

На правах рукописи

Морозов Александр Сергеевич



003475009

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В
ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ
СИСТЕМЕ НАЗЕМНОГО АВТОТРАНСПОРТА**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (оборонная и гражданская техника)

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре «Радиосистемотехника» Московской академии
рынка труда и информационных технологий

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Оганесян Ашот Арутюнович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Алдошин Владимир Михайлович

кандидат технических наук
Звеков Сергей Геннадиевич

Ведущая организация: **Сибирский Федеральный университет**

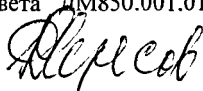
Защита состоится «18» июня 2009 г. в 14 ч. ____ на заседании диссертационно-
го совета ДМ850.001.01 при Московской академии рынка труда и информационных
технологий по адресу: 121351, г. Москва, ул. Молодогвардейская, д. 46, корп. 1, аудито-
рия 328.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке академии.

Автореферат разослан «15 » мая 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ДМ850.001.01

кандидат технических наук, профессор



Ю. И. Чересов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время технологии спутниковой навигации нашли самое широкое применение практически во всех областях деятельности человека. При этом наиболее эффективно внедрение спутниковой навигации в те области деятельности, которые традиционно требуют высокоточного навигационно-временного обеспечения. Одной из быстро растущей областью использования спутниковой навигации является автомобильный транспорт. С внедрением в эксплуатацию в 90-х годах прошлого столетия среднеорбитальных спутниковых радионавигационных систем появилось средство высокоточного определения навигационно-временных параметров. Проведенный анализ показывает, что только спутниковые радионавигационные системы второго поколения (ГЛОНАСС/GPS) способны обеспечить беспрецедентно высокоточное навигационно-временное определение объектов в любой точке мира.

На сегодняшний день в высокоточном навигационно-временном обеспечении с использованием космических навигационных технологий, применительно к гражданским отраслям, нуждаются:

1. Диспетчерские системы управления грузовыми транспортными перевозками (цель внедрения: повышение безопасности, увеличение пропускной способности);

2. Городской общественный транспорт. В РФ на сегодняшний день внедрена комплексная автоматизированная навигационная система диспетчерского управления транспортом в следующих городах: Москва, Нижний Новгород, Казань, Тула, Кемерово, Новосибирск, Брянск (цель внедрения: оптимизация и управление пассажиропотоками);

3. Служба «Скорой медицинской помощи», дежурный транспорт предприятий по обслуживанию водопроводных, тепловых, энергетических сетей, специальные машины МВД и МЧС, охранные комплексы с использованием спутниковых навигационных технологий (цель внедрения: оперативное управление, реагирование на чрезвычайные происшествия).

Обладея такими достоинствами как глобальность, беспрецедентно высокая точность, спутниковые радионавигационные системы обладают рядом недостатков. Например, в сложных географических условиях не обеспечивается требуемая точность и непрерывность навигационно-временных определений. Проведенные в рамках диссертационной работы экспериментальные исследования в условиях плотной городской за-

стройки показали, что число наблюдаемых навигационных спутников на некоторых участках было менее необходимого количества. Несмотря на то, что промежутки времени неработоспособности приемника спутниковой навигации составляли от нескольких секунд до нескольких минут, в ряде приложений это может оказаться неприемлемым. Кроме того, ограничение видимости навигационных спутников в городских условиях приводит к работе приемника спутниковой навигации по постоянно меняющемуся и геометрически неблагоприятному рабочему созвездию. Поэтому для повышения точности и обеспечения непрерывности навигационно-временных определений необходимо использовать дополнительную информацию. Анализ большого количества исследований показывает, что эффективным способом обеспечения точности и непрерывности навигационно-временных определений является совместная обработка спутниковых измерений и измерений автономных датчиков. Как показал проведенный в ходе диссертационной работы анализ, в качестве источников дополнительной навигационной информации на современных автомобилях могут быть использованы микроэлектромеханические датчики. В настоящее время микроэлектромеханические датчики входят в состав систем активной и пассивной безопасности современных автомобилей. Микроэлектромеханические датчики обладают совокупностью уникальных достоинств, основными из которых являются: малые массогабаритные характеристики; низкое энергопотребление; низкая цена на микроэлектромеханические датчики; высокая надежность; высокая устойчивость к перегрузкам и ударам.

Проведенный системный анализ показал, что микроэлектромеханические гироскопы могут эффективно использоваться в качестве автономной поддержки спутниковой навигации на непродолжительных интервалах времени пропадания сигналов, возникающих из-за затенений высотными строениями, при проезде туннелей и т.п. В качестве одного из вариантов построения комплексной системы можно рассматривать возможность использования информации с выходов микроэлектромеханических датчиков, установленных на современном автомобиле. Поэтому исследования в области повышения точности и обеспечения непрерывности навигационно-временных определений автотранспорта на основе решения задачи комплексной обработки информации является актуальной научной задачей, которой и посвящена диссертационная работа.

Целью исследования является решение научной задачи анализа и синтеза алгоритма обработки информации в интегрированной инерциально-спутниковой навигаци-

онной системе наземного автотранспорта для повышения точности и обеспечения непрерывности навигационно-временного определения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решение следующих **научных задач**.

1. Проведение анализа причин понижения точности и непрерывности навигационно-временных определений наземного автотранспорта в условиях городской застройки.

2. Осуществление системного анализа возможности по определению способов повышения точности и непрерывности навигационно-временных определений на наземном автотранспорте в условиях кратковременного пропадания спутниковых навигационных сигналов.

3. Разработка алгоритмов обработки информации, на основе теории оптимальной нелинейной фильтрации в перспективных навигационных комплексах наземного автотранспорта для использования в городских условиях.

4. Проведение имитационного моделирования и экспериментальных исследований синтезированного оптимального алгоритма с целью проверки адекватности работы, разработанной математической модели интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы в условиях мегаполиса.

Объектом исследований являются автономные алгоритмы функционирования приемников спутниковой навигации и алгоритмы комплексирования приемника спутниковой навигации и инерциальных микроэлектромеханических датчиков.

