

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

На правах рукописи

Кутовой Денис Алексеевич

МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ,
ПРИСУЩИХ БЛОКУ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В СОСТАВЕ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление
и обработка информации, статистика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор
Евсеев Владимир Иванович

Санкт-Петербург – 2022

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Погрешности в измерительной информации чувствительных элементов в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы	14
1.1. Математическая модель погрешности измерительной информации	15
1.2. Кинематическая схема.....	16
1.3. Погрешности в измерительной информации	25
1.4. Моделирование измерительной информации	28
1.5. Выводы по главе.....	29
Глава 2. Оценка систематических составляющих погрешности чувствительных элементов в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы	32
2.1. Методы оценки систематических составляющих погрешности	32
2.2. Скалярная калибровка с использованием метода многопараметрической оптимизации	45
2.3. Практические результаты применения скалярного способа калибровки с использованием метода многопараметрической оптимизации	51
2.4. Выводы по главе.....	63
Глава 3. Оценка случайных составляющих погрешности чувствительных элементов в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы .	67
3.1. Методы оценки случайных составляющих погрешности	68
3.2. Методика оценки случайных составляющих погрешности с использованием адаптивного метода вариации Аллана	78
3.3. Практические результаты применения методики оценки случайных составляющих погрешности с использованием адаптивного метода вариации Аллана	81
3.4. Выводы по главе.....	97
Заключение	99
Список сокращений	102

Список литературы	103
Приложение А (обязательное) Результаты расчета оценки случайных погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы	120
Приложение Б Внедрение результатов диссертационной работы.....	146

Введение

Актуальность темы исследования. Для контроля и корректировки движения различных технических объектов (летательных аппаратов, морских судов, наземной техники и других) в соответствии с заданной траекторией перемещения необходимо обладать информацией об их параметрах ориентации и перемещения в пространстве в каждый момент времени с определенной дискретностью. В сфере ракетно-космической техники (РКТ) гражданского назначения данная задача решается в основном за счет инерциальной навигационной системы (ИНС). ИНС – это система, позволяющая определять местоположение и параметры перемещения объекта в инерциальной системе координат (ИСК), основанная на автономном методе навигации, который не требует наличия внешних данных, получаемых, например, от звезд или радиомаяков. Чувствительные элементы (ЧЭ), входящие в состав ИНС, на каждый такт работы системы оценивают значения линейных ускорений и угловых скоростей, действующих на оси чувствительности (ОЧ) ЧЭ. Вычислительная система ИНС на основе показаний ЧЭ формирует векторы линейного ускорения и угловой скорости, действующие на объект на текущий такт работы системы.

Наиболее широкое распространение в сфере РКТ гражданского назначения получило использование в качестве ИНС гиростабилизированной платформы с размещенными на ней акселерометрами. Управление летательными аппаратами требует поддержания в пространстве строго заданного углового положения измерителей линейного ускорения (акселерометров) при жестких требованиях к погрешностям ориентации гиростабилизированной платформы.

С развитием вычислительной техники и повышением точностных характеристик ЧЭ в современном и перспективном бортовом оборудовании стали применять бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). Основные тенденции развития БИНС изложены в публикациях [42, 52, 63, 73].

В отличие от платформенных ИНС в БИНС ЧЭ жестко закреплены относительно объекта управления, что накладывает повышенные требования к точностным характеристикам БИНС. Преимуществами БИНС по сравнению с платформенными ИНС являются более низкая стоимость, меньшие массогабаритные характеристики и время готовности, высокая надежность, а также низкие эксплуатационные расходы.

БИНС включает в себя блок чувствительных элементов (БЧЭ), состоящий из акселерометров и гироскопов и формирующий первичную информацию: значения составляющих вектора кажущегося линейного ускорения объекта и вектора угловой скорости БЧЭ относительно инерциального пространства в проекциях на оси связанной с БЧЭ ортогональной системы координат – приборной системы координат (ПСК).

Ориентацию системы координат, связанной с объектом, необходимо непрерывно вычислять по измеренным гироскопами угловым скоростям объекта. По линейным ускорениям, оцениваемым акселерометрами БИНС, которые жестко закреплены на объекте, и по ориентации в ИСК, вычисляется местоположение объекта.

В качестве ЧЭ БИНС, использующихся в системах управления РКТ гражданского назначения, в последние годы широкое распространение получили маятниковые акселерометры (МА) в качестве измерителей линейного ускорения и волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) в качестве измерителей угловой скорости. Описание современных БИНС на основе ВОГ приведено в работах [13, 46, 47].

МА являются одними из основных элементов современных ИНС, поскольку обладают высокими точностными характеристиками. У МА, использующих в качестве подвеса подвижной части магнитный или упругий подвес, отсутствует трение, что снимает ограничение на порог чувствительности акселерометра. Более подробная информация приведена в монографии [82].

В диссертации рассматривались МА и ВОГ, функционирующие при линейных ускорениях до 10 g.

ВОГ, реализующие эффект Саньяка, приходят на смену более дорогим лазерным гироскопам. Они, как и лазерные гироскопы, работают в широком диапазоне угловых скоростей, обладают высокой разрешающей способностью и инвариантны к ориентации измерительной оси относительно вектора силы тяжести g , т.е. наилучшим образом подходят для построения БИНС. Преимущества ВОГ опубликованы различными исследователями [13, 46, 47, 48, 55]. Первоначальное использование ВОГ было ограничено невысокой точностью, к настоящему времени отмечается значительный прогресс в точностных характеристиках ВОГ, в том числе отечественного производства, что подтверждается данными, представленными в докладах на конференциях [13, 48].

Выходная измерительная информация (линейное ускорение, угловая скорость) ЧЭ БИНС в силу различных факторов, таких как механические и температурные воздействия, погрешности установки ЧЭ в корпусе прибора, шумы различной природы и другие, содержит в себе систематические (от запуска к запуску) и случайные (в запуске) ошибки. Более подробная информация приведена в работах [35, 78, 89].

Для снижения ошибок гироскопических и акселерометрических каналов в процессе работы системы необходимо осуществлять алгоритмическую компенсацию их погрешностей в соответствии с определенной математической моделью погрешности (ММП) БЧЭ БИНС, специально разработанной для каждого типа датчиков в зависимости от характера и состава учитываемых погрешностей. Зная величину погрешностей БЧЭ БИНС можно рассчитать точностные характеристики образца БИНС.

