

На правах рукописи

Лочехин Алексей Владимирович

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА С ИНЕРЦИАЛЬНЫМ МОДУЛЕМ НА
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ГИРОСКОПЕ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ДАТЧИКАХ

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Санкт – Петербург

2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском Государственном Университете Информационных Технологий, Механики и Оптики

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: профессор базовой кафедры ИНС СПбГУ ИТМО при ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", профессор, д.т.н. Емельянец Геннадий Иванович

ОФИЦАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

д.т.н. Ландау Борис Ефимович, ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"

к.т.н. Шевченко Сергей Юрьевич, СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт ОАО "ГНИНГИ"

Защита диссертации состоится 24 ноября 2010 г.
в 14:00 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.238.06 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, ауд. 5108.

Автореферат разослан 22 октября 2010 г.

Ученый секретарь

Совета по защите докторских

и кандидатских диссертаций Д212.238.06

кандидат технических наук,

доцент

_____ / А. М. Боронахин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время для проведения глубоководных работ и океанографических исследований находят широкое применение автономные обитаемые подводные аппараты. В состав их навигационного оборудования включают различные типы курсоуказателей, лагов, приемной аппаратуры спутниковых и гидроакустических навигационных систем. При использовании в составе измерительного модуля микромеханических датчиков (ММД): гироскопов (с дрейфом $0,01^\circ/\text{с}$) и акселерометров (с погрешностью $0,1 \text{ м/с}^2$), можно обеспечить выработку углов качки с приемлемой точностью, привлекая для демпфирования шулеровских колебаний информацию о скорости от лага. Однако остается проблема с выработкой курса, так как современные микромеханические гироскопы «не чувствуют» вращение Земли. Поэтому в измерительном модуле на ММД погрешность по курсу постоянно растет во времени. Проблему обеспечения требований по курсу в интегрированных системах ориентации и навигации (ИСОИ) с измерительным модулем низкого уровня точности пытаются решить, в частности, за счет использования приемной аппаратуры спутниковых навигационных систем с разнесенными антеннами (интегрированная система Seapath 200 норвежской фирмы Seatex AS). Однако в системах навигации подводных аппаратов это решение можно использовать только в надводном положении.

Существуют современные бескарданные гиригоризонткомпасы на волоконно-оптических гироскопах. В качестве примера таких систем для морского применения можно привести малогабаритную систему «Зенит СК», производства ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», в которой из-за недостаточной точности используемых гироскопов (ф. «Физоптика» г. Москва) применяется модуляционное вращение измерительного блока. Это приводит к увеличению массогабаритных характеристик и снижению надежности прибора.

Известны зарубежные аналоги: волоконно-оптический гиригоризонткомпас SR 2100 совместной разработки фирм Litton Marine System (США), Sperry Marine Inc. и Decca Marine (Англия), а также системы ориентации и навигации OCTANS и PHINS (ф. IXSEA, Франция). Для обеспечения высокой точности в выработке курса в приведенных выше системах используются малогабаритные прецизионные волоконно-оптические гироскопы уровня $0,01^\circ/\text{ч}$, отечественных аналогов которых в настоящее время нет.

В диссертации предлагается альтернативная схема построения и алгоритмы работы малогабаритного гиригоризонткомпаса, включающего инерциальный модуль на ММД и один бескарданный электростатический гироскоп (БЭСГ). Данные, поступающие от БЭСГ (разработка ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор») используются для ограничения погрешности измерительного блока на ММД по курсу (для ее непрерывной коррекции) в условиях эксплуатации подводного аппарата. При этом вектор кинетического момента БЭСГ при запуске может быть ориентирован либо по оси Мира (полярная ориентация при использовании прибора в низких и средних широтах), либо в плоскости экватора Земли (экваториальная ориентация для высоких широт). К достоинствам такой схемы построения гиригоризонткомпаса следует отнести малые массогабаритные характеристики прибора и возможность функционирования с приемлемой точностью в высоких широтах. При

этом ожидается сохранение точности выработки параметров ориентации объекта на уровне современных зарубежных инерциальных модулей на волоконно-оптических гироскопах.

Основной целью диссертационной работы является разработка схемы построения и алгоритмов работы интегрированной системы ориентации и навигации на основе бескарданного гироскопа на электростатическом гироскопе и блоке микромеханических датчиков для подводных аппаратов.

Непосредственными задачами исследования являются:

- анализ современных ИСОН морского применения и их точности;
- выработка требований ко времени готовности и погрешностям системы и чувствительных элементов;
- разработка структуры построения предлагаемой ИСОН для подводных аппаратов;
- создание конструкции и разработка алгоритмов работы ИСОН на основе гироскопа на БЭСГ и блоке микромеханических датчиков;
- исследование точности рассматриваемой ИСОН путем имитационного моделирования в пакете Matlab (Simulink);
- анализ погрешностей системы с привлечением экспериментальных данных стендовых и мореходных испытаний БЭСГ, блока ММД и мультиантенной приемной аппаратуры спутниковой навигационной системы.

Методы исследования. Разработка структуры построения и алгоритмов работы предлагаемой ИСОН базируется на использовании положений общей теории навигации, инерциальной навигации и теории фильтрации. Постановка прикладных задач анализа и оценки системы основана на методологии разработки алгоритмов с использованием концепций объектно-ориентированного программирования для моделирования, имитации и анализа динамических систем.

Научные положения, выносимые на защиту:

- 1) Схема построения гироскопа, использующего комплексирование информации, поступающей от БЭСГ и блока ММД;
- 2) Алгоритмы начальной выставки и навигационного режима работы ИСОН, включающие формирование и линеаризацию измерений с использованием информации от измерительного модуля, гидроакустического лага, глубиномера, приемной аппаратуры спутниковой и гидроакустической навигационной системы;
- 3) Модель погрешностей гироскопа, содержащая описание суммарных дрейфов БЭСГ в квазиинерциальной системе координат и позволяющая решать задачу точной начальной выставки системы на ограниченном интервале времени.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработано программное обеспечение функционирования ИСОН в пакете MATLAB (Simulink), позволяющее моделировать работу системы в различных

режимах с использованием как модельных, так и реальных данных испытаний измерительных модулей;

2. Создана трехмерная модель и конструкция измерительного блока, что дает возможность оценить массогабаритные характеристики прибора.

