

На правах рукописи

Алешкин Михаил Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМ И АЛГОРИТМОВ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ИЗБЫТОЧНЫХ БЛОКОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ**

Специальность 05. 13. 05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат

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

Саратов – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Большаков Александр Афанасьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Львов Алексей Арленович
кандидат технических наук
Пылаев Юрий Константинович

Ведущая организация: Институт проблем точной механики
и управления РАН (г. Саратов)

Защита состоится «10» 02 2010 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.242.08 при ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет» по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ауд. 1/319.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.242.08.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Саратовского государственного технического университета

С авторефератом можно ознакомиться на сайте www.sstu.ru

Автореферат разослан «__22__» __12__ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.А. Терентьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для решения задач навигации и управления подвижными объектами применяются инерциальные системы, содержащие блоки инерциальных датчиков (гироскопов и акселерометров), которые измеряют составляющие векторов угловой скорости и линейного ускорения объекта, а также блоки обработки данных. Эффективным способом повышения надежности и точности инерциальных систем является использование функционально избыточных блоков гироскопов и акселерометров с неортогональной ориентацией их осей чувствительности. Это направление активно развивается в работах зарубежных и отечественных авторов, таких как Evans F.A., Wilcox I.C., Gilmore I.P., McKern R.A., Епифанов А.Д., Окоемов Б.Н., Водичева Л.В., Цуцаева Т.В. и др. Однако до сих пор ряд вопросов построения таких систем не исследован.

Выбор конкретной конфигурации блоков инерциальных датчиков обусловлен особенностями алгоритмов предварительной обработки их информации, под которыми понимаются алгоритмы оценивания трех компонентов векторов кажущегося ускорения и угловой скорости на оси блока, позволяющие снизить случайные или систематические погрешности датчиков при их использовании в системах навигации и управления. Для задач обработки информации инерциальных датчиков некоторые методы предварительной обработки изложены в работах Ривкина С.С., Свешникова А.А., Челпанова И.Б., Несенюка Л.П., Салычева О.С., Степанова О.А. и др. В качестве алгоритмов предварительной обработки могут быть использованы алгоритмы детерминированной и стохастической фильтрации, которые имеют разную структуру, сложность и предполагают различный объем предварительной калибровки (испытаний) датчиков и различную конфигурацию инерциального блока. При этом отсутствует сравнительный анализ алгоритмов, позволяющий выработать рекомендации по их применению для конкретного класса инерциальных датчиков.

Работа выполнялась в рамках основного научного направления вуза 03В. Полученные результаты использованы в НИР «Разработка теоретических основ, математических моделей и алгоритмов управления многозвенными манипуляторами космических систем по информации микромеханических датчиков», входящей в аналитическую ведомственную целевую программу «Развитие научного потенциала высшей школы на 2008-2009 годы» и соответствующей перечню критических технологий, определенных политикой РФ в области науки, технологий и техники на период до 2010 года .

Вышеизложенное определило актуальность и цель настоящей работы.

Целью диссертационной работы является повышение точности определения трех компонентов векторов кажущегося ускорения и абсолютной угловой скорости объекта по информации блоков одно- и двухкомпонентных инерциальных датчиков с помощью обоснованного выбора конфигурации, алгоритмов и программ предварительной обработки информации избыточного блока датчиков для обеспечения заданных точности и надежности с учетом отказов датчиков. Для достижения этой цели требуется решить следующие задачи.

1. Проанализировать различные конфигурации блоков одно- и двухкомпонентных инерциальных датчиков и выработать рекомендации по их количеству и ориентации осей в блоке при заданных требованиях к надежности и точности оценивания компонентов измеряемого вектора.

2. Построить математические модели блоков одно- и двухкомпонентных датчиков и алгоритмы предварительной обработки, основанные на методах стохастического оценивания и фильтрации.

3. Разработать нейросетевой алгоритм оценивания, исследовать влияние структуры нейронной сети, допустимой погрешности оценивания, вида функций активации на сходимость процесса обучения нейронной сети.

4. Провести сравнительный анализ алгоритмов обработки избыточной информации блоков инерциальных датчиков для формирования критериев по выбору конкретных алгоритмов.

5. Создать программный комплекс и экспериментальную установку для численного и полунатурного моделирования работы избыточных измерительных блоков однокомпонентных и двухкомпонентных датчиков с компьютерной обработкой информации и провести исследования с целью выработки рекомендаций по применению алгоритмов для обработки информации конкретных блоков датчиков.

Объектом исследования являются избыточные блоки одно- и двухкомпонентных инерциальных датчиков.

Предметом исследования являются математические модели блоков одно- и двухкомпонентных датчиков различной конфигурации и алгоритмы определения оценок компонентов измеряемого вектора кажущегося ускорения объекта.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы стохастического оценивания и фильтрации, дискретной математики и математического моделирования, теории вероятностей и статистической обработки экспериментальных данных.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается корректностью постановки задач исследования, применением апробированных аналитических и численных методов анализа. Основные теоретические результаты и результаты математического моделирования подтверждены экспериментальными данными.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем.

1. Предложена конфигурация блока четырех двухкомпонентных датчиков, обеспечивающая минимум ошибки определения измеряемого вектора как при всех исправных датчиках, так и при наличии отказов, и выполнение заданных требований по надежности измерительного блока.

2. Разработан нейросетевой алгоритм оценивания трех компонентов измеряемого вектора, определены структура нейронной сети, вид функции активации и условия обучаемости при заданных требованиях к точности оценивания.

3. Предложен модернизированный алгоритм оценивания на основе фильтра Калмана, отличающийся пониженным порядком разностных уравнений фильтра.