Предметом исследований являются характеристики точности и непрерывности навигационно-временных определений интегрированных инерциально-спутниковых навигационных системах.

При решении поставленной задачи использовались следующие **методы исследования**: системный анализ, теория оптимальной нелинейной фильтрации, теория имитационного моделирования, теория прикладного и системного программирования.

Достоверность результатов исследований обеспечивается корректным использованием математического аппарата статистического синтеза и анализа радиотехнических систем и корректным использованием имитационного моделирования, прикладного и имитационного моделирования.

На защиту выносятся теоретические и прикладные способы повышения точности и обеспечения непрерывности навигационно-временных определений в условиях городской застройки:

1. Математическая модель описания интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы.

2. Разработанный на основе марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации слабосвязанный алгоритм комплексирования приемника спутниковой навигации и микроэлектромеханических датчиков (инерциальных датчиков интегрирующего типа).

3. Разработанная программно-математическая среда для проведения имитационных и экспериментальных исследований синтезированного алгоритма.

4. Результаты имитационных и экспериментальных исследований алгоритма слабосвязанного комплексирования приемника спутниковой навигации и микроэлектромеханических датчиков.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней:

1. Разработан на основе марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации слабосвязанный алгоритм комплексирования приемника спутниковой навигации и микроэлектромеханических датчиков (инерциальных датчиков интегрирующего типа).

2. Проведен анализ зависимости точности навигационных определений от темпа поступления информации угловой скорости с микроэлектромеханических гироскопов (гироскопов интегрирующего типа) при функционировании интегрированной системы в городских условиях.

3. Проведен анализ интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы путем имитационного моделирования и экспериментальных исследований в условиях мегаполиса.

Практическая ценность результатов исследований, полученных в диссертации, заключается в том, что они могут быть использованы при разработке высокоточной навигационной аппаратуры наземного автотранспорта. Предложено использование микроэлектромеханических инерциальных датчиков систем активной и пассивной безопасности автомобилей в качестве инерциальной поддержки интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы автомобиля.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на:

1. Всероссийская научно-техническая конференция «8-е научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского». Москва, ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2007.

2. Международная молодежная научная конференция «XXXIII Гагаринские чтения», Москва, РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2007.

3. XIX научно-техническая конференция аспирантов и молодых специалистов, г. Жуковский, ОАО «НИИ приборостроения им. В.В. Тихомирова, 2007.

4. Межвузовская научно-техническая конференция курсантов и молодых ученых (посвященная 90-летию юбилею ВУЗа и 150-летию со дня рождения А.С. Попова) – Тамбов: ТВВИУ (ВИ), 2008

5. Научно-техническая конференция «Тенденция и гармонизация развития радионавигационного обеспечения». Москва, ФГУП «Интернавигация», МАДИ, 2008.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 13 работах в виде статей, тезисов докладов, приведенных в списке публикаций в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, а также 10 таблиц и 70 рисунков. Общий объем работы составляет 155 страниц. Список литературы содержит 81 наименование.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов работы. Кроме того, описана структура диссертации и представлено краткое содержание её глав.

В первой главе диссертационной работы проанализирована роль и значимость спутниковой навигации для автотранспорта. Как показывают расчеты, проведенные в Минтрансе РФ, ожидаемая экономическая эффективность от использования спутниковых навигационных технологий для организации управления транспортными потоками и средствами, позволит сэкономить от 10 % до 25 % ресурсов.

В рамках главы проведен анализ получившего широкое распространение системы диспетчерского управления и контроля транспортных средств - Automatic Vehicle Location (AVL), разработанного в США. Такие системы используются для обеспечения оперативного контроля и управления транспортным парком, а также для решения вопросов безопасности при перевозке особо опасных грузов (вооружение, боеприпасы, радиоактивные и опасные промышленные отходы), ценностей, пассажиров и т.д. Проведенный анализ показал, что в настоящее время системы диспетчерского управления ориентируются на навигационное обеспечение за счет спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Отмечено, что с внедрением спутниковых радионавигационных систем второго поколения типа ГЛОНАСС и GPS, а также с развитием сотовой сети и снижением стоимости спутниковой связи привело к резкому повышению потребности в спутниковой навигации и качественно новому решению навигационных задач.

Проведенный анализ показал, что на сегодняшний день в РФ оснащены приемниками спутниковой навигации только незначительная часть автотранспорта, поэтому следует ожидать спрос на аппаратуру спутниковой навигации. Далее в главе рассмотрены требования к точности навигационно-временных определений для автотранспорта.

В главе отмечено, что требования к навигационному обеспечению различных гражданских объектов, осуществляемому, в частности, с помощью спутниковой радионавигационной системы (СРНС), впервые в нашей стране сформулированы, обобщены

приведены в Российском радионавигационном плане, подготовленном с участием специалистов заинтересованных ведомств и служб. В настоящее время для обычных транспортных средств, требуемая среднеквадратическая ошибка определения координат находится в пределах единиц метров - единиц километров, причем при необходимости, например обеспечения точной ориентировки в городе, соответствующая точность равна единицам - первому десятку метров.

Отмечено, что к основным проблемам использования глобальных спутниковых радионавигационных систем в городских условиях является высотная застройка, которая ограничивает видимость навигационных спутников. Проведенный анализ на основе митационных и экспериментальных исследований показал, что в некоторые моменты времени количество наблюдаемых навигационных спутников составляло меньше минимально необходимого количества. Это приводит к разрывам при решении навигационно-временных задач. Проведенный анализ показал, что наиболее перспективным методом обеспечения непрерывности навигационно-временных определений в условиях городской застройки является комплексирование приемника спутниковой навигации и автономных инерциальных датчиков. Отмечено, что наиболее перспективными автономными датчиками являются микромеханические сенсоры, которые нашли широкое применение на современных автомобилях в системах активной и пассивной безопасности.