3. По результатам моделирования в пакете MATLAB (Simulink) алгоритмов функционирования ИСОН с привлечением реальных данных испытаний измерительных модулей выработаны и обоснованы требования к точности БЭСГ и блока ММД.

Реализация и внедрение результатов исследований. Результаты работы внедрены в учебный процесс на кафедре информационно-навигационных систем СПбГУ ИТМО. Разработаны методические указания и программное обеспечение для лабораторной работы по исследованию режимов работы гироскопизированного компаса на БЭСГ и ММД при подготовке магистров по направлению интегрированных инерциально-спутниковых систем.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на XI конференции молодых ученых "Навигация и управление движением, V, VI Всероссийской межвузовской конференция молодых ученых, XXXVIII научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 8 статьях и докладах, из них по теме диссертации 8, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 4 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях перечисленных в конце автореферата. Основные положения защищены патентом.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 131 страницу основного текста, список использованной литературы из 82 наименований на 8 страницах, 28 рисунков, 4 таблицы и приложения с чертежами на 8 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 приводится обзор современного состояния проблем разработок и анализ точности современных ИСОН. Дан прогноз по составу перспективных интегрированных систем морского применения с учетом современного уровня в развитии отечественной гироскопической элементной базы. Анализируются точностные характеристики на примере современной ИСОН, включающей инерциальный модуль с реверсными модуляционными поворотами измерительного блока на волоконно-оптических гироскопах типа VG951 и мультиантенную приемную аппаратуру GPS/ГЛОНАСС с фазовыми измерениями.

Приводится структура построения и состав предлагаемой ИСОН для подводных аппаратов. Кратко описываются исследуемые режимы работы:

1. Первый режим заключается в начальной выставке и калибровке системы в надводном положении, при котором осуществляется выставка и калибровка измерительного модуля на ММД с использованием информации от мультиантенной приемной аппаратуры GPS, а затем точная выставка в инерциальной системе координат орта кинетического момента БЭСГ с опорой на данные, поступающие от блока ММД (углы качки) и приемной аппаратуры GPS (курс и координаты места).
2. Второй режим – навигационный (автономный режим с периодическими наблюдениями по координатам местоположения), используется в подводном положении аппарата. Инерциальный измерительный модуль с демпфированием от гидроакустического лага обеспечивает выработку курса и углов качки. Координаты места вычисляются инерциальным методом с непрерывным использованием данных лага и глубиномера при периодической коррекции от гидроакустической навигационной системы.

Особенности предлагаемого решения заключаются в следующем:

- при точной начальной выставке БЭСГ помимо калибруемого гироскопа, используется информация так называемого «опорного» БЭСГ, формируемая по данным, поступающим от мультиантенной приемной аппаратуры GPS и блока ММД («виртуальный» БЭСГ принимается идеальным, не имеющим дрейфа). По данным проекций векторов их кинетических моментов в корпусных осях моделируется ортогональный гироскопический трехгранник $q_1q_2q_3$;
- применяется дискретный алгоритм обработки, использующий для линеаризации представление разностных измерений и уравнений погрешностей системы в квазиинерциальной системе координат $Oint_1int_2int_3$, оси которой дискретно в моменты коррекции положения БЭСГ согласуются с осями трехгранника $q_1q_2q_3$;
- для описания неучтенного дрейфа БЭСГ используется упрощенная модель суммарного дрейфа, представленного в виде винеровского процесса;
- для обработки измерений используется алгоритм обобщенного фильтра Калмана с обратной связью по всему вектору состояния системы.