Степень разработанности темы. Для оценки систематических и случайных погрешностей БИНС используются различные методики.

Для оценки систематических составляющих известны методики на основе:
 - калибровки по прямым измерениям [16, 17, 27, 30, 31, 37, 53, 60, 78, 80, 83, 88], разработанные авторами А.И.Матасовым, А.В.Деревянкиным, Е.В.Драницыной, А.Г.Андреевым, В.С.Ермаковым, М.Б.Мафтером, В.А.Морозовым, М.Н.Устюговым, М.А.Щипицыной;

- косвенной калибровки [19, 23, 24], разработанные авторами Л.В.Водичевой, Ю.В.Парышевой;
- скалярной калибровки [2, 3, 4, 37, 41, 88], разработанные авторами А.А.Аврутовым, В.В.Шавриным, А.С.Конаковым, В.И.Тисленко, Е.А.Измайловым, С.Н.Лепе, А.В.Молчановым.

Для оценки случайных составляющих известны методики на основе:

- статистического метода [16, 17, 27, 53], разработанные авторами В.В.Тихомировым, И.Б.Вавиловой, А.А.Голован, А.В.Козловым, И.А.Папуша, Н.А.Парусниковым;
- спектральной плотности мощности [8, 57, 98], разработанные авторами А.В.Архиповым, А.С.Тимошенковым, М.А.Литвиным;
- метода вариации Аллана [1, 6, 8, 54, 57, 62, 65, 76, 98], разработанные авторами Д.У.Алланом, Т.Н.Сирой, А.А.Авиевым, А.В.Архиповым, А.С.Тимошенковым, С.Г.Кучерковым, Д.И.Лычевым, А.И.Скалоном, Л.А.Чертковым, М.А.Литвиным, В.В.Матвеевым, М.Г.Погореловым, А.В.Моториным, В.А.Васильевым.

Классические методики исследования систематических составляющих (калибровка по прямым измерениям) и случайных процессов (выборочная дисперсия, спектральная плотность) не всегда применимы, так как накладывают существенные требования на условия проведения и не всегда позволяют идентифицировать источник погрешностей и их количественный вклад в общую статистику шума, что подтверждено в публикациях автора [А3, А6].

Другие рассматриваемые методики также имеют ряд ограничений: оценка только части основных погрешностей БЧЭ БИНС, недостаточная точность оценки погрешностей БЧЭ БИНС, жесткие требования к условиям проведения испытаний и другие.

Таким образом, в силу того, что существующие методики оценки погрешностей БЧЭ БИНС имеют ряд ограничений, актуальность исследований по теме диссертационной работы определяется теоретической и практической

необходимостью разработки новых методик оценки погрешностей БЧЭ БИНС с целью:

- повышения точности оценки систематических и случайных погрешностей ЧЭ БИНС;

- повышения точности определения ориентации объекта в пространстве;

- сокращения вычислительных затрат при проведении испытаний БИНС.

Объектом исследования является аппаратно-программный комплекс, позволяющий проводить оценку погрешностей ЧЭ (акселерометры и гироскопы) в составе БИНС, входящих в состав современных систем управления объектов РКТ гражданского назначения, разрабатываемых АО «НПО автоматики им. академика Н.А.Семихатова» (входит в Госкорпорацию «Роскосмос»), г. Екатеринбург.

Предметом исследования являются методы и методики, как основа предложенного программно-алгоритмического обеспечения, позволяющего за счет апостериорной обработки измерительной информации ЧЭ БИНС проводить оценку систематических и случайных составляющих ММП ЧЭ БИНС.

Цели и задачи диссертации. Целью работы является разработка теоретического и научно-методического аппарата для обеспечения повышения точности и снижения вычислительных затрат оценки систематических и случайных составляющих ММП БЧЭ БИНС за счет разработки соответствующих методик апостериорной обработки измерительной информации.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

1. Предложены ММП БЧЭ и кинематические схемы БИНС, содержащие минимально необходимое и избыточное количество измерительных осей.

2. Проведен анализ основных систематических и случайных составляющих ММП БЧЭ БИНС, вносящих основной вклад в точность современных БИНС. Проведено моделирование указанных составляющих.

3. Проведен анализ существующих методов и методик оценки систематических и случайных составляющих ММП БЧЭ БИНС.

4. Разработана методика оценки систематических составляющих ММП БЧЭ БИНС на основе способа скалярной калибровки, эффективная с точки зрения точности оценки и адаптации к условиям проведения испытаний.

5. Разработана методика оценки случайных составляющих ММП БЧЭ БИНС на основе метода вариации Аллана, эффективная с точки зрения точности и вычислительных затрат на проведение оценок.

6. Проведена экспериментальная апробация разработанных методик оценки систематических и случайных составляющих ММП БЧЭ БИНС на моделируемой и реальной измерительной информации БЧЭ БИНС.

Научная новизна работы заключается в том, что в работе:

1. На основе исследований предложен системный подход к созданию аппаратно-программного комплекса и методик оценки погрешностей для реализации методов и средств оценки погрешностей с применением математического моделирования и проведения экспериментальных работ на реальных образцах техники.

2. Разработана новая методика оценки систематических составляющих ММП ЧЭ БИНС на основе скалярного способа калибровки и с использованием методов многопараметрической оптимизации, позволяющая производить оценку систематических составляющих погрешности ММП ЧЭ БИНС в условиях ограничений на точность выставки и позиционирование БИНС.

3. Разработана новая методика оценки случайных составляющих ММП ЧЭ БИНС с использованием аддитивного метода вариации Аллана, при котором аппроксимация кривой вариации Аллана проводится с использованием методов многопараметрической оптимизации.

4. В разработанной методике оценки случайных составляющих ММП ЧЭ БИНС с использованием аддитивного метода вариации Аллана расчет значений вариации Аллана выполняется с равномерным шагом в логарифмическом масштабе, что существенно (более чем в 10^3 раз для рассматриваемых массивов данных) сокращает вычислительные затраты на проведение расчета значений

вариации Аллана по сравнению с полным перебором интервалов осреднения, сохраняя при этом необходимую точность.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии (аналитических и расчетных) методов и средств оценки погрешностей БЧЭ современных БИНС.

