

На правах рукописи

Бабиченко Андрей Викторович

**ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИОННО-
УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ВЫСОКОМАНЕВРЕННЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 2009

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана на кафедре «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации»

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук, профессор
Рахтесенко Евгений Романович

2. Доктор физико-математических наук, профессор
Жбанов Юрий Константинович

Ведущая оппонентка

У1882661 ук
Бабиченко А.В. яч
Прикладные методы
обработки информации и
моделирования при
проектировании информац...
2009 0-00
Москва

У 1882661

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

на заседании
государственного
г. Москва, 2-я

ный печатью
-я Бауманская
ертащ

А. Бау



1882661
Бабиченко А. В. Прикладные

Е.В. Бурый

1623

Актуальность работы. Перспективы развития фронтовой авиации связываются с многофункциональными высокоманевренными летательными аппаратами (ВМЛА), оснащенными бортовыми информационно-управляющими комплексами (ИУК), позволяющими совершать полеты в различных условиях, получать и обрабатывать информацию о внешней обстановке и состоянии бортовых систем, осуществлять воздействие по воздушным и наземным целям с помощью бортовых средств поражения. Требования к ИУК летательных аппаратов, создаваемых опытно-конструкторскими бюро Сухого, Мякояна, Миля, Камова, постоянно возрастают и, соответственно, усложняются как сами бортовые комплексы и системы, так и их разработка, осуществляемая коллективами Раменского приборостроительного конструкторского бюро (РПКБ), Государственного научно-исследовательского института авиационных систем (ГосНИИ АС), Научно-исследовательского института авиационного оборудования (НИИ АО), Государственного научно-исследовательского института приборостроения (ГосНИИП), Московского института электромеханики и автоматики (МИЭА), Летно-исследовательского института им. М.М. Громова (ЛИИ), Российского института радионавигации и времени (РИРВ), Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры (ВНИИРА), другими организациями отрасли. Значительный вклад в развитие методов и алгоритмов комплексной обработки и моделирования ИУК внесен учеными МГТУ им. Н.Э. Баумана, ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, МАИ им. С. Орджоникидзе, МГУ им. М.В. Ломоносова, ИПМ РАН, научно-исследовательских центров Министерства обороны Российской Федерации.

Математическое моделирование на этапах разработки, испытаний и технического сопровождения бортовых комплексов, в известной степени заменяя работу с реальными дорогостоящими компонентами ИУК работой с их моделями, позволяет существенно снизить трудоемкость и стоимость работ по созданию ИУК. Достигнутый уровень развития вычислительной техники позволяет успешно ставить и решать задачи моделирования практически любых информационных связей и физических процессов бортовых комплексов и систем.

С другой стороны, повышение требований к информационному обеспечению ИУК ВМЛА ведет к необходимости разработки все более сложных алгоритмов обработки в реальном масштабе времени многообразной информации измерительных устройств комплекса, при этом требуется использовать все более тонкие и сложные математические модели самих бортовых систем, летательного аппарата и взаимодействующих с ним объектов. Это – другое направление математического моделирования ИУК ВМЛА, успех которого также в значительной мере обусловлен достигнутым уровнем развития бортовых вычислительно-коммуникационных средств.

Можно констатировать, что усложнение задач бортовых комплексов, увеличение числа взаимодействующих объектов, качественный рост

возможностей вычислительно-коммуникационных средств предопределяют существенное повышение роли обработки информации и моделирования при разработке и эксплуатации ИУК ВМЛА. При этом прикладные методы обработки информации и моделирования ИУК ВМЛА развиваются по двум направлениям:

- моделирование работы ИУК ВМЛА как элемент технологического процесса разработки и исследований бортовых алгоритмов и систем,
- моделирование состояния и поведения ВМЛА и его бортового оборудования в информационном пространстве в реальном масштабе времени как основное содержание комплексной обработки информации ИУК при его штатной эксплуатации.

Основным объектом исследования в диссертации является ИУК ВМЛА и его связи с информационным пространством, при этом в качестве предмета исследований выступает математическая модель комплекса и методы обработки информации ИУК.

Целью диссертации является разработка методов моделирования и комплексной обработки информации, обеспечивающих выполнение функциональных задач ВМЛА во всех условиях применения и повышающих эффективность проектирования и испытания бортовых комплексов.

Теоретическая основа и методы решения задач. Теоретическую основу диссертационной работы составили:

- классическая механика и инерциальная навигация;
- теория линий, поверхностей и фигуры Земли;
- информационно-статистическая теория обработки измерений;
- оптимальная и адаптивная фильтрация данных;
- аппроксимация экспериментальных данных гладкими линиями;
- обработка измерений обзорно-прицельных и радионавигационных бортовых средств;
- объектно-ориентированное и структурное программирование.

Многие научные положения диссертации опираются на фундаментальные труды А.Ю. Ишлинского, П.В. Бромберга, В.Д. Андреева, Р. Калмана и других известных отечественных и зарубежных ученых. Основными методами решения задач диссертационной работы явились:

- математическое имитационное моделирование комплекса;
- полунатурное моделирование комплекса;
- летные испытания ИУК ВМЛА и послеполетный анализ результатов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработаны методы и алгоритмы многоуровневой адаптивно-робастной комплексной обработки информации ИУК ВМЛА, обеспечивающей выполнение функциональных задач ВМЛА во всех условиях применения;
- разработаны методы построения математической модели информационного пространства на базе семейства уровнейых поверхностей и системы координатных трехгранников,

обеспечивающей информационное единство и целостность ИУК ВМЛА;

- разработаны методы отображения уровневых поверхностей на сферу и высокоточные бортовые алгоритмы решения позиционных задач на уровневых поверхностях;
- разработаны и исследованы математические модели, методы и алгоритмы обработки информации базовых инерциальных навигационных систем;
- разработаны и исследованы методы моделирования ИУК ВМЛА при проектировании и исследованиях ИУК, обеспечивающие высокое качество результатов и их соответствие экспериментальным данным;
- разработаны методы и алгоритмы формирования эталонной траекторной информации, обеспечивающей методическую основу моделирования ИУК ВМЛА;
- разработаны метод и алгоритмы послеполетного контроля качества работы ИУК на основе субоптимальной обработки записанной в полете информации;
- разработаны методы компенсации динамических дрейфов платформенных инерциальных систем путем автоматической калибровки на борту с помощью субоптимальной фильтрации текущих измерений.

Практическая значимость, реализация и внедрение результатов работы.

Основным результатом диссертационной работы является создание методов обработки информации и математического моделирования ИУК ВМЛА при разработке и испытаниях новой авиационной техники. Выносимые на защиту теоретические положения диссертации, проработанные в рамках выполнения научно-исследовательских работ (НИР), соответствуют экспериментальным данным, полученным в ходе многочисленных полунатурных и летных испытаний бортовых комплексов летательных аппаратов «Су», «МиГ», «Ка». Выполненные разработки легли в основу проектирования ИУК новых поколений и модернизации существующих бортовых комплексов:

- разработанные методы обработки информации ИУК ВМЛА, обеспечивающие формирование параметров состояния с требуемой точностью во всех условиях применения, доведены до практических алгоритмов и бортовых программ, зарегистрированных в Государственном Реестре программ для ЭВМ;
- разработанные прикладные методы моделирования составили основу системы имитационного моделирования ИУК ВМЛА новых поколений, обеспечивающую высокую эффективность создания и испытаний бортового программно-математического обеспечения (ПМО) летательных аппаратов новых поколений.

Предложенные методы обработки информации и моделирования ИУК:

- использованы при разработке авансового, эскизного и технического проектов перспективного авиационного комплекса фронтовой авиации (ПАК ФА) 5-го поколения;
- используются при разработке рабочей конструкторской документации ПАК ФА, а также при проектировании и испытаниях бортовых комплексов и систем ВМЛА поколений 4 и 4+;
- защищены патентами Российской Федерации, внедренными в состав бортовых комплексов самолетов и вертолетов, прошедших государственные испытания и выпускаемых крупными сериями (различные модификации самолетов Су-27, Су-30МК, МиГ-29; вертолеты Ка-31);
- использованы при выполнении научно-исследовательских работ, заказанных Министерством обороны Российской Федерации;
- используются при чтении курсов лекций «Математическое моделирование ИУК» и «Информационно-статистическая теория обработки измерений» в МГТУ им. Н.Э. Баумана и МАИ им. С. Орджоникидзе, а также при курсовом и дипломном проектировании студентов этих университетов.

Внедрение результатов работы подтверждается более чем 30 актами.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- методы и алгоритмы многоуровневой адаптивно-робастной комплексной обработки информации ИУК ВМЛА;
- методы адаптации алгоритмов и моделей ИУК: априорной – на основе ковариационного анализа и минимаксного критерия качества, текущей – на основе согласования расчетной и фактической ковариаций и сетевой фильтрации данных, долгосрочной – на основе использования энергонезависимой памяти комплекса;
- методы построения математической модели информационного пространства;
- методы и алгоритмы решения позиционных задач на уровневых поверхностях;
- математические модели, методы и алгоритмы обработки информации базовых инерциальных навигационных систем;
- методы моделирования ИУК ВМЛА при проектировании и исследованиях ИУК;
- методы и алгоритмы формирования эталонной траекторной информации;
- метод и алгоритмы послеполетного контроля качества работы ИУК на основе субоптимальной обработки записанной в полете информации;
- методы и бортовые алгоритмы автоматической калибровки и компенсации динамических дрейфов платформенных ИНС.

Личный вклад автора. Разработка и внедрение новой авиационной техники – это коллективный творческий труд, тем не менее, разработка методов, моделей и алгоритмов, выносимых на защиту, осуществлена

непосредственно автором или при его решающем вкладе в исследования, проведенные в соавторстве с А.П. Рогалевым, Г.И. Джанджгавой, А.В. Чернодаровым, М.И. Ореховым, В.В. Негриковым, В.К. Шкредом, С.Я. Сухоруковым, В.И. Манохиным.

Апробация диссертации. Основные положения и результаты диссертации докладывались на Московском авиакосмическом салоне МАКС-2001 (Жуковский, 2001), юбилейной научно-технической конференции «Авиационные системы в XXI веке» (Москва, 2006), XVII международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации» (Алушта, 2008), 6-й международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2007), заседаниях Государственных комиссий Министерства обороны Российской Федерации по приему НИР (Раменское, 1995-2007 гг.), Научно-техническом Совете РПКБ (Раменское, 2008), 3-ей Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (Санкт-Петербург, 2009).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 научных статей и материалов научно-технических конференций, в том числе в изданиях Перечня ВАК – 18, получено около 20 патентов Российской Федерации, выпущено более 24 научно-технических отчетов по различным этапам НИОКР по разработке новой авиационной техники.

