

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**

Механико-математический факультет
Кафедра прикладной механики и управления
Лаборатория управления и навигации

На правах рукописи

Сазонов Игорь Юрьевич

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
БЕСКАРДАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ
НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ПРИ ПОМОЩИ
ГРУБЫХ ОДНОСТЕПЕННЫХ СТЕНДОВ**

Специальность 01.02.01 — теоретическая механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2012 г.

Работа выполнена на кафедре прикладной механики
и управления механико-математического факультета
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научные руководители:	доктор физико-математических наук, профессор	Н.А. Парусников
	кандидат физико-математических наук, в.н.с.	Н.Б. Вавилова
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор	А.В. Шаронов
	кандидат физико-математических наук	А.В. Фомичев
Ведущая организация:	Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФГУП ГосНИИАС)	

Защита диссертации состоится 14 декабря 2012 года в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.22 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, механико-математический факультет, аудитория 16-10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке механико-математического факультета МГУ по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, механико-математический факультет, 14 этаж.

Автореферат разослан 14 ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

В.А. Прошкин

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Бескарданные инерциальные системы навигации постоянно совершенствуются, развиваются методы и основанные на них алгоритмы обработки первичной инерциальной информации. Важнейшей задачей является компенсация инструментальных погрешностей, поскольку их воздействие приводит к накоплению навигационных ошибок, снижающих длительность автономного функционирования инерциальных навигационных систем. Для определения параметров инструментальных погрешностей (кратко это называется калибровкой) разрабатываются способы обработки результатов лабораторных испытаний с использованием высокоточного дорогостоящего стендового оборудования. Но в лаборатории управления и навигации МГУ с участием автора была предложена методика, позволяющая получать высокий уровень точности калибровки в том числе и на грубых стендах. Таким образом, разработка методов и алгоритмов калибровки на грубых стендах является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы и направления исследования

Целью работы является создание методики и построение программного обеспечения для определения параметров математической модели инструментальных погрешностей бескарданных инерциальных навигационных систем (БИНС). При этом предполагается использование грубых одностепенных стендов с различной ориентацией оси вращения.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов

В работе используются методы теоретической механики, теории инерциальной навигации, оптимального оценивания, линейной алгебры, аналитической геометрии, элементы теории случайных процессов. Исходные модели инструментальных погрешностей являются общепринятыми. Разработанные алгоритмы проверены при обработке реальных измерительных данных, а также путем полунатурного моделирования. Полученные при этом результаты согласуются с ожидаемыми.

Научная новизна работы и полученные результаты

В диссертационной работе:

1. Предложено для калибровки БИНС использовать грубые стенды. При этом калибровку предполагается осуществлять не для каждого типа датчиков (ньютонметров и датчиков угловой скорости) отдельно, а для системы в сборе.

2. Для задачи калибровки бескарданной навигационной системы на одностепенном стенде разработаны метод и математические модели калибровки. Обоснован выбор плана калибровочного эксперимента, обеспечивающего высокую обусловленность задачи оценивания. В отличие от известных ранее способов решения задачи, необходимые эволюции легко реализуемы для большинства типов стендов, включая грубые, поскольку информация от датчиков стенда не используется.
3. Исследована зависимость точности калибровки от программных вращений, осуществляемых посредством управления платформой стенда.
4. Алгоритм калибровки распространен на случай смещения блока ньютометров относительно оси вращения стенда¹. Таким образом алгоритм приобретает методическую целостность, поскольку из требований к проведению калибровочного эксперимента исключается необходимость близкого расположения чувствительных масс ньютометров к оси вращения стенда.
5. Предложен способ оценивания параметров взаимного разнесения чувствительных масс ньютометров путем незначительной модификации плана калибровочного эксперимента, не повышающей требований к его проведению. Алгоритмическая компенсация этого разнесения позволяет существенно уменьшить ошибки навигационного счисления для маневренных летательных аппаратов.

Теоретическая и практическая ценность

Теоретическая ценность работы заключается в построении математических моделей калибровки БИНС в сборе на грубых одностепенных стендах. Полученные в работе результаты служат обоснованием принципиальной возможности использования разработанных на основе этих моделей метода и алгоритмов для серийной обработки данных калибровочных экспериментов.

Практическая ценность работы заключается в том, что она дает руководство по проведению и обработке при помощи предложенных алгоритмов данных калибровочных экспериментов на грубых стендах, позволяет создавать для этого необходимое программное обеспечение, подстраивая его под конкретный тип инерциальных датчиков.

Результаты работы могут быть применены и в какой-то мере уже используются для автоматизации технологического процесса калибровки БИНС на специализированных предприятиях приборостроительных отраслей промышленности, таких как Московский институт электромеханики и автоматики (МИЭиА), Государственный научно-исследовательский институт

¹данный результат получен соискателем совместно с к.ф.-м.н. Козловым А.В.

авиационных систем (ГосНИИАС), Пермская научно-производственная приборостроительная компания (ПНППК), ЗАО «Инерциальные технологии „Технокомплекса“» и др.

Апробация работы

По материалам диссертации были сделаны следующие доклады на научно-технических семинарах и конференциях:

1. *Вавилова Н.Б., Парусников Н.А., Сазонов И.Ю. (докладчик — Парусников Н.А.) Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем при помощи грубых одностепенных стендов. // Международная конференция „Современные проблемы математики, механики и их приложений“.* Москва, 30 марта — 2 апреля 2009.
2. *Сазонов И.Ю., Шаймарданов И.Х. (докладчик — Шаймарданов И.Х., инж. ЗАО „ИТТ“)* Калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы на микромеханических датчиках акселерометров и гироскопов. // *Вторая конференция молодых ученых и специалистов Московского отделения международной общественной организации „Академия навигации и управления движением“.* Москва, ФГУП ЦНИИ автоматики и гидравлики, 30 сентября 2009.
3. *Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А., Сазонов И.Ю. (докладчик — Сазонов И.Ю.)* Калибровка бескарданной инерциальной навигационной системы в сборе на грубых одностепенных стендах. // *XVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам.* Санкт-Петербург, ГНЦ ЦНИИ „Электроприбор“, 31 мая — 2 июня 2010.
4. *Сазонов И.Ю.* Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем в сборе при помощи грубых одностепенных стендов. // *XIX международный научно-технический семинар „Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации“.* Алушта, сентябрь 2010.
5. *Сазонов И.Ю.* Задача идентификации параметров инструментальных погрешностей (калибровки) бескарданной инерциальной навигационной системы в сборе при помощи грубых одностепенных стендов. // *Семинар им. А.Ю. Ишлинского по прикладной механике и управлению кафедры прикладной механики и управления МГУ.* Москва, МГУ, 24 октября 2012.