Внедрение результатов. Разработанный аналитический и программно-алгоритмический аппарат, как основа новых методик оценки погрешностей БЧЭ БИНС, используется в рамках разработки систем управления изделиями РКТ гражданского назначения при стендовой калибровке на позициях АО «НПО автоматики им. академика Н.А.Семихатова» (приложение Б). Разработанный аналитический и программно-алгоритмический аппарат может быть использован также в алгоритмах предстартовой и межполетной калибровки БИНС (после того, как будут завершены их испытания, и они будут введены в состав штатных бортовых средств различных объектов РКТ гражданского назначения).

Практическая значимость работы состоит в том, что использование разработанных методик для оценки погрешностей БЧЭ БИНС при стендовой, предстартовой и межполетной калибровке БИНС позволило повысить точность определения соответствующих параметров и сократило время проведения калибровки. Использование предложенной методики оценки систематических составляющих погрешности БЧЭ БИНС позволило проводить калибровку в условиях ограничений на угловую ориентацию БИНС, что является актуальным в условиях предстартовой и межполетной калибровки. Использование предложенного метода оценки случайных погрешностей БЧЭ БИНС позволило значительно (более чем в 10^3 раз для рассматриваемых массивов данных) сократить время на апостериорную обработку измерительной информации в рамках оценки случайных погрешностей БЧЭ БИНС при проведении калибровки.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы сбора, систематизация и анализ научно-технической информации, методы многопараметрической оптимизации, математической статистики, теории вероятностей. Математическое моделирование, обработка

информации и вычисления осуществлялись с использованием пакета прикладных программ MatLab.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитический и программно-алгоритмический аппарат для реализации математического моделирования процессов оценки погрешностей БЧЭ БИНС.
2. Методика оценки систематических составляющих погрешности ММП ЧЭ БИНС на основе метода скалярной калибровки, позволяющая проводить оценку в условиях ограничений на точность выставки БИНС относительно известных эталонных значений физических величин, действующих на БИНС, и ограничений на позиционирование БИНС при проведении записи измерительной информации ЧЭ БИНС.
3. Методика оценки случайных составляющих погрешности ММП ЧЭ БИНС на основе метода вариации Аллана, имеющая преимущества перед аналогичными методиками в точности оценки случайных погрешностей и вычислительных затратах на проведение оценок случайных погрешностей, рассматриваемых ММП БИНС.
4. Результаты практического применения разработанных аналитического и программно-алгоритмического аппарата и соответствующих методик постановки и проведения комплексных экспериментов для оценки погрешностей реальных (штатных и перспективных) БЧЭ БИНС.

Достоверность научных положений. Математическое моделирование и обработка данных стендовых испытаний БИНС осуществлялись с использованием пакета прикладных программ MatLab. Для обеспечения испытаний БИНС применялось аттестованное стендовое оборудование для комплексных испытаний образцов РКТ гражданского назначения. Результаты применения разработанных методик существенно повышают точность навигации РКТ гражданского назначения, что подтверждается проведенным циклом стендовых испытаний.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- Научно-технической конференции молодых специалистов и ученых «Системы управления космических аппаратов и комплексов», Москва, Российская Федерация: V (19 – 20 апреля 2012 г.), VI (18 – 19 сентября 2014 г.);
- Всероссийском конкурсе молодых ученых, Миасс, Российская Федерация: IV (16 – 17 октября 2012 г.);
- Конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», Санкт-Петербург, Российская Федерация: XV (12 – 15 марта 2013 г.), XVI (11 – 14 марта 2014 г.), XVII (17 – 20 марта 2015 г.), XVIII (15 – 18 марта 2016 г.);
- Научно-технической конференции молодых специалистов, Екатеринбург, Российская Федерация: VII (10 – 11 апреля 2013 г.), VIII (8 – 10 апреля 2015 г.);
- Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий, Миасс, Российская Федерация: XXXIII (4 – 6 июня 2013 г.);
- Молодежной конференции «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике», Звездный городок, Российская Федерация: 25 – 27 июня 2014 г.;
- Конференции памяти выдающегося конструктора гирокопических приборов Н.Н.Острякова: XXIX (14 – 16 октября 2014 г.);
- Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, Российская Федерация: XXII (25 – 27 мая 2015 г.), XXIII (30 мая – 1 июня 2016 г.);
- Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Козловские чтения), Самара, Российская Федерация: IV (14 – 18 сентября 2015 г.);
- Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникация и системы управления», Екатеринбург, Российская Федерация: II (14 – 15 декабря 2015 г.);
- Межрегиональной отраслевой научно-технической конференции «Люльевские чтения», Екатеринбург, Российская Федерация: XX (22 – 24 марта 2016 г.);

- Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», Москва, Российская Федерация: VIII (1 – 3 июня 2016 г.);
- Всероссийской научно-практической конференции «Системы управления и радиоэлектронная аппаратура», Екатеринбург, Российская Федерация: VIII (10 – 13 апреля 2017 г.).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 23 печатных работы, среди которых 6 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 3 – в изданиях, индексируемых Scopus, 14 – в трудах конференций. По теме диссертационного исследования получено 2 патента: Патент №2626288 на «Способ определения погрешностей основных характеристик блока инерциальных измерителей», приоритет 21.03.2016, дата гос. регистрации 25.07.2017 г.; Патент №2638782 на «Способ определения шумов в измерительной информации чувствительных элементов инерциальных навигационных систем», приоритет 21.03.2016, дата гос. регистрации 15.12.2017г.

Соответствие специальности. Диссертационная работа соответствует пунктам 3, 4, 5, 15 паспорта специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы, в том числе результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решение задач, а также обобщении полученных результатов.

Глава 1. Погрешности в измерительной информации чувствительных элементов в составе беспилотной инерциальной навигационной системы

В классическом виде ЧЭ БИНС являются акселерометры и гироскопы, «жестко» привязанные к корпусу объекта. ЧЭ определяют ориентацию и местоположение ЛА относительно ИСК, путем оценки значений линейного ускорения и угловых скоростей, действующих на их ОЧ.