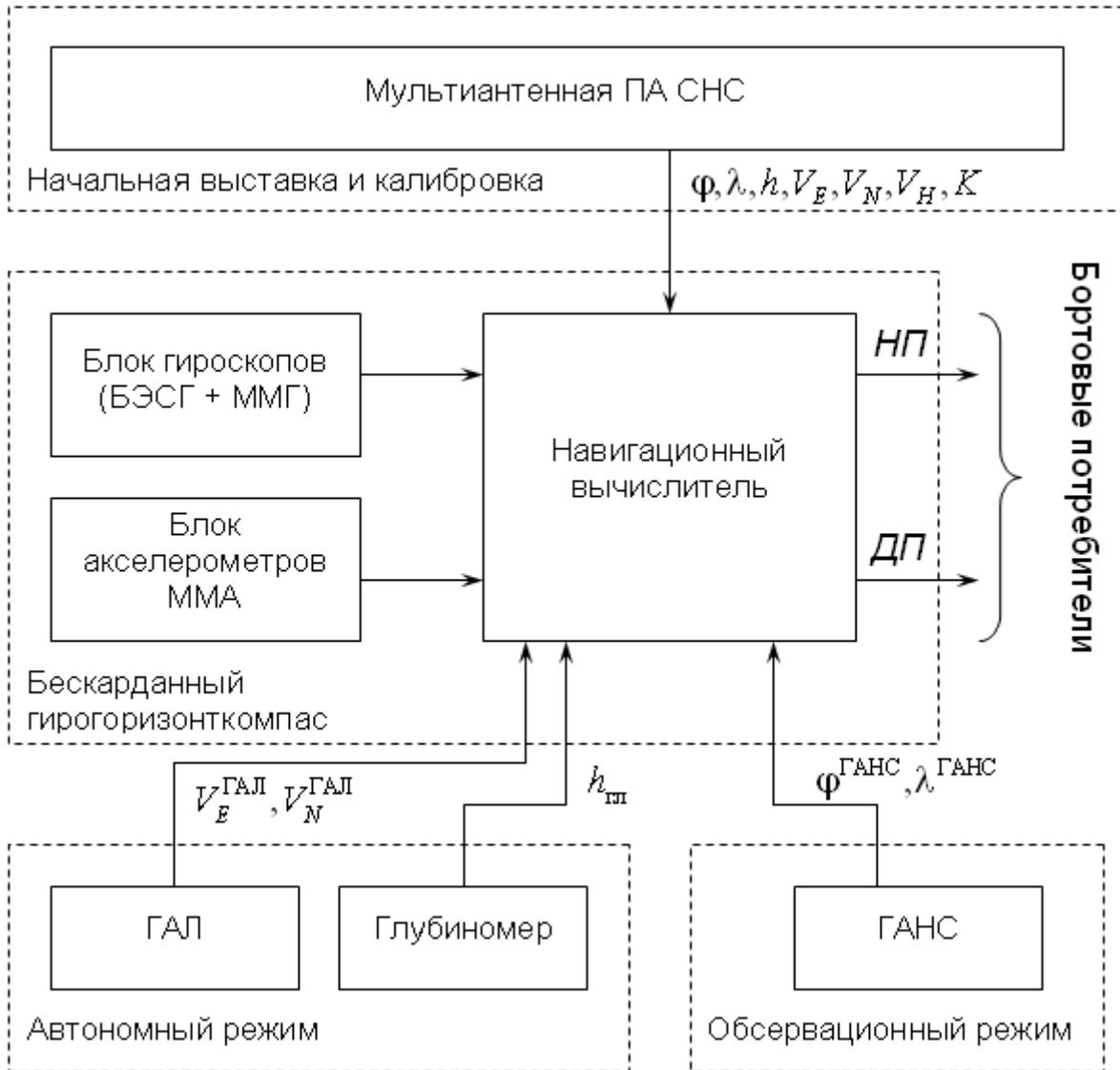


Рис.1. Структурная схема навигационной системы счисления пути
 ГАЛ – гидроакустический лаг, ГАНС – гидроакустическая навигационная система, ПА СНС – приемная аппаратура спутниковой навигационной системы, ММГ и ММА – микромеханические гироскопы и акселерометры, НП и ДП – навигационные и динамические параметры, φ, λ, h – географические координаты, V_E, V_N, V_H – составляющие линейной скорости объекта, K – курс, $V_E^{ГАЛ}, V_N^{ГАЛ}$ – составляющие линейной скорости, получаемые от ГАЛ, $\varphi^{ГАНС}, \lambda^{ГАНС}$ – географические координаты, вырабатываемые ГАНС, $h_{гп}$ – данные о высоте, поступающие от глубиномера

Глава 2 посвящена разработке алгоритмов работы и описанию конструкции ИСОН на основе бескарданного гиروهоризонткомпаса на БЭСГ и блоке ММД. Конструкция (рис. 2) состоит из следующих элементов: 1 – Корпус, 2 – Блок микромеханических датчиков + GPS-модуль, 3 – Бескарданный электростатический гироскоп, 4 – Блок питания датчиков угла, 5 – Блок питания подвеса, 6 – Блок раз-

гона и демпфирования, 7 – Блок управления подвеса, 8 – Спецвычислитель, 9 – Навигационный блок.

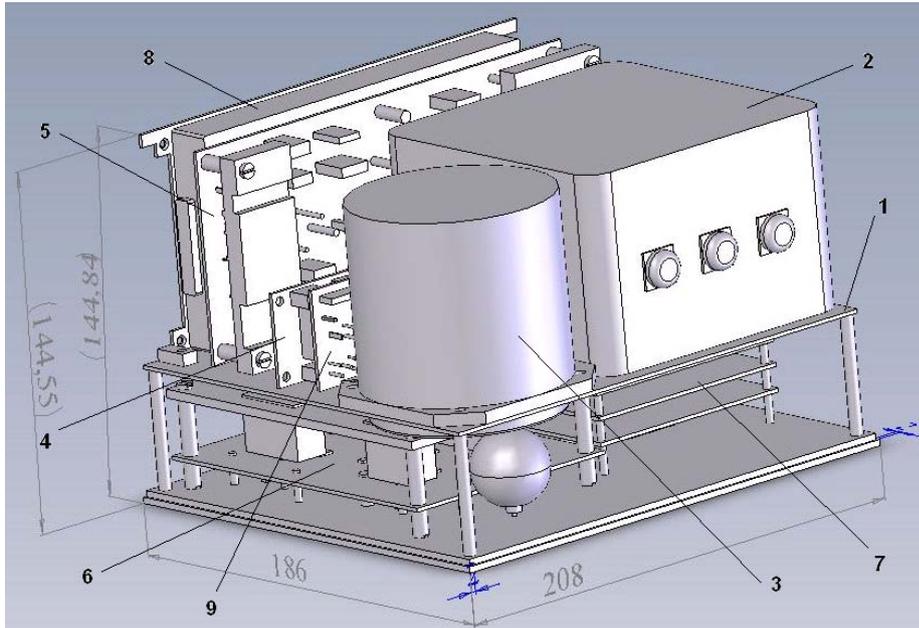


Рис 2. Конструкция гирогоризонткомпаса на БЭСГ и ММД (без крышки)

Схема алгоритма работы представлена на рис. 3.