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 377 машинописных страницах, содержит 90 рисунков, 25 таблиц и состоит из: списка сокращений, введения, шести глав основной части, выводов, заключения и списка литературы, включающего 123 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 «Методы и задачи обработки информации и моделирования информационно-управляющих комплексов высокоманевренных летательных аппаратов» состоит из трех разделов. Первый раздел – описание облика и основных тенденций развития главного объекта исследования – ИУК ВМЛА, посредством которого экипаж решает задачи целевого применения ВМЛА. Важнейшими атрибутами бортовых комплексов ЛА являются [19]:

- аппаратно-измерительная база;
- вычислительные ресурсы;
- средства внешней и внутренней коммуникации;
- средства отображения информации и управления;
- программно-математическая и алгоритмическая база;
- технологическая база разработки и эксплуатации комплекса,

соответственно степени развития которых различают несколько поколений бортового оборудования. ИУК современных и перспективных ВМЛА относятся к 4, 4+ и 5 поколениям. Основные перспективы развития ИУК связаны с дальнейшим углублением и расширением информационной

интеграции комплекса с объектами тактической группы и элементами информационного пространства, а также с широким применением гибких технологий адаптации комплекса к внешним и внутренним условиям. Необходимым условием этого является устойчивый рост мощности наземных и бортовых вычислительных средств и средств обмена данными.

С другой стороны, качественный рост вычислительных средств делает возможным проведение полномасштабного математического моделирования разрабатываемых бортовых комплексов и их алгоритмического обеспечения, в результате которого может быть решена значительная часть задач разработки и испытаний ИУК. Это приводит к относительному уменьшению стоимости разработки и эксплуатации комплексов.

Во втором разделе рассмотрены вопросы моделирования в реальном времени при комплексной обработке информации ИУК ВМЛА при его штатной эксплуатации. Физические объекты, участвующие в решении задач целевого применения ВМЛА, рассматриваются как структурные элементы единой метасистемы, а информационные взаимодействия между ними – как соответствующие связи. При этом главная задача комплексной обработки информации (КОИ) ИУК ВМЛА формулируется как задача построения адекватной математической модели связей метасистемы (рис. 1), включающей [1]: околоземное навигационное пространство; заполняющие его информационные поля и объекты; ЛА, оснащенные ИУК. Центральное место в метасистеме занимает информационное пространство – околоземное навигационное пространство, заполненное информационными полями [1] естественного и искусственного происхождения, в которое погружены ЛА и взаимодействующие с ними объекты – цели, ориентиры и т.п. ВМЛА связан с информационным пространством посредством информационной оболочки, включающей различные бортовые измерительные устройства и системы. Связи между информационными полями, навигационным пространством и ЛА образуют замкнутые цепочки звеньев, к измерению и вычислению которых сводится решение различных информационных задач. В идеальном случае использование разных информационных полей будет давать варианты одной и той же картины.

Однако неточности измерения связей и построения модели информационного поля приводят к неоднозначности решений «треугольников связей» и, соответственно, к неточности определения состояния ВМЛА и других объектов. Устранение или сведение к минимуму этой неточности представляет собой задачу КОИ, которая решается с помощью пятиуровневой системы алгоритмов [1].

На 1-м уровне формируется модель информационного пространства.

На 2-м уровне осуществляется автономная обработка информации измерительных каналов. Обобщенный алгоритм $\mathcal{R}^i$ обработки информации в i -м канале m -го ЛА (из состава группы) связывает вектор N_m^i состояния канала с измерительной информацией J_m^i канала и параметрами соответствующего информационного поля K_m^i :

$$N_m^i = \mathcal{R}^i(J_m^i, K_m^i).$$

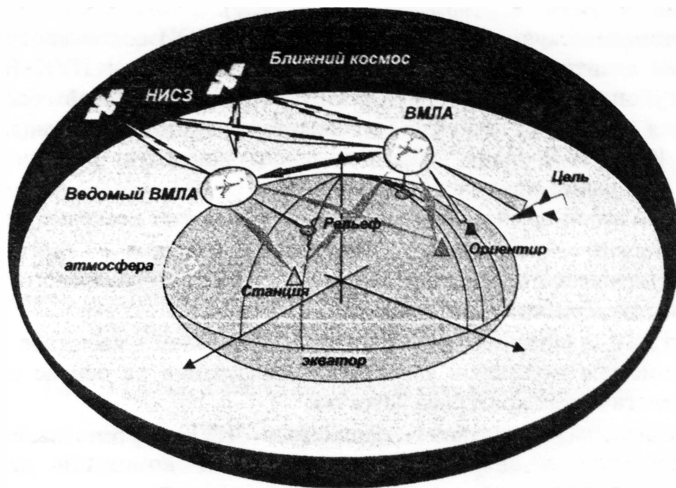


Рис. 1. Схема информационной метасистемы

На 3-м уровне формируются информационные невязки между векторами N_m^i , J_m^i , K_m^i различных каналов, связанных между собой, кроме оператора $\mathcal{K}^i$, еще и операторами $\mathcal{K}^i$ и $\mathcal{Z}^i$:

$$J_m^i = \mathcal{K}^i(N_m^i, K_m^i);$$

$$K_m^i = \mathcal{Z}^i(N_m^i, J_m^i).$$

В качестве опорной выступает информация того канала, который в текущий момент является наиболее точным и надежным. Выбор осуществляется на основе анализа накапливаемой текущей информации каналов и информации из бортовой базы данных, в том числе с помощью бортовой системы интеллектуальной поддержки.

На 4-м уровне осуществляется обработка невязок с помощью алгоритмов фильтрации разной степени сложности – от сглаживающих фильтров до вычислительно-устойчивых модификаций адаптивно-робастных фильтров Калмана.

На 5-м уровне формируются корректирующие поправки для моделей информационных полей и каналов, а также синтезируются точные параметры состояния ЛА и взаимодействующих с ним объектов. При этом широко используются данные межбортового обмена и межбортовых измерений взаимных координат ($\Delta N_{n/m}$ – для m -го ЛА относительно n -го) в составе тактической единицы (группы). Использование этой информации позволяет решать следующие задачи:

определение на m -ом борту резервных расчетных значений информации $N_{n(m)}^i$ для каналов n -ых бортов:

$$N_{n(m)}^i = \Phi(N_m^i, \Delta N_{n/m});$$

определение на m -ом борту резервных расчетных значений измерительной информации $J_{n(m)}^i$ для каналов n -ых бортов:

$$J_{n(m)}^i = \mathcal{N}^i(N_{n(m)}^i, K_m^i).$$

Математическую основу верхних уровней КОИ составляют методы и алгоритмы адаптивно-робастной обработки информации ИУК ВМЛА на основе субоптимальной фильтрации. В качестве базовой основы для построения фильтров выбрана вычислительно-устойчивая модификация фильтра Калмана-Джозефа, обеспечивающая надежную работу в любых режимах и условиях применения ВМЛА.

Адаптивный характер системы КОИ ИУК ВМЛА имеет несколько сторон:

- априорная адаптация моделей методом имитационного математического моделирования на основе минимаксного критерия качества обработки информации;
- текущая адаптация (настройка) в реальном масштабе времени параметров моделей и алгоритмов фильтрации на основе различных статистических критериев качества;
- долгосрочная адаптация параметров ИУК путем выделения и сохранения в энергонезависимой памяти комплекса стабильных параметров моделей.

Текущая настройка осуществляется методом параметрической адаптации по принципу согласования расчетного и фактического значений ковариации информационной невязки. Уровень сигнальной величины

$$\beta = v_j^2 / \alpha_j,$$

где: $\alpha_j = (H \cdot P \cdot H^T)_j + R_j$ – расчетное значение ковариации j-той невязки;

v_j^2 – оценка фактической ковариации j-той невязки,

служит мерой соответствия априорной информации о состоянии системы и ее фактическим состоянием. Для правильной адаптации фильтра предварительно на основе использования локальной информационной избыточности комплекса осуществляется выявление причин аномального роста β : если причина этого – рост погрешностей корректора, то его влияние ограничивается вплоть до отключения, если причина – рост погрешностей корректируемого канала или неточная настройка фильтра, то осуществляется подстройка параметров фильтра. Быстрая подстройка осуществляется по алгоритму: если $\beta \geq 1$, то $\alpha = v^2$,

при этом происходит поправка коэффициентов усиления фильтра:

$$K = P H^T \alpha^{-1} = \frac{P H^T}{v^2},$$

где K , P , H – матрицы коэффициентов усиления фильтра, расчетной ковариации вектора состояния и модели измерителя соответственно.

Алгоритм медленной подстройки расчетной ковариации вектора состояния имеет вид: если $\beta \geq 1$, то

$$P = \bar{P} + K \cdot (\beta - 1) \cdot H \cdot \bar{P}.$$

При этом осуществляется подстройка ковариаций, позволяющая более точно учесть слабооцениваемые погрешности, например, курсовой дрейф инерциальных навигационных систем (ИНС).

Нечувствительность (робастность) алгоритмов КОИ к нештатным ситуациям и ускорение приспособительной реакции алгоритмов КОИ обеспечивается методом сетевой фильтрации, когда в состав алгоритмов КОИ включено несколько фильтров с разными настройками (рис. 2), работающих одновременно и формирующих свои оценки. Анализ невязок v разных фильтров позволяет различить, информация какого фильтра лучше соответствует режиму работы и будет использована для коррекции.

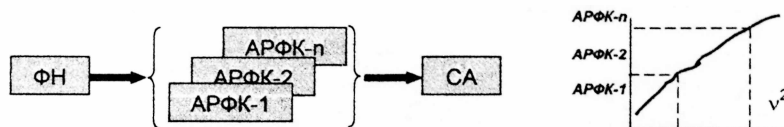


Рис. 2. Схема реализации метода сетевой фильтрации

На рис. 2 обозначены: ФН – формирование невязок, СА – селектор-анализатор, АРФК – адаптивно-робастный фильтр Калмана. Чертеж справа поясняет принцип работы селектора-анализатора: для разных диапазонов величины v^2 выбираются АРФК с разными априорными настройками.

В третьем разделе рассматриваются вопросы математического моделирования ИУК ВМЛА как технологии разработки и исследований бортовых алгоритмов и систем (рис. 3). Результатом этапа проектирования, опирающегося на техническое задание (ТЗ) и накопленный научно-технический задел, является базовая версия бортового программно-математического обеспечения, которая затем испытывается в натурных условиях и дорабатывается по результатам испытаний. При этом моделирование является основным методом и инструментом разработки и исследований.

Полная схема системы имитационного математического моделирования (СИММ) включает в себя: модель ИУК; модель ВМЛА как механической системы; модель информационного пространства (рис. 4). При моделировании информационной части ИУК можно пренебречь деформациями ЛА, заменить динамическую модель ЛА кинематической и решать задачу в два этапа:

- создание эталонных траекторий движения ВМЛА в информационном пространстве;
- моделирование работы ИУК ВМЛА на этих траекториях.

На рис. 5 приведена укрупненная блок-схема алгоритма имитационного математического моделирования, соответствующая структуре рис. 4. В алгоритме присутствуют модели:

- физической составляющей метасистемы, включающей модель движения ЛА и модели информационных полей;
- информационной оболочки ИУК;
- ПМО ИУК (многоуровневая система КОИ);

- средств человеко-машинного интерфейса (пульт управления работой алгоритма моделирования метасистемы, отображения и регистрации данных).