Публикации

По теме диссертации опубликовано пять работ, из них две — в журналах, включенных ВАК в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и

изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций. Перечень опубликованных работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, трех глав, перечня основных результатов и списка литературы. Общий объем составляет 86 страниц. Список литературы содержит 39 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении говорится о месте работы среди исследований по аналогичной тематике, дан обзор существующей литературы, обоснована актуальность темы, даны общие постановки и описаны подходы к решению рассмотренной в диссертации задачи. Также описана структура работы, перечислены публикации в научных изданиях и доклады по теме работы.

В первой главе показана возможность решения задачи калибровки БИНС при помощи грубых одностепенных стендов. Задача решается в наиболее общей постановке, поэтому полученные в первой главе выводы не привязаны к конкретным характеристикам навигационных систем.

Общая постановка задачи. Используются понятия приборного трехгранника Mz (ортогонального трехгранника, в проекциях на оси которого измеряется удельная сила, действующая на приведенную чувствительную массу блока ньютометров), его численного образа — модельного трехгранника Mu , а также географического трехгранника Mx . Через \hat{a} обозначается кососимметрическая матрица, соответствующая вектору $a = (a_1, a_2, a_3)^T$:

$$\hat{a} = \begin{pmatrix} 0 & a_3 & -a_2 \\ -a_3 & 0 & a_1 \\ a_2 & -a_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Измерения датчиков угловой скорости (ДУС) и ньютометров служат исходной информацией для калибровки:

$$\begin{aligned} \omega'_z &= \omega_z - (\nu_z + \nu_z^{(s)}) \\ f'_z &= f_z + \Delta f_z + \Delta f_z^{(s)} \end{aligned}$$

Где $\nu_z, \Delta f_z$ — систематические составляющие погрешностей ДУС и ньютометров при измерении ω'_z и f'_z векторов угловой скорости ω_z приборного трехгранника и удельной силы f_z , действующей на приведенную чувствительную массу блока ньютометров; $\nu_z^{(s)}, f_z^{(s)}$ — случайные составляющие погрешностей ДУС и ньютометров типа белого шума. Для систематических составляющих ошибок принимается параметризованная математическая модель и цель калибровки — определить параметры этой модели.

Математические модели калибровки БИНС составляют:

- модельные кинематические уравнения БИНС (кинематические уравнения Пуассона);
- кинематические уравнения ошибок БИНС;
- уравнения корректирующих измерений;

- модели инструментальных погрешностей.

Модельные кинематические уравнения служат для определения ориентации приборного трехгранника:

$$\dot{L}_y = \hat{\omega}'_z L_y - L_y \hat{u}_x$$

Здесь L_y — матрица ориентации модельного трехгранника My относительно географического трехгранника Mx , ω'_z — его абсолютная угловая скорость, $u_x = (0, u \cos \varphi, u \sin \varphi)^T$, где u — угловая скорость вращения Земли, φ — широта места.

Уравнения ошибок БИНС имеют вид:

$$\dot{\beta}_y = \hat{\omega}'_z \beta_y + \nu_z + \nu_z^{(s)}$$

Здесь β_y — вектор малого поворота, определяющий ориентацию трехгранника Mz относительно трехгранника My .

Корректирующие измерения строятся на базе сигналов ньютометров. Модель измерений представляется в виде:

$$\sigma_y = \frac{1}{g}(f'_z L_y f_x) = -\hat{L}_3 \beta_y + \frac{1}{g}(\Delta f_z + \Delta f_z^{(s)})$$

где $L_3 = (L_{13}, L_{23}, L_{33})^T$ - третий столбец матрицы L_y .

При этом принята следующая *модель инструментальных погрешностей*:

$$\Delta f_z = \Delta f_z^0 + \Gamma f_z, \quad \Gamma = \begin{pmatrix} \Gamma_{11} & 0 & 0 \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & 0 \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} \end{pmatrix}$$

$$\nu_z = \nu_z^0 + \Theta \omega_z, \quad \Theta = \begin{pmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & \Theta_{13} \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & \Theta_{23} \\ \Theta_{31} & \Theta_{32} & \Theta_{33} \end{pmatrix}$$

Здесь ν_z^0 и Δf_z^0 - погрешности нулей ДУС и ньютометров, Γ_{ii} и Θ_{ii} , $i = 1, 2, 3$ - погрешности масштабов, Γ_{ij} и Θ_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$, ($i \neq j$) - погрешности неортогональности осей чувствительности (перекосы). Проведенный в диссертации *анализ наблюдаемости* показал, что при наличии трех циклов калибровки, на каждом из которых одна из трех осей приборного трехгранника БИНС совмещается с осью вращения стенда, все введенные параметры инструментальных погрешностей наблюдаемы в случае стенда с горизонтальной осью вращения. На рис. 1 показаны составляющие модели инструментальных погрешностей, наблюдаемые по совокупности измерений на одном, двух и трех циклах калибровки.

Таким образом, задача сводится к построению оценок вектора состояния линейной динамической системы при помощи вектора измерений σ_y , линейно зависящего от компонент вектора состояния, если математическая