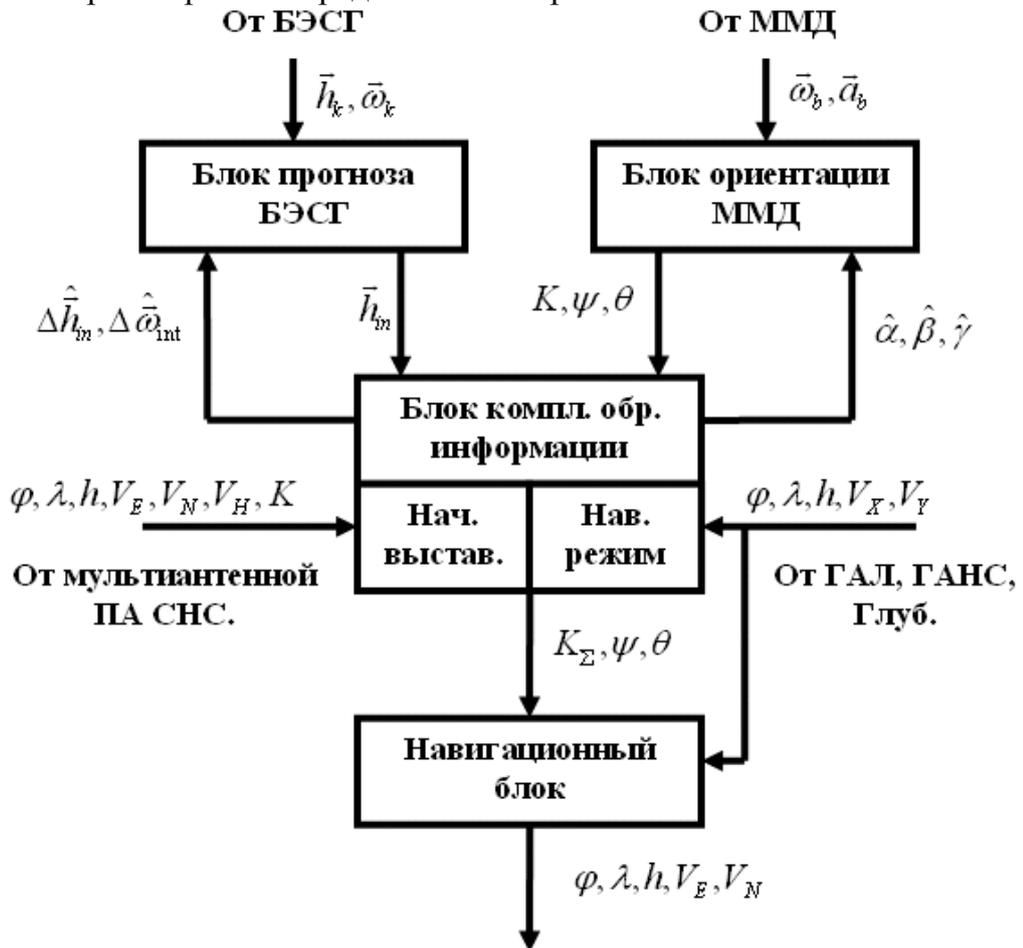


Рис 3. Схема алгоритма работы

Алгоритмы работы каждого из режимов представлены в виде следующих функциональных блоков:

- Блок формирования исходных данных;
- Блок ориентации, в котором решается задача ориентации;
- Навигационный блок (отвечает за выработку навигационных параметров);
- Блок фильтрации (формирование разностных измерений и выработка оценок).

Блок формирования исходных данных задает шаг дискретности поступления информации от чувствительных элементов и оценочного канала фильтра Калмана, модель Земного эллипсоида, а также начальные значения навигационных и динамических параметров морского подвижного объекта.

Блок, решающий задачу ориентации, в общем случае вырабатывает некоторые параметры, которые однозначно задают жестко связанную с твердым телом ортогональную систему координат по отношению к некоторой заранее заданной или выбранной. Решение заключается в вычислении параметров Родрига-Гамильтона и матрицы направляющих косинусов.

Навигационный блок вырабатывает кинематические параметры поступательного движения центра масс объекта в низкочастотной области спектра, которыми являются проекции вектора линейной скорости на связанные и навигационные оси, его координаты в навигационной системе координат, а также направление движения. Алгоритмы этого блока строятся на основе положений и методов инерциальной навигации.

Блок выработки оценок вектора состояния системы является ключевым элементом в алгоритме функционирования системы. Алгоритм строится на основе обобщенного фильтра Калмана и включает в себя следующие разностные измерения и векторы состояния для различных режимов работы:

1) Режим начальной выставки и калибровки блока на ММД с опорой на информацию, поступающую от приемной аппаратуры GPS.

Разностные измерения:

$$\begin{aligned} z_{VE} &= V_E - V_E^{GPS}; & z_\lambda &= \lambda - \lambda^{GPS}; \\ z_{VN} &= V_N - V_N^{GPS}; & z_h &= h - h^{et}; \\ z_\varphi &= \varphi - \varphi^{GPS}; & z_K &= K - K^{GPS}. \end{aligned}$$

Вектор состояния:

$$\mathbf{x} = \left[\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \Delta V_E \quad \Delta V_N \quad \Delta V_H \quad \Delta \varphi \quad \Delta \lambda \quad \Delta h \quad \Delta \bar{\omega}_{xb} \quad \Delta \bar{\omega}_{yb} \quad \Delta \bar{\omega}_{zb} \right. \\ \left. \Delta \bar{a}_{xb} \quad \Delta \bar{a}_{yb} \quad \Delta \bar{a}_{zb} \quad \Delta M_{gx} \quad \Delta M_{gy} \quad \Delta M_{gz} \right]^T,$$

где $\Delta \bar{\omega}_{xb}, \Delta \bar{\omega}_{yb}, \Delta \bar{\omega}_{zb}$ – систематические составляющие дрейфов гироскопов и $\Delta \bar{a}_{xb}, \Delta \bar{a}_{yb}, \Delta \bar{a}_{zb}$ – акселерометров, $\Delta M_{gx}, \Delta M_{gy}, \Delta M_{gz}$ – нестабильность масштабных коэффициентов гироскопов, α, β, γ – погрешность выработки параметров ориентации.

2) Режим начальной выставки БЭСГ с опорой на данные мультиантенной приемной аппаратуры спутниковой навигационной системы и блок ММД.

Разностные измерения:

$$z_1 = \cos \theta^R - \cos \theta;$$

$$z_2 = h_{int1}^R - h_{int1}^{et},$$

где z_1 - скалярное измерение, представляющее собой разность косинусов расчетного θ^R и измеренного θ угла между ортами векторов кинетических моментов «виртуального» и реального БЭСГ; z_2 - первый элемент вектора

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{h}_{int}^R - \mathbf{h}_{int}^{et}.$$

Здесь $\mathbf{h}_{int}^R, \mathbf{h}_{int}^{et}$ – расчетные (прогнозируемые) и эталонные значения орта реального БЭСГ в проекциях на оси квазиинерциальной системы координат, формируемые по данным об углах качки от инерциального модуля на ММД, курсе и координатах места от GPS.

Вектор состояния при полной модели дрейфов БЭСГ при калибровке коэффициентов модели ухода:

$$\mathbf{x} = [\Delta h_{int1} \quad \Delta h_{int2} \quad \Delta k_0 \quad \Delta \mu_1 \quad \Delta \mu_2 \quad \Delta \mu_3 \quad \Delta v_1 \quad \Delta v_2 \quad \Delta v_3 \quad \Delta h_{k1} \quad \Delta h_{k2} \quad \Delta h_{k3} \quad \Delta k_1 \quad \Delta k_2 \quad \Delta k_3 \quad \Delta k_4 \quad \Delta k_5 \quad \Delta k_6]^T,$$

где $\Delta k_0, \Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3, \Delta k_4, \Delta k_5, \Delta k_6, \Delta \mu_1, \Delta \mu_2, \Delta \mu_3, \Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3$ – погрешности определения коэффициентов модели ухода.