Далее рассмотрены наиболее распространенные варианты комплексирования приемника спутниковой навигации и микромеханических датчиков, их достоинства и недостатки. Показано, что практически любую схему интегрирования можно с той или иной степенью приближения представить как одну из схем интеграции: разомкнутая схема комплексирования, слабосвязанное комплексирование на уровне навигационных определений, слабосвязанное комплексирование на уровне радионавигационных параметров, слабосвязанное комплексирование на уровне сигналов с выходов датчиков инерциально-навигационной системы, тесносвязанная схема комплексирования и схема глубокой интеграции. В качестве варианта комплексирования в диссертационной работе была выбрана схема комплексирования приемника спутниковой навигации и инерциально-навигационной системы (ИНС) на уровне выходных сигналов инерциальных датчиков (рис. 1). Выбор данной схемы комплексирования обусловлен следующими причинами:

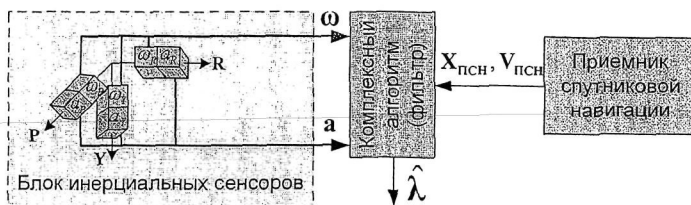


Рис. 1. Слабосвязанное комплексирование на уровне сигналов с выходов микромеханических датчиков

- работа направлена на гражданских потребителей, поэтому можно предположить, что потребители будут

использовать аппаратуру спутниковой радионавигационной системы в условиях отсутствия преднамеренных помех;

- данный алгоритм позволяет получить практически потенциальные характеристики точности и непрерывности навигационно-временных определений.

- относительно несложная техническая реализация, позволяющая в качестве инерциальных компонентов использовать микроэлектромеханические гироскопы и акселерометры, стоимость которых составляет несколько сотен рублей за датчик.

Во второй главе рассматриваются автономные алгоритмы функционирования приемника спутниковой навигации. Отмечено, что, несмотря на универсальность методов оптимальной нелинейной фильтрации, при инженерном проектировании приемников применяются упрощенные алгоритмы обработки сигналов. Одним из примеров инженерного подхода является использование двухэтапных алгоритмов обработки, следующих из эвристических соображений, а не одноэтапных алгоритмов следующих из теории оптимальной фильтрации. Далее в главе представлены двухэтапные алгоритмы обработки информации, используемые в современных приемниках спутниковой навигации, и одноэтапные алгоритмы.

Суть различных представлений алгоритмов заключается в следующем. Вектор состояния $\lambda(t)$ подвижного объекта, параметры которого однозначно определяют его положение в пространстве и динамику, можно представить в виде:

$$\lambda(t) = [X^T(t), V^T(t), a^T(t)]^T,$$

где $X(t) = [X(t), Y(t), Z(t), \Delta(t)]^T$ – вектор координат подвижного объекта и рассогласования шкалы времени ($\Delta(t)$), задаваемой опорным генератором приемника спутниковой навигации, относительно шкалы единого системного времени;

$(t) = [V_x(t), V_y(t), V_z(t), V_\Delta(t)]^T$ – вектор составляющих скорости объекта и скорости изменения во времени рассогласования $\Delta(t)$, имеющей также смысл относительно отклонения частоты опорного генератора;

$t) = [a_x(t), a_y(t), a_z(t)]^T$ – вектор составляющих ускорения подвижного объекта.

Из совокупности радиосигналов принятых приемником, требуется оптимальным разом извлечь информацию о векторе $\lambda(t)$, т.е. определить оптимальную, например, критериям максимума апостериорной плотности вероятностей или минимума среднеквадратической ошибки, оценку вектора $\hat{\lambda}(t)$. Как отмечалось выше, для определения вектора $\lambda(t)$ по сигналам спутниковой радионавигационной системы известны два основных вида алгоритмов обработки информации – двухэтапные и одноэтапные. В двухэтапных алгоритмах под этапом первичной обработки понимают процесс обработки принимаемых радиосигналов навигационных спутников, результатом которого является совокупность оцененных значений радионавигационных параметров (задержки $\hat{\tau}(t)$, скорости изменения задержки $V_r(t)$), а также выделенные биты служебной информации $t)$. Под этапом вторичной обработки понимают процесс преобразования выходных данных первичной обработки в значения вектора текущих координат и параметров, характеризующих динамику объекта. В одноэтапном алгоритме задача навигационно-временных определений решается непосредственно (из принимаемой входной реализации фильтруются не радионавигационные параметры, а навигационные параметры – компоненты вектора $\lambda(t)$).

Актуальность рассмотрения одноэтапных алгоритмов связана именно с предстоящим существенным увеличением сигналов. В главе отмечено, что в связи с восстановлением российской, модернизацией американской и созданием европейской спутниковой радионавигационной системы потребителю одновременно будут доступны до 100 навигационных сигналов на спутниковых каналах L1, L2, L3, L5, E1, E5a, E5b, E6. Значительное увеличение числа навигационных сигналов систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo входе антенны может значительно улучшить характеристики приемника спутниковой навигации, так как при увеличении числа сигналов число определяемых навигационных параметров не изменяется. В одноэтапных алгоритмах такое объединение происходит в

едином контуре, замкнутом по навигационным параметрам. Поэтому в отличие от двуступенчатых алгоритмов, одноэтапные алгоритмы способны реализовать потенциальные характеристики автономных приемников спутниковой навигации.

Методами марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации синтезированы автономные двухэтапный и одноэтапный алгоритмы. Отметим, что алгоритмы синтезированы в рамках гауссовской аппроксимации апостериорной плотности вероятности и сводились к одному из представлений расширенного фильтра Калмана:

$$\hat{\lambda}_{k+1} = \tilde{\lambda}_{k+1} + \mathbf{R}_{k+1} \frac{\partial F_{k+1}}{\partial \lambda}; \quad \mathbf{R}_k^{-1} = \tilde{\mathbf{R}}_k^{-1} - \frac{\partial^2 F_k}{\partial \lambda \partial \lambda^T},$$

где $\hat{\lambda}_k$ - экстраполированная оценка; $\tilde{\mathbf{R}}_k^{-1}$ - матрица апостериорной дисперсии; $F_k = \ln p(\xi_k / \lambda_k)$ - логарифм функционала правдоподобия.