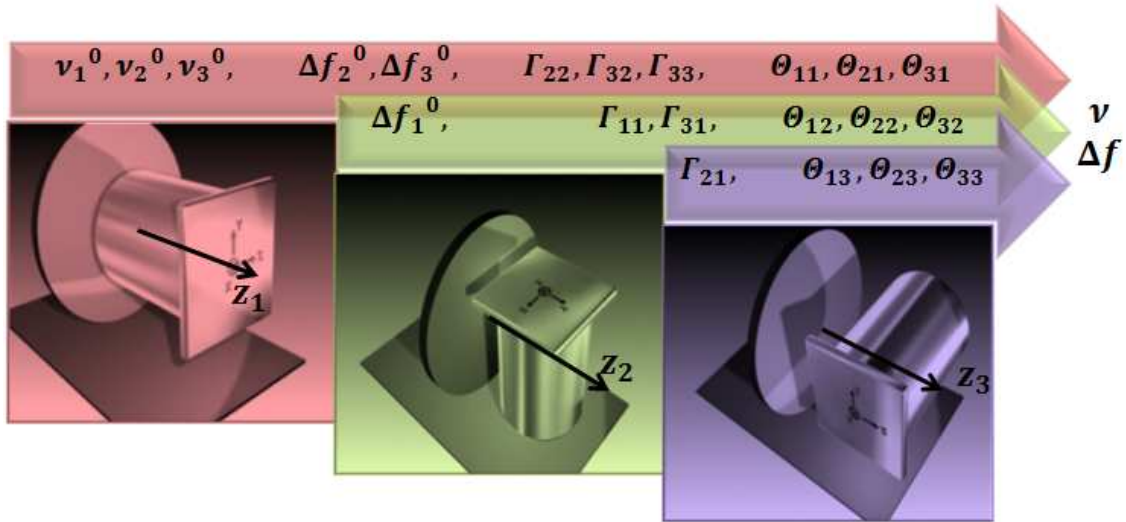


Рис. 1: Наблюдаемость параметров инструментальных погрешностей БИНС при наличии одного, двух и трех циклов калибровки

модель инструментальных погрешностей линейно зависит от совокупности неизвестных параметров, полагаемых константами. Каждый из таких параметров c удовлетворяет формирующему уравнению $\dot{c} = 0$ и вместе с компонентами вектора β_y образует оцениваемый вектор состояния системы. Для оценивания применяется алгоритм калмановской фильтрации. Моделирование ковариационных соотношений фильтра Калмана подтвердило наблюдаемость всех параметров введенной модели инструментальных погрешностей при наличии упомянутых выше трех циклов калибровки. В ходе численного моделирования процесса калибровки были приняты следующие априорные среднеквадратические погрешности для оцениваемых параметров: $\sigma_{v^0} = 0, 1^\circ/\text{час}$, $\sigma_{\Delta f^0} = 0.0006g$, $\sigma_{\Gamma_{ii}} = 10^{-3}$, $\sigma_{\Gamma_{ij}} = 3'$, $\sigma_{\Theta_{ii}} = 10^{-3}$, $\sigma_{\Theta_{ij}} = 3'$. Угловая скорость вращения стенда задавалась типа меандра равной $\pm 1^\circ/\text{сек}$.

Оценка качества калибровки проводилась посредством учета ковариаций ошибок оценки параметров инструментальных погрешностей при моделировании точности решения навигационной задачи на специальной траектории — так называемой „змейке“, в движении по которой проявляются все составляющие инструментальных погрешностей: $V_e = V \cos \psi$, $V_n = V \sin \psi$, угол курса $\psi(t) = \psi_0 + A_0 \sin \frac{2\pi t}{T_0}$, где V_e , V_n - восточная и северная компоненты скорости движения, $V = 200$ м/с, $\psi_0 = \frac{\pi}{4}$, $A_0 = \frac{\pi}{3}$, $T_0 = 480$ с. Координированность поворотов на змейке имитировалась заданием угла крена γ в виде

$$\gamma = \arctan \frac{\dot{\psi}V}{g}.$$

Эффективность калибровки оценивалась по максимальной ошибке БИНС

в определении местоположения, мерой которой принята величина $\rho = a\sqrt{\sigma^2(\Delta\lambda \cos \varphi) + \sigma^2(\Delta\varphi)}$ на интервале движения. Здесь a — длина большой полуоси навигационного эллипсоида, $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ — ошибки в определении широты и долготы.

В случае, когда все инструментальные погрешности, за исключением случайных составляющих, отсутствуют, предельная точность за час движения составляет 200 (400) м при СКО дискретных белых шумов в ДУС $\sigma_{\nu(s)}$, равной 0,1 (0,3) °/час (на частоте 1 Гц).

Результаты моделирования приведены в таблице 1.

Время калибровки, мин		0	3×6	3×12	3×18	3×24	3×30
$\sigma_{\nu(s)}$, °/час							
0,1	ρ , км	15,7	7,2	3,5	2,5	2,0	1,8
0,3		15,7	8,5	6,0	5,0	4,3	3,9

Таблица 1: Зависимость ошибки определения местоположения БИНС от продолжительности калибровки

Численное моделирование задачи показывает, что при тех же начальных условиях, интенсивностях шумов и на той же траектории, что и выше, результаты калибровки на стендах с вертикальной осью вращения после их учета в режиме навигации приводят к бóльшим погрешностям. Именно, максимальная ошибка определения местоположения меняется от 8,3 км ($\sigma_{\nu(s)} = 0,1^\circ/\text{час}$) и 8,9 км ($\sigma_{\nu(s)} = 0,3^\circ/\text{час}$) при времени калибровки 18 мин до 7,3 км ($\sigma_{\nu(s)} = 0,1^\circ/\text{час}$) и 7,5 км ($\sigma_{\nu(s)} = 0,3^\circ/\text{час}$) при 90 мин. Таким образом, точность калибровки на стендах с вертикальной осью вращения существенно ниже, чем на стендах с горизонтальной.

Выводы к первой главе:

- Разработанный алгоритм калибровки строится таким образом, что в нем не используется информация от датчиков стенда.
- Калибровочный эксперимент, состоящий из трех циклов, на каждом из которых одна из приборных осей БИНС совмещается с горизонтальной осью вращения грубого стенда, обеспечивает приемлемую точность калибровки.
- Стенды с вертикальной осью вращения для калибровки мало пригодны.

Во второй главе алгоритм калибровки распространен на случай разнесения чувствительных масс ньютометров, часто имеющий место на практике.

Постановка задачи.