Рис. 3. Роль и место математического моделирования при проектировании и исследовании ИУК ВМЛА

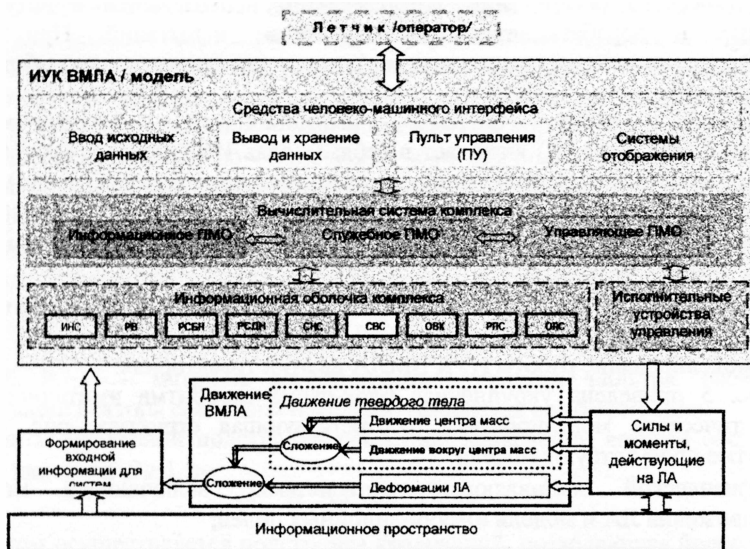


Рис. 4. Полная схема СИММ ИУК ВМЛА

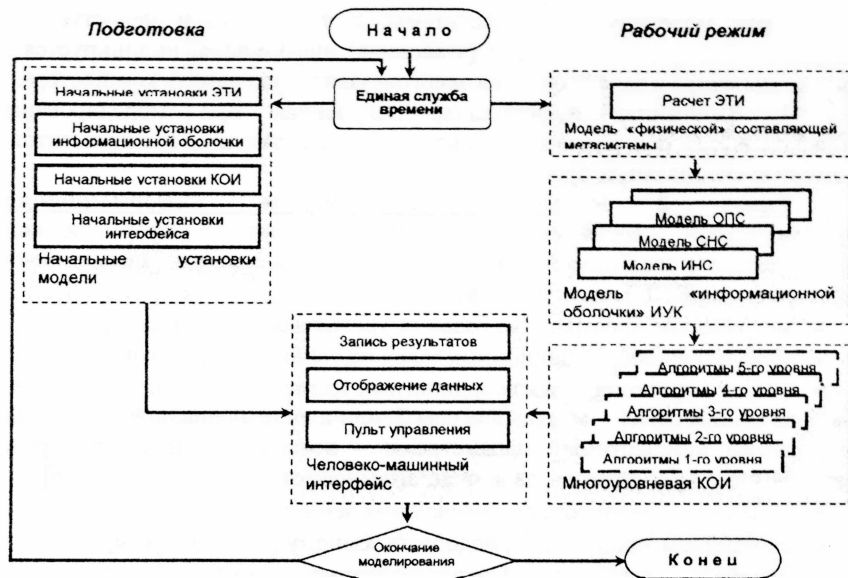


Рис. 5. Блок-схема алгоритма СИММ

К числу типичных задач, решаемых с помощью математического моделирования, можно отнести следующее:

- анализ и корректировка требований ТЗ к точности и информационным возможностям комплекса и систем;
- формирование требований к аппаратно-измерительной части ИУК;
- разработка и лабораторные испытания методов и алгоритмов решения функциональных задач ИУК;
- формирование математических моделей компонентов метасистемы, алгоритмов и программ комплексной обработки информации;
- обеспечение проведения полунатурных испытаний;
- анализ результатов летных испытаний и корректировка ПМО ИУК;
- послеполетный анализ и экспресс-анализ результатов работы ИУК;
- формирование научно-технического задела для будущих разработок и прогнозирование перспектив развития ИУК ВМЛА.

В ходе практических работ по проектированию и испытаниям ИУК ВМЛА сложился следующий порядок взаимодействия СИММ с пользователем.

1. Индивидуальные черты разрабатываемого или исследуемого комплекса настраиваются вручную для каждого ИУК ВМЛА и сохраняются в виде отдельного программного проекта.

2. Изменяемые условия моделирования, описывающие в основном внешние условия работы ИУК ВМЛА, перенастраиваются с использованием автоматизированного пользовательского интерфейса.

3. При проведении вычислительных экспериментов информация о параметрах моделируемой метасистемы, в том числе и недоступная в натурных экспериментах точная (эталонная) информация, индицируется на экране монитора и записывается в энергонезависимую память компьютера.

4. Записанная информация, полученная при моделировании, обрабатывается при анализе результатов вычислительных экспериментов с помощью специальных программ.

Глава 2 «Математическая модель информационного пространства» посвящена построению модели информационного пространства и его базовой основы – модели околоземного навигационного пространства (МНП), включающей:

- метрическое пространство базовых уровневых поверхностей;
- методы решения позиционных задач на уровневых поверхностях;
- систему ортогональных координатных трехгранников в пространстве.

Базовая основа МНП – модель фигуры Земли в виде эллипсоида вращения с известными стандартными параметрами – поверхность нулевого уровня околоземного пространства, заполненного множеством поверхностей [6]:

- семейством эллипсоидов, софокусных земному (s -эллипсоиды);
- семейством эллипсоидов, подобных земному (h -эллипсоиды);
- семейством поверхностей, эквидистантных земному эллипсоиду.

Уравнение поверхности, эквидистантной земному эллипсоиду, впервые полученное автором в сотрудничестве с А.П. Рогалевым, имеет вид [3, 6] квазиэллипсоида – эллипсоида, полуоси которого равны:

$$a_s = a + H \cdot \sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}, \quad b_s = b + H \cdot \frac{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}}{\sqrt{1 - e^2}},$$

где φ – географическая широта; H – геометрическая высота; a , b , e^2 – полуоси и квадрат эксцентриситета земного эллипсоида.

Главные радиусы кривизны квазиэллипсоида связаны с главными радиусами кривизны R_1^0 и R_2^0 земного эллипсоида выражениями $R_1 = R_1^0 + H$ и $R_2 = R_2^0 + H$.

Метрические характеристики римановых пространств, образованных семействами этих поверхностей, описываются метрическими тензорами.

Метрический тензор семейства квазиэллипсоидов:

$$M = \begin{pmatrix} (R_1 \cos \varphi)^2 & 0 & 0 \\ 0 & R_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны квазиэллипсоида.

Метрический тензор семейства h -эллипсоидов:

$$M_h = \begin{vmatrix} (R_1 \cos \varphi)^2 & 0 & 0 \\ 0 & R_2^2 & -R_2 \frac{e^2 \sin \varphi \cos \varphi}{\kappa} \\ 0 & -R_2 \frac{e^2 \sin \varphi \cos \varphi}{\kappa} & 1 - \frac{e^2 \sin^2 \varphi (1 - e^2)}{\kappa^2} \end{vmatrix},$$

где h – экваториальная высота; e^2 – квадрат второго эксцентриситета подобного эллипсоида; $\kappa = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$ – сфероидическая функция; R_1 и R_2 – радиусы кривизны 1-го и 2-го вертикалов h -эллипсоида:

$$R_1 = \frac{a+h}{\kappa}; \quad R_2 = \frac{(a+h) \cdot (1-e^2)}{\kappa^3}.$$

Метрический тензор семейства s -эллипсоидов:

$$M_s = \begin{vmatrix} (R_1 \cos \varphi)^2 & 0 & 0 \\ 0 & R_2^2 & R_2 \frac{e_s^2 \sin \varphi \cos \varphi}{\kappa^3} \\ 0 & R_2 \frac{e_s^2 \sin \varphi \cos \varphi}{\kappa^3} & 1 - 2e^2 \sin^2 \varphi + e^4 \sin^2 \varphi \end{vmatrix},$$

где h_s – экваториальная высота, $e_s^2 = c^2/(a+h_s)^2$ – квадрат 2-го эксцентриситета s -эллипсоида; c – фокусное расстояние меридиана s -эллипсоида; $\kappa = \sqrt{1 - e_s^2 \sin^2 \varphi}$ – сфероидическая функция; R_1 и R_2 – радиусы кривизны 1-го и 2-го вертикалов s -эллипсоида:

$$R_1 = \frac{a+h_s}{\kappa}; \quad R_2 = \frac{(a+h_s) \cdot (1-e_s^2)}{\kappa^3}.$$

Для одной и той же точки кривизны квазиэллипсоида, h -эллипсоида и s -эллипсоида различаются. Метрические тензоры M_h и M_s имеют недиагональный вид, поэтому нормаль к h -эллипсоиду или s -эллипсоиду в произвольной точке над Землей не совпадает с нормалью к земному эллипсоиду, опущенной из этой же точки.

Рассмотренные римановы пространства имеют особые точки, в которых метрический тензор вырождается – точки полярной оси ($\varphi = \pm \pi/2$). Показано, что наличие таких точек является свойством околоземного пространства и не зависит от типа выбранных координат. Наибольшая математическая строгость обеспечивается при использовании семейства эквидистантных поверхностей.

В основу методов решения позиционных задач определения координат, углов и расстояний на уровневых поверхностях положены известные алгоритмы решения геодезических задач на поверхности земного эллипсоида. Доказано [6], что соотношение $tg(u) = tgB \cdot \sqrt{1-e^2}$, связывающее геодезическую B и

приведенную и широты произвольной точки земного эллипсоида, справедливо и для точек на поверхности квазиэллипсоида. Построено бesselово отображение геодезической линии квазиэллипсоида на дугу большого круга сферы [6]:

$$S = a \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \sqrt{1 - e^2 \cos^2 u} \cdot d\sigma + H \sqrt{1 - e^2} \cdot (\sigma_2 - \sigma_1) ;$$

$$\Delta L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sqrt{1 - e^2 \cos^2 u} \cdot d\lambda ,$$

где S и ΔL – длина дуги геодезической линии и разность долготы ее точек; σ_1 и σ_2 – длина дуги большого круга на вспомогательной единичной сфере от экватора до 1-ой и 2-ой точек соответственно, выраженные в угловой мере. На основе бesselова отображения построены алгоритмы решения позиционных задач на квазиэллипсоиде, точность которых на расстояниях до 5000 км не хуже 10÷30 м по дальностям и координатам и 0,1÷1" – по углам направлений [6]. Высокая точность разработанных алгоритмов и отсутствие в них итерационных процедур численного интегрирования делает их пригодными для применения в бортовых комплексах ВМЛА при построении алгоритмов решения инженерно-штурманских задач.

Построение МНП завершается описанием кинематики координатных прямоугольных трехгранников с правой ориентацией осей [3], взаимная ориентация которых, описываемая с помощью различных параметров, и соответствующие кинематические уравнения составляют математическую основу решения задач о движении объектов в пространстве.

Глава 3 «Формирование эталонной траектории движения объекта в информационном пространстве» посвящена разработке технологии подготовки и проведения вычислительных экспериментов по моделированию ИУК ВМЛА в различных условиях и режимах. Стержневой вопрос обеспечения качества имитационного математического моделирования – формирование эталонной траекторной информации как совокупности данных о состоянии ВМЛА и взаимодействующих с ним объектов в информационном пространстве. Эталонная траекторная информация должна удовлетворять противоречивой системе требований [4]: полнота, целостность, непрерывность, корректность (в смысле физической реализуемости), точность, априорность и фундаментальность.