Вектор состояния упрощенной модели (при оценивании суммарных дрейфов):

$$\mathbf{x} = [\Delta h_{int1} \quad \Delta h_{int2} \quad \Delta h_{k1} \quad \Delta h_{k2} \quad \Delta h_{k3} \quad \Delta \omega_{int1} \quad \Delta \omega_{int\Sigma}]^T.$$

Упрощенная модель погрешностей уходов ЭСГ в квазиинерциальной системе координат:

$$\Delta \dot{h}_{int1}^R = -(\omega_{int3} + \omega_{int2} \cos \theta / \sin \theta) \Delta h_{int2}^R + \Delta \omega_{int\Sigma},$$

$$\Delta \dot{h}_{int2}^R = \omega_{int3} \Delta h_{int1}^R + (\omega_{int1} \cos \theta / \sin \theta) \Delta h_{int2}^R - \Delta \omega_{int1} \sin \theta,$$

$$\Delta \dot{\omega}_{int1} = w_1,$$

$$\Delta \dot{\omega}_{int\Sigma} = w_2,$$

$$\Delta \dot{h}_{k1} = w_3,$$

$$\Delta \dot{h}_{k2} = w_4,$$

$$\Delta \dot{h}_{k3} = w_5,$$

где $\Delta \omega_{int1}, \Delta \omega_{int\Sigma} = \sin \theta \cdot \Delta \omega_{int2} - \cos \theta \cdot \Delta \omega_{int3}$ – суммарные остаточные дрейфы БЭСГ, характеризующие погрешности калибровки коэффициентов модели ухода на стенде, их изменчивость от запуска к запуску и в текущем запуске, описываемые винеровскими процессами с заданными параметрами; $\Delta h_{k1}, \Delta h_{k2}, \Delta h_{k3}$ – погрешности списывающих устройств БЭСГ в корпусных осях, скачкообразно меняющиеся при переходе с одного датчика угла на другой и описываемые случайными постоянными.

3) Навигационный режим работы ИСОН.

Разностные измерения:

$$\begin{aligned} z_\varphi &= \varphi - \varphi^{\Gamma\text{АСП}}, & z_{VEL} &= V_E - V_E^{\Gamma\text{АЛ}}, & z_2 &= h_{\text{int}1}^R - h_{\text{int}1}^{et}. \\ z_\lambda &= \lambda - \lambda^{\Gamma\text{АСП}}, & z_{VNL} &= V_N - V_N^{\Gamma\text{АЛ}}, \\ z_h &= h - h^{\Gamma\text{Л}}, & z_1 &= \cos \theta^R - \cos \theta; \end{aligned}$$

Здесь эталонные значения $\mathbf{h}_{\text{int}}^{et}$ орта реального БЭСГ в проекциях на оси квазиинерциальной системы координат, формируются по данным об углах качки и курсе от инерциального модуля на ММД.

Вектор состояния:

$$\mathbf{x} = \left[\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \Delta V_E \quad \Delta V_N \quad \Delta V_H \quad \Delta \varphi \quad \Delta \lambda \quad \Delta h \quad \Delta \bar{\omega}_{xb} \quad \Delta \bar{\omega}_{yb} \quad \Delta \bar{\omega}_{zb} \quad \Delta \bar{a}_{xb} \quad \Delta \bar{a}_{yb} \quad \Delta \bar{a}_{zb} \quad \Delta M_{gx} \quad \Delta M_{gy} \quad \Delta M_{gz} \quad \Delta h_{\text{int}1} \quad \Delta h_{\text{int}2} \quad \Delta \omega_{\text{int}1} \quad \Delta \omega_{\text{int}\Sigma} \right]^T.$$

Глава 3 посвящена исследованию точности рассматриваемой интегрированной системы ориентации и навигации с помощью имитационного моделирования в пакете Matlab (Simulink).

В качестве исходных данных принимались следующие значения:

Для БЭСГ:

- начальная ориентация вектора кинетического момента БЭСГ – в плоскости земного экватора в навигационном режиме и полярная ориентация при точной начальной выставке с погрешностью выставки около 15', погрешности начальной калибровки коэффициентов его модели ухода – 0,01 °/ч.

Погрешности микромеханических гироскопов в проекциях на оси объекта:

- нестабильность масштабных коэффициентов – случайные величины с уровнем 0,3 %;
- систематические составляющие дрейфов, которые характеризуют смещение нулей от пуска к пуску – случайные величины с уровнем 40 °/ч;
- случайные составляющие дрейфов, которые характеризуют дрейф нуля в пуске – марковские процессы первого порядка $\sigma=6$ °/ч, $\mu=1/600$ (с⁻¹);
- флуктуационные составляющие дрейфов – дискретные белые шумы на рабочей частоте $\sigma=100$ °/ч.

Погрешности микромеханических акселерометров в проекциях на оси объекта:

- нестабильность масштабных коэффициентов линейных акселерометров – случайные величины с уровнем 1 %;
- смещение нулей – случайные величины с уровнем 0,01 м/с²;
- дрейфы нулей линейных акселерометров – марковские процессы первого порядка $\sigma=0,003$ м/с², $\mu=0,01$ (с⁻¹);
- флуктуационные составляющие погрешностей акселерометров – дискретные белые шумы на рабочей частоте $\sigma=0,1$ м/с².

Гидроакустический лаг:

- флуктуационные составляющие погрешностей $\sigma=0,1$ м/с.