В первой главе математическая модель калибровки строилась в предположении, что чувствительные массы ньютометров расположены на оси вращения стенда. В этом предположении на каждую чувствительную массу действует измеряемая ньютометром сила реакции $f_z = -g_z$. При наличии пространственного разнесения чувствительных масс ньютометров в показаниях ньютометров следует учесть поправки — $f_{iz}^{cp} = \hat{\omega}_z^2 r_i$ и $f_{iz}^t = -\hat{\omega}_z r_i$. Здесь r_i — радиус-вектор чувствительной массы i -го ньютометра в трехграннике Sz , начало которого совпадает с началом географического трехгранника, а оси параллельны соответствующим осям приборного трехгранника. При этом начало географического трехгранника лежит на оси вращения стенда. Что касается составляющих f_{iz}^t , то они представляются в виде $f_{iz}^t = -\hat{\Omega}_z r_i - \hat{u}_z r_i$, и допустимо пренебрежение первым слагаемым на интервалах, где Ω_z постоянна, в предположении редких быстрых изменений угловой скорости в процессе эксперимента. Аддитивная добавка к вектору измерения f'_z , порожденная смещением чувствительных масс ньютометров относительно оси вращения стенда, примет вид

$$\begin{aligned}
f_z^{cp} + f_z^t &= \begin{bmatrix} ((\hat{\omega}_z^2 - \widehat{\omega}_z u_z) r_1)_1 \\ ((\hat{\omega}_z^2 - \widehat{\omega}_z u_z) r_2)_2 \\ ((\hat{\omega}_z^2 - \widehat{\omega}_z u_z) r_3)_3 \end{bmatrix} = \\
&= - \begin{bmatrix} (\omega_2^2 + \omega_3^2) r_{11} & - \omega_1 \omega_2 r_{12} & - \omega_1 \omega_3 r_{13} \\ -\omega_1 \omega_2 r_{21} & + (\omega_1^2 + \omega_3^2) r_{22} & - \omega_2 \omega_3 r_{23} \\ -\omega_1 \omega_3 r_{31} & - \omega_2 \omega_3 r_{32} & + (\omega_1^2 + \omega_2^2) r_{33} \end{bmatrix} - \\
&- \begin{bmatrix} 0 & + (-\Omega_1 u_2 + u_1 \Omega_2) r_{12} & + (-\Omega_1 u_3 + u_1 \Omega_3) r_{13} \\ (\Omega_1 u_2 - u_1 \Omega_2) r_{21} & + 0 & + (-\Omega_2 u_3 + u_2 \Omega_3) r_{23} \\ (\Omega_1 u_3 - u_1 \Omega_3) r_{31} & + (\Omega_2 u_3 - u_2 \Omega_3) r_{32} & + 0 \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{1}$$

Здесь r_{ij} — j -ая координата i -ой чувствительной массы в трехграннике Sz . Величины r_{ij} постоянны в течение одного цикла калибровки, поскольку БИНС жестко закреплена на платформе стенда. В случае, когда они известны, вклад сил инерции компенсируется в уравнениях измерений путем замены f'_z на $f'_z - f_z^{cp} - f_z^t$, а в остальном алгоритм оценивания остается прежним. Если же величины r_{ij} неизвестны, то они включаются в оцениваемый вектор состояния динамической системы.

Учет смещения инерциального измерительного блока относительно оси вращения стенда при калибровке.

Вначале рассматривается частный случай — предположение малости членов $\omega_l \omega_m (r_{ij} - r_{kj})$. Он имеет конкретную физическую интерпретацию — смещение инерциального измерительного блока относительно оси вращения значительно

превышает расстояния между чувствительными массами ньютонометров. Имеем

$$f_z^{cp} + f_z^{tt} = - \begin{bmatrix} (\omega_2^2 + \omega_3^2)r_{11} & - \omega_1\omega_2r_{22} & - \omega_1\omega_3r_{33} \\ -\omega_1\omega_2r_{11} & + (\omega_1^2 + \omega_3^2)r_{22} & - \omega_2\omega_3r_{33} \\ -\omega_1\omega_3r_{11} & - \omega_2\omega_3r_{22} & + (\omega_1^2 + \omega_2^2)r_{33} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & + (-\Omega_1u_2 + u_1\Omega_2)r_{22} & + (-\Omega_1u_3 + u_1\Omega_3)r_{33} \\ (\Omega_1u_2 - u_1\Omega_2)r_{11} & + 0 & + (-\Omega_2u_3 + u_2\Omega_3)r_{33} \\ (\Omega_1u_3 - u_1\Omega_3)r_{11} & + (\Omega_2u_3 - u_2\Omega_3)r_{22} & + 0 \end{bmatrix}.$$

Обозначив $r_{ii} = s_i$, получим уточненную модель калибровки, включающую в себя ту же линейную динамическую систему с добавленными к ней формирующими уравнениями $\dot{s}_i = 0$, вектор состояния которой, с включенными в него параметрами s_i , подлежит оцениванию при помощи вектора измерений

$$\sigma_x = \hat{\beta}_x(0, 0, 1)^T + \frac{1}{g}L_y^T(\Delta f_z^0 + \Gamma f_z + \Phi(s_1, s_2, s_3)^T + \Delta f_z^{(s)}),$$

где

$$\Phi = - \begin{bmatrix} \omega_2^2 + \omega_3^2 & -\omega_1\omega_2 - \Omega_1u_2 + u_1\Omega_2 & -\omega_1\omega_3 - \Omega_1u_3 + u_1\Omega_3 \\ -\omega_1\omega_2 + \Omega_1u_2 - u_1\Omega_2 & \omega_1^2 + \omega_3^2 & -\omega_2\omega_3 - \Omega_2u_3 + u_2\Omega_3 \\ -\omega_1\omega_3 + \Omega_1u_3 - u_1\Omega_3 & -\omega_2\omega_3 + \Omega_2u_3 - u_2\Omega_3 & \omega_1^2 + \omega_2^2 \end{bmatrix}.$$

Погрешность нуля ньютонометра $\varepsilon_i^0 = \Delta f_i^0/g$ (в первой главе показана наблюдаемость на k -м цикле величин ε_i^0 при $i \neq k$) входит в измерение теперь в сумме с линейной комбинацией, в которую помимо величин, наблюдаемость которых показана в первой главе, входят величины $\Phi_{ij}s_j$ — параметры s_j с элементами матрицы Φ в качестве коэффициентов при этих параметрах. Для наблюдаемости каждого слагаемого из этой суммы в отдельности необходимо изменение коэффициента $\omega_k^2 + \omega_i^2$. Это достигается, например, путем задания угловой скорости вращения стенда в виде гармонической функции. Для стендов, способных реализовывать исключительно постоянную угловую скорость, возможно задание угловой скорости типа сложного меандра: при очередной перемене знака угловой скорости ее модуль увеличивается на некоторую величину.

О мере оцениваемости параметров s_j можно судить по результатам численного моделирования, приведенным на рис. 2 для двух вариантов задания угловой скорости вращения стенда: в виде простого и сложного меандра.