Здесь частные производные по параметрам (для первичного этапа в двухэтапном алгоритме это радионавигационные параметры) представляют собой дискриминанты соответствующих схем слежений.

Проведенные исследования показали, что помехоустойчивость одноэтапного алгоритма выше помехоустойчивости двухэтапного алгоритма. Из табл. 1 видно, что выигрыш одноэтапного алгоритма составляет до 11 дБ при использовании 28-31 навигационных спутников (без учета дискретного параметра). Кроме того, проведенные исследования показали, что характеристики точности и непрерывности навигационных временных определений у одноэтапного и двухэтапного алгоритмов, при больших отношениях сигнал/шум, практически совпадают.

Таблица 1

		Пороговое значение J/S, дБ			
		Двухэтапный алгоритм		Одноэтапный алгоритм	
		Дискретный параметр			
		+	-	+	-
Количество наблюдаемых спутниковых каналов	6-7	29	33	33	38
	28-31	29	33	37	44

где J - мощность помехи, S - мощность сигнала.

В третьей главе приведен синтез и анализ алгоритма комплексирования приемника спутниковой навигации с автономными датчиками. В качестве автономных датчиков рассматриваются микроэлектромеханические датчики - триада гироскопов и триада акселерометров.

акселерометров. Особенностью синтезированного алгоритма является включение в вектор состояния в качестве параметров, характеризующих пространственную ориентацию, кватерниона Родрига–Гамильтона (нормированный кватернион). Выбранный в качестве параметров ориентации кватернион Родрига–Гамильтона имеет ряд достоинств: в отличие от углов Эйлера не требуется начальная выставка математической платформы инерциальной системы (предположение о малости начальных углов ошибок); кватернион связан линейными уравнениями с угловыми скоростями, которые используются в качестве наблюдений; кватернион не вырождается при любом пространственном положении объекта.

Для алгоритма комплексирования приемника спутниковой навигации с инерциальными датчиками в качестве опорной системы координат выбрана геоцентрическая подвижная система координат ECEF – Earth Centered Earth Fixed (ПЗ-90, WGS-84).

Спутниковые наблюдения. При реализации слабосвязанного алгоритма комплексирования приемника спутниковой навигации и инерциальных датчиков, в качестве наблюдений от приемника спутниковой навигации используются навигационные решения (вектора координат и скорости):

$$\xi_X(t) = X(t) + n_X(t), \quad \xi_V(t) = V(t) + n_V(t),$$

где X , V – вектор координат центра масс и скоростей объекта в гринвичской системе координат (ECEF);

$n_X(t)$, $n_V(t)$ – векторы независимых белых гауссовских шумов с нулевым математическим ожиданием и корреляционными функциями $M\{n_X(t_1)n_X^T(t_2)\} = Q_X \cdot \delta(t_2 - t_1)$, $M\{n_V(t_1)n_V^T(t_2)\} = Q_V \cdot \delta(t_2 - t_1)$, где Q_X , Q_V – симметричные неотрицательно определенные матрицы.

Инерциальные наблюдения. Блок микромеханических акселерометров, жестко связанный с осями объекта, осуществляет измерение ускорений относительно инерциального пространства в связанной системе координат, например, RPY – Roll, Pitch, Yaw. оэтому, уравнения акселерометров в геоцентрической подвижной связанной системе координат ECEF которая вращается в инерциальном пространстве с угловой скоростью вращения Земли ω_z , можно представить в виде:

$$y_a(t) = U_{RPY}^{ECI} \{p_\omega p_x p_y p_z\} U_{ECI}^{ECEF} [a_{ECEF} + 2\Omega \times V - g_T(X)] + n_{ya}(t),$$

где $\mathbf{a}_{ECEF}$ – вектор ускорения объекта в гринвичской системе координат (ECEF);

$\mathbf{U}_{RPY}^{ECI}$ – матрица перехода из связанной системы координат RPY в инерциальную систему координат ECI – Earth Centered, Inertial;

$\mathbf{U}_{ECI}^{ECEF}$ – матрица перехода из системы координат ECI в ECEF;

$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \omega_3 \end{bmatrix}^T$ – матрица угловой скорости вращения Земли;

$2 \cdot \mathbf{\Omega} \times \mathbf{V}$ – кориолисово ускорение;

$\mathbf{g}_T(\mathbf{X}) = \mathbf{g}_T(\mathbf{X}) - \mathbf{\Omega} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{X})$ – удельная сила тяжести;

$\mathbf{g}_T(\mathbf{X})$ – вектор интенсивности гравитационного поля Земли;

$\mathbf{\Omega} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{X})$ – переносное (центростремительное) ускорение;

$\times$ – операция векторного умножения;

$\mathbf{p} = [p_\omega, p_x, p_y, p_z]^T$ – параметры Родрига – Гамильтона;

$\mathbf{n}_{ya}(t)$ – вектор белого гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и диагональной матрицей односторонних спектральных плотностей $\mathbf{N}_{ya}$;

Уравнение наблюдения для сигнала с выхода блока микромеханических гироскопов представлено в следующем виде:

$$y_\omega(t) = \omega(t) + \Delta\omega + \mathbf{n}_\omega(t),$$

где $\omega(t) = [\omega_x(t) \ \omega_y(t) \ \omega_z(t)]^T$ – вектор истинных значений угловой скорости,

$\Delta\omega = [\Delta\omega_x \ \Delta\omega_y \ \Delta\omega_z]^T$ – вектор систематических ошибок микроэлектромеханических гироскопов, $\mathbf{n}_\omega(t)$ – вектор белого гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и диагональной матрицей односторонних спектральных плотностей $\mathbf{N}_\omega$.

В вектор состояния $\lambda(t)$, включены параметры, описывающие всю совокупность инерциальных и спутниковых наблюдений:

$$\lambda(t) = [\mathbf{X}^T \ \mathbf{V}^T \ \mathbf{a}^T \ \mathbf{p}^T \ \omega^T \ \Delta\omega^T]^T.$$

Модель динамики параметров задавалась стохастической моделью Зингера третьего порядка.