Для удовлетворения всем этим требованиям предложен метод двухэтапного синтеза эталонной траектории. На первом этапе строится траектория, удовлетворяющая требованиям полноты, корректности и целостности. Для этого используется один из методов:

- численное решение дифференциальных уравнений движения ЛА;
- синтез эталонной траектории на основе выборки информации из записей полетных данных реальных ЛА;
- синтез эталонной траектории из отдельных типовых маневров.

При этом рассчитываются значения ключевых параметров, которые записываются в массивы, на основе которых строятся аппроксимирующие функции, восстанавливающие законы изменения ключевых параметров, близкие к фактическим. Результатом работы первого этапа являются конкретные выражения для аппроксимирующих функций.

На втором этапе:

- единая служба времени СИММ рассчитывает модельное время t ;
- для каждого t рассчитываются аппроксимации ключевых параметров;
- по значениям ключевых параметров рассчитывается полный вектор траекторных данных.

Правильный выбор аппроксимирующих функций гарантирует, что восстановленные значения ключевых параметров будут удовлетворять требованиям точности, непрерывности и априорности при сохранении корректности и целостности исходных массивов выборок. Фундаментальность и полнота обеспечиваются выбором вида ключевых параметров. В качестве ключевых параметров рекомендованы:

- а) географические (λ , ϕ , H) или декартовы (X , Y , Z) координаты центра масс;
 - б) углы курса (Ψ), тангажа (θ), крена (γ) или составляющие вектора конечного поворота относительно гринвичского трехгранника (Φ).
- Параметры деформации, рассчитываемые в функции параметров движения твердого тела, уточняют поведение отдельных точек ВМЛА.

Рассмотрены методы формирования ключевых параметров:

- разбиение траектории на типовые элементы (типовые маневры): взлет, горка, крейсерский полет, пикирование, разгон, торможение, правый/левый виражи, правая/левая бочки, петля Нестерова и т.д. – описываемые участками элементарных линий, в простейшем случае – отрезков прямых и дуг окружностей;
- численное интегрирование системы дифференциальных уравнений движения ВМЛА – динамической или кинематической модели;
- использование записанных с помощью контрольно-записывающей аппаратуры (КЗА) выходных параметров навигационного комплекса во время полета ЛА, представляющих собой гипотетическую траекторию, с точностью до погрешностей комплекса совпадающую с реальной. Малые величины погрешностей комплекса и физическая устойчивость движения ЛА гарантируют, что она будет отражать основные свойства реальной: корректность, целостность и полноту.

Рассмотрены методы формирования аппроксимирующих функций для массивов опорной информации.

1) Кусочная аппроксимация элементарными кривыми, когда для каждого ключевого параметра на типовом маневре подбирается элементарная функция из специальной библиотеки.

2) Аппроксимация с помощью тригонометрических рядов Фурье на интервале $[0, T]$, где T – продолжительность моделируемого движения ЛА. Для удовлетворительного качества разложения в ряд Фурье функций, описывающих изменение во времени координат ЛА, достаточно 5÷10 членов

ряда, а функций, описывающих изменение во времени угловой ориентации – $30 \div 50$ членов ряда. При этом точность воспроизведения траектории составит: по координатам $5 \div 10$ км, по углам – $2 \div 5^\circ$. Главное достоинство метода – минимальное количество параметров аппроксимирующих функций, простота аппроксимирующих выражений и гарантированная целостность траекторной информации. Недостатком являются то, что на краях интервала $[0, T]$ суммы рядов Фурье могут иметь колебательный характер, обычно не присущий траектории движения ЛА. Это может исказить траекторию и делать ее не вполне корректной.

3) Аппроксимация табулированных значений ключевых параметров кубическими сплайнами. Подбор параметров сплайнов осуществляется путем решения трехдиагональной системы $(n+1)$ линейных уравнений, полученных из условий гладкости стыков на n временных интервалах ($n \leq 1000$).

Завершающим вопросом построения эталона является разработка алгоритмов восстановления полной траекторной информации для каждого момента времени по известным значениям ключевых параметров. Эта задача решается на втором этапе. В зависимости от вида выбранных ключевых параметров, алгоритмы восстановления траекторной информации могут быть различными. Перечень вычисляемых параметров зависит от конкретной задачи моделирования и, как правило, включает в себя следующее:

- параметры навигационного пространства (кривизны уровней поверхностей, параметры взаимной угловой ориентации ортогональных трехгранников, их угловые скорости, расстояния между выбранными точками и т.п.);
- параметры информационных полей (гравитационное поле тяготения, поле высот рельефа, поле движения атмосферы, поле координат ориентиров и т.п.);
- координаты центра масс ЛА и выбранных точек интереса;
- векторы абсолютных и относительных линейных и угловых скорости и ускорения выбранных точек ЛА, отнесенным к разным системам координат;
- параметры угловой ориентации ЛА.

В работе подробно рассмотрены алгоритмы восстановления траекторной информации по различным группам ключевых параметров:

- по географическим координатам и углам ориентации;
- по вектору относительной скорости;
- по декартовым координатам и углам ориентации;
- по декартовым координатам и вектору конечного поворота.

Все рассмотренные методы опробованы и используются в СИММ при разработке и исследованиях различных ИУК ВМЛА.

Глава 4 «Модели базовых инерциальных систем ИУК ВМЛА» посвящена разработке математических моделей платформенных и бесплатформенных ИНС (БИНС), составляющих базовую информационную основу ИУК ВМЛА поколений 4, 4+, 5. Определение информационного пространства

обеспечивает строгое построение моделей информационных систем ИУК, в том числе ИНС.

Введя обозначения:

N_t - многомерный вектор навигационных параметров;

$J'_0(\bar{\omega}, \bar{a})$ - инерциальная информация на интервале времени от 0 до t ;

M - параметры навигационного пространства и гравитационного поля, модель идеальной ИНС определится в виде [3]

$$N_t = \Theta(J'_0, M, N_0).$$

Оператор Θ может иметь различные формы, однако в любом случае он включает в себя три интегратора: угловой скорости, линейного ускорения и линейной скорости. Модель идеальной ИНС может быть записана в форме, удовлетворяющей условиям задачи Коши о существовании и единственности решения N_t , что позволяет утверждать об однозначности счисляемого вектора N_t при многообразии возможных форм оператора Θ . Любая ИНС решает задачу взаимного определения координатных трехгранников (рис. 6). На рис. 6 показаны также параметры ориентации: матрицы направляющих косинусов C , кватернионы Q , векторы конечных поворотов $\bar{\Theta}$, углы последовательных поворотов.

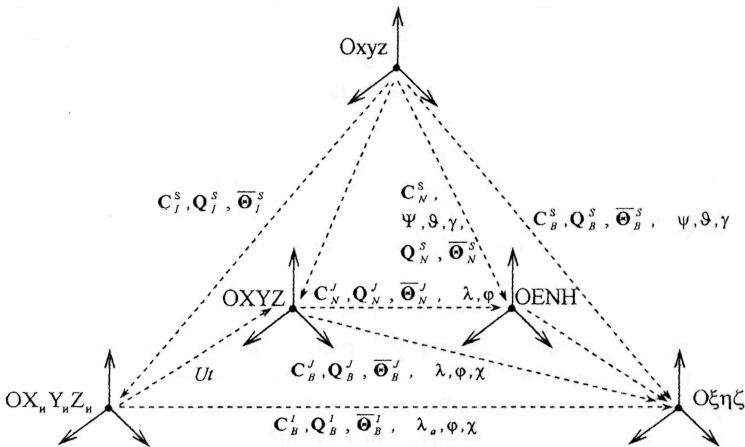


Рис. 6. Схема взаимосвязи координатных трехгранников

Существует особенность счисления линейной скорости в ИНС, связанная с использованием акселерометров с интегрирующими выходами, которые формируют цифровой код, соответствующий интегральной сумме входной величины кажущегося ускорения за малый промежуток времени τ . За это время приборный измерительный трехгранник поворачивается и ориентация выходного вектора приращения становится неопределенной. Для платформенных ИНС вследствие малости угловой скорости гироскопов это не имеет большого значения, а для БИНС проблема правильной интерпретации выходных сигналов датчиков становится довлеющей и во многом предопределяет облик алгоритмов БИНС и их точность.

Приводятся разработанные автором алгоритмы обработки инерциальной информации таких акселерометров [25] и гироскопов. Основу алгоритма обработки выходной информации акселерометров составляют выражения перепроецирования любого вектора $\vec{A}$ из текущего положения вращающегося трехгранника $Ox_ky_kz_k$ на зафиксированные в момент времени t_k оси $Oxyz_k$:

$$\vec{A} = \vec{A} + \frac{\sin\Theta}{\Theta} \cdot \vec{\Theta} \times \vec{A} + \frac{(1-\cos\Theta)}{\Theta^2} \cdot \vec{\Theta} \times (\vec{\Theta} \times \vec{A});$$

где: $\vec{A}$ - вектор $\vec{A}$ в проекциях на текущие оси;

$\vec{A}$ - вектор $\vec{A}$ в проекциях на фиксированные оси;

$\vec{\Theta}$ - вектор конечного поворота от $Ox_ky_kz_k$ к $Oxyz$.

Полный интеграл на интервале времени τ_c от вектора кажущегося ускорения $\vec{a}'$, полученный в зафиксированных относительно инерциального пространства осях, является полным приращением кажущейся скорости $\Delta\vec{V}$ и определяется как:

$$\Delta\vec{V} = \underline{\Delta\vec{V}} + \int_{t_k}^t \left(\frac{\sin\Theta}{\Theta} \cdot \vec{\Theta} \times \vec{a}' + \frac{(1-\cos\Theta)}{\Theta^2} \cdot \vec{\Theta} \times (\vec{\Theta} \times \vec{a}') \right) \cdot dt.$$

Вектор $\Delta\vec{V}$ определен в осях связанного трехгранника, зафиксированного на момент t_k времени начала цикла интегрирования. Векторная величина $\underline{\Delta\vec{V}}$ – локальный интеграл – накапливается на выходах акселерометров за время $(t - t_k)$. Второе слагаемое – расчетная величина конической поправки $\Delta\vec{V}^{con}$ – определится с помощью формул вида:

$$\Delta\vec{V}^{con} \Big|_0^N = \sum_{n=0}^{n=N} \gamma_n \cdot \Delta\vec{V}_n^{con},$$

$$\text{где } \Delta\vec{V}_n^{con} = \frac{\sin\Theta_{n-1}}{\Theta_{n-1}} \cdot \vec{\Theta}_{n-1} \times \vec{a}_n^s + \frac{(1-\cos\Theta_{n-1})}{\Theta_{n-1}^2} \cdot \vec{\Theta}_{n-1} \times (\vec{\Theta}_{n-1} \times \vec{a}_n^s);$$

$$\vec{a}_n^s = f(\underline{\Delta\vec{V}});$$

f – выбранная функция расчета ускорения по последовательности значений локальных интегралов;

γ_n – коэффициенты выбранного метода интегрирования.

Период τ_s измерения локальных интегралов меньше τ_c в целое число раз. Накопление локальных интегралов и конических поправок осуществляется в течение времени τ_c , после чего рассчитывается новое значение вектора скорости в проекциях на оси соответствующего положения связанного трехгранника и осуществляется обнуление счетчиков.