Отметим, что задание угловой скорости вращения стенда в виде сложного меандра позволяет наряду с оцениванием параметров s_j достигнуть той же точности оценивания смещений нулей акселерометров ε_i^0 , которая была достигнута при моделировании в первой главе в отсутствие предположения о

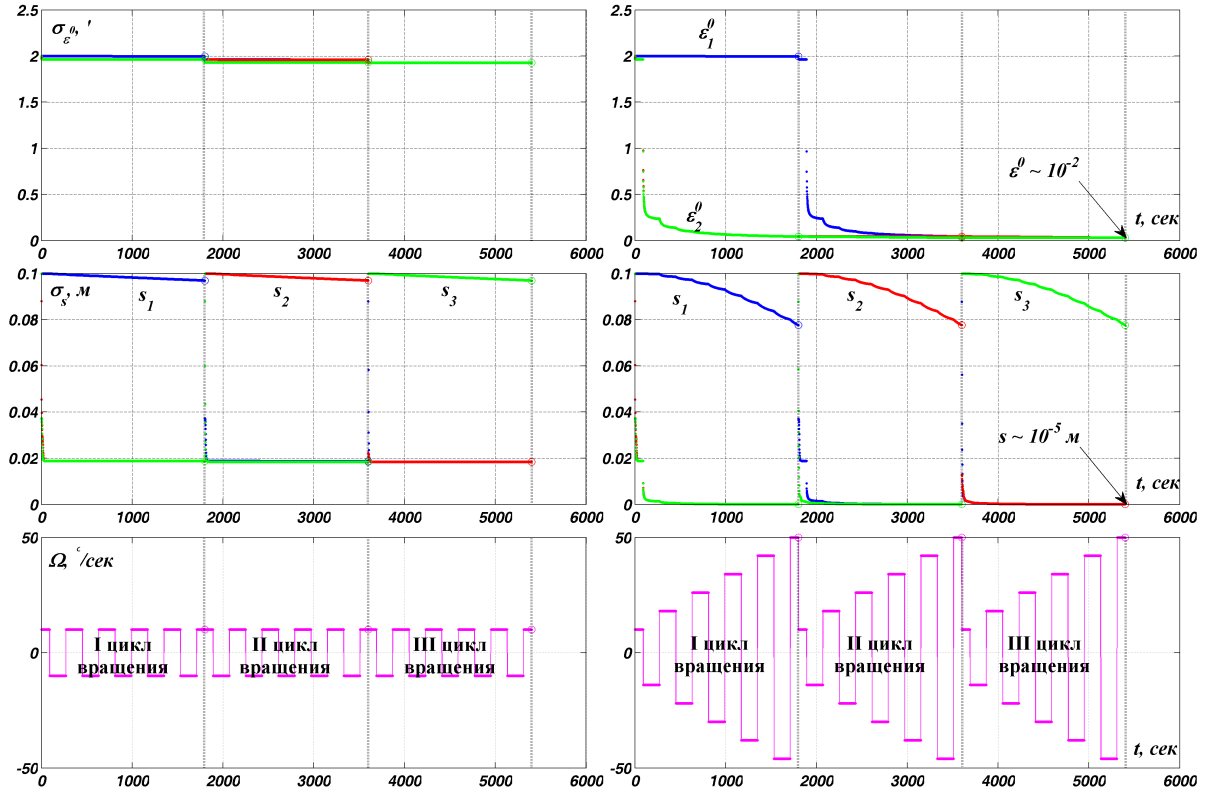


Рис. 2: СКО ошибок оценок $\varepsilon_1^0, \varepsilon_2^0, \varepsilon_3^0$ и s_1, s_2, s_3 при двух режимах управления платформой стенда

разнесении чувствительных масс ньютонометров относительно оси вращения стенда.

Задача оценивания дополненного параметрами s_j вектора состояния решается в рамках описанных ранее трех стандартных циклов калибровки.

Оценивание параметров пространственного разнесения чувствительных масс ньютонометров.

Представим радиус-векторы чувствительных масс ньютонометров в трехграннике Sz r_i в виде суммы $r_i = h + \rho_i$, где h — радиус-вектор приведенной чувствительной массы блока ньютонометров M в трехграннике Sz . Напомним, что начало трехгранника Sz совпадает с лежащим на оси вращения стенда началом географического трехгранника, а оси параллельны соответствующим осям приборного трехгранника. Тогда ρ_i — радиус-вектор чувствительной массы i -го ньютонометра в приборном трехграннике. Формула (1) примет вид

$$f_z^{cp} + f_z^{tt} = - \begin{bmatrix} (\omega_2^2 + \omega_3^2)(h_1 + \rho_{11}) & - \omega_1\omega_2(h_2 + \rho_{12}) & - \omega_1\omega_3(h_3 + \rho_{13}) \\ -\omega_1\omega_2(h_1 + \rho_{21}) & + (\omega_1^2 + \omega_3^2)(h_2 + \rho_{22}) & - \omega_2\omega_3(h_3 + \rho_{23}) \\ -\omega_1\omega_3(h_1 + \rho_{31}) & - \omega_2\omega_3(h_2 + \rho_{32}) & + (\omega_1^2 + \omega_2^2)(h_3 + \rho_{33}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & + (-\Omega_1 u_2 + u_1 \Omega_2)(h_2 + \rho_{12}) & + (-\Omega_1 u_3 + u_1 \Omega_3)(h_3 + \rho_{13}) \\ (\Omega_1 u_2 - u_1 \Omega_2)(h_1 + \rho_{21}) & + 0 & + (-\Omega_2 u_3 + u_2 \Omega_3)(h_3 + \rho_{23}) \\ (\Omega_1 u_3 - u_1 \Omega_3)(h_1 + \rho_{31}) & + (\Omega_2 u_3 - u_2 \Omega_3)(h_2 + \rho_{32}) & + 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Назовем приведенной чувствительной массой точку пересечения плоскостей, проходящих через чувствительные массы ньютометров ортогонально их осям чувствительности. В этом случае $\rho_{11} = \rho_{22} = \rho_{33} = 0$, а вектор h совпадает с введенным ранее вектором s . При этом оставшиеся параметры ρ_{ij} постоянны и определяются внутренним устройством БИНС, а s_j определяются закреплением БИНС на платформе стенда и постоянны только в течение одного цикла калибровки. Поправка (2) запишется в виде