4. Исследовано влияние спектра измерительных шумов и шумов динамического процесса датчиков, дисперсии элементов и величины нормы ковариационной матрицы ошибок датчиков на смещения и дисперсии ошибок оценивания компонентов вектора кажущегося ускорения с помощью математического моделирования и полунатурного эксперимента, что позволило сформировать рекомендации по выбору алгоритмов предварительной обработки информации блоков двухкомпонентных акселерометров типа ADXL-203 и однокомпонентных кварцевых акселерометров КХ67-041.

Практическая значимость результатов состоит в разработке конфигураций избыточных блоков одно- и двухкомпонентных инерциальных датчиков, определении численных значений углов ориентации осей чувствительности, алгоритмов предварительной обработки их информации, обеспечивающих выполнение заданных требо-

ваний по надежности избыточного блока и точности оценивания трех компонентов измеряемого вектора кажущегося ускорения.

Программный комплекс для моделирования работы и обработки экспериментальных данных избыточных измерительных блоков датчиков и алгоритмов обработки их информации с учетом погрешностей датчиков, шумов измерителей и наводок в виде детерминированных и случайных процессов с заданной спектральной характеристикой используется в учебном процессе кафедрой «Приборостроение» СГТУ при проведении практических занятий, дипломного проектирования и выполнении квалификационных работ по направлению 551500, а также кафедрой «Системы искусственного интеллекта» при выполнении НИР СГТУ-239, входящей в состав основного научного направления СГТУ 03В.

Материалы работы, относящиеся к алгоритмам обработки информации блока однокомпонентных акселерометров (БИЛУ), использованы в филиале ФГУП «НПЦАП»-«ПО КОРПУС» (г. Саратов).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на II Международной научной конференции «Аналитическая теория автоматического управления и её приложения» (Саратов, СГТУ, 2005), VIII Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления» (Таганрог, ТРГУ, 2006), Международной конференции «Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении» (Саратов, ИПТМУ РАН, 2006), XIX, XX и XXI Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (Воронеж, Ярославль, Саратов, 2006-2008), Международной научно-практической конференции «Интернет и инновации» (Саратов, 2008), а также на научно-технических семинарах кафедр «Техническая кибернетика и информатика» и «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета в 2005 – 2009 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ общим объемом 2,3 п.л., в т. ч. 1 статья в журнале из перечня ВАК РФ, 8 статей в сборниках научных трудов, 2 свидетельства Роспатента об официальной регистрации программ и 1 патент на полезную модель. Личный вклад автора диссертации в этих работах состоит в создании математических моделей измерительных блоков датчиков, определении численных значений коэффициентов, разработке программ и проведении численного и полунатурного моделирования работы избыточных блоков датчиков и алгоритмов обработки их информации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, сопровождающихся выводами, заключения, приложения и списка использованной литературы, включающего 107 наименований. Общий объем работы составляет 141 страницу, включая 35 рисунков и 18 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель исследования, новизна и практическая значимость результатов.

В первом разделе рассмотрены известные результаты по схемам построения избыточных блоков инерциальных датчиков, оптимизации взаимной ориентации их осей чувствительности, алгоритмам обработки избыточной информации. Проведенный анализ позволил сформулировать задачи исследования по выбору конфигурации блоков одно- и двухкомпонентных инерциальных датчиков, построению соответствующих математических моделей, обоснованию выбора алгоритмов оценивания ком-

понентов измеряемого вектора. Для решения этих задач необходимо обосновать выбор конкретных схем построения блоков в соответствии с требованиями по надежности и точности, определить углы ориентации и соответствующие матрицы направляющих косинусов осей чувствительности датчиков в блоке для построения математических моделей блоков и алгоритмов предварительной обработки их информации, экспериментально определить элементы ковариационной матрицы ошибок и другие параметры блоков, входящие в алгоритм оценивания, построить алгоритмы и провести исследования их точности для выработки рекомендаций по их применению.

Во втором разделе определяются матрицы направляющих косинусов углов ориентации осей чувствительности однокомпонентных и двухкомпонентных датчиков в блоках при условии выполнения заданных требований по надежности и точности оценивания трех компонентов векторов кажущегося ускорения и абсолютной угловой скорости. Для этого проанализированы различные конфигурации блоков 4, 5 и 6 однокомпонентных и 4 двухкомпонентных датчиков. Для каждой вычислялись вероятности безотказной работы блока и нормы ковариационной матрицы ошибок определения вектора и каждого его компонента в объектовых осях при исправных датчиках и при наличии одного или двух отказов. При этом предполагалось, что информация датчиков определяется математической моделью вида

$$Y = NX + \delta, \quad (1)$$

в которой Y - вектор показаний датчиков размерности n ; δ - вектор ошибок измерений, являющихся аддитивными независимыми случайными величинами с нулевым математическим ожиданием; N - матрица направляющих косинусов осей чувствительности датчиков в объектовых осях XYZ размерностью $[n \times 3]$. При сделанных допущениях оценка \hat{X} измеряемого вектора X , обеспечивающая минимум среднеквадратической погрешности, определяется методом наименьших квадратов, а ковариационная матрица ошибок имеет вид

$$R_{\delta} = (N^T \times N)^{-1} \sigma^2. \quad (2)$$

Из анализа следует, что при исправных датчиках дисперсии ошибок оценивания измеряемого вектора и его компонентов для трех конфигураций блоков одноосных датчиков одинаковы (кл.1, кл.2 и пространственно-симметричная ориентация осей чувствительности (кл.3)). При наличии одного отказа дисперсии ошибок оценивания вектора одинаковы, дисперсии компонентов различны между собой. Для шестисносного блока кл.1 они имеют величины от $0,5D$ до $0,71D$, кл.2- $0,5 \div 1D$, кл.3- $0,53D \div 0,915D$, где D - дисперсия ошибок одного датчика. При наличии двух отказов дисперсии ошибок оценивания вектора для блоков кл.1 и кл.2 составляют от $2,5D$ до $4,1D$ в зависимости от взаимной ориентации осей чувствительности отказавших датчиков. Для блока кл.2 этот показатель равен $3D$. Дисперсии оценок компонентов вектора всех трех блоков различны и изменяются в диапазонах от $0,69D$ до $1,9D$ для блока кл.1, от $0,5D$ до $1,7D$ для блока кл.2 и от $0,58D$ до $3D$ для блока кл.3. Аналогичные соотношения дисперсий получены для других блоков. В целом выявлено преимущество блоков с конфигурацией кл.1, в которых оси чувствительности однокомпонентных датчиков расположены равномерно на образующих конуса с полууглом при вершине $54,74$ градуса.