Выходные сигналы гироскопических датчиков угловых перемещений (ДУП) ("квазикоординаты") пропорциональны приращениям интегралов от угловых скоростей вокруг осей чувствительности этих приборов, которые можно считать проекциями на оси Ox , Oy , Oz некоторого вектора $\vec{\alpha}$. Ориентация связанного трехгранника относительно инерциального описывается с помощью вектора $\vec{\Phi}$ конечного поворота, связанного с векторами $\vec{\alpha}$ и $\vec{\omega}$ соотношением:

$$\bar{\Phi} = \bar{\alpha} + \bar{\Phi}^{\text{conus}},$$

$$\text{где } \bar{\alpha} = \int \bar{\omega} \cdot dt; \quad \bar{\Phi}^{\text{conus}} = \int \bar{\Phi}^{\text{conus}} \cdot dt; \quad \bar{\Phi}^{\text{conus}} = \frac{1}{2}(\bar{\Phi} \times \bar{\omega}) + \frac{1 - \frac{\theta}{2} \cdot \text{ctg} \frac{\theta}{2}}{\theta^2} \cdot (\bar{\Phi} \times (\bar{\Phi} \times \bar{\omega}))$$

Алгоритм БИНС осуществляет обработку “квазиординат” с целью формирования вектора ориентации объекта, на котором установлены датчики. Обработка выходной информации датчиков угловых перемещений и расчет вектора ориентации $\bar{\Phi} \equiv \bar{\Theta}$ осуществляется аналогично тому, как это делается при определении кажущейся скорости.

В работе рассмотрены вопросы контроля точности алгоритмов БИНС. Объективный контроль алгоритма предполагает подачу на его вход эталонного сигнала, получение соответствующего выходного сигнала и сравнение последнего с его эталонным значением. При этом связь между эталонными значениями входных ($\bar{\alpha}$ и $\bar{\omega}$) и выходных сигналов ($\bar{\Phi}$) должна иметь точное аналитическое описание. Показано [28], что получить аналитическое описание связи между “квазиординатами” и вектором ориентации можно только для частных случаев плоскопараллельного движения, а для произвольных пространственных движений объекта это невозможно. Соответственно, для алгоритмов обработки информации БИНС, использующих ДУПы, в общем случае возможны только косвенные или приближенные оценки точности.

Особое внимание в работе уделено рассмотрению моделей ошибок ИНС как основы алгоритмов комплексной обработки информации ИУК. Алгоритмические погрешности, не разрушающие функциональную схему идеального алгоритма, приводятся к адекватным погрешностям датчиков, поэтому рассматривается модель ИНС с функционально идеальным алгоритмом Θ , возмущенную эквивалентными погрешностями датчиков $\delta \bar{a}^3$, $\delta \bar{\omega}^3$, погрешностями начальной установки ΔN_0 и погрешностями определения характеристик навигационного пространства ΔM [3]:

$$N_t^m = \Theta^m(J_0^t, M^m, N_0^m) \cong N_t + \Xi(J_0^t(\bar{a}, \bar{\omega}), M, N_0, \delta \bar{a}^3, \delta \bar{\omega}^3, \Delta M, \Delta N_0).$$

Символ “m” означает модельное значение параметра.

Рассмотрены методы формирования модели погрешностей датчиков

$$\delta \bar{a} = f(\bar{a}, t^0), \quad \delta \bar{\omega} = f(\bar{a}, \bar{\omega}, t^0).$$

Один метод состоит в том, что на основе анализа физических принципов работы прибора в составе его модели удерживаются наиболее существенные составляющие, а сумма остальных членов ряда в силу центральной предельной теоремы заменяется соответствующим гауссовским шумом.

Другой подход состоит в принятии гипотезы о том, что сумма ряда на каждом последовательном временном интервале с точностью до малых случайных величин сходится к элементарным функциям и задача формирования модели сводится к подбору параметров этих функций.

Оба варианта предполагают введение модели погрешностей в состав вектора состояния ИНС, оценка которого осуществляется на борту в реальном масштабе времени.

Третий подход состоит в том, что функциональные зависимости вида $\delta \bar{a} = f(\bar{a}, t^0)$ и $\delta \bar{\omega} = f(\bar{a}, \bar{\omega}, t^0)$ реализуются в процессе предполетной калибровки высокостабильных датчиков. В предельном случае систематические зависимости модели могут быть скомпенсированы и в рассмотрении останутся случайные вариации модели.

Таким образом, модель погрешностей вида

$$\delta \bar{a} = \left(\sum_i k_i \cdot \mu_{i1} \right) \cdot \bar{e}_1 + \left(\sum_i k_i \cdot \mu_{i2} \right) \cdot \bar{e}_2 + \left(\sum_i k_i \cdot \mu_{i3} \right) \cdot \bar{e}_3,$$

$$\delta \bar{\omega} = \left(\sum_i k_i \cdot \nu_{i1} \right) \cdot \bar{e}_1 + \left(\sum_i k_i \cdot \nu_{i2} \right) \cdot \bar{e}_2 + \left(\sum_i k_i \cdot \nu_{i3} \right) \cdot \bar{e}_3,$$

где $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ – орты координатного трехгранника, в котором ведется рассмотрение вектора эквивалентных погрешностей; μ_{ij} и ν_{ij} – случайные величины, динамика которых описывается соответствующими дифференциальными уравнениями формирующих фильтров; k_i – параметры модели, является универсальной и обеспечивающей решение задач обработки информации ИУК ВМЛА.

Главной особенностью платформенных ИНС является наличие двух модельных образов опорного трехгранника $O\xi\eta\zeta$ (рис. 7.): $(O\xi\eta\zeta)^{nl}$ связан с гиросплатформой, а $(O\xi\eta\zeta)^m$ соответствует рассчитанному вычислителем системы положению. Связи между $O\xi\eta\zeta$, $(O\xi\eta\zeta)^{nl}$ и $(O\xi\eta\zeta)^m$ описываются векторами ориентации $\bar{\Phi}^o$ и $\bar{\Phi}^m$, дифференциальные уравнения для которых:

$$\dot{\bar{\Phi}}^o = -\bar{\omega}^o \times \bar{\Phi}^o + \bar{\omega}^{o^m} - \bar{\omega}^o = -\bar{\omega}^o \times \bar{\Phi}^o + \Delta \bar{\omega}^o,$$

$$\dot{\bar{\Phi}}^m = -\bar{\omega}^o \times \bar{\Phi}^m + \bar{\omega}^m - \bar{\omega}^o = -\bar{\omega}^o \times \bar{\Phi}^m + \bar{\omega}^{o^m} + \delta \bar{\omega} - \bar{\omega}^o = -\bar{\omega}^o \times \bar{\Phi}^m + \Delta \bar{\omega}^o + \delta \bar{\omega},$$

где $\bar{\omega}^o$ – угловая скорость опорного трехгранника $O\xi\eta\zeta$;

$\bar{\omega}^m$ – угловая скорость гиросплатформы – трехгранника $(O\xi\eta\zeta)^{nl}$;

$\bar{\omega}^{o^m}$ – расчетное значение угловой скорости опорного трехгранника, т.е. угловая скорость трехгранника $(O\xi\eta\zeta)^m$;

$\Delta \bar{\omega}^o$ – ошибка формирования расчетного значения угловой скорости – вариация вектора $\bar{\omega}^o$;

$\delta \bar{\omega}$ – вектор эквивалентных инструментальных погрешностей гироскопов – эквивалентный дрейф гиросплатформы, рассматриваемый в осях опорного трехгранника.

В БИНС строятся расчетные модельные образы $(Oxyz)^m$ и $(O\xi\eta\zeta)^m$ связанного и опорного трехгранников, ориентация которых относительно исходных описывается векторами $\bar{\Phi}^s$ и $\bar{\Phi}^o$ (рис. 8.) Дифференциальные уравнения, описывающие поведение этих векторов:

$$\dot{\bar{\Phi}}^o = -\bar{\omega}^o \times \bar{\Phi}^o + \bar{\omega}^{o^m} - \bar{\omega}^o = -\bar{\omega}^o \times \bar{\Phi}^o + \Delta \bar{\omega}^o,$$

$$\dot{\bar{\Phi}}^s = -\bar{\omega}^s \times \bar{\Phi}^s + \bar{\omega}^{s^m} - \bar{\omega}^s = -\bar{\omega}^s \times \bar{\Phi}^s + \delta \bar{\omega},$$

где $\bar{\omega}^s$ – угловая скорость связанного трехгранника $Oxyz$;

$\bar{\omega}^{s^m}$ – измеренное гироскопами значение угловой скорости связанного трехгранника;

$\delta \bar{\omega}$ – вектор эквивалентных инструментальных погрешностей гироскопов, рассматриваемый в осях связанного трехгранника.

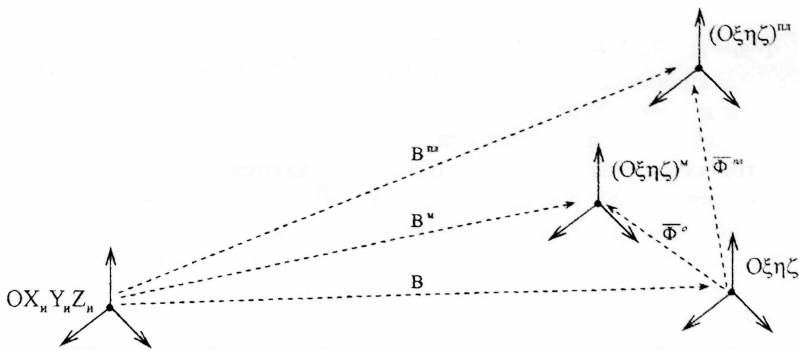


Рис. 7. Модельные трехгранники платформенной ИНС

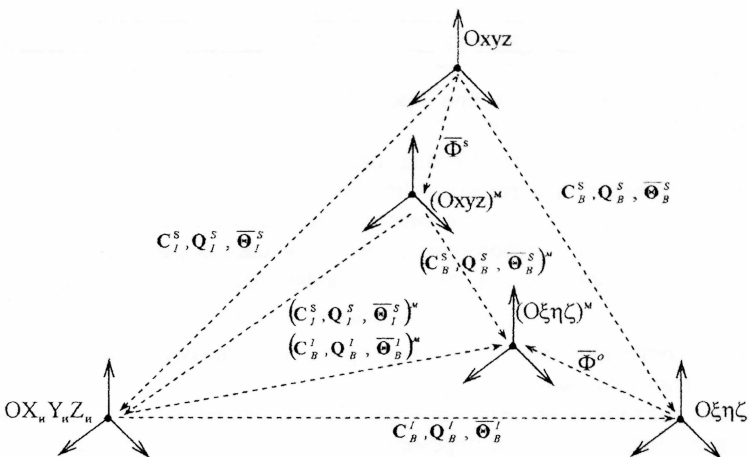


Рис. 8. Модельные трехгранники бесплатформенной ИНС

Ошибки определения угловых координат $\Delta\lambda$, $\Delta\phi$ и углов ориентации $\Delta\chi$, $\Delta\Psi$, $\Delta\psi$, $\Delta\theta$, $\Delta\gamma$ определяются как функции от векторов Φ^o , Φ^u и Φ^s [3].