$$f_z^{cp} + f_z^{tt} = - \begin{bmatrix} (\omega_2^2 + \omega_3^2)s_1 & -\omega_1\omega_2(s_2 + \rho_{12}) & -\omega_1\omega_3(s_3 + \rho_{13}) \\ -\omega_1\omega_2(s_1 + \rho_{21}) & (\omega_1^2 + \omega_3^2)s_2 & -\omega_2\omega_3(s_3 + \rho_{23}) \\ -\omega_1\omega_3(s_1 + \rho_{31}) & -\omega_2\omega_3(s_2 + \rho_{32}) & (\omega_1^2 + \omega_2^2)s_3 \end{bmatrix} - \\ - \begin{bmatrix} 0 & +(-\Omega_1u_2 + u_1\Omega_2)(s_2 + \rho_{12}) & +(-\Omega_1u_3 + u_1\Omega_3)(s_3 + \rho_{13}) \\ (\Omega_1u_2 - u_1\Omega_2)(s_1 + \rho_{21}) & 0 & +(-\Omega_2u_3 + u_2\Omega_3)(s_3 + \rho_{23}) \\ (\Omega_1u_3 - u_1\Omega_3)(s_1 + \rho_{31}) & +(\Omega_2u_3 - u_2\Omega_3)(s_2 + \rho_{32}) & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Из уравнений следует, что в случае строгого совмещения одной из приборных осей с осью вращения стенда ни один из параметров ρ_{ij} не наблюдается: коэффициенты при них близки к нулю. Т.е. в рамках введенных ранее стандартных циклов калибровки задача оценки ρ_{ij} уже не решается. Поэтому для оценивания параметров разнесения чувствительных масс ньютометров внутри БИНС предлагается ввести дополнительные циклы калибровки.

На каждом дополнительном цикле калибровки соответствующую приборную ось БИНС следует совмещать не строго с осью вращения стенда, а под небольшим углом (в пределах 5–10°). При этом отклонение данной приборной оси от оси вращения стенда должно осуществляться таким образом, чтобы одна из двух других приборных осей оставалась с точностью до 1–2° ортогональной оси вращения стенда. При указанном расположении приборных осей коэффициенты при ρ_{ij} таковы, что один из этих параметров хорошо оценивается. Например, в случае отклонения оси Mz_1 на первом цикле калибровки таким образом, что ось Mz_3 остается ортогональной оси вращения стенда, с миллиметровой точностью оценивается параметр ρ_{12} . Если же отклонение провести таким образом, что оси вращения стенда остается ортогональной ось Mz_2 , то будет оцениваться параметр ρ_{13} . Без отклонения, т.е. в случае строгого совмещения оси Mz_1 с осью вращения стенда, ни один из параметров ρ_{ij} не оценивается с достаточной точностью. Устанавливая БИНС на стенд с различными отклонениями, после проведения шести дополнительных циклов вращения можно оценить все шесть параметров ρ_{ij} , характеризующих пространственное разнесение чувствительных масс ньютометров внутри БИНС.

Численное моделирование процесса калибровки на основных и дополнительных циклах подтверждает этот факт. При моделировании были приняты следующие характеристики системы. Априорные среднеквадратичные

погрешности оцениваемых параметров: $\sigma_{\nu^0} = 0.1^\circ/\text{час}$, $\sigma_{\Delta f^0} = 6 \cdot 10^{-4}g$, $\sigma_{\Gamma} = 10^{-3}$, $\sigma_{\Theta} = 10^{-3}$, $\sigma_{s_i} = 0.1\text{м}$, $\sigma_{\rho_{ij}} = 0.02\text{м}$. СКО шумовых составляющих погрешностей: $\sigma_{\nu^s} = 0.1^\circ/\text{час}$, $\sigma_{\Delta f^s} = 3 \cdot 10^{-4}g$ (на частоте 1 Гц). Угловая скорость вращения в каждом цикле изменялась по закону $\Omega_x(t) = 200^\circ/\text{с} \times \sin(2\pi t/600\text{с})$, а угол между осью вращения стенда и соответствующей приборной осью составлял 5° . На рис. 3 и 4 представлены графики СКО ошибок оценок параметров ρ_{12} , ρ_{23} , ρ_{31} на стандартных (основных) и дополнительных циклах калибровки.