Содержащиеся в выходной измерительной информации погрешности разделяют на систематические, – не изменяющиеся со временем (константы) или изменяющиеся согласно известному закону, алгоритму, и случайные (шумы и шумовые составляющие погрешности), произвольно меняющиеся со временем и более сложно поддающиеся математическому описанию, чем систематические.

Причиной возникновения систематических составляющих погрешности в основном являются технологические факторы и температурные возмущения в условиях установившихся тепловых процессов в конструкциях ЧЭ. Случайные погрешности имеют в основном электромагнитную природу происхождения, вызванную влиянием электронных компонент, входящих в состав БИНС. Более подробное описание приведено в статье [8].

В рамках диссертационной работы рассматриваются основные систематические и случайные составляющие погрешности ЧЭ БИНС, вносящие наиболее существенный вклад в общую погрешность БИНС, применяемых в сфере РКТ гражданского назначения.

Для описания измерительной информации АК и ГК БИНС предложены соответствующие математические модели погрешности, которые имеют схожий характер и отличаются некоторыми составляющими, учитывающими особенности принципа действия соответствующего измерительного канала БИНС.

1.1. Математическая модель погрешности измерительной информации

В рамках исследования предложена следующая модель выходной информации измерительного АК:

$$AK_i(t_j) = \frac{1}{(1 + Ma_i(t_j))} \cdot (Ka_i(t_j) + Sa_i + \Delta Sa_i(t_j) + \Delta Na_i(t_j)), \quad (1.1)$$

$$Ma_i(t_j) = Ma_i(t_{j-1}) + (\Delta Ma_i(t_j)) \cdot \Delta t, \quad (1.2)$$

$$Ma_i(t_0) = M_i, \quad (1.3)$$

где $AK_i(t_j)$ – проекция линейного ускорения на ОЧ i -го АК, м/с^2 ;

i – порядковый номер АК в БЧЭ ($i = 1, \dots, n$), б/р;

n – количество АК в БЧЭ, б/р;

j – порядковый номер показания i -го АК в БЧЭ, б/р;

t_j – j -й момент времени съема измерительной информации i -го АК, с;

$Ka_i(t_j)$ – значение выходного сигнала i -го АК за такт опроса, м/с^2 ;

Sa_i – систематическая составляющая погрешности смещения нулевого сигнала i -го АК, м/с^2 ;

$\Delta Sa_i(t_j)$ – случайное блуждание выходного сигнала i -го АК (белый шум), м/с^2 ;

ΔNa_i – случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала i -го АК, м/с^2 ;

M_i – систематическая составляющая масштабного коэффициента i -го АК, б/р;

$\Delta Ma_i(t_j)$ – случайная составляющая масштабного коэффициента i -го АК, б/р;

Δt_j – длительность такта опроса выходного сигнала i -го АК ($\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$), с.

В рамках исследования рассматривалась следующая модель выходной информации измерительного ГК:

$$GK_i(t_j) = \frac{1}{(1 + Mg_i(t_j))} \cdot (Kg_i(t_j) + Sg_i + \Delta Sg_i(t_j) + \Delta Ng_i(t_j)), \quad (1.4)$$

$$Mg_i(t_j) = Mg_i(t_{j-1}) + (\Delta Mg_i(t_j)) \cdot \Delta t_j, \quad (1.5)$$

$$Mg_i(t_0) = M'_i, \quad (1.6)$$

где $GK_i(t_j)$ – проекция линейного ускорения на ОЧ i -го ГК, угл.с/с;
 i – порядковый номер ГК в БЧЭ ($i = 1, \dots, n$), б/р;
 n – количество ГК в БЧЭ, б/р;
 j – порядковый номер показания i -го ГК в БЧЭ, б/р;
 t_j – j -й момент времени съема измерительной информации i -го ГК, с;
 $Kg_i(t_j)$ – значение выходного сигнала i -го ГК за такт опроса, угл.с/с;
 Sg_i – систематическая составляющая погрешности смещения нулевого сигнала i -го ГК, угл.с/с;
 $\Delta Sg_i(t_j)$ – случайное блуждание выходного сигнала i -го ГК (белый шум), угл.с/с;
 ΔNg_i – случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала i -го ГК, угл.с/с;
 M'_i – систематическая составляющая масштабного коэффициента i -го ГК, б/р;
 $Mg_i(t_j)$ – случайная составляющая масштабного коэффициента i -го ГК, б/р;
 Δt_j – длительность такта опроса выходного сигнала i -го ГК ($\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$), с.

1.2. Кинематическая схема

В современных БИНС ОЧ АК (ГК) принято располагать в ПСК (здесь и далее ПСК $OX_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ является правой ортогональной системой координат) таким образом, что любые две из них неколлинеарны, и любые три из них некомпланарны. Минимальное количество ОЧ АК (ГК) в БЧЭ БИНС для получения необходимого набора измерительной информации с учетом требований по неколлинеарности и некомпланарности равно 3. При этом с целью

резервирования и повышения точности измерений распространение получили БЧЭ БИНС с избыточным количеством ОЧ АК (ГК).

По совокупностям измеренных показаний с ОЧ АК (ГК) в БЧЭ оцениваются абсолютные значения линейного ускорения (угловой скорости), действующие на прибор.

Рассмотрим описание процесса пересчета показаний чувствительных элементов БИНС из ОЧ в оси ПСК и обратного пересчета для БИНС с 3 АК и 3 ГК.

ПСК $OX_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ является правой ортогональной системой координат.

Ориентация ОЧ АК и ГК БИНС относительно ПСК задается в двух положениях:

ОЧ_{ном} – ОЧ АК (ГК) в номинальном положении. Номинальное положение ОЧ АК (ГК) определяется как положение ОЧ АК (ГК), определенное при проектировании, без учета погрешностей углов, на которые отклоняется ОЧ АК (ГК) в процессе изготовления и эксплуатации БИНС;

ОЧ_{факт} – ОЧ АК (ГК) в фактическом положении. Фактическое положение ОЧ АК (ГК) определяется как положение ОЧ АК (ГК) с учетом погрешностей углов, на которые отклоняется ОЧ АК (ГК) в процессе изготовления и эксплуатации БИНС.