В работе рассмотрены методы определения понятия «ошибка счисления линейной скорости» и построены соответствующие модели. Один метод рассматривает две группы скаляров: V_ξ , V_η , V_ζ и V_x , V_y , V_z , первые три из которых являются проекциями вектора фактической скорости точки O на оси идеального трехгранника $O\xi\eta\zeta$, а другие три являются счисленными (модельными) значениями этих проекций. Причем счисление осуществляется в осях модельного трехгранника $Oxyz$. Величины V_x , V_y , V_z трактуются как модельные аналоги величин V_ξ , V_η , V_ζ , а разности вида $\Delta V_\xi \equiv V_\xi - V_x$, $\Delta V_\eta \equiv V_\eta - V_y$, $\Delta V_\zeta \equiv V_\zeta - V_z$ называются «ошибками счисления скоростей вдоль осей $O\xi$, $O\eta$, $O\zeta$ ». Развернутые выражения для ΔV_ξ , ΔV_η , ΔV_ζ содержат не только ошибки собственно счисления проекций скоростей, но и параметры взаимной ориентации трехгранников $O\xi\eta\zeta$ и $Oxyz$. Метод получил большое

распространение при проектировании ИНС. Триада скаляров ΔV_ξ , ΔV_η , ΔV_ζ не является проекциями некоторого вектора $\Delta \vec{V}$ на оси трехгранников $O\xi\eta\zeta$ или $Oxyz$, так как каждый из этих скаляров получен вычитанием проекций различных векторов на различные оси.

Другой метод состоит в том, что рассматриваются векторы $\bar{V}^*$, $\bar{V}$, $\Delta \bar{V}$, образующие векторный треугольник: $\Delta \bar{V} = \bar{V}^* - \bar{V}$, где $\bar{V}$ – идеальный (фактический) вектор скорости объекта, $\bar{V}^*$ – модельный (счисленный) вектор скорости объекта, $\Delta \bar{V}$ – вектор ошибки счисления скорости объекта, который представляет собой вектор в строгом смысле и может быть спроецирован на любые выбранные оси.

В работе приводится подробный анализ указанных вариантов, нашедших практическое применение в задачах обработки информации ИУК ВМЛА.

Глава 5 «Формирование математических моделей компонентов метасистемы и алгоритмов комплексной обработки информации ИУК ВМЛА» содержит примеры приложений разработанных методов математического моделирования при проведении соответствующих НИР и ранних этапов ОКР.

Сущность разработанного метода синтеза и априорной адаптации математических моделей и алгоритмов путем ковариационного анализа на типовых эталонных траекториях состоит в следующем. После построения математической модели информационного канала в виде системы дифференциальных уравнений она приводится к форме Коши:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot w,$$

где X – вектор состояния канала, w – вектор входных возмущений, A , B – матрицы математической модели.

В составе вектора X выделяется ядро X^* , состоящее из погрешностей основных счисляемых величин, и переменная часть, состоящая из элементов эквивалентных погрешностей датчиков. Переменная часть состоит из погрешностей, включенных (X^d) и не включенных (X'^d) в состав оцениваемого вектора $X^* = \begin{bmatrix} X^* \\ X'^d \end{bmatrix}$. На базе сформированного вектора X^* строится адаптивно-

робастный фильтр Калмана. Затем осуществляется имитационное математическое моделирование работы алгоритмов фильтрации на типовых траекториях ВМЛА для разных размерностей вектора X^* и настроек фильтра. В качестве обобщенного критерия качества принимается функционал

$J = \sum_{i=1}^m c_i \cdot p_{ii}$, где: p_{ii} – диагональные элементы ковариационной матрицы вектора состояния X^* ; c_i – весовые коэффициенты; m – количество оцениваемых переменных.

Для настройки параметров фильтра используется минимаксный критерий качества [5, 7, 26], который для временного интервала коррекции $t_k \in [t_0, T]$, множества типичных законов изменения параметров движения и траекторий полета ВМЛА, для которого элементы переходной матрицы F фильтра образуют множество V_F , множества V_Q и V_R значений параметров

входных и измерительных шумов системы, множества V_{P_0} начальных значений ковариационной матрицы P , множеств V_{Q_c} и V_{R_c} варьируемых параметров фильтра запишется в виде:

$$J_o = \min_{\substack{Q_c \in V_{Q_c} \\ R_c \in V_{R_c}}} \max_{\substack{F \in V_F \\ t_k \in [t_0, T]}} J \\ Q_c \in V_{Q_c} \quad F \in V_F \quad t_k \in [t_0, T] \\ R_c \in V_{R_c} \quad Q_c \in V_{Q_c} \quad R_c \in V_{R_c} \quad P_o \in V_{P_o}.$$

Для каждого режима работы и состава измерителей ИУК существует наилучшая структура оцениваемого вектора состояния и параметров настройки фильтра, которые определяются в ходе наземных и уточняются в процессе летных испытаний. Рекомендуемый порядок наращивания модели: 1) ядро вектора состояния, 2) постоянные случайные дрейфы, 3) динамические дрейфы, 4) смещения нулей акселерометров. Размерность модели, используемой для построения фильтра, зависит от точности и стабильности корректирующей информации и от располагаемой вычислительной мощности. На основе разработанного метода предложены структуры моделей базовых систем бортовых комплексов разных ЛА.

Разработаны алгоритмы КОИ обзорно-прицельных (ОПС) и навигационных систем (НС), основанные на решении векторного треугольника положения (рис. 9). При известной величине $\vec{R}_{OP}$, выбираемой из бортовой базы данных, использование информации ОПС о векторе $\vec{D}_{OP}$ обеспечивает решение задач коррекции ИНС (рис. 10а) и контроля спутниковых НС (рис. 10б) с целью обеспечения информационной целостности и помехозащищенности комплекса.

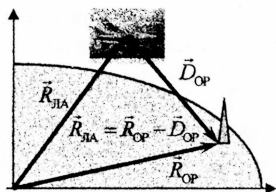


Рис. 9. Векторный треугольник положения в задачах КОИ

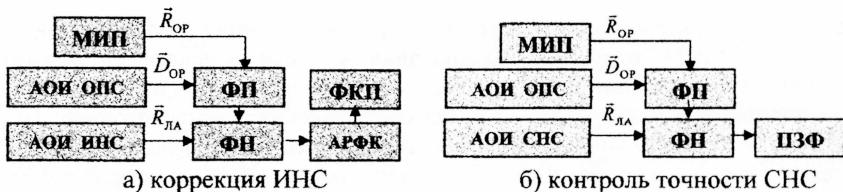


Рис. 10. Схема КОИ ОПС и НС

В любом случае по информации ОПС и модели информационного поля (МИП) ориентиров формируется вектор $\vec{R}_{OP}^{OПС}$, который сравнивается с вектором $\vec{R}_{ЛА}$, определяемым контролируемым каналом. Невязка обрабатывается с помощью фильтра и формируется оценка погрешностей НС. На рис. 10 обозначены: ФП – блок формирования параметров

треугольника, ФН – формирование невязок, АОИ – автономная обработка информации, ПЗФ – помехозащитный фильтр, ФКП – формирование корректирующих поправок. Современные ОПС, при уровне собственных погрешностей $5\div 10$ м по дальности и $7\div 10^\circ$ по углам, способны эффективно решать эти задачи.

Разработаны алгоритмы решения задачи микронавигации – определения параметров движения точки ЛА, удаленной от его центра масс. Вблизи от точки интереса устанавливаются акселерометры и гироскопы, на которых строится БИНС. Задача микронавигации сводится к КОИ центральной ИНС комплекса, установленной вблизи центра масс ЛА, СНС и БИНС. Предложена двухступенчатая система адаптивно-робастной КОИ: СНС-ИНС и ИНС-БИНС (рис. 11). Показано, что использование высокочастотного (до 20 Гц) замкнутого контура коррекции БИНС по ИНС, юстировки инерциальных систем на уровне $2\div 3'$ и синхронизации их информации на уровне 10 мс обеспечивает высокое качество микронавигации (до 0,5 м/с по скорости) даже в условиях упругих деформаций носовой части ЛА в пределах $20\div 30'$.

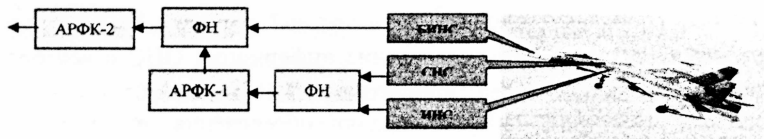


Рис. 11. Схема КОИ при решении задачи микронавигации

Рассмотрены методы КОИ при организации резервного режима довыставки БИНС на подвижном основании (корабле) с помощью встроенного приемника СНС. Особенности сформированных алгоритмов являются разомкнутая схема включения фильтра и использование метода быстрой адаптации. Методами математического моделирования установлено, что алгоритм оценивания погрешностей БИНС и их последующего прогноза и компенсации может обеспечить точность счисления координат до $1\div 2$ миль за час, а автономные погрешности при этих условиях могут достигать 15 миль за час. Разработанные алгоритмы легли в основу ПМО бортового комплекса ВМЛА палубного базирования в части обеспечения режима довыставки и коррекции БИНС для последующих натурных испытаний.

Разработаны алгоритмы КОИ аэрометрических и высокоточных НС, основанные на решении векторного треугольника скоростей (рис. 12). Здесь $\vec{v}^*$ – вектор скорости ЛА относительно атмосферы; $\vec{v}$ – вектор скорости ЛА относительно Земли; $\vec{w}$ – ветер. Алгоритм КОИ работает в двух режимах: коррекция аэрометрического канала и обеспечение режима сверхманевренности.

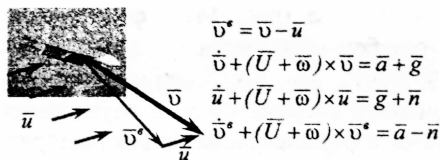


Рис. 12. Векторный треугольник скоростей в задачах КОИ

В первом случае осуществляется формирование невязки между точной НС и аэрометрическим каналом, в результате адаптивно-робастной обработки которой формируются оценки ветра и погрешностей измерителей воздушной скорости и аэродинамических углов (рис. 13а). Во втором случае, когда ВМЛА переходит в режим полета с углами атаки 60° и более и эти измерители теряют работоспособность, осуществляется расчет значений аэродинамических углов α , β и воздушной скорости $|\vec{v}^*|$ по информации НС и АРФК (рис. 13б). Погрешность расчета аэродинамических величин при этом составляет около 1%. На рис. 13 обозначены: КВ – курсовая вертикаль, АЭР – аэрометрические приборы.

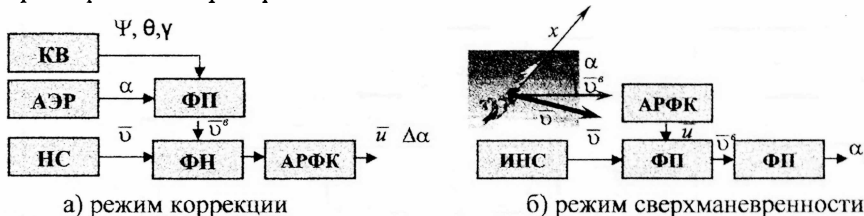


Рис. 13. Схема КОИ аэродинамического и навигационного каналов

Обеспечение за счет КОИ информационной целостности комплекса в режиме сверхманевренности существенно расширяет функциональные возможности ИУК и эффективность действия ВМЛА.