Так как многие задачи навигации и управления решаются по скалярным уравнениям, желательна одинаковая точность определения всех компонентов измеряемого вектора. Зависимости функционала

$$I = (D_\varepsilon - D_{\varepsilon x})^2 + (D_\varepsilon - D_{\varepsilon y})^2 + (D_\varepsilon - D_{\varepsilon z})^2$$

от угла поворота «конуса» вокруг оси z для блоков 4, 5 и 6 датчиков имеют минимум при 45, 27, 15°, соответственно, при отказе первого датчика. Аналогичные зависимости построены при отказе каждого из датчиков, входящих в блок. При этом показано, что

$$\sum_{j=1}^6 I_j = \text{const.}$$

Таким образом, погрешности оценок компонентов вектора зависят от номеров отказавших датчиков и в этом смысле все ориентации «конуса» в блоке эквивалентны. Этот вывод справедлив и при отказе любых двух датчиков.

Для конфигураций с «центральной» осью (кл.2) показано, что при отказе центрального датчика погрешность определения вектора резко увеличивается, поэтому предпочтительнее «чистый конус».

Для двухкомпонентных датчиков применение результатов, полученных для однокомпонентных, непосредственно невозможно, т.к. пара осей чувствительности каждого датчика связана между собой нелинейными условиями ортогональности.

$$\sum_{j=1}^3 n_{ij}^2 = 1 \quad (i = 1, 2), \quad \sum_{j=1}^3 n_{1j} n_{2j} = 0. \quad (3)$$

Попытка равномерно «уложить» оси чувствительности двухкомпонентных датчиков на тот же конус приводит к «дублированию» осей в ортогональной триаде. В общем виде задача минимизации нормы $R_\delta(n^k_{ij})$ ($k = 1, 2, 3, 4$) при ограничениях (3) не решена. Найдено частное решение, приведенное на рис. 1 и 2.

В качестве исходной взята конфигурация, при которой одна ось чувствительности каждого датчика перпендикулярна плоскостям полуоктаэдра, а каждый датчик может быть повернут вокруг этой оси чувствительности на угол α . Зависимость $R_\delta(\alpha)$ имеет минимум при $\alpha = 45^\circ$. При этом показано, что первые и вторые оси чувствительности находятся на конусе с полууглом при вершине $54,74^\circ$ т.е.

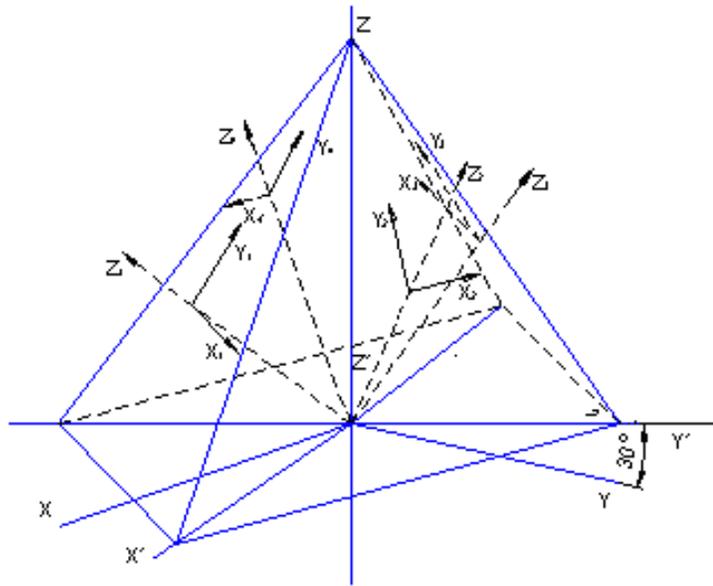


Рис.1. Исходная ориентация осей чувствительности датчиков

эта конфигурация относится к кл.1. Дисперсия ошибок определения компонентов измеряемого вектора при всех исправных датчиках составляет $0,375D$, при любом одном отказе – $0,525D$, при двух - от $0,75D$ до $1D$ независимо от номера отказавшего

датчика. При других ориентациях осей чувствительности двухкомпонентных датчиков в блоке норма ковариационной матрицы ошибок увеличивается.

Таким образом, получены углы ориентации и соответствующие матрицы направляющих косинусов осей чувствительности однокомпонентных и двухкомпонентных датчиков в блоке, обеспечивающие минимум нормы ковариационной матрицы ошибок оценивания трех компонентов измеряемого вектора при всех исправных датчиках и при наличии отказов.