Решение задачи оптимальной фильтрации по наблюдениям приводит к одному из представлений расширенного фильтра Калмана:

$$\hat{\lambda}_k = \tilde{\lambda}_k + \mathbf{R}_k \cdot \left[\frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{X}^T} \quad \frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{V}^T} \quad \frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{a}^T} \quad \frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{p}^T} \quad \frac{\partial F_k}{\partial \boldsymbol{\omega}^T} \quad \frac{\partial F_k}{\partial \Delta \boldsymbol{\omega}^T} \right]^T; \quad \mathbf{R}_k^{-1} = \tilde{\mathbf{R}}_k^{-1} - \frac{\partial^2 F_k}{\partial \boldsymbol{\lambda} \partial \boldsymbol{\lambda}^T},$$

где $F_k = \ln p(\xi_{X,k}, \xi_{V,k}, \mathbf{y}_{a,k}, \mathbf{y}_{\omega,k} / \boldsymbol{\lambda}_k)$ – логарифм функционала правдоподобия.

Исследование характеристик точности навигационно-временных определений.

На рис. 2 и 3 приведены типовые реализации абсолютных значений ошибок фильтрации координаты X и скорости V_X в пределах 3σ .

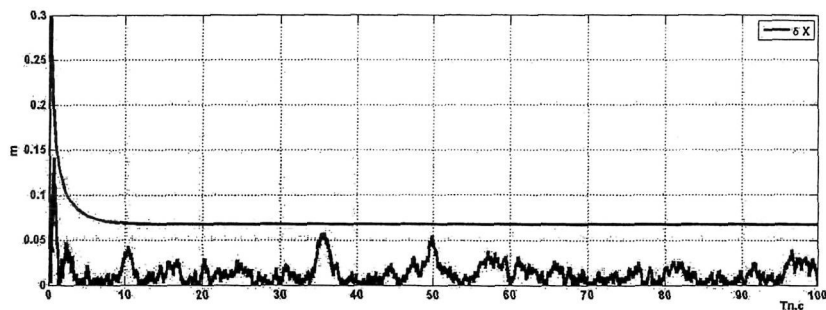


Рис. 2. Ошибка фильтрации координаты X

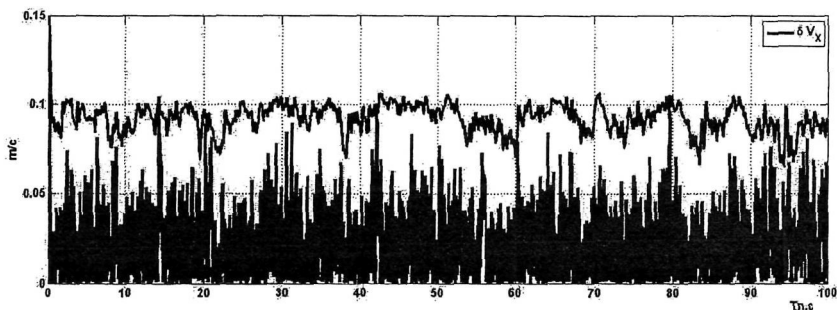


Рис. 3. Ошибка фильтрации скорости V_X

Так точность определения навигационно-временных параметров составило (3σ) по координатам лучше 0,1 м (без учета ионосферных и эфемеридных ошибок), по скорости $\sim 0,1$ м/с, по ускорению ~ 1.5 м/с².

На рис. 4 представлена ошибка оценки курса автомобиля. Видно, что точность определения параметров пространственной ориентации (углы Эйлера) составляет 1-3 градуса.

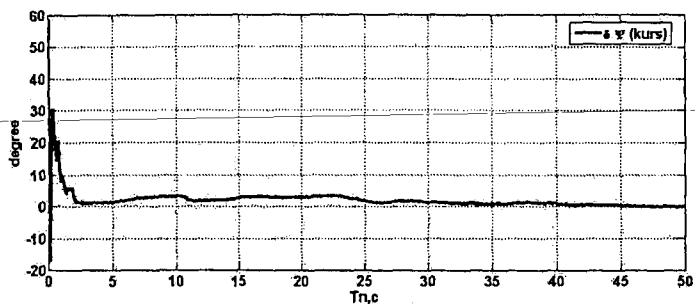


Рис. 4. Ошибки определения пространственных углов автомобиля

Исследование характеристик непрерывности навигационно-временных определений. На рис. 5 и 6 представлены абсолютная ошибка по координатам и количество наблюдаемых навигационных спутников.

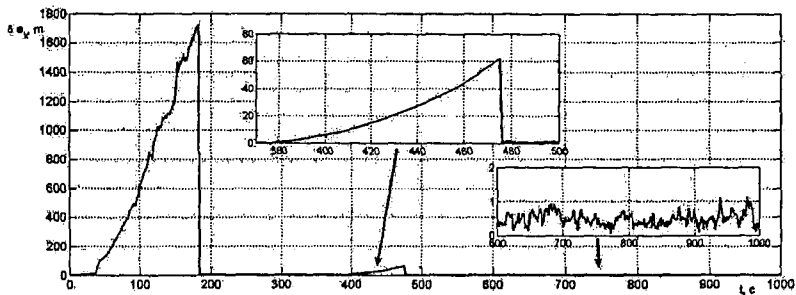


Рис. 5. Круговая ошибка по координатам

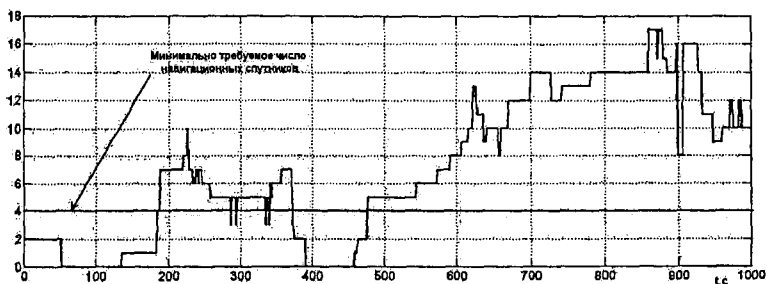


Рис. 6. Количество наблюдаемых спутников

Из рис. 5 и 6 видно, что на начальном этапе количество навигационных спутников меньше минимально необходимого числа. Поэтому на данном этапе работа комплексно-