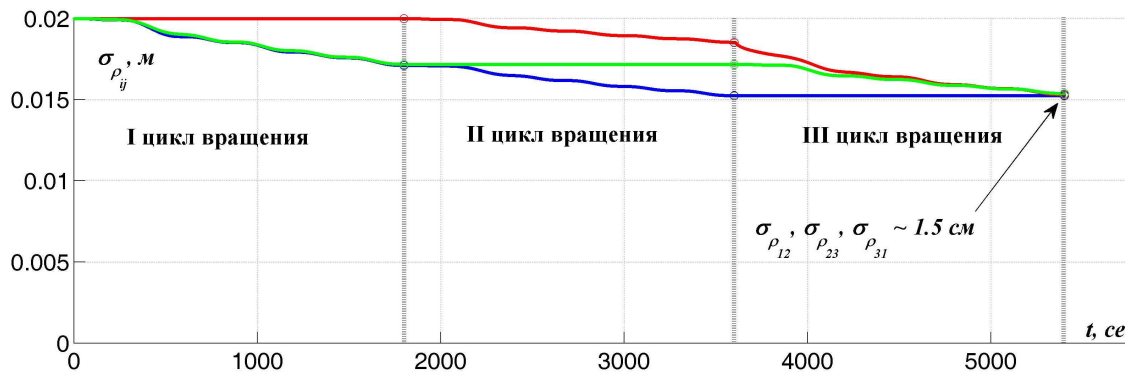


Рис. 3: СКО ошибок оценок ρ_{12} , ρ_{23} , ρ_{31} на основных циклах калибровки

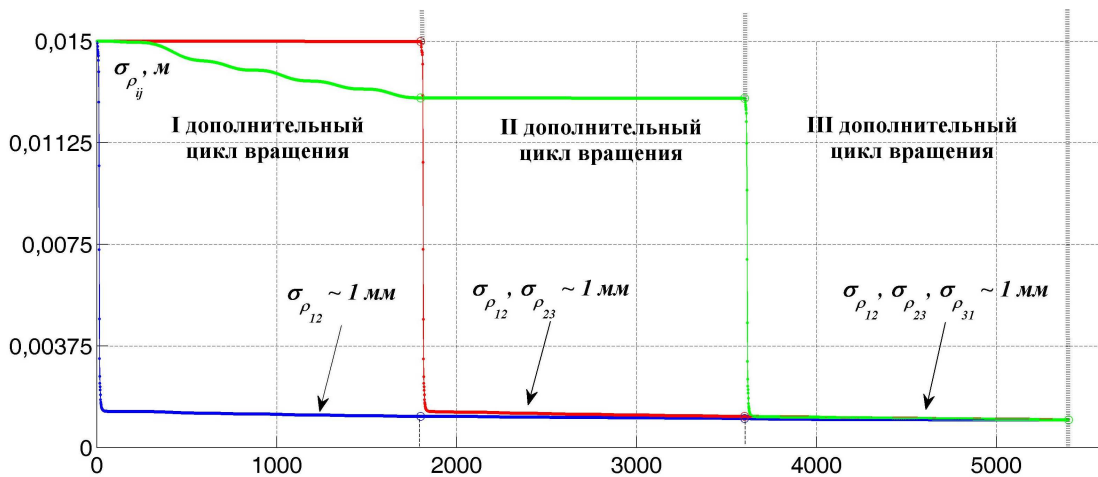


Рис. 4: СКО ошибок оценок ρ_{12} , ρ_{23} , ρ_{31} на дополнительных циклах калибровки

Выводы ко второй главе:

- Вектор смещения блока ньютометров относительно оси вращения стенда оценивается с приемлемой точностью на основных циклах калибровки в случае задания переменной по модулю угловой скорости стенда. Остальные параметры калибровки при этом оцениваются без потери точности по сравнению со случаем, когда указанное смещение отсутствует.
- Параметры взаимного разнесения чувствительных масс ньютометров на основных циклах калибровки ненаблюдаемы. Одна из возможностей

провести их оценивание состоит в введении дополнительных циклов калибровки, отличающихся от основных установкой БИНС на стенде.

В третьей главе рассмотрены особенности калибровки наиболее распространенных типов систем. К их числу относятся грубые системы на базе микромеханических датчиков (MEMS). Для таких систем необходима модификация алгоритмов решения задачи калибровки.

Для блока микромеханических датчиков используется следующая более полная модель инструментальных погрешностей

$$\Delta f_z = \Delta f_z^0 + \begin{pmatrix} \Gamma_{11} & 0 & 0 \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & 0 \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} \end{pmatrix} f_z,$$

$$\nu_z = \nu_z^0 + \begin{pmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & \Theta_{13} \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & \Theta_{23} \\ \Theta_{31} & \Theta_{32} & \Theta_{33} \end{pmatrix} \omega_z + \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix} f_z/g.$$

Отличие данной модели от использованной в двух первых главах состоит в добавлении в модель параметров d_{ij} динамических дрейфов ДУС, зависящих от ускорений носителя. Кроме того, возникает требование реинициализации нулей ДУС и ньютометров на каждом цикле калибровки, т.к. их значение меняется от запуска к запуску. По совокупности измерений на трех циклах калибровки, на каждом из которых одна из приборных осей БИНС совмещается с горизонтальной осью вращения стенда, все параметры расширенной модели инструментальных погрешностей также наблюдаемы.

Задача оценивания решается в варианте введения обратных связей в систему модельных уравнений, в нашем случае это уравнение Пуассона.

На каждом шаге алгоритма оценивания вектора состояния \tilde{x} решается задача определения ориентации модельного трехгранника относительно опорного по сигналам ДУС — задача интегрирования уравнения Пуассона $\dot{L}_{y^r} = \hat{\omega}_{y^r} L_{y^r} - L_{y^r} \hat{u}_x$ для матрицы $L_{y^r}(\psi'_g, \vartheta', \gamma')$, полученной из матрицы L_y циклической перестановкой строк. Иными словами, определяются текущие значения углов курса ψ'_g , тангажа ϑ' , крена γ' . Перед следующим шагом вычисленная ориентация корректируется, а алгоритм вычисления ориентации — интегрирования уравнения Пуассона реинициализируется скорректированными углами курса $\tilde{\psi}$, тангажа $\tilde{\vartheta}$, крена $\tilde{\gamma}$. Корректирующей информацией являются оценки ошибок ориентации $\tilde{\beta}_y$ приборного трехгранника относительно модельного на шаге счета алгоритма.

Обратные связи вводятся в уравнение Пуассона с целью удержания кинематической ошибки БИНС в линейной зоне. Дополнительно с той же целью может привлекаться внешняя информация об орте оси вращения стенда:

$$\sigma_e = L_{y^r}^T(1, 0, 0)^T - (1, 0, 0)^T = (\widehat{L_y^T \beta_y})^T(1, 0, 0)^T + L_{y^r}^T(0, \kappa_3, -\kappa_2)^T,$$

где κ — вектор малого поворота, компоненты которого постоянны на каждом цикле. Он может быть физически интерпретирован как описывающий несовпадение оси вращения стенда с совмещенной с ней соответствующей приборной осью.

Результаты обработки данных калибровочного эксперимента.

Описанный метод калибровки реализован в программном обеспечении, при помощи которого обработаны материалы экспериментов по калибровке БИНС на базе волоконнооптических гироскопов (ВОГ) и микромеханических акселерометров. Эксперимент состоял из трех циклов, в каждом из которых горизонтальная ось вращения совмещалась с одной из осей приборного трехгранника БИНС. Сигналы датчиков регистрировались с частотой 128 Гц. В начале циклов БИНС неподвижна в течение 15 мин., затем осуществлялось вращение с переменной угловой скоростью в течение 30 мин.

Характеристики случайных составляющих погрешностей датчиков следующие: СКО случайных дрейфов ДУС составляли $\sigma_{\nu^{(s)}} = 90^\circ/\text{час}$, погрешностей ньютометров $\sigma_{\Delta f^{(s)}} = 0.02\text{м/с/с}$.

В результате обработки получены оценки параметров инструментальных погрешностей БИНС. Характерные значения оцениваемых инструментальных погрешностей представлены в таблице 2.