Рассмотрено также применение математического моделирования при разработке алгоритмов решения задач самолетовождения для групповых действий в плотном строю. Приведенные в главе результаты неоднократно публиковались автором и использовались при решении многих прикладных задач [2, 3, 5, 7, 24, 26, 29].

В главе 6 «Математическое моделирование при решении проблем повышения качества информационного обеспечения бортовых комплексов ВМЛА» приведены основные результаты применения изложенных теоретических положений к решению практических задач разработки и исследования ИУК ВМЛА на завершающих этапах ОКР.

В первом разделе рассмотрены [22] вопросы математического моделирования применительно к задаче информационной интеграции серийной ИНС средней точности и высокоточного приемника СПС, осуществляемой в рамках модернизации ИУК строевых ВМЛА. Выбрана разомкнутая схема системы как требующая минимальной доработки

модернизируемого комплекса (рис. 14). Сформирован базовый вектор X состояния модели ошибок ИНС, на начальном этапе включавший: $\Delta V_{\xi}^{м}$, $\Delta V_{\eta}^{м}$, $\Phi_{\xi}^{м}$, $\Phi_{\eta}^{м}$, $\Phi_{\zeta}^{м}$, $\Delta \Psi_0$, $\delta \omega_{\xi}$, $\delta \omega_{\eta}$, построены алгоритмы формирования информационных невязок инерциального и спутникового каналов, а также обработки этих невязок и формирования оценок вектора состояния.

С целью компенсации выявленного в ходе летных испытаний влияния динамических дрейфов гироскопов, разработан метод его автоматической калибровки на борту. Для этого в состав вектора состояния X включены четыре коэффициента динамических дрейфов горизонтальных каналов – величины $\delta \omega_{\xi}/a_{\xi}$, $\delta \omega_{\eta}/a_{\xi}$, $\delta \omega_{\xi}/a_{\eta}$, $\delta \omega_{\eta}/a_{\eta}$ и по результатам моделирования сформирован облик алгоритмов КОИ и подобраны параметры настройки алгоритмов выделения и компенсации влияния дрейфов [22]. Летные испытания показали, что доработанное таким образом ПМО в режиме прогноза обеспечивает высокую точность комплекса: в течение часа после 5-минутного сеанса коррекции ошибки комплексных координат не превысили 500 м по долготе λ и 800 м по широте ϕ , а автономных за то же время – 4100 м и 4500 м соответственно.

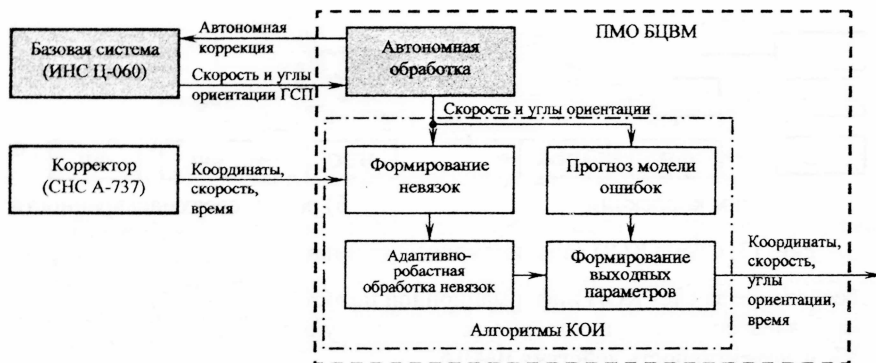


Рис. 14. Схема комплексирования ИНС и СНС

Во втором разделе рассмотрены вопросы математического моделирования и обработки информации ИУК ВМЛА поколения 4+. В рамках решения задачи синтезированы алгоритмы КОИ ИНС, СНС и доплеровского измерителя скорости и сноса [2, 3, 5, 23]. Особое внимание уделено проблеме идентификации курсовой погрешности, для чего разработана и внедрена сетевая структура алгоритмов фильтрации [2, 5]. Достигнутая точность коррекции курса, обеспечивающая высокое качество решения задач комплекса, подтверждена летными испытаниями (табл. 1).

Проведено исследование возможности использования разработанных алгоритмов КОИ для послеполетного экспресс-анализа. Установлено, что качество оценивания курсовой погрешности с помощью разработанного алгоритма КОИ соответствует качеству существующих сертифицированных средств послеполетной обработки данных [23] (рис. 15).

Точность формирования навигационных параметров

параметр (погрешность)	Штатная работа ИНС		Нештатная работа ИНС		
	автономный	комплексный канал			автономный
		прогноз	оценивание	прогноз	
курс, угл. мин.	8÷10	6÷8	5	10÷12	до 600
скорость, м/с	1÷2	0,5÷1	0,1	2÷3	до 50
координаты, км	2÷3	1÷2	0,1	1÷3	до 100

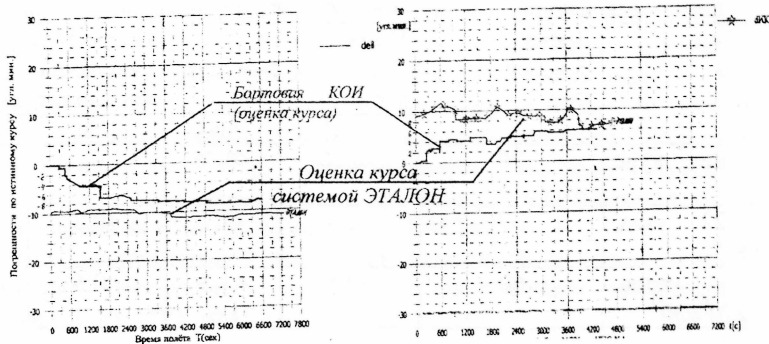


Рис. 15. Точность послеполетной оценки погрешности курса

В третьем разделе рассмотрены вопросы моделирования на этапе испытаний при обеспечении точности начальной выставки (НВ) ИНС палубного базирования. Разработка алгоритма НВ проводилась на стендах, обеспечивающих имитацию угловой качки или линейных колебаний. Натурные испытания на море выявили некорректность настроек алгоритмов из-за несоответствия условий проведения испытаний на море и на лабораторных стендах. Доведение ПМО НВ ИНС выполнено в два этапа:

- доработка стенда угловой качки до комплексного;
- настройка на нем алгоритма НВ до требуемого качества выставки.

Можно считать, что в реальных условиях на море акселерометры ИНС ЛА измеряют ускорение

$$\vec{w}_0 = \vec{w}_c + \vec{\varepsilon} \times \vec{\rho} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{\rho}) + 2\vec{\omega} \times \vec{V}_p + \vec{w}_p,$$

где $\vec{w}_c$ - абсолютное ускорение точки С стартовой позиции ЛА на палубе; $\vec{\varepsilon}$, $\vec{\omega}$ - абсолютные угловые ускорение и скорость корабля; $\vec{\rho}$ - вектор положения ИНС ЛА относительно точки С; $\vec{V}_p$, $\vec{w}_p$ - скорость и ускорение движения ЛА относительно корабля. Стенд угловой качки не предусматривает моделирование слагаемых $\vec{\varepsilon} \times \vec{\rho}$, $\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{\rho})$, $2\vec{\omega} \times \vec{V}_p$ и $\vec{w}_p$, а в модели ускорения $\vec{w}_c$ отсутствует составляющая от орбитального движения корабля. Для доработки стенда в его состав введены блоки, вычисляющие недостающие слагаемые и прибавляющие соответствующие поправки к

сигналам, поступающим на вход ПМО НВ. Контрольные эксперименты показали, что поведение выходных параметров алгоритма НВ ИНС на доработанном стенде вполне соответствует тому, что наблюдалось в натурных работах на море. После этого была проведена серия экспериментов по моделированию различных условий движения и качки, в ходе которых осуществлена настройка параметров алгоритма начальной выставки, обеспечивающая требуемую точность. Результаты повторных натурных испытаний на море (табл. 2) полностью удовлетворяют требованиям ТЗ.

Таблица 2.

Результаты натурных испытаний алгоритма начальной выставки

Движение корабля	Время счисления, мин	Погрешности счисления скорости, м/с		Погрешности счисления координат, км	
		$ \Delta v_E $	$ \Delta v_N $	$ \Delta \lambda $	$ \Delta \phi $
Хода нет, курс 133°	30	$<0,30$	$<0,35$	–	–
Ход 22 узла, курс 85°	37	$<0,3$	$<1,1$	$\leq 0,2$	$\leq 1,4$
Ход 14 узлов, курс $270^\circ \pm 30^\circ$	60	$<0,4$	$<1,3$	$<0,6$	$<1,9$

Применение методов математического моделирования позволило в условиях ограниченного лимита времени и средств решить важную научно-техническую проблему испытаний и доработки режима начальной выставки ИНС ЛА палубного базирования и обеспечить сдачу объектов заказчику.

Основные научно-технические выводы по работе.

1. Для обеспечения выполнения функциональных задач ВМЛА во всех условиях применения необходимо построение многоуровневой системы алгоритмов адаптивно-робастной комплексной обработки информации, моделирующей состояние объектов в информационном пространстве.
2. Методической основой алгоритмов КОИ ИУК ВМЛА, обеспечивающей информационное единство и целостность комплекса, является модель информационного пространства на базе семейства уровневых поверхностей и системы координатных трехгранников, причем наилучшая точность навигационных определений достигается при использовании квазиэллипсоидов. Бесселево отображение квазиэллипсоида обеспечивает построение системы бортовых алгоритмов решения позиционных задач с высокой точностью.
3. Адаптивность моделей и алгоритмов КОИ ИУК к различным условиям применения обеспечивается методами: априорной адаптации на основе ковариационного анализа и минимаксного критерия качества, текущей адаптации на основе согласования расчетной и фактической ковариаций и сетевой фильтрации данных, и долгосрочной адаптации с использованием энергонезависимой памяти комплекса.

4. Информационной основой ИУК ВМЛА являются ИНС, унифицированные математические модели погрешностей которых строятся на базе малых векторов поворотов координатных трехгранников, а также «скалярного» и «векторного» методов определения погрешностей числения скорости. Применимость аналитических методов контроля точности алгоритмов перспективных БИНС, реализующих измерение и обработку «квазикоординат», ограничена динамикой объекта.

5. Методической основой математического моделирования ИУК ВМЛА в лабораторных условиях, обеспечивающей высокое качество результатов и их соответствие экспериментальным данным, является эталонная траектория. Требованиям, предъявленным к эталону, удовлетворяет траекторная информация, полученная методом аналитического восстановления кубических сплайн-аппроксимаций результатов натурных работ.

6. Методы автоматической калибровки на борту на основе субоптимальной фильтрации текущих измерений и лабораторной калибровки по результатам анализа полетных данных обеспечивают высокую эффективность компенсации динамических дрейфов платформенных ИНС модернизируемых комплексов серийных ВМЛА.

7. Метод субоптимальной обработки записанной в полете комплексной информации обеспечивает проведение оперативного экспресс-контроля точности работы ИУК ВМЛА.