го алгоритма эквивалента алгоритму счисления автономной бесплатформенной инерциальной системы, которая сформирована на основе микроэлектромеханических датчиков. Анализ характеристик точности определения координат показывает, что за время 180 секунд ошибка достигает примерно 2000 метров. На втором продолжительном участке пропадания навигационных спутников (с 380 по 480 секунды) ошибка по пространственному положению составила менее 60 метров. Столь существенная разница в точности определения координат на разных этапах связана с тем, что на начальном этапе систематические ошибки гироскопических датчиков не списаны. После появления необходимого количества навигационных спутников для навигационных решений приемников спутниковой навигации (со 180 до 380 секунды) в синтезированном комплексном алгоритме оцениваются (списываются) систематические ошибки микроэлектромеханических гироскопов (рис. 6). Поэтому на втором интервале длительного отсутствия навигационных спутников (с 380 по 480 секунды) точность автономного счисления инерциальными датчиками значительно выше. Отметим, что при кратковременном (в течение нескольких секунд) отсутствии навигационных решений от приемника спутниковой навигации, ошибки комплексного алгоритма практически не отличаются от нормального режима функционирования.

Принятие решения управления темпом обработки потоков информации. Используемые спутниковая и инерциальная системы выдают наблюдения с разным темпом и привязаны к собственным шкалам времени. Поэтому одним из важных направлений исследований является управление потоками информации. При этом наибольший интерес представляет рассмотрение наблюдений инерциальных гироскопов.

Как известно, микроэлектромеханические гироскопы являются датчиками интегрирующего типа, на выходе которых формируются интегралы от угловых скоростей $q_i = \int_{t_i}^{t_i + \tau_i} \omega(t) dt$. Использование накопленного угла q_i для автономных инерциально-навигационных систем оправдано тем, что такое техническое решение имеет ряд преимуществ: гироскопы интегрирующего типа гасят вибрационные воздействия, выдавая потребителю суммарный накопленный угол поворота q ; существенно снижаются требования к быстродействию специализированных вычислителей инерциально-навигационные системы.

Для анализа возможности использования гироскопов интегрирующего типа в инерциально-спутниковой навигационной системе было проведено имитационное моделирование. Суть проведенных исследований заключалась в следующем. Было задано, что истинное значение угловой скорости ω поступает с темпом, $\Delta t = 1 \text{ мс}$, а в качестве наблюдения использовалось среднее значение угловой скорости ω_{cp} на интервале

$$\text{накопления } (Tn): \omega_{\text{на},i} = \frac{1}{Tn} \int_{t_i}^{t_i+Tn} \omega_i dt$$

На рис. 7 представлен график истинного значения угловой скорости ω и ее сред-

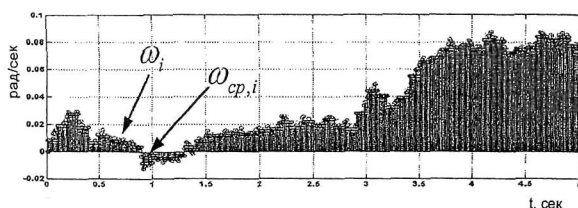


Рис. 7. Истинное значение угловой скорости автомобиля

нее значение ω_{cp} при интервале накопления $Tn = 20 \text{ мс}$. Проведенные исследования показали, что в комплексном режиме в качестве наблюдений блока гироскопов можно ис-

пользовать не накопленный угол поворота q , а среднее значение угловых скоростей ω_{cp} на интервале накопления Tn . Так, если комплексный алгоритм интеграции приемника спутниковой навигации и инерциальной навигационной системы с включением в вектор состояния параметров ориентации, позволяет осуществлять высокоточное определение ориентации автомобиля вплоть до значений $Tn = (50 \div 100) \text{ мс}$, то в режиме автономной работы инерциальной навигационной системы определить ориентацию практически невозможно уже при $Tn > (3-5) \text{ мс}$ вследствие быстрого накопления значительных ошибок. Следовательно, при практической реализации комплексных алгоритмов, необходимо использовать различный темп обработки наблюдений от микроэлектромеханических датчиков в зависимости от работоспособности приемника спутниковой навигации. Проведенный системный анализ показал, что возможно два режима работы комплексной системы. В первом (основном), комплексном режиме основные ресурсы вычислителя используются для реализации алгоритма комплексирования и, следовательно, темп поступления данных от микроэлектромеханических датчиков можно увеличить до 10-20 мс. Во втором режиме, когда приемник спутниковой навигации не работоспособен, необходимо использовать инерциальные наблюдения с более высоким темпом поступ-

ления данных от микромеханических датчиков до 1-2 мс. Заметим, возрастающая при этом потребность в вычислительных ресурсах обеспечиваются за счет высвобожденных ресурсов комплексного алгоритма. Таким образом, реализация алгоритма комплексирования приемника спутниковой навигации и инерциальных датчиков требует принятия решения об управлении темпом поступления потоков данных (рис. 8).

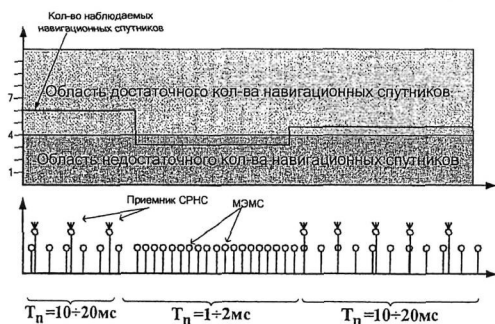


Рис. 8. Темп поступления потока данных

Четвертая глава посвящена имитационным и экспериментальным исследованием. В главе отмечено, что в настоящее время имитационное моделирование рассматривается как неотъемлемая часть системы создания новых высокотехнологичных продуктов. В рамках диссертационной работы, для исследования синтезированных алгоритмов был разработан моделирующий стенд. В состав разработанного моделирующего стенда входят следующие основные компоненты (рис. 9).