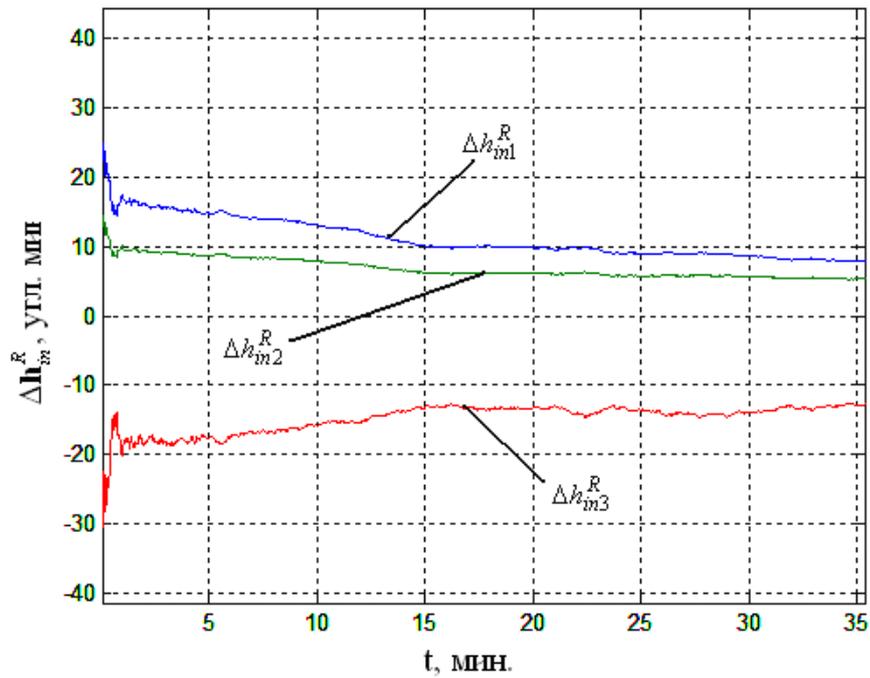


Рис. 4. Погрешности начальной выставки БЭСГ при оценке суммарного дрейфа

В случае упрощенной модели получаем существенное сокращение времени готовности при точности выставки вектора кинетического момента БЭСГ (рис. 4) в инерциальной системе координат в пределах 15'.

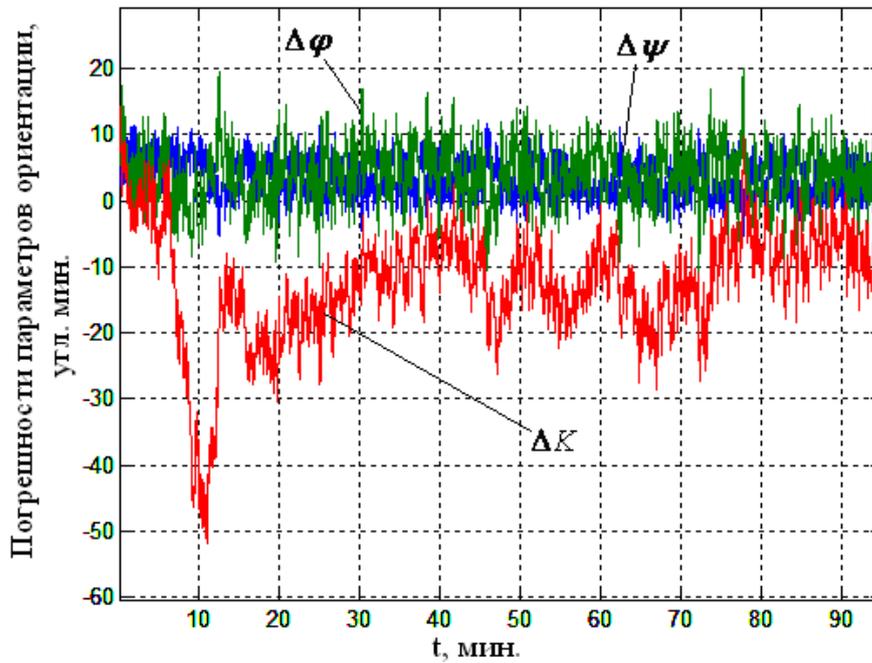


Рис. 5. Погрешности гирогоризонткомпыа по параметрам ориентации при работе в навигационном режиме

Погрешности измерительного блока (рис. 5) при принятых погрешностях БЭСГ и ММД не превышают: по курсу – $15'$, а по углам качки – $10'$.

В главе 4 анализируются погрешности системы с привлечением экспериментальных данных. Дается оценка точности и времени готовности ИСОН.

Рассматривается задача определения параметров ориентации объекта при интеграции поступающей информации от инерциального модуля на ММД и мультиантенной приемной аппаратуры спутниковой навигационной системы при запуске ИСОН в условиях подвижного объекта, которая сводится к задаче начальной выставки и калибровки измерительного блока. При оценке точности ИСОН использовались реальные данные мореходных испытаний.

Бескарданный инерциальный модуль (рис.6) состоит из корпуса, платы чувствительных элементов, на которой размещены ММД ф. Analog Devices (ADXRS150 и ADXL105): гироскопы с дрейфом уровня $0,1^\circ/\text{с}$, $0,07^\circ/\text{с}/\text{Гц}$ и акселерометры с погрешностями уровня $0,03 \text{ м}/\text{с}^2$, $0,02 \text{ м}/\text{с}^2/\text{Гц}$, обеспечивающая электроника, и плата, содержащая контроллер на базе сигнального процессора TMS320F2812, осуществляющего обработку навигационной информации.



Рис. 6. Бескарданный инерциальный измерительный модуль на ММД

Испытания проводились на Ладожском озере 24.07.09 г. При этом использовались измерения фазы на частоте 10 Гц от двух приемников – Ashtech G12 и «Котлин» (ОАО «РИРВ»). Приемные антенны GPS были расположены на судне на базе около 3,4 м. по поперечной оси.

Результаты испытаний приведены на рис. 7.