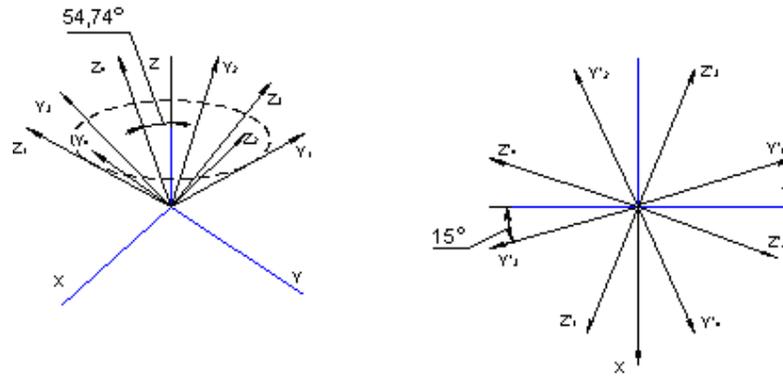


Рис. 2. Ориентация осей чувствительности двухкомпонентных датчиков

$$N_4 = \begin{bmatrix} -0,415627 & 0,415627 & 0,809017 \\ 0,572061 & -0,572061 & 0,587785 \\ -0,415627 & -0,415627 & 0,809017 \\ 0,572061 & 0,572061 & 0,587785 \\ 0,415627 & -0,415627 & 0,809017 \\ -0,572061 & 0,572061 & 0,587785 \\ 0,415627 & 0,415627 & 0,809017 \\ -0,572061 & -0,572061 & 0,587785 \end{bmatrix}; N_6 = \begin{bmatrix} 0,816496 & 0 & 0,577350 \\ 0,408248 & 0,707106 & 0,577350 \\ -0,408248 & 0,707106 & 0,577350 \\ -0,816496 & 0 & 0,577350 \\ -0,408248 & -0,707106 & 0,577350 \\ 0,408248 & -0,707106 & 0,577350 \end{bmatrix}$$

Матрицы направляющих косинусов являются элементами математической модели блока датчиков и алгоритмов обработки его информации, которые предлагаются в третьем разделе.

В третьем разделе изучаются точностные характеристики различных алгоритмов оценивания компонентов вектора кажущегося ускорения по информации блоков четырех двухкомпонентных и шести однокомпонентных акселерометров. В качестве двухкомпонентных использовались микромеханические акселерометры (ММА) ADXL-203, в качестве однокомпонентных - прецизионные кварцевые акселерометры КХ67-041.

На первом этапе проводилась калибровка масштабных коэффициентов и определялись статистические характеристики выходных сигналов по каждому каналу. На рис. 3 представлен общий вид установки с ММА. Аналогичные данные по КХ67-041 представлены филиалом ФГУП «НПЦАП»- «ПЮ Корпус».

В качестве анализируемых алгоритмов предварительной обработки информации рассматриваются выражения

$$\hat{X} = L^{-1}Y, \tag{4}$$

$$\hat{X} = (N^T \times N)^{-1} \times N^T \times Y, \tag{5}$$

$$\hat{X} = (N^T R^{-1}N)N^T R^{-1}Y, \tag{6}$$

$$\hat{X} = \psi + (C^{-1} + N^T R^{-1} N)^{-1} N^T R^{-1} (Y - N\psi). \quad (7)$$

В выражениях (4)–(7) L - матрица 3×3, составленная из направляющих косинусов трех осей чувствительности акселерометров блока, взаимная ориентация которых близка к ортогональной триаде; N - матрица направляющих косинусов осей чувствительности акселерометров; R - матрица ковариаций измерительных шумов; ψ - начальное приближение, в качестве которого можно взять оценку \hat{X} , вычисленную по формуле (4); C - априорная ковариационная матрица ошибок решения.



Рис.3. Экспериментальная установка с микромеханическими акселерометрами

Выражения (5), (6) и (7) соответствуют методам наименьших квадратов (МНК), максимального правдоподобия (ММП) и фильтру Калмана - Бьюси (ФКБ) при выполнении соответствующих гипотез: нулевое математическое ожидание шумов, равенство их дисперсий и нормальное распределение для МНК, диагональность и известность ковариационной матрицы измерительных шумов для ММП и ФКБ.

Кроме (4)–(7) использовался модифицированный алгоритм дискретного фильтра Калмана (ФК) в виде разностных уравнений

$$P_{k+1}^- = AP_k A^T + D, \quad \hat{X}_{k+1}^- = A \hat{X}_k + BU_k, \\ \hat{X}_{k+1} = \hat{X}_{k+1}^- + K_k (Y_k - M \hat{X}_{k+1}^-), \quad K_k = P_{k+1}^- M^T (M P_{k+1}^- M^T + R)^{-1}, \\ P_{k+1} = (I - K_k M) P_{k+1}^-, \quad (8)$$

$$\hat{U}_k = (B^T B)^{-1} B^T (\hat{X}_{k+1}^- - A \hat{X}_k), \quad (9)$$

соответствующих динамическим уравнениям движения блока датчиков в переменных состояниях

$$\dot{X} = AX + BU + W, \quad Y = MX + V \quad (10)$$

В системах (8) и (9) приняты следующие обозначения: \hat{x}_{k+1}^- , \hat{x}_k - соответственно, прогноз значения вектора состояния и уточненная оценка на текущем шаге; A, B - собственная матрица объекта и матрица его управляемости, соответственно; U_k - управление; Y_k - вектор измерения на текущем шаге; M - матрица измерений; W, R - ковариации шумов процесса и измерений, соответственно; P_{k+1}^- , P_{k+1} - априорная и апостериорная (уточненная) оценки ковариаций ошибок; K_k - матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана.

Получение оценки вектора состояния \hat{X}_{k+1} проходит в два этапа. На первом этапе осуществляется прогноз оценки на следующий шаг рекурсии \hat{X}_{k+1}^- , а на сле-

дующем этапе уточняют значение этой оценки и вычисляют вектор \hat{X}_{k+1} . Для получения рекуррентного алгоритма оценивания система замыкается выражением (9). Известной особенностью классического ФК являются высокий порядок системы разностных уравнений, увеличивающийся при расширении вектора переменных состояния за счет ошибок оценивания. Применение алгоритма (8)-(9) позволяет снизить размерность уравнений.

Кроме алгоритмов (4)–(9) в работе рассмотрена возможность применения искусственных нейронных сетей (ИНС) для оценивания компонентов измеряемого вектора. Структура избыточного блока датчиков с системой обработки информации, имеющая, например, шесть входов (сигналы акселерометров) и три выхода (W_x , W_y , W_z) указывает на возможность применения нейросетевых алгоритмов. При этом задача идентификации отказов может трактоваться как задача распознавания образов.