$\nu^0, \text{ }^\circ/\text{час}$	$\Theta_{ii}, \text{ } \%$	$\Theta_{ij}, \text{ '}$	$\Delta f^0, \text{ м/с/с}$	$\Gamma_{ii}, \text{ } \%$	$\Gamma_{ij}, \text{ '}$
10	0,4	20	0,005	0,5	10

Таблица 2: Характерные значения оценок параметров инструментальных погрешностей БИНС

Для оценки качества калибровки к сигналам датчиков применен алгоритм автономной навигации после выставки по заданному курсу в двух вариантах: без компенсации параметров калибровки и с компенсацией полученных оценок. Дрейфы, оцененные в процессе выставки, компенсировались в обоих случаях. Интервал навигации — 2 мин., на котором БИНС вращалась вокруг креновой оси вручную. На рис. 5 представлены ошибки автономной навигации в определении составляющих относительной скорости и координат в двух вариантах.

Выводы к третьей главе:

- По совокупности измерений на трех циклах калибровки, на каждом из которых одна из приборных осей БИНС совмещается с горизонтальной осью вращения стенда, достижима приемлемая точность оценивания параметров расширенной модели инструментальных погрешностей.
- Введение обратных связей в алгоритм счисления ориентации и привлечение информации об орте оси вращения стенда являются эффективными средствами удержания кинематической ошибки БИНС в линейной зоне.

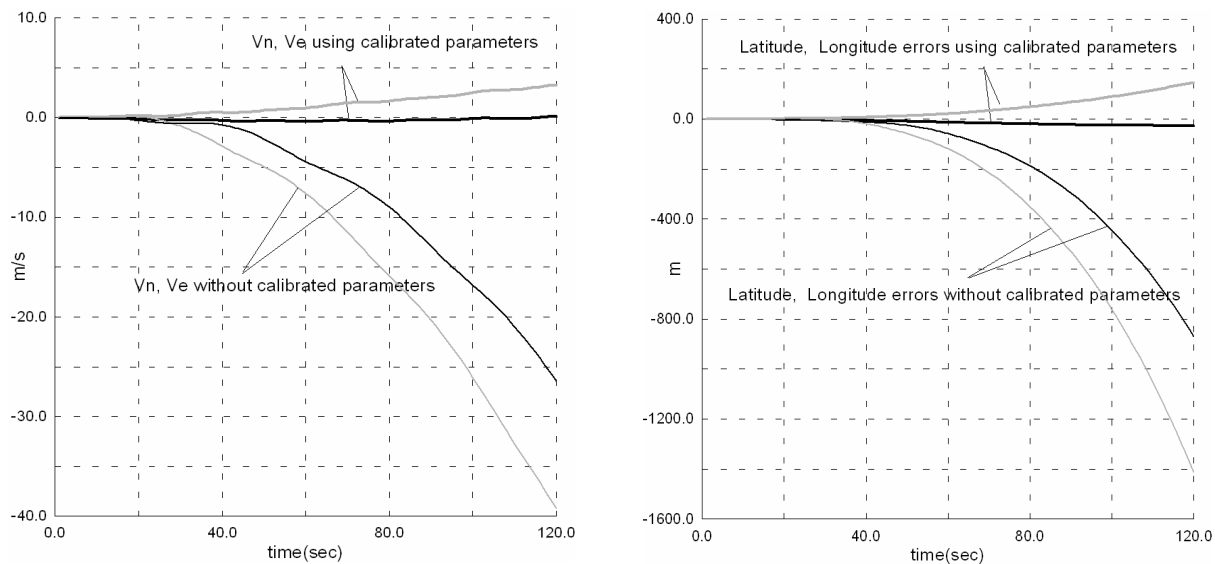


Рис. 5: Ошибки автономной навигации БИНС с компенсацией и без компенсации параметров калибровки

- Результаты обработки данных калибровочных экспериментов свидетельствуют о том, что компенсация параметров калибровки позволяет на порядок уменьшить ошибки БИНС в навигации на коротких интервалах времени.

В заключении диссертационной работы приведены основные выводы.

Заключение

1. Разработана методика и показана принципиальная возможность ее использования для калибровки БИНС на стендах с одной степенью свободы. Соответствующий алгоритм калибровки строится таким образом, что в нем не используется информация от датчиков стенда, что позволяет применять для калибровки грубые стенды. Показано, что наибольшая эффективность метода достигается в том случае, когда ось вращения стенда близка к горизонтальной и направлена приблизительно по меридиану, а эксперимент состоит из трех циклов, в каждом из которых ось вращения стенда совмещается с одной из осей приборного трехгранника БИНС. Установлено, что стенды с вертикальной осью вращения для калибровки БИНС в сборе мало пригодны.
2. В методике калибровки на грубом одностепенном стенде учтено смещение чувствительных масс ньютометров относительно оси вращения стенда. Показана оцениваемость этих параметров в случае задания изменяемой по модулю угловой скорости вращения стенда. Подтверждено, что в таком случае потери точности основных параметров калибровки не происходит.
3. Предложен способ оценивания геометрических параметров разнесения чувствительных масс ньютометров друг относительно друга внутри корпуса БИНС при помощи дополнительных циклов вращения, отличающихся от основных установкой БИНС на стенде.
4. Предложен ряд модификаций алгоритма калибровки применительно к грубым датчикам первичной информации, а именно: усложнение модели инструментальных погрешностей, введение обратных связей в модельные уравнения, использование информации об орте оси вращения в качестве дополнительного измерения.

Публикации по теме диссертации

1. *Вавилова Н.Б., Парусников Н.А., Сазонов И.Ю.* Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем при помощи грубых одностепенных стендов. // *Современные проблемы математики и механики*. Том I. Прикладные исследования, М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. с. 212-223.
2. *Вавилова Н.Б., Голован А.А., Сазонов И.Ю.* Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем в сборе при помощи грубых одностепенных стендов. // *Труды XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам*. СПб.: ГНЦ ЦНИИ „Электроприбор“, 2010.

3. *Сазонов И.Ю.* Калибровка бескарданной инерциальной навигационной системы в сборе на грубых одностепенных стендах. // *Труды XIX международного научно-технического семинара „Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации“*. М.: Изд-во МЭИ, 2010, с. 245–246.
4. *Сазонов И.Ю., Шаймарданов И.Х.* Калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы на микромеханических датчиках акселерометров и гироскопов. // *Вопросы оборонной техники: научно-технический сборник*. Серия 9, 2010, №3 (244)–4 (245), с. 73–82.
5. *Вавилова Н.Б., Сазонов И.Ю.* Калибровка инерциальной навигационной системы в сборе на грубых стендах с одной степенью свободы. // *Вестник Московского университета* Серия 1. Математика. Механика. М.: Изд-во МГУ, 2012, №4, с 64–66.