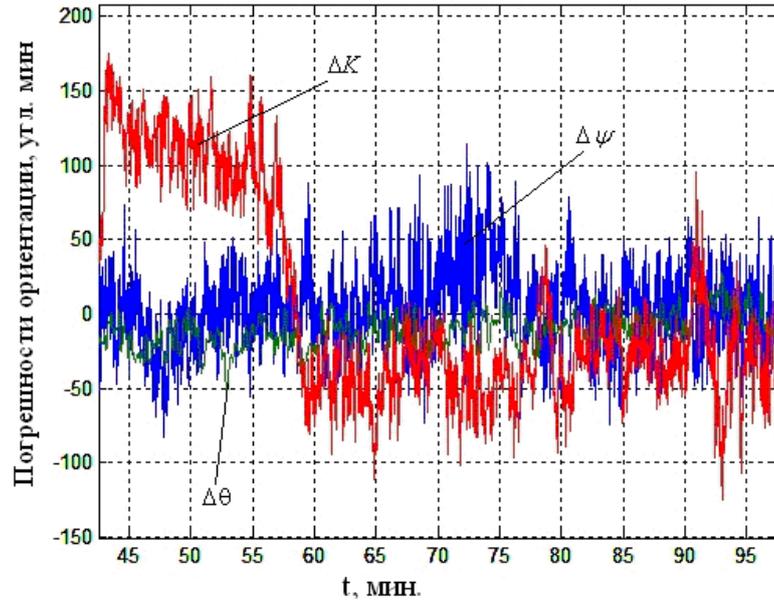


Рис.7. Погрешности ориентации на участке хода прямым курсом

Полученные результаты решения задачи ориентации объекта в рассматриваемой схеме построения ИСОН вызваны низкой точностью чувствительных элементов (гироскопы с дрейфом уровня $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$).

Результаты стендовых испытаний измерительного модуля на более точных датчиках угловых скоростей приведены на рис.8. Файлы записи результатов стендовых испытаний в нормальных климатических условиях и после прогрева прибора содержат данные (съем информации на частоте 1 кГц, интегрирование по Эйлеру на частоте 50 Гц) показаний трех датчиков угловых скоростей (VG 951, фирма «Физоптика», г. Москва), трех акселерометров (АК-10/4, фирма «Дельфин», г. Москва). Измерительный блок совершает вокруг оси z_b , ортогональной палубе, реверсные повороты $\pm 360^\circ$ (1 оборот – 5 мин.) с постоянной скоростью и ступенчатым изменением ее знака.

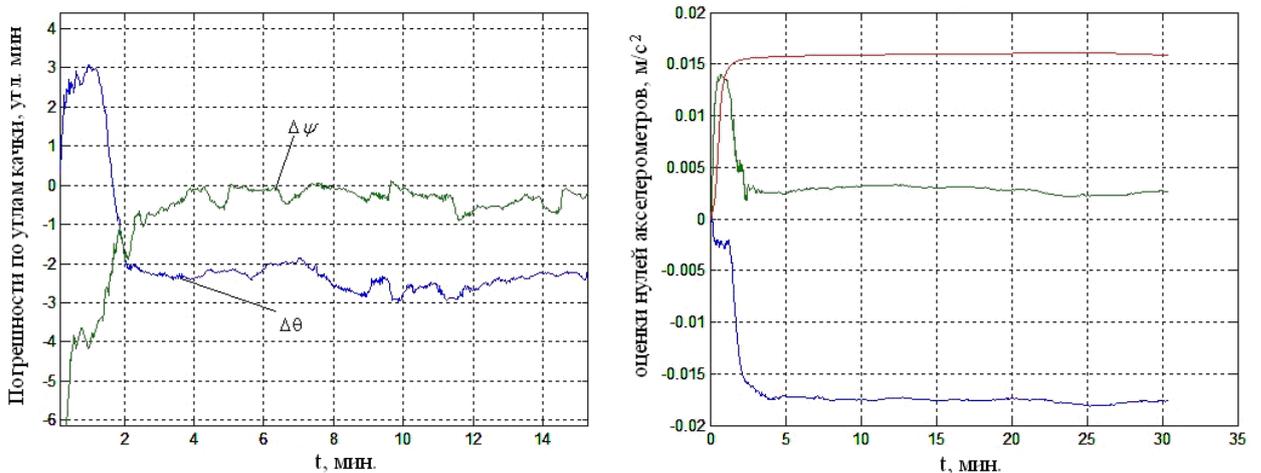


Рис. 8. Погрешности по углам качки и оценки нулей акселерометров

Приведены результаты (рис. 9, 10) стендовых испытаний БЭСГ (файлы записи результатов предоставлены ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»).