Изучение свойств нейросетевых алгоритмов базировалось на использовании пакета MATLAB. Вначале решалась модельная задача: задавались проекции вектора $\bar{W}(W_x, W_y, W_z)$ на оси блока, пересчитывались в показания акселерометров с помощью матрицы направляющих косинусов, и поступали на вход нейронной сети с тремя нейронами во внешнем слое и различным количеством внутренних слоев (рис. 4). Варьировались количество слоев, функции активации и допустимая погрешность вычисления $\hat{W}_x, \hat{W}_y, \hat{W}_z$, при которых оценивалась сходимость процесса обучения сети.

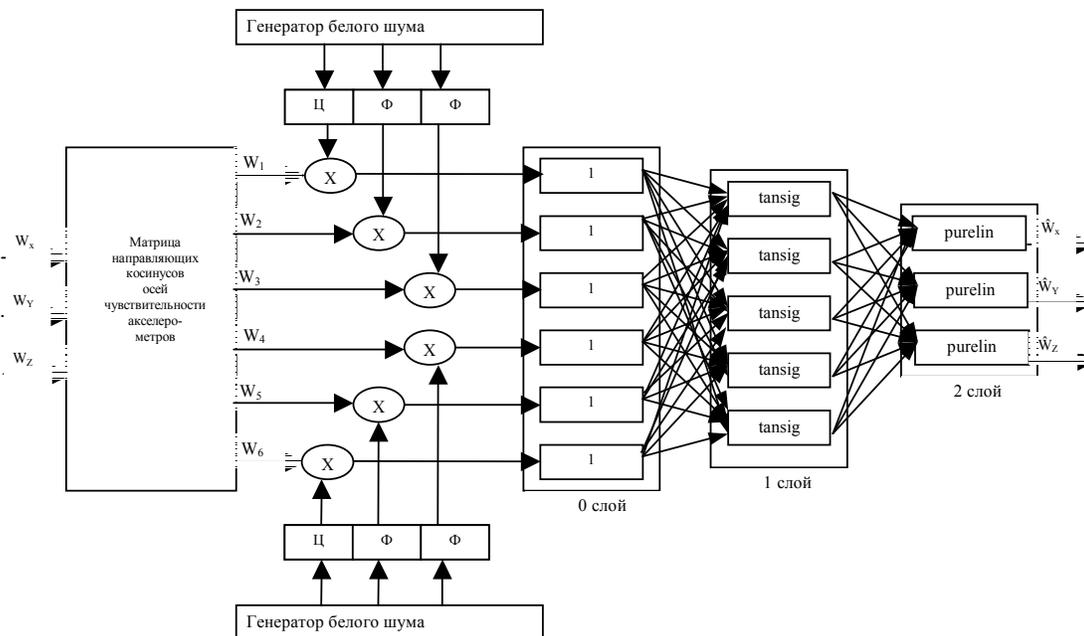


Рис. 4. Структурная схема моделирования

Обучение проводилось методом Левенберга-Марквардта. Начальные значения синаптических коэффициентов задавались случайными. В качестве функций активации рассматривались линейная (purelin), сигмоидальная (tansig) и логарифмическая (logsig). Процесс обучения сошелся для следующих вариантов.

1. Двухслойная сеть с функциями активации (tansig и purelin); (logsig и purelin); (purelin и purelin) для скрытого и выходного слоёв соответственно;

2. Трёхслойная сеть с функциями (tansig, purelin, purelin); (logsig, purelin, purelin); (purelin, purelin, purelin). Лучшие результаты - при применении линейной функции активации. Чем больше слоев, тем лучше сходится процесс обучения. Для оцени-

вания компонентов $\hat{W}_x, \hat{W}_y, \hat{W}_z$ вектора \bar{W} с погрешностью порядка 0,1% достаточно использовать алгоритм трехслойной нейронной сети с линейными функциями активации, который достигает порогового значения за 3 шага обучения.

Таким образом, рассмотрены пять алгоритмов оценивания трех компонентов измеряемого вектора кажущегося ускорения по информации избыточного блока акселерометров, имеющие разную структуру, сложность, предполагающие различный объем предварительной калибровки датчиков.

В четвертом разделе для выработки критериев выбора алгоритмов предварительной обработки для конкретных блоков датчиков и исследования зависимостей погрешностей оценивания от уровня взаимной корреляции шумов и различных движений основания разработана программа моделирования работы избыточного измерительного блока и системы обработки информации, блок-схема которой приведена на рис. 5.