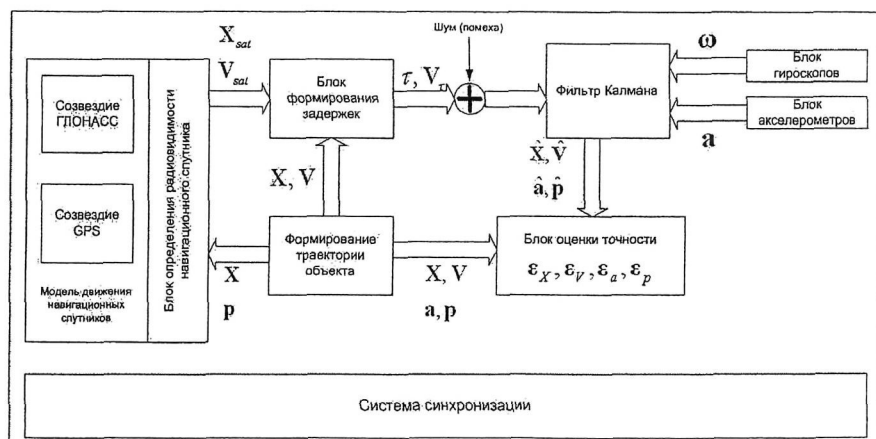


Рис. 9. Структура моделирующего стенда

Модель движения навигационных спутников. Используемая модель движения учитывает уравнения невозмущенного движения навигационных спутников в инерциальной системе координат с использованием орбитальных элементов систем ГЛОНАСС и GPS.

Модель движения подвижного объекта. В качестве истинной траектории в диссертационной работе использовались статистические и реальные траектории движения автомобиля в городе Москве. Для формирования реальных траекторий движения автомобиля был проведен эксперимент. В процессе эксперимента в автомобиле был установлен высокоточный двухчастотный (L1/L2) приемник спутниковой навигации Lexop GGD (JAVAD, USA), работающий по сигналам ГЛОНАСС/GPS. Использование двухчастотного приемника позволило в значительной степени устранить влияние ионосферных ошибок. Результаты измерений приемника спутниковой навигации в режиме реального времени записывались в персональный компьютер с темпом 1-10 Гц с привязкой ко времени ГЛОНАСС. Несмотря на то что, измерения приемника обладают высокими точностными характеристиками и достаточно подробно прописывают траекторию движения автомобиля, их нельзя непосредственно использовать в качестве эталонной траектории, без предварительной обработки. Поэтому для формирования эталонной траектории движения автомобиля по измерениям использовался алгоритм двухсторонней интерполяции.

Модель определения радиовидимости навигационных спутников учитывает положение навигационных спутников в орбитальных группировках, углы ориентации автомобиля, что позволяет адекватно имитировать конфигурацию радиовидимых навигационных спутников в условиях городской застройки. При этом параметром позволяющим учитывать плотность городской застройки является выбор угла маски.

Модель инерциальной навигационной системы. В диссертационной работе модель ошибок инерциальных датчиков включает в себя следующие параметры: случайные шумы измерений гироскопов; смещения нулей гироскопов; случайные шумы измерений акселерометров. Выбранная модель ошибок хорошо согласуется с характеристиками микроэлектромеханических датчиков.

Экспериментальная проверка синтезированных алгоритмов.

Для проверки работоспособности комплексного алгоритма проводились натурные эксперименты с использованием приемника спутниковой навигации Lехоп GGD и блока

микроэлектромеханических датчиков ADIS16350.



Рис. 10. Размещение аппаратуры

Размещение аппаратуры представлено на рис. 10. Исследование алгоритма СКО проводились в постобработке. Результаты исследований показали высокую точность синтезированного комплексного алгоритма. При этом полученные характеристики точности навигационно-временных определений практически совпадают с результатами статистического моделирования. В ходе

экспериментальных исследований была решена задача синхронизации данных поступающих от микроэлектромеханических датчиков и приемника спутниковой навигации, а также осуществлен учет температурных уходов микроэлектромеханических датчиков.

В заключении диссертационной работы подведены итоги выполнения исследований, сформулированы полученные в работе научные и практические результаты, позволяющие повысить точность и обеспечить непрерывность навигационно-временных определений автотранспорта в городских условиях:

1. Проведенный анализ показал, что при использовании исключительно спутниковой навигационной системой в условиях городской застройки невозможно обеспечить требуемую точность и непрерывность навигационно-временных определений. При этом наиболее эффективным способом обеспечения высокой точности и непрерывности является создание интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы. Проведенный системный анализ интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы показал, что в качестве инерциальных датчиков для построения высокоточных навигационных систем целесообразно использовать микроэлектромеханические датчики. Для автомобилей оснащенных датчиками движения, использование микроэлектромеханических датчиков систем активной и пассивной безопасности позволит обеспечить инерциальную поддержку приемника спутниковой навигации.

2. На основе теории оптимальной нелинейной фильтрации синтезирован алгоритм слабосвязанного комплексирования приемника спутниковой навигации и инерциальных микроэлектромеханических датчиков. Сравнительный анализ характеристик точности навигационно-временных определений комплексного (приемник и МЭМС) и автономного (только приемник) алгоритмов показал, что повышение точности оценки навигационных параметров в комплексном режиме составляет: по ускорению в 7-10 раз, по скорости до 5 раз. При числе навигационных спутников меньше минимально необходимого количества, синтезированный алгоритм функционирует аналогично автономной бесплатформенной инерциальной системе, построенной на основе микроэлектромеханических датчиков, тем самым, обеспечивая непрерывность навигационно-временных определений. Кроме того, синтезированный алгоритм слабосвязанного комплексирования приемника спутниковой навигации и микроэлектромеханических датчиков позволяет получить точность определения параметров пространственной ориентации (углов Эйлера) 1-3 градусов (3σ). Включение в вектор состояния параметров, характеризующих систематические уходы нулей гироскопов, позволяет с точностью до 90% скомпенсировать соответствующие уходы, и тем самым повысить точность навигационно-временных определений в автономном режиме, при временной неработоспособности приемника спутниковой навигации.