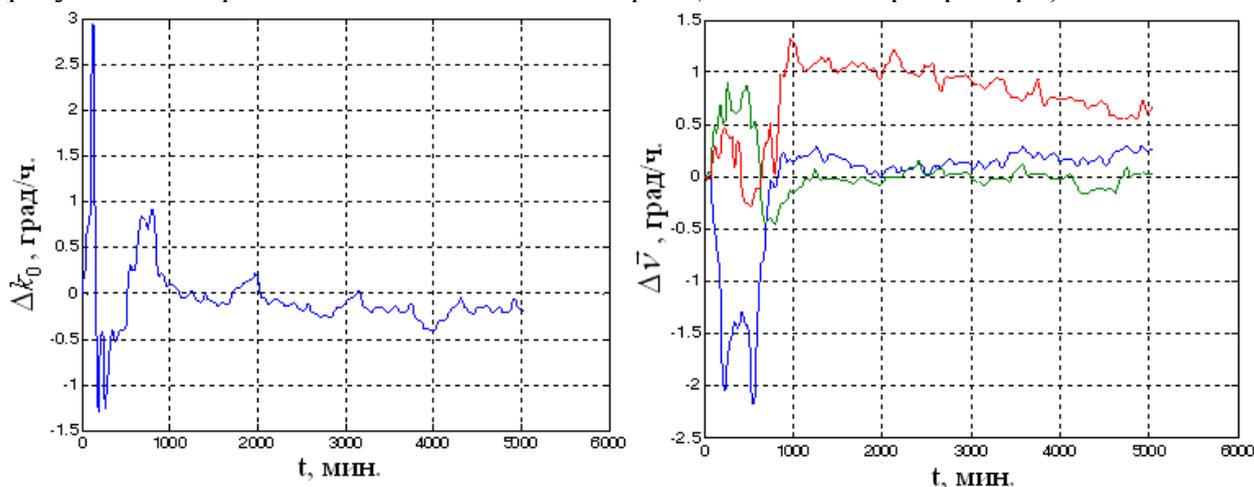


Рис. 9. Погрешность коэффициентов модели ухода k_0 и \vec{v}

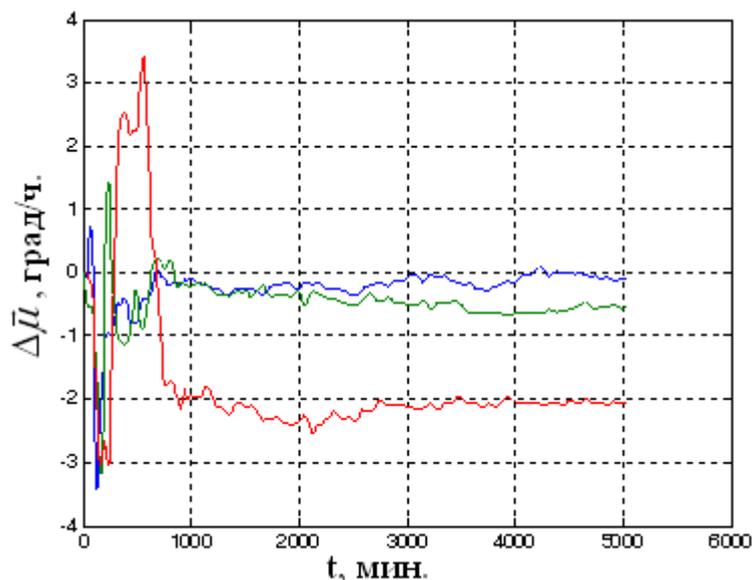


Рис. 10. Погрешность коэффициентов модели ухода $\vec{\mu}$

В результате анализа работы алгоритмов с реальными данными была проверена корректность использования созданных алгоритмов и принятых допущений. Это позволило оценить точность и время готовности предлагаемой ИСОН для подводных аппаратов. Погрешности гирогоризонткомпаса при использовании микромеханических гироскопов и акселерометров с дрейфами $0,01^\circ/с$ и $0,01м/с^2$ соответственно не выходят за пределы: по курсу – $15'$, а по углам качки – $10'$ в широтах, не превышающих 70° . В высоких широтах ИСОН работает в режиме хранения азимутального направления с погрешностью не более $0,01^\circ/ч$. При использовании упрощенной модели ухода БЭСГ и реализации только точной начальной выставки вектора его кинетического момента время готовности ИСОН не превышает 40 минут.

Результаты и выводы.

1. Предложена и обоснована новая схема построения гиригоризонткомпаса, использующая комплексирование информации, поступающей от БЭСГ и блока ММД;

2. Разработаны и исследованы алгоритмы начальной выставки и навигационного режима работы ИСОН, включающие формирование и линеаризацию измерений с использованием информации от измерительного блока, гидроакустического лага, глубиномера, приемной аппаратуры спутниковой и гидроакустической навигационной системы;

3. Предложена модель погрешностей гиригоризонткомпаса, содержащая описание суммарных дрейфов БЭСГ в квазиинерциальной системе координат и позволяющая решать задачу точной начальной выставки системы на ограниченном интервале времени;

4. Выработаны и обоснованы требования к точности БЭСГ и блоку ММД по результатам имитационного моделирования в пакете MATLAB (Simulink) алгоритмов функционирования ИСОН с привлечением реальных данных испытаний измерительных модулей:

- погрешности ИСОН при использовании БЭСГ с суммарным дрейфом $0,01^\circ/\text{ч}$, микромеханических гироскопов и акселерометров с дрейфами $0,01^\circ/\text{с}$ и $0,01\text{ м}/\text{с}^2$ соответственно не выходят за пределы: по курсу – $15'$, а по углам качки – $10'$ в широтах, не превышающих 70° ;
- в высоких широтах обеспечивается работа ИСОН в режиме хранения азимутального направления с погрешностью не более $0,01^\circ/\text{ч}$.

5. Разработано программное обеспечение функционирования ИСОН в пакете MATLAB (Simulink), позволяющее моделировать работу системы в различных режимах с использованием как модельных, так и реальных данных испытаний измерительных модулей;

6. Создана трехмерная модель и конструкция измерительного блока, что позволяет оценить массогабаритные характеристики прибора;

7. Разработаны методические указания и программное обеспечение для лабораторной работы по исследованию режимов работы гиригоризонткомпаса на БЭСГ и ММД при подготовке магистров по направлению интегрированных инерциально-спутниковых систем.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. А. В. Лочехин, Г. И. Емельянцев. Начальная выставка и калибровка бескарданного гиригоризонткомпаса на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2009. №5. С.62–69.

2. А. В. Лочехин., Г. И. Емельянцев. Погрешности бескарданного гиригоризонткомпаса на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. СПбГУ ИТМО. 2010. №10. С.42–48.

3. А. В. Лочехин. Проблемы построения корабельных интегрированных систем ориентации и навигации // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2008. № 47. С.151–160.

Другие статьи и материалы конференций:

4. Интегрированная система ориентации и навигации на основе бескарданного электростатического гироскопа и микромеханических датчиков: пат. 87518 Рос. Федерация: МПК G01C21/16/ Лочехин А. В.; заявитель и патентообладатель Лочехин А. В. - № 2009111305/22; заявл. 19.03.09; опубл. 10.10.09.

5. А. В. Лочехин. Гиригоризонткомпас на базе бескарданного электростатического гироскопа и блока микромеханических датчиков // Сборник трудов «V ВСЕРОССИЙСКАЯ МЕЖВУЗОВСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ» С.26–30.

6. А. В. Лочехин. Начальная выставка и калибровка гиригоризонткомпаса на базе бескарданного электростатического гироскопа и блока микромеханических датчиков // Сборник трудов «VI ВСЕРОССИЙСКАЯ МЕЖВУЗОВСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ» С.41–44.

7. А. В. Лочехин. О погрешностях бескарданного гиригоризонткомпаса на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках // Сборник трудов «XI конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» С.15–20.

8. А. В. Лочехин, Г. И. Емельянцев, Б. А. Блажнов., А. П. Степанов. О разработке курса в интегрированной навигационной системе, использующей блок микромеханических датчиков и мультиантенную приемную аппаратуру GPS/ГЛОНАСС // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. СПбГУ ИТМО. 2010. (отдано в печать).