8. Метод полунатурных испытаний режима начальной выставки ИНС на качающемся основании, предусматривающий корректировку выходных сигналов измерительных приборов на рассчитываемые величины поправок, соответствующие моделируемому движению объекта, по своим возможностям настройки и контроля алгоритмов ИНС эквивалентен натурным испытаниям.

В **заключении** сформулированы главные теоретические и практические итоги диссертации: развитие теории обработки бортовой информации и прикладных методов моделирования ИУК ВМЛА, проверка теоретических положений полунатурными экспериментами и летными испытаниями, внедрение полученных результатов в серийное производство.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бабиченко А.В., Орехов М.И., Рогалев А.П. Основы построения системы комплексной обработки информации в интегрированных комплексах бортового оборудования перспективных многофункциональных летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. – 2007. – № 2. – С. 43-49.
2. Рогалев А.П., Бабиченко А.В. Математическое моделирование инерциально-спутниковых систем навигации и управления летательных аппаратов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2002. – № 4. – С. 60-71.

3. Рогалев А.П., Бабиченко А.В. Методы и алгоритмы интеграции данных инерциально-спутниковых навигационных систем // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2002. – №4. – С. 9-24.
4. Рогалев А.П., Бабиченко А.В., Радченко И.В. Математическое моделирование эталонной фазовой траектории движения летательного аппарата в околосземном навигационном пространстве // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2002. – №6. – С.29-32.
5. Интегрированная динамически реконфигурируемая система комплексной обработки информации бортовых комплексов навигации, управления и наведения / Г.И. Джанджгава, А.П. Рогалев, А.В. Бабиченко, С.Я. Сухоруков // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2002. – № 6. – С.8-14.
6. Бабиченко А.В. Геометрия базовых поверхностей околосземного навигационного пространства // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2008. – № 8. – С. 33-47.
7. Джанджгава Г.И., Рогалев А.П., Бабиченко А.В. Интегрированная адаптивно-робастная система обработки информации с переменной управляемой структурой // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2000. – № 8. – С.73-77.
8. Комплексная обработка информации навигационных и обзорно-прицельных систем / Г.И. Джанджгава, А.П. Рогалев, С.Я. Сухоруков, А.В. Бабиченко // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2002. – № 6. – С.15-29.
9. Комплексная обработка информации инерциальных навигационных систем в режиме начальной выставки ИНС на палубе корабля / Г.И. Джанджгава, А.П. Рогалев, В.И. Манохин, А.В. Бабиченко // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2007. – №2. – С.22-35.
10. Пат. 2232376 (РФ), МПК G01C 23/00. Информационно-управляющий комплекс многофункциональных летательных аппаратов / А.В. Бабиченко, Г.И. Герасимов, Г.И. Джанджгава, В.В. Кавинский, В.В. Негриков, М.И. Орехов, В.П. Полосенко, А.П. Рогалев, А.А. Семаш, К.В. Шелепень. – Заявлено 25.09.03; Опубл. 10.07.04, Бюл. № 19.
11. Пат. 2232102 (РФ), МПК B64C 13/00. Распределенный информационно-управляющий комплекс группы многофункциональных летательных аппаратов / А.В. Бабиченко, В.М. Бражник, Г.И. Герасимов, В.С. Горб, Г.М. Гущин, Г.И. Джанджгава, В.В. Кавинский, В.В. Негриков, М.И. Орехов, В.П. Полосенко, А.П. Рогалев, А.А. Семаш, К.В. Шелепень, В.М. Шерман. – Заявлено 21.10.03; Опубл. 10.07.04, Бюл. № 19.
12. Пат. 2232377 (РФ), МПК G01C 23/00. Распределенный информационно - управляющий комплекс подвижных объектов / А.В. Бабиченко, Г.И. Герасимов, Г.И. Джанджгава, В.В. Кавинский, В.И. Манохин, В.В. Негриков, М.И. Орехов, В.П. Полосенко, А.П. Рогалев, А.А. Семаш, К.В. Шелепень, В.М. Шерман. – Заявлено 25.09.03; Опубл. 10.07.04, Бюл. №19.
13. Пат. 2238522 (РФ), МПК B64C 13/00. Комплекс начальной выставки инерциальной системы / А.В. Бабиченко, К.А. Бахонин, В.Л. Будкин, С.М.

- Габбасов, В.П. Голиков, Г.И. Джанджгава, С.В. Ларионов, В.С. Магнусов, В.И. Манохин, В.В. Негриков, В.П. Полосенко, В.М. Шерман – Заявлено 27.11.03; Оpubл. 20.10.04, Бюл. № 29.
14. Пат. 2263280 (РФ), МПК G01C 23/00. Комплексная информационная система / А.В. Бабиченко, В.М. Бражник, В.Н. Вишнева, С.М. Габбасов, Г.И. Джанджгава, В.И. Манохин, А.С. Никулин, М.И. Орехов, В.П. Полосенко, А.П. Рогалев, С.Я. Сухоруков, К.В. Шелепень. – Заявлено 23.03.04; Оpubл. 27.10.05, Бюл. № 30.
15. Пат. 2263281 (РФ), МПК G01C 23/00. Комплексная навигационная система / А.В. Бабиченко, В.М. Бражник, Г.И. Герасимов, Г.И. Джанджгава, В.В. Кавинский, О.И. Куколевский, А.С. Никулин, М.И. Орехов, И.В. Радченко, А.П. Рогалев, С.Я. Сухоруков, К.В. Шелепень. – Заявлено 23.03.04; Оpubл. 27.10.05, Бюл. № 30.
16. Пат. 2265190 (РФ), МПК G01C 23/00. Комплексная навигационная система / А.В. Бабиченко, В.М. Бражник, Г.И. Герасимов, Г.И. Джанджгава, В.В. Кавинский, А.С. Никулин, М.И. Орехов, И.В. Радченко, А.П. Рогалев, С.Я. Сухоруков, К.В. Шелепень, В.К. Шкред. – Заявлено 23.03.04; Оpubл. 27.11.05, Бюл. № 33.
17. Пат. 2260177 (РФ), МПК G01C 23/00. Комплексная навигационная система / А.В. Бабиченко, В.М. Бражник, Г.И. Герасимов, Г.И. Джанджгава, В.В. Кавинский, М.И. Орехов, И.В. Радченко, А.П. Рогалев, К.В. Шелепень, В.К. Шкред. – Заявлено 23.03.04; Оpubл. 10.09.05, Бюл. № 25.
18. Пат. на пол. модель № 34724 (РФ), МПК 7G01C23/00. Комплексная навигационная система / Г.И. Джанджгава, А.В. Бабиченко, В.С. Горб, С.Н. Ищенко, В.В. Кавинский, В.И. Логинов, А.С. Никулин, А.А. Никулина, М.И. Орехов, А.А. Семаш. – Заявлено 24.06.03; Оpubл. 10.12.03, Бюл. № 34.
19. Развитие интеллектуальных интегрированных комплексов бортового оборудования навигации, управления и наведения летательных аппаратов в разработках Раменского приборостроительного конструкторского бюро / Г.И. Джанджгава, Г.И. Герасимов, П.Ю. Петкевичус, С.Я. Сухоруков, А.В. Бабиченко, И.А. Гайнуллин, А.В. Чернодаров // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2008. – № 2. – С. 2-10.
20. Полунатурное моделирование качки корабля в задачах обработки инерциальной информации / А.В. Бабиченко, В.П. Голиков, С.В. Ларионов, В.И. Манохин, И.В. Радченко, А.В. Требухов // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2008. – № 11. – С. 55-58.
21. Алгоритмы решения задач бортовым комплексом навигации и управления летательного аппарата в режиме сверхманевренности / В.М. Бражник, А.П. Рогалев, А.В. Бабиченко, А.С. Никулин, С.Я. Сухоруков // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2002. – № 6. – С. 33-34.
22. Бабиченко А.В., Никулин А.С., Радченко И.В. Информационная интеграция инерциальной и спутниковой навигационных систем в модернизируемых бортовых комплексах высокоманевренных летательных аппаратов // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2008. – № 11. – С. 18-25.

23. Бабиченко А.В., Шкред В.К. Оценка курсовой погрешности инерциальных навигационных систем // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2008. – № 11. – С.12-17.
24. Гайнуллин И.А., Бабиченко А.В. Математическое моделирование ситуационной системы интеллектуальной поддержки решения задач самолетовождения в плотном строю // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2008. – № 11. – С.45-54.
25. Бабиченко А.В. Метод построения алгоритмов обработки информации бесплатформенной инерциальной навигационной системой // *Научно-методические материалы по системам навигации и управления летательными аппаратами* / Под ред. В.П.Харькова. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1995. – 180 с.
26. Бабиченко А.В., Джанджгава Г.И., Рогалев А.П. Оптимизация математической модели ошибок БИНС и их коррекция от спутниковой навигационной системы // *Гироскопия и навигация*. – 1996. – № 2. – С. 50-51.
27. Бабиченко А.В., Некрасов А.В. Математические модели нейронных сетей в задачах пилотажно-навигационного комплекса // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2008. – №11. – С. 33-40.
28. Бабиченко А.В., Рогалев А.П. К вопросу о контроле точности алгоритмов БИНС // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2006. – № 10. – С.27-29.
29. Рогалев А.П., Бабиченко А.В. Исследование методов комплексирования бесплатформенных инерциальных и спутниковых навигационных систем // *Научно-методические материалы по системам навигации и управления летательными аппаратами* / Под ред. В.П. Харькова. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1995. – 180 с.
30. Чернодаров А.В., Бабиченко А.В. Контроль и адаптивно-робастная защита целостности инерциальных измерительных модулей // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2008. – №11. – С.59-64.
31. Пат. 2241208 (РФ), МПК В64С 13/00. Измеритель курса подвижного объекта / А.В. Бабиченко, В.Н. Вишнева, С.М. Габбасов, Г.И. Джанджгава, В.С. Магнусов, В.И. Манохин, В.В. Негриков, М.И. Орехов, В.П. Полосенко, А.П. Рогалев. – Заявлено 04.12.03; Оpubл. 27.11.04, Бюл. № 33.
32. Пат. 2209747 (РФ), МПК В 64D 45/00. Пилотажный индикатор / А.В. Бабиченко, М.И. Орехов, И.В. Радченко, В.К. Шкред. – Заявлено 21.08.01; Оpubл. 10.08.03, Бюл. № 22.
33. Пат. 2011170 (РФ), МПК G01C21/00. Способ определения координат подвижного объекта / А.В. Бабиченко. – Заявлено 04.10.91; Оpubл. 15.04.94, Бюл. № 7.
34. Пат. 2059205 (РФ), МПК G01C21/00. Способ определения параметров ориентации и навигации подвижных объектов / А.В. Бабиченко. – Заявлено 15.05.92; Оpubл. 27.04.96, Бюл. № 12.
35. Пат. 2079141 (РФ), МПК G01P3/36. Датчик абсолютной линейной скорости объекта / Бабиченко А.В. – Заявлено 14.10.92; Оpubл. 10.05.97, Бюл. № 13.

Подписано к печати 8.05.09 Заказ № 324
Объем 2,0 печ.л, Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5
263-62-01