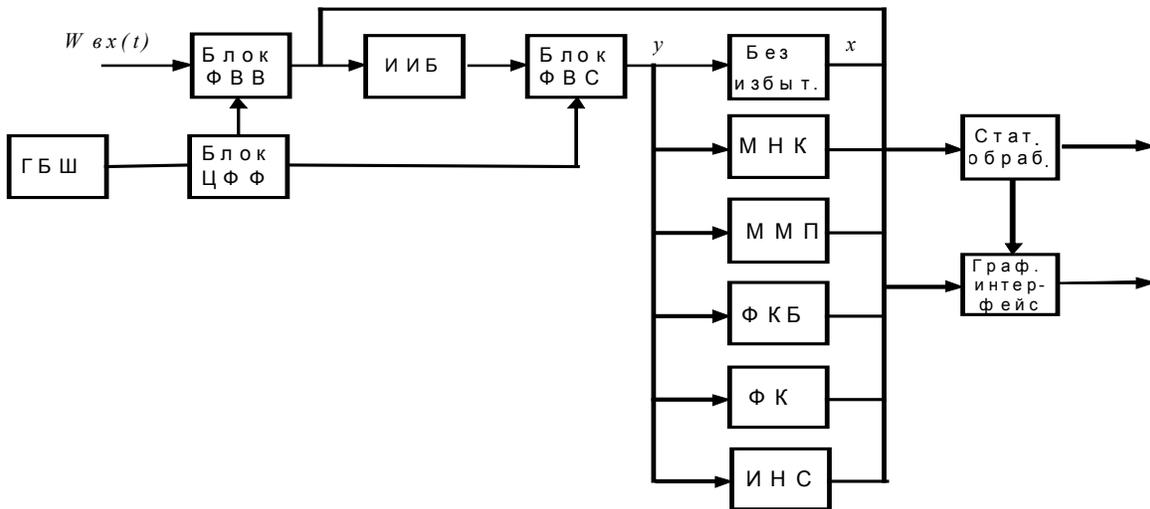


Рис. 5. Блок-схема программы

Движение объекта может задаваться блоком формирования входных воздействий (ФВВ) в виде детерминированных законов изменения кажущихся ускорений (абсолютных угловых скоростей) или стационарных и нестационарных случайных процессов с заданной спектральной характеристикой, моделируемых с помощью генератора белого шума (ГБШ) и блока цифровых формирующих фильтров (блок ЦФФ). На выходные сигналы инерциального блока (ИИБ) может быть наложен измерительный шум в блоке формирования выходных сигналов (блок ФВС). Результаты обработки информации ИИБ пятью различными алгоритмами выводятся в графическом или табличном видах после статистической обработки. Программа применима для моделирования работы любого измерительного блока, математическая модель которого задана, и обработки экспериментальных данных. Моделировались различные варианты движений основания, уровня и соотношений дисперсий измерительных и динамических шумов. Для примера на рис. 6 приведена диаграмма дисперсий ошибок оценок компонента W_x в зависимости от величины диагональных элементов ковариационной матрицы измерительных шумов. При этом предполагалось, что $\bar{W} = const$, $D \equiv 0$, измерительные шумы датчиков являются равномерно распределенными независимыми случайными величинами с нулевым математическим ожиданием. Для алгоритма ФК матрица D принималась диагональной и отличной от нуля.

На изображенной диаграмме столбцы для дисперсий ошибок оценивания компоненты входного вектора методом ФК практически не видны из-за их малости относительно дисперсий ошибок оценивания методом без использования избыточности. Для пяти других методов зависимость дисперсий ошибок оценивания от дисперсии диагональных элементов матрицы ковариаций измерительных шумов хорошо видна.

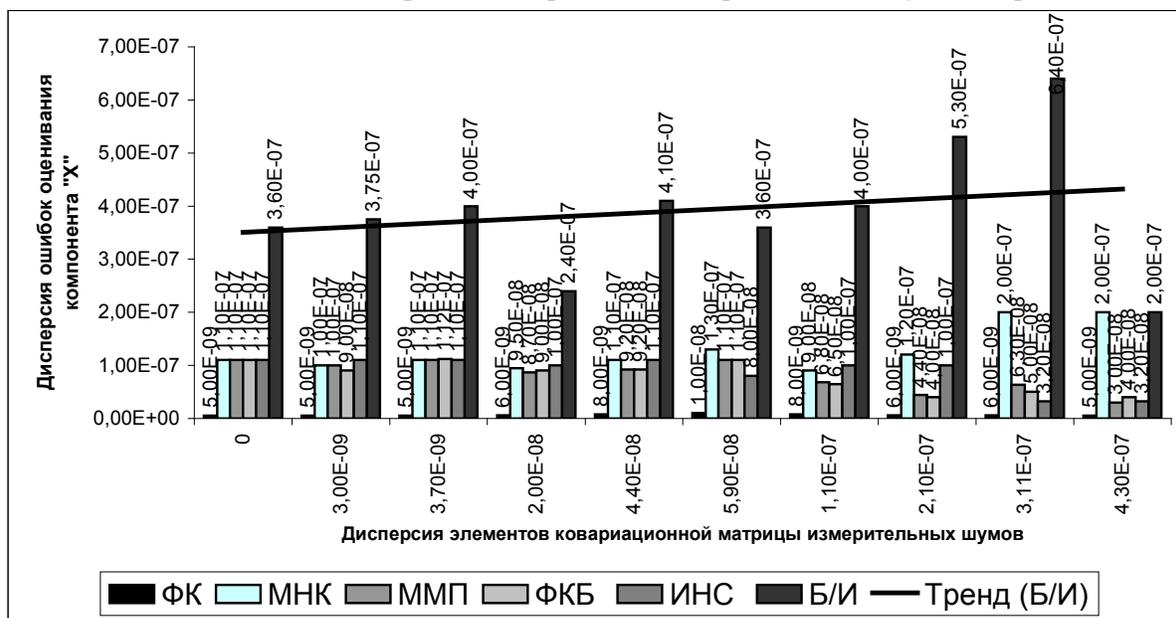


Рис. 6 Дисперсия ошибок оценивания W_x

По тренду дисперсии ошибок оценивания без использования избыточности и МНК видно, что с ростом дисперсии диагональных элементов дисперсия ошибок оценивания этого метода имеет тенденцию к росту, хотя и остается в 3 - 4 раза меньше. Дисперсия ошибок оценивания методом максимального правдоподобия, наоборот, уменьшается, а разница между МНК и ММП увеличивается. График изменения этой разности изображен на рис. 7.

На этом графике по вертикальной оси - отношение разности дисперсий ошибок оценивания МНК и ММП к значению дисперсии МНК. По этому графику можно определить, при каком значении дисперсии диагональных элементов ковариационной матрицы измерительных шумов целесообразно переходить от МНК к более сложному ММП, если принять какое-либо значение приведенной разности за пороговое.

Аналогичные зависимости построены и для погрешностей других алгоритмов.

Сравнение точности алгоритмов при наличии взаимных корреляций измерительных шумов показало, что с ростом нормы ковариационной матрицы дисперсия ФК, как и других алгоритмов, увеличивается. Однако скорость роста дисперсии ошибок оценивания ФК меньше скорости роста дисперсий других методов. Поэтому с ростом нормы матрицы R от $6 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^4$ отношение смещения оценки ФК нелинейно уменьшается от 0,1 для ММП и 0,17 для МНК до 0,01 и 0,012, соответственно.