Пересчет проекций линейных ускорений из ОЧ_{факт} АК в ПСК осуществляется по формуле (1.7).

$$[X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}]_{\text{АК}}^T = M_{\text{АК}}[\text{АК}_1 \text{АК}_2 \text{АК}_3]^T, \quad (1.7)$$

где $[X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}]_{\text{АК}}^T$ - проекции линейных ускорений на оси OX_{Π} , OY_{Π} , OZ_{Π} ПСК;

$[\text{АК}_1 \text{АК}_2 \text{АК}_3]^T$ - проекции линейных ускорений на ОЧ_{факт} АК_i, где *i* - номер ОЧ_{факт} АК; *i*=1, 2, 3;

$M_{\text{АК}}$ – матрица пересчета проекций линейных ускорений из ОЧ_{факт} АК в ПСК.

Пересчет проекций линейных ускорений из ПСК в ОЧ_{факт} АК осуществляется по формуле (1.8).

$$[\text{АК}_1 \text{АК}_2 \text{АК}_3]^T = M_{\text{АК}}^T[X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}]_{\text{АК}}^T, \quad (1.8)$$

где $[AK_1 AK_2 AK_3]^T$ - проекции линейных ускорений на ОЧ_{факт} АК_{*i*}, где *i* - номер ОЧ_{факт} АК; *i*=1, 2, 3;

$[X_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}]_{\text{АК}}^T$ - проекции линейных ускорений на оси ОХ_П, ОY_П, ОZ_П ПСК;

$M_{\text{АК}}^T$ – транспонированная матрица пересчета проекций линейных ускорений из ОЧ_{факт} АК в ПСК, которая пересчитывает проекции линейных ускорений из ПСК в ОЧ_{факт} АК.

Пересчет проекций угловых скоростей из ОЧ_{факт} ГК в ПСК осуществляется по формуле (1.9).

$$[X_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}]_{\text{ГК}}^T = M_{\text{ГК}} [\Gamma K_1 \Gamma K_2 \Gamma K_3]^T, \quad (1.9)$$

где $[X_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}]_{\text{ГК}}^T$ - проекции угловых скоростей на оси ОХ_П, ОY_П, ОZ_П ПСК;

$[\Gamma K_1 \Gamma K_2 \Gamma K_3]^T$ - проекции угловых скоростей на ОЧ_{факт} ГК_{*i*}, где *i* - номер ОЧ_{факт} ГК; *i*=1, 2, 3;

$M_{\text{ГК}}$ – матрица пересчета проекций угловых скоростей из ОЧ_{факт} ГК в ПСК.

Пересчет проекций угловых скоростей из ПСК в ОЧ_{факт} ГК осуществляется по формуле (1.10).

$$[\Gamma K_1 \Gamma K_2 \Gamma K_3]^T = M_{\text{ГК}}^T [X_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}]_{\text{ГК}}^T, \quad (1.10)$$

где $[\Gamma K_1 \Gamma K_2 \Gamma K_3]^T$ - проекции угловых скоростей на ОЧ ГК_{*i*}, где *i* - номер ОЧ ГК; *i*=1, 2, 3;

$[X_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}]_{\text{ГК}}^T$ - проекции угловых скоростей на оси ОХ_П, ОY_П, ОZ_П ПСК;

$M_{\text{ГК}}^T$ – транспонированная матрица пересчета проекций угловых скоростей из ОЧ_{факт} ГК в ПСК, которая пересчитывает проекции угловых скоростей из ПСК в ОЧ_{факт} ГК.

Матрица пересчета $M_{\text{АК}}$ ($M_{\text{ГК}}$) проекций линейных ускорений (угловых скоростей) из ОЧ АК (ГК) в ПСК рассчитывается с использованием матриц направляющих косинусов углов, задающих номинальную ориентацию ОЧ, и углов, которые характеризуют отклонение номинальной ориентации ОЧ.

Номинальная ориентация измерительных осей БИНС относительно ПСК задается для АК через углы α_i, β_i ; для ГК через углы ξ_i, η_i , где *i* – номер ОЧ АК (ГК).

Погрешности ориентации измерительных осей относительно ПСК задаются для акселерометров через углы $\Delta\alpha_i$, $\Delta\beta_i$; для гироскопов через углы $\Delta\xi_i$, $\Delta\eta_i$, где i – номер ОЧ АК (ГК).

α_i (ξ_i) - углы между ОЧ_{ном} и положительным направлением оси ОХ_п.

β_i (η_i) – углы между проекциями ОЧ_{ном} на плоскость ОY_пZ_п и отрицательным направлением оси ОY_п, отсчитываются от проекций ОЧ_{ном} на плоскость ОY_пZ_п против часовой стрелки, если смотреть с положительного направления оси ОХ_п. В случае, когда ОЧ_{ном} лежит на оси ОХ_п, угол β_i принимается равным 0 град.

$\Delta\alpha_i$ ($\Delta\xi_i$) – углы, характеризующие отклонение номинальной ориентации ОЧ (между ОЧ_{ном} и проекцией ОЧ_{факт} на плоскость ОХ_пОЧ_{ном}). Углы имеют положительное значение, если угол между ОХ_п и проекцией ОЧ_{факт} на плоскость ОХ_пОЧ_{ном}, отсчитывающийся от ОЧ_{ном} против часовой стрелки, если смотреть с положительного направления оси N, больше угла между ОХ_п и ОЧ_{ном}, в обратном случае углы имеют отрицательное значение.

N_i – ось дополняющая прямоугольную систему координат (где X – это ОХ_п, Y – проекция i -й ОЧ_{ном} на ОY_пZ_п, где i – номер ОЧ_{ном} АК (ГК)) до левой.

$\Delta\beta_i$ ($\Delta\eta_i$) – углы, характеризующие отклонение номинальных ориентаций ОЧ (между проекциями ОЧ_{факт} и ОЧ_{ном} на плоскость ОY_пZ_п). Углы имеют положительное значение, если угол между отрицательным направлением оси ОY_п и проекцией ОЧ_{факт} (ОЧ_{ном}) на плоскость ОY_пZ_п, отсчитывающийся от проекции ОЧ_{факт} (ОЧ_{ном}) против часовой стрелки (если смотреть с положительного направления оси ОХ_п), больше для ОЧ_{факт}, чем для ОЧ_{ном}. В обратном случае углы имеют отрицательное значение.

