыми многогранниками в задачах гарантированного оценивания // Межрегиональная научно-техн. конф. 11-15 октября 1993г.: Тез. докл. -Пермь : ПГТУ, 1993.

3. Ширяев В.И., Велкова И.С., Халила Н.Б. Об операциях над выпуклыми многогранниками в задачах оценивания в условиях неопределенности // Управление в технических системах и электромеханические устройства . Тем. сб. научн. труд. -Челябинск : ЧГТУ, 1993. -С. 53-60.

4. Shiryaev V.I., Velkova I.S., Pelzweiger S.B. Control of the Social-Economic Processes under Uncertain Conditions // Abstracts. International Conference on Interval and Computer-Algebraic Methods in Science and Engineering. Interval'94. March 7-10, 1994, St-Peterburg, Russia. P. 218-219.

5. Велкова И.С. Об одном алгоритме обнаружения отказов в информационной системе // Всероссийская молодежная научно-технич. конф. "Информационные и кибернетические системы управления и их элементы" (Уфа, 16-18 декабря 1995г.): Тез. докл. -Уфа : УГАТУ, 1995. -С. 114-115.

6. Велкова И.С. Обнаружение информационных отказов в динамических системах // Программн. обеспеч. Микропроцессорная техника сложн. автоматич. систем и их устройства: Тем. сб. научн. тр. -Челябинск : ЧГТУ, 1995. -С.19-20.

7. Велкова И.С., Шустова М.А., Ширяев В.И. Об алгоритмах оптимальной фильтрации в одном навигационном комплексе // Программн. обеспеч. Микропроцессорная техника сложн. автоматич. систем и их устройства: Тем. сб. научн. тр. -Челябинск : ЧГТУ, 1995. -С.21-24.

8. Ширяев В.И., Велкова И.С. О построении доверительного множества в задачах минимаксно-стохастической фильтрации // 9-я Всероссийская конференция "Мат. программирование и приложения" (Екатеринбург, 27 февраля – 3 марта 1995г): Информ. бюллетень Ассоциации матем. программирования. Вып. 5. -Екатеринбург: УрО АН, 1995. -С.56-57.

9. Ширяев В.И., Евсеев Д.М., Велкова И.С., Сидорова Н.Б. Алгоритмы высокоточного управления и оптимальной фильтрации навигационной информации летательных аппаратов в условиях неопределенности // 7-й Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Самара, 20-22 июня 1995г: Тез.докл. -Самара, 1995.

10. Shiryaev V.I., Velkova I.S., Evseev D.M., Sidorova N.B., Shiryaev E.V. Guaranteed control algorithms of the dynamic system under uncertain

conditions // Symposium überoperations research (SOR'95). Universitat Passau, 13-15 September 1995. Abstracts. Passau. 1995. P. 118.

11. Shiryaev V.I., Velkova I.S. Estimation and Control of the Lyndam Systems under Uncertainty Conditions // Advances in Modelling & Analysis, C, AMSE Press, Vol. 46, N3, 1995, pp. 55-63.

12. Shiryaev V.I., Velkova I.S., Kozlov V.N., Shiryaev O.V. Prediction in fuzzy social-economic process models under incomplete and inaccurate information // Overseas Publishers Association, C, SAMS, 1995, Vol. 18-19. pp. 775-778.

13. Велкова И.С. Об аппроксимации информационных множеств эллипсомидаами и многогранниками в задаче минимаксно-стохастической фильтрации // Элементы и приборы систем управления. Тем. сб. научн. трудов. - Челябинск. ЧГТУ, 1996. -С.71-74.

14. Построение позиционного управления роботов в условиях неопределенности по неполным и неточным измерениям / В.И. Ширяев, И.С. Велкова, Д.М. Евсеев и др. // 6-я Межд. научн.-технич. конф. "Робототехника для экстремальных условий". С.-Петербург, 18-20 апреля 1995г. Материалы конференции. -С.-Пб.: СПбГТУ, 1996. -С. 171-179.

15. Velkova I.S. On Information Fault Detection in the Dynamic System under the Condition of Statistical Uncertainty// The Fourth Intern. Workshop "Multiple Criteria and Game Problems under Uncertainty". Orekhovo-Zuevo. Russia. September 8-14, 1996. Abstracts. M. 1996. P. 128.

Остан

Издательство Челябинского
государственного технического университета

ЛР № 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 17.04.97. Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л 0,93. Уч.-изд. л. 1.
Тираж 100 экз. Заказ 130/172.

УП издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.