3. Гироскопы интегрирующего типа требуют применения специальных алгоритмов обработки, суть которых сводится к формированию эквивалентных наблюдений. Как показали проведенные исследования, комплексный режим обработки позволяет непосредственно использовать наблюдения гироскопов. Причем, в комплексном режиме темп поступления данных от гироскопов можно уменьшить до 50-100 Гц, что позволяет направить основные вычислительные ресурсы на реализацию комплексного алгоритма. В автономном режиме работы, когда неработоспособен приемник спутниковой навигации, для реализации алгоритма достаточно увеличить темп поступления данных до 500-1000 Гц, с использованием освободившегося вычислительного ресурса комплексного режима. Таким образом, в интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системе в зависимости от работоспособности приемника спутниковой навигации необходимо принимать решения об использовании различного темпа поступления информации от гироскопических датчиков.

4. Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, сопровождались проведением натурных экспериментов. При проведении экспериментов использовался высокоточный приемник спутниковой навигации Lехоп GGD и блок микроэлектромеханических датчиков ADIS16350. Исследования синтезированного интегрированного алгоритма по результатам проведенных экспериментов подтвердили работоспособность алгоритма. Анализ данных в постобработке позволил всесторонне исследовать влияние различных параметров на характеристики точности и непрерывности синтезированного алгоритма комплексирования. При этом наиболее критичным к точности определения параметров угловой ориентации оказались температурные уходы микромеханических гироскопов. В ходе экспериментальных исследований была решена задача синхронизации данных поступающих от микроэлектромеханических датчиков и приемника спутниковой навигации.

5. Разработанные программные продукты, реализующие комплексный алгоритм интеграции и синхронизации данных микромеханических датчиков и приемника спутниковой навигации отправлены на регистрацию.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.

1. **Морозов А.С.** Исследование особенностей функционирования приемников спутниковой навигации в условиях городской застройки / Аксенов С.Ю., Морозов А.С., Оганесян А.А.// журнал «Электросвязь» №9. – М.: 2008.

Публикации в других изданиях.

2. **Морозов А.С.** Сравнительный анализ характеристик точности и помехоустойчивости одноэтапного и двухэтапного алгоритмов приема сигналов спутниковой радионавигационной системы / Морозов А.С., Оганесян А.А., Хованец С.Я.// Радиоэлектронное оборудование : сборник научно-методических материалов / ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. – М.: 2007. – С. 49-51.

3. **Морозов А.С.** Моделирование созвездия СРНС ГЛОНАСС и GPS в сложных географических условиях / Морозов А.С., Оганесян А.А., Хованец С.Я.// Материалы конференции: тезисы докладов Всероссийская научно-техническая конференция (г. Москва, 21-23 март 2007) – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2007. – С. 116.

4. Морозов А.С. Анализ существующих и перспективных инерциально-спутниковых навигационных систем. Методы комплексирования приемников спутниковой навигации и инерциально-навигационных систем / Морозов А.С., Оганесян А.А., Хованец С.Я. // Материалы Международной молодежной научной конференции – М.: РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2007.

5. Морозов А.С. Исследование характеристик точности определения пространственной ориентации по сигналам спутниковых радионавигационных систем и бортовых инерциальных датчиков / Морозов А.С., Оганесян А.А.// Материалы XIX научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых – Жуковский: ОАО «НИИ приборостроения им. В.В. Тихомирова, 2007.

6. Морозов А.С. Моделирующий стенд для исследования характеристик комплексных алгоритмов обработки информации в инерциально-спутниковых навигационных системах / Епишин К.В., Морозов А.С., Оганесян А.А.// Материалы XIX научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых – Жуковский: ОАО «НИИ приборостроения им. В.В. Тихомирова, 2007.

7. Морозов А.С. Исследование слабосвязанного алгоритма комплексирования приемника спутниковой навигации и инерциальных датчиков МЭМС / Морозов А.С., Оганесян А.А.// Радиоэлектронное оборудование : сборник научно-методических материалов / ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. – М.: 2008.

8. Морозов А.С. Моделирование интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы в математической среде MATLAB / Морозов А.С., Оганесян А.А.// Межвузовская научно-техническая конференция курсантов и молодых ученых (посвященная 90-летию юбилею ВУЗа и 150-летию со дня рождения А.С. Попова) / Тамбовское высшее военное авиационное инженерное училище радиоэлектроники (военный институт) - Тамбов: 2008.

9. Морозов А.С. Навигационное обеспечение БПЛА. Состояние и перспективы / Морозов А.С., Оганесян А.А.// Доклад на II Всероссийской конференции «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами России. Направления и перспективы развития» в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (Москва 20-21 ноября 2008 г.). - М.

10. Морозов А.С. Использование микроэлектромеханических датчиков в комплексных инерциально-спутниковых навигационных системах беспилотных летательных аппаратов / Баталюк Д.А., Морозов А.С., Оганесян А.А.// Доклад на II Всероссий-

ской конференции «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами России. Направления и перспективы развития» в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (Москва 20-21 ноября 2008 г.). - М.

11. **Морозов А.С.** Методы комплексирования приемника спутниковой навигации и инерциальной навигационной системы. Результаты экспериментальных исследований слабосвязанного алгоритма комплексирования в городских условиях / Аксенов А.Ю., Аникин А.Л., Морозов А.С., Оганесян А.А. // Журнал «Новости навигации» № 4. – М.: 2008. С 25-29.

12. **Морозов А.С.** Исследование алгоритмов комплексирования ИНС и спутникового приемника / Аксенов А.Ю., Аникин А.Л., Морозов А.С., Оганесян А.А. // Научно - техническая конференция Межгосударственного Совета «Радионавигация», ФГУП НТЦ «Интернавигация», Российского общественного института навигации «Тенденции и гармонизация развития радионавигационного обеспечения». – М.: МАДИ, 2008.

13. **Морозов А.С.** Обоснование способа построения интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы для маломаневренных объектов / Баталюк Д.А., Морозов А.С., Оганесян А.А.// Радиоэлектронное оборудование : сборник научно-методических материалов / ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. – М.: 2009.

Разрешено в печать 7 мая 2009 г.

Формат 60х84 1/16

Тираж 55 экз. Заказ № 325