Для БИНС с тремя АК матрица $M_{АК}$ пересчета проекций линейных ускорений из ОЧ_{факт} АК в ПСК имеет вид:

$$M_{АК} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & \cos(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & \cos(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) \\ \cos(\beta_1 + \Delta\beta_1)\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & \cos(\beta_2 + \Delta\beta_2)\sin(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & \cos(\beta_3 + \Delta\beta_3)\sin(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) \\ \sin(\beta_1 + \Delta\beta_1)\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & \sin(\beta_2 + \Delta\beta_2)\sin(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & \sin(\beta_3 + \Delta\beta_3)\sin(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) \end{bmatrix}. \quad (1.11)$$

Для БИНС с тремя ГК матрица $M_{\Gamma K}$ пересчета проекций угловых скоростей из ОЧ_{факт} ГК в ПСК имеет вид:

$$M_{\Gamma K} = \begin{bmatrix} \cos(\xi_1 + \Delta\xi_1) & \cos(\xi_2 + \Delta\xi_2) & \cos(\xi_3 + \Delta\xi_3) \\ \cos(\eta_1 + \Delta\eta_1)\sin(\xi_1 + \Delta\xi_1) & \cos(\eta_2 + \Delta\eta_2)\sin(\xi_2 + \Delta\xi_2) & \cos(\eta_3 + \Delta\eta_3)\sin(\xi_3 + \Delta\xi_3) \\ \sin(\eta_1 + \Delta\eta_1)\sin(\xi_1 + \Delta\xi_1) & \sin(\eta_2 + \Delta\eta_2)\sin(\xi_2 + \Delta\xi_2) & \sin(\eta_3 + \Delta\eta_3)\sin(\xi_3 + \Delta\xi_3) \end{bmatrix}. \quad (1.12)$$

Матрица M_{AK} пересчета проекций линейных ускорений из ОЧ_{факт} АК в ПСК (1.11) получена из первых столбцов матриц M_{AK1} , M_{AK2} , M_{AK3} (1.13–1.15), образованных из произведений матриц поворотов на углы $(\alpha_i + \Delta\alpha_i)$ и $(\beta_i + \Delta\beta_i)$; где $i = 1, 2, 3$.

Первый столбец матрицы M_{AK} пересчета проекций линейных ускорений из ОЧ_{факт} АК в ПСК (1.11) получен из первого столбца матрицы M_{AK1} (1.13), образованной из произведений матриц поворотов на углы $(\alpha_1 + \Delta\alpha_1)$ и $(\beta_1 + \Delta\beta_1)$.

$$\begin{aligned} M_{AK1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_1 + \Delta\beta_1) & -\sin(\beta_1 + \Delta\beta_1) \\ 0 & \sin(\beta_1 + \Delta\beta_1) & \cos(\beta_1 + \Delta\beta_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & -\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & 0 \\ \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & -\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & 0 \\ \cos(\beta_1 + \Delta\beta_1)\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & \cos(\beta_1 + \Delta\beta_1)\cos(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & -\sin(\beta_1 + \Delta\beta_1) \\ \sin(\beta_1 + \Delta\beta_1)\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & \sin(\beta_1 + \Delta\beta_1)\cos(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & \cos(\beta_1 + \Delta\beta_1) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Второй столбец матрицы M_{AK} пересчета проекций линейных ускорений из ОЧ_{факт} АК в ПСК (1.11) получен из первого столбца матрицы M_{AK2} (1.14), образованной из произведений матриц поворотов на углы $(\alpha_2 + \Delta\alpha_2)$ и $(\beta_2 + \Delta\beta_2)$.

$$\begin{aligned} M_{AK2} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_2 + \Delta\beta_2) & -\sin(\beta_2 + \Delta\beta_2) \\ 0 & \sin(\beta_2 + \Delta\beta_2) & \cos(\beta_2 + \Delta\beta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & -\sin(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & 0 \\ \sin(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & \cos(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & -\sin(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & 0 \\ \cos(\beta_2 + \Delta\beta_2)\sin(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & \cos(\beta_2 + \Delta\beta_2)\cos(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & -\sin(\beta_2 + \Delta\beta_2) \\ \sin(\beta_2 + \Delta\beta_2)\sin(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & \sin(\beta_2 + \Delta\beta_2)\cos(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) & \cos(\beta_2 + \Delta\beta_2) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Третий столбец матрицы M_{AK} пересчета проекций линейных ускорений из ОЧ_{факт} АК в ПСК (1.11) получен из первого столбца матрицы M_{AK3} (1.15), образованной из произведений матриц поворотов на углы $(\alpha_3 + \Delta\alpha_3)$ и $(\beta_3 + \Delta\beta_3)$.

$$M_{AK3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_3 + \Delta\beta_3) & -\sin(\beta_3 + \Delta\beta_3) \\ 0 & \sin(\beta_3 + \Delta\beta_3) & \cos(\beta_3 + \Delta\beta_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) & -\sin(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) & 0 \\ \sin(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) & \cos(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \quad (1.15)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) & -\sin(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) & 0 \\ \cos(\beta_3 + \Delta\beta_3) \sin(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) & \cos(\beta_3 + \Delta\beta_3) \cos(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) & -\sin(\beta_3 + \Delta\beta_3) \\ \sin(\beta_3 + \Delta\beta_3) \sin(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) & \sin(\beta_3 + \Delta\beta_3) \cos(\alpha_3 + \Delta\alpha_3) & \cos(\beta_3 + \Delta\beta_3) \end{bmatrix}.$$

Матрица $M_{\Gamma K}$ пересчета проекций угловых скоростей из ОЧ_{факт} ГК в ПСК (1.12) получена из первых столбцов матриц $M_{\Gamma K1}$, $M_{\Gamma K2}$, $M_{\Gamma K3}$ (1.16-1.18), образованных из произведений матриц поворотов на углы $(\xi_i + \Delta\xi_i)$ и $(\eta_i + \Delta\eta_i)$; где $i = 1, 2, 3$.