Сравнение алгоритмов при наличии шумов измерительных и динамического процесса осуществлялось по дисперсии ошибок оценивания и смещению оценки.

Анализ диаграмм показывает, что имеется явная закономерность изменения дисперсий ошибок оценивания с ростом нормы ковариационной матрицы шумов динамического процесса. В этом случае значения отношений дисперсии ошибок оценивания ФК к дисперсиям других алгоритмов возрастает с увеличением нормы.

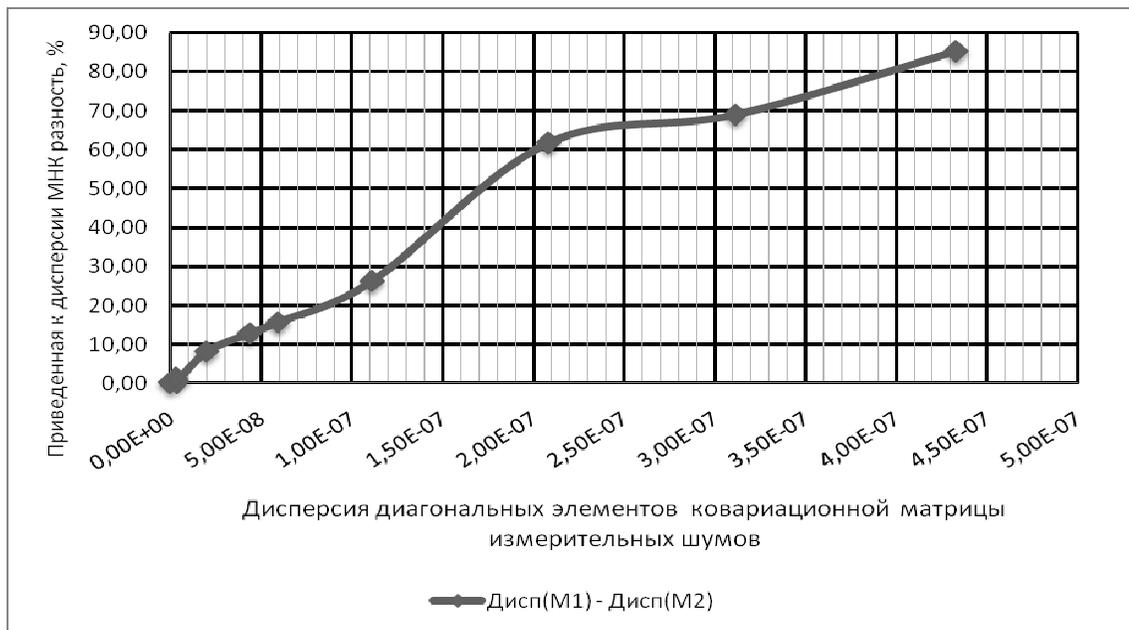


Рис. 7 Приведенная разность дисперсий

Это означает, что оценки алгоритмов МВНК, МНК и Б/И приближаются к оценкам ФК по величине дисперсии ошибок оценивания. Однако рост величин отношений не линеен и резко увеличивается при значениях нормы, больших $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^4$. Таким образом, оптимальные значения нормы ковариационной матрицы шумов динамического процесса находятся в диапазоне $1 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^4$. Так как на практике определить статистические параметры шумов динамического процесса сложно, следует стремиться не к приближению этой матрицы к истинной, а к ограничению ее нормы. Анализ других вариантов показал, что во всех случаях ФК имеет наилучшие результаты и по смещению оценок и по дисперсиям ошибок оценивания. При неэкстремальных значениях дисперсий шумов и ковариаций ФК обладает на порядок меньшей дисперсией ошибок оценивания. В большинстве случаев смещение оценки также меньше, чем у остальных методов. Недостатком ФК является увеличение инерционности при относительно больших значениях элементов ковариационной матрицы измерительных шумов, а также появление ощутимого динамического запаздывания при изменении компонентов входного вектора с частотами свыше 10 Гц.

Метод максимального правдоподобия целесообразно использовать при отсутствии сильных корреляций измерительных шумов и неравенстве дисперсий шумов измерительных каналов между собой. Этот метод применим при нестационарном входном воздействии без ограничений, которые требуется учитывать для ФК. Дисперсия и математическое ожидание ошибок оценивания этим методом в некоторых случаях приближаются к параметрам ФК (отношение параметра ФК к параметру МВНК близко к 1), но в большинстве случаев различие существенно. При этом вычислительная нагрузка значительно меньше, чем у ФК.

Метод наименьших квадратов обеспечивает оценки, сравнимые по точности с ММП только в случаях близости значений дисперсий измерительных шумов и отсутствия их корреляции. Наиболее существенно разница между ними проявляется в резком увеличении дисперсии ошибок оценивания с ростом дисперсии элементов ковариационной матрицы измерительных шумов. При норме матрицы ковариаций измерительных шумов, равной или большей $5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^4$, разность дисперсий ММП и МНК становится больше 10% в пользу ММП.

Алгоритм ИНС позволяет снизить дисперсию ошибок оценивания компонентов на уровне МНК, кроме того, он обеспечивает на порядок меньшее смещение оценок.

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволило провести математическое моделирование и экспериментальные исследования работы блоков четырех двухкомпонентных и шести однокомпонентных акселерометров с системой обработки избыточной информации. Исследовано влияние величины и дисперсии элементов ковариационной матрицы измерительных шумов, наличия и параметров шумов динамических процессов. Разработаны рекомендации по применению конкретных алгоритмов в зависимости от характеристик инерциальных измерителей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена взаимная ориентация осей чувствительности однокомпонентных и двухкомпонентных датчиков в блоке, при которой обеспечивается минимум среднеквадратической ошибки определения вектора и его компонентов, как при всех исправных датчиках, так и при наличии отказов.