Первый столбец матрицы $M_{\Gamma K}$ пересчета проекций угловых скоростей из ОЧ_{факт} ГК в ПСК (1.12) получен из первого столбца матрицы $M_{\Gamma K1}$ (1.16), образованной из произведений матриц поворотов на углы $(\xi_1 + \Delta\xi_1)$ и $(\eta_1 + \Delta\eta_1)$.

$$\begin{aligned} M_{\Gamma K1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\eta_1 + \Delta\eta_1) & -\sin(\eta_1 + \Delta\eta_1) \\ 0 & \sin(\eta_1 + \Delta\eta_1) & \cos(\eta_1 + \Delta\eta_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\xi_1 + \Delta\xi_1) & -\sin(\xi_1 + \Delta\xi_1) & 0 \\ \sin(\xi_1 + \Delta\xi_1) & \cos(\xi_1 + \Delta\xi_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\xi_1 + \Delta\xi_1) & -\sin(\xi_1 + \Delta\xi_1) & 0 \\ \cos(\eta_1 + \Delta\eta_1)\sin(\xi_1 + \Delta\xi_1) & \cos(\eta_1 + \Delta\eta_1)\cos(\xi_1 + \Delta\xi_1) & -\sin(\xi_1 + \Delta\xi_1) \\ \sin(\eta_1 + \Delta\eta_1)\sin(\xi_1 + \Delta\xi_1) & \sin(\eta_1 + \Delta\eta_1)\cos(\xi_1 + \Delta\xi_1) & \cos(\eta_1 + \Delta\eta_1) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Второй столбец матрицы $M_{\Gamma K}$ пересчета проекций угловых скоростей из ОЧ_{факт} ГК в ПСК (1.12) получен из первого столбца матрицы $M_{\Gamma K2}$ (1.17), образованной из произведений матриц поворотов на углы $(\xi_2 + \Delta\xi_2)$ и $(\eta_2 + \Delta\eta_2)$.

$$\begin{aligned} M_{\Gamma K2} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\eta_2 + \Delta\eta_2) & -\sin(\eta_2 + \Delta\eta_2) \\ 0 & \sin(\eta_2 + \Delta\eta_2) & \cos(\eta_2 + \Delta\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\xi_2 + \Delta\xi_2) & -\sin(\xi_2 + \Delta\xi_2) & 0 \\ \sin(\xi_2 + \Delta\xi_2) & \cos(\xi_2 + \Delta\xi_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\xi_2 + \Delta\xi_2) & -\sin(\xi_2 + \Delta\xi_2) & 0 \\ \cos(\eta_2 + \Delta\eta_2)\sin(\xi_2 + \Delta\xi_2) & \cos(\eta_2 + \Delta\eta_2)\cos(\xi_2 + \Delta\xi_2) & -\sin(\xi_2 + \Delta\xi_2) \\ \sin(\eta_2 + \Delta\eta_2)\sin(\xi_2 + \Delta\xi_2) & \sin(\eta_2 + \Delta\eta_2)\cos(\xi_2 + \Delta\xi_2) & \cos(\eta_2 + \Delta\eta_2) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Третий столбец матрицы $M_{\Gamma K}$ пересчета проекций угловых скоростей из ОЧ_{факт} ГК в ПСК (1.12) получен из первого столбца матрицы $M_{\Gamma K3}$ (1.18), образованной из произведений матриц поворотов на углы $(\xi_3 + \Delta\xi_3)$ и $(\eta_3 + \Delta\eta_3)$.

$$M_{\Gamma K3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\eta_3 + \Delta\eta_3) & -\sin(\eta_3 + \Delta\eta_3) \\ 0 & \sin(\eta_3 + \Delta\eta_3) & \cos(\eta_3 + \Delta\eta_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\xi_3 + \Delta\xi_3) & -\sin(\xi_3 + \Delta\xi_3) & 0 \\ \sin(\xi_3 + \Delta\xi_3) & \cos(\xi_3 + \Delta\xi_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \quad (1.18)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\xi_3 + \Delta\xi_3) & -\sin(\xi_3 + \Delta\xi_3) & 0 \\ \cos(\eta_3 + \Delta\eta_3)\sin(\xi_3 + \Delta\xi_3) & \cos(\eta_3 + \Delta\eta_3)\cos(\xi_3 + \Delta\xi_3) & -\sin(\xi_3 + \Delta\xi_3) \\ \sin(\eta_3 + \Delta\eta_3)\sin(\xi_3 + \Delta\xi_3) & \sin(\eta_3 + \Delta\eta_3)\cos(\xi_3 + \Delta\xi_3) & \cos(\eta_3 + \Delta\eta_3) \end{bmatrix}.$$

Основными базовыми плоскостями ПСК являются:

- базовая плоскость I (БП I) – плоскость, образованная осями OY_П, OZ_П ПСК;
- базовая плоскость III (БП III) – плоскость, образованная осями OX_П, OY_П ПСК;
- базовая плоскость II (БП II) – плоскость, перпендикулярная базовым плоскостям I и III.

Распространенной является кинематическая схема БИНС с 3 АК и 3 ГК, в которой ОЧ_{ном} АК и ГК расположены ортогонально. ОЧ АК и ГК БИНС в номинальном положении соосны с осями ПСК.

В таблице 1.1 представлены углы, определяющие ориентацию ОЧ_{ном} АК (ГК) относительно ПСК для такой кинематической схемы.

Таблица 1.1 – Углы, определяющие ориентацию ОЧ_{ном} АК (ГК) относительно ПСК

Наименование угла	Значение угла, град
$\alpha_1(\xi_1)$	0
$\alpha_2(\xi_2)$	90
$\alpha_3(\xi_3)$	90
$\beta_1(\eta_1)$	0
$\beta_2(\eta_2)$	180
$\beta_3(\eta_3)$	90

Схемы ориентации ОЧ_{факт} трех АК и трех ГК БИНС относительно ПСК в соответствии с таблицей 1.1 представлены на рисунках 1.1 и 1.2 соответственно.