2. Получены математические модели блоков четырех двухкомпонентных и шести однокомпонентных датчиков, имеющих близкие показатели по надежности, и алгоритмы первичной обработки информации датчиков и оценивания трех компонентов измеряемого вектора (кажущегося ускорения) на основе методов наименьших квадратов, максимального правдоподобия, фильтра Калмана – Бьюси и модифицированного дискретного фильтра Калмана.

3. Разработан алгоритм оценивания трёх компонентов вектора кажущегося ускорения с помощью многослойной нейронной сети прямого распространения. Исследовано влияние количества слоев, вида функций активации и допустимой погрешности оценивания на сходимость процесса обучения сети. Лучшие результаты получены для трехслойной нейронной сети с линейными функциями активации.

4. Создано программное обеспечение, позволяющее проводить математическое моделирование и обработку экспериментальной информации избыточного блока датчиков произвольной конфигурации с возможностью задания различной ориентации осей чувствительности датчиков в блоке, детерминированных или случайных входных сигналов с заданной спектральной характеристикой, моделирования измерительных шумов и шумов динамических процессов с заданными статистическими характеристиками с помощью цифрового формирующего фильтра.

5. Проведены математическое моделирование и экспериментальные исследования работы блоков четырех двухкомпонентных микромеханических акселерометров ADXL-203 и шести однокомпонентных кварцевых акселерометров КХ67-041 с системой обработки избыточной информации, в которой реализованы пять различных алгоритмов оценивания.

6. Проведены исследования влияния на точность оценивания компонентов вектора кажущегося ускорения величин и дисперсии элементов ковариационной матрицы измерительных шумов, наличия и параметров шумов динамических процессов. Разработаны рекомендации по применению конкретных алгоритмов в зависимости от характеристик инерциальных измерителей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Алешкин М.В. Исследование алгоритмов обработки информации избыточно-го блока микромеханических акселерометров/ В.В. Алешкин, М.В. Алешкин, А.С. Сокольский, А.С. Матвеев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. №1. С. 96 – 105.

Публикации в других изданиях

2. Алешкин М.В. Нейросетевой алгоритм обработки избыточной информации блока акселерометров /М.В. Алешкин// Аналитическая теория автоматического управления и её приложения: материалы Второй Междунар. науч. конф. Саратов:СГТУ, 2005. С.238 – 240.

3. Алешкин М.В. Нейросетевое моделирование избыточного блока акселерометров/М.В. Алешкин// Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления: материалы VIII Всерос. науч. конф. студентов и аспирантов. Таганрог: ТРТУ, 2006. С. 70.

4. Алешкин М.В. Экспериментальная установка для исследования характеристик избыточного блока микромеханических акселерометров/ В.В. Алешкин, М.В. Алешкин, А.С. Сокольский // Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении: материалы Междунар. конф. Саратов: ИПТМУ РАН, 2006. С. 22 – 26.

5. Алешкин М.В. Моделирование работы избыточного блока акселерометров с нейросетевой обработкой информации / В.В. Алешкин, М.В. Алешкин // Математические методы в технике и технологиях: сб.трудов XIX Междунар. науч. конф. в 9т. Воронеж: ВГТА, 2006. Т. 6. С. 25 – 26.

6. Алешкин М.В. Экспериментальное определение характеристик блока четырех двухкомпонентных микромеханических акселерометров / М.В. Алешкин, Н.И. Фролов, А.С. Матвеев // Математические методы в технике и технологиях: сб.трудов XX Междунар. науч. конф. в 9 т. Ярославль: ЯГТУ, 2007. Т. 8. С.149-151.

7. Алешкин М.В. Алгоритм и программа обработки информации избыточной измерительной системы на основе фильтра Калмана / А.А. Большаков, М.В. Алешкин, А.С. Матвеев // Математические методы в технике и технологиях: сб.трудов XXI Междунар. науч. конф. в 10 т. Саратов: СГТУ, 2008. Т. 9. С. 37 – 39.

8. Алешкин М.В. Математические модели, методы и алгоритмы обработки избыточной информации измерительного блока / В.В. Алешкин, А.С. Матвеев, М.В. Алешкин // Интернет и инновации: сб.трудов Междунар. конф. Саратов: СГТУ, 2008. С. 377 – 380.

9. Алешкин М.В. Использование интернет – технологий и GPS/ГЛОНАСС – GSM для повышения технико–экономической эффективности эксплуатации подвижных объектов / М.В. Алешкин, И.С. Шатурный // Интернет и инновации: сб.трудов Междунар. конф. Саратов: СГТУ, 2008. С. 344 – 346.

Патентные документы

10. Алешкин М.В. Программа синтеза и анализа цифрового формирующего фильтра / В.В. Алешкин, В.Б. Никишин, М.В. Алешкин; Свидетельство Роспатента об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2006610942 от 14.03.2006.

11. Алешкин М.В. Комплект лабораторного оборудования для исследования блока микромеханических акселерометров / В.В. Алешкин, И.Н. Голованов, М.В. Алешкин, Н.И. Фролов ; Патент на полезную модель №86298 от 27.08.09 г.

12. Алешкин М.В. Программа моделирования работы избыточного блока и алгоритмов обработки информации / В.В. Алешкин, А.С. Матвеев, М.В. Алешкин; Свидетельство Роспатента об офиц. регистрации программы для ЭВМ №2009612269 от 06.06.2009.

Алешкин Михаил Валерьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМ И АЛГОРИТМОВ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ИЗБЫТОЧНЫХ БЛОКОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Автореферат

Корректор О.А. Панина

Подписано в печать 15.12.09

Формат 60x84 1/16

Бум офсет.

Усл. печ. л. 1,0

Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ _____

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77