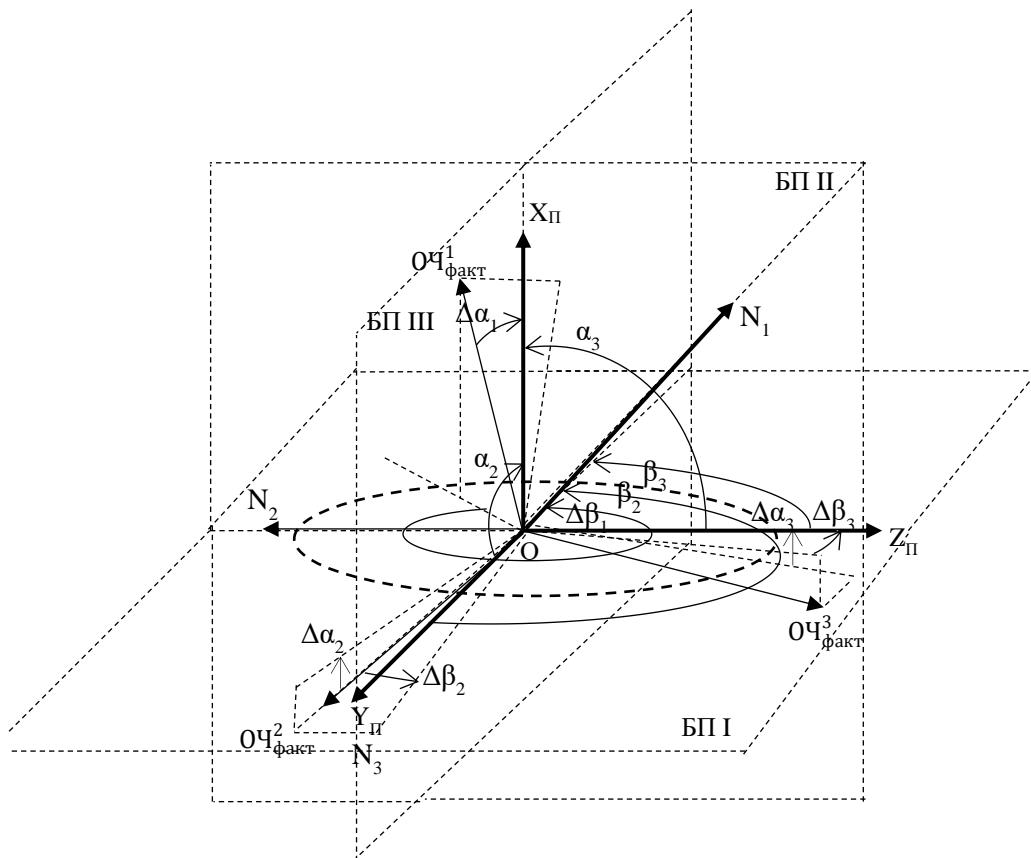


Рисунок 1.1 – Схема ориентации $OCh_{\text{факт}}$ АК БИНС относительно ПСК $OX_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}$

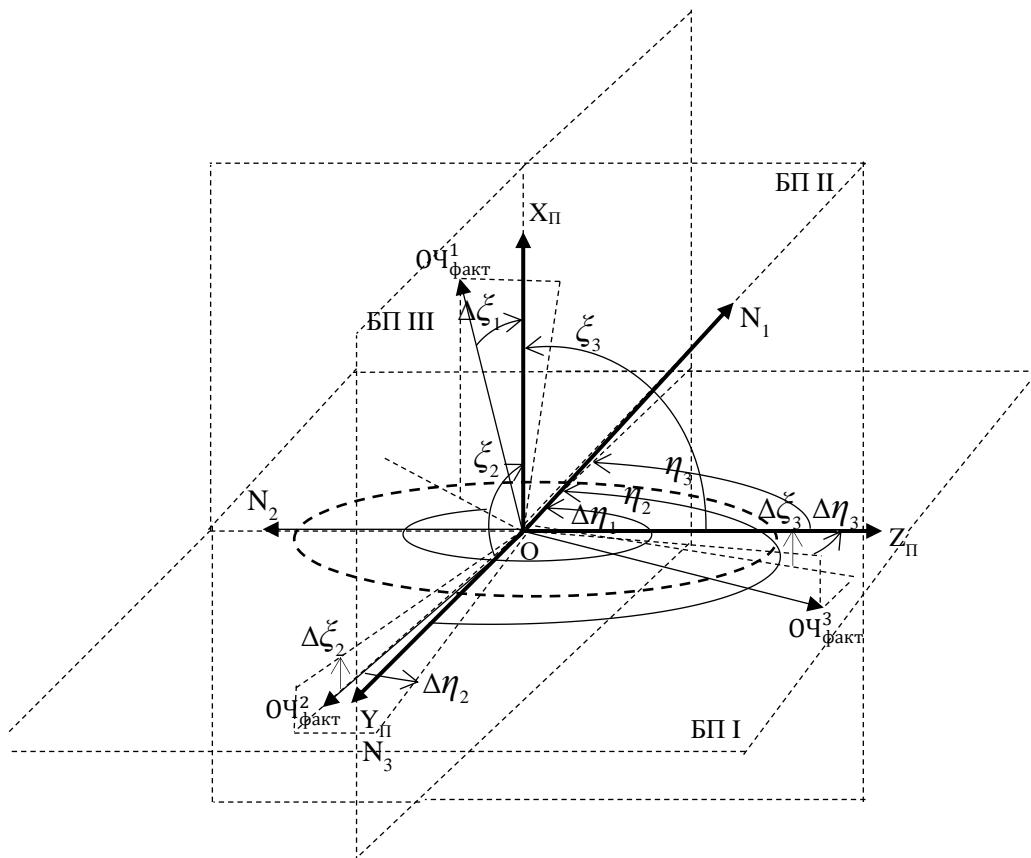


Рисунок 1.2 – Схема ориентации $OCh_{\text{факт}}$ ГК БИНС относительно ПСК $OX_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}$

В соответствии с данными работы [22] известно, что для произвольного числа АК (ГК) в БЧЭ с точки зрения обеспечения необходимой точности БЧЭ оптимальными конфигурациями ОЧ относительно ПСК является их расположение на «конусе» или на «додекаэдре». Причем оптимальным будет являться расположение ОЧ БИНС под равным углом к оси, вдоль которой на БИНС действует основная величина линейного ускорения и угловой скорости.

Расположение ОЧ_{ном} АК (ГК) относительно ПСК в трехосных ортогональных блоках на «конусе» представлено на рисунке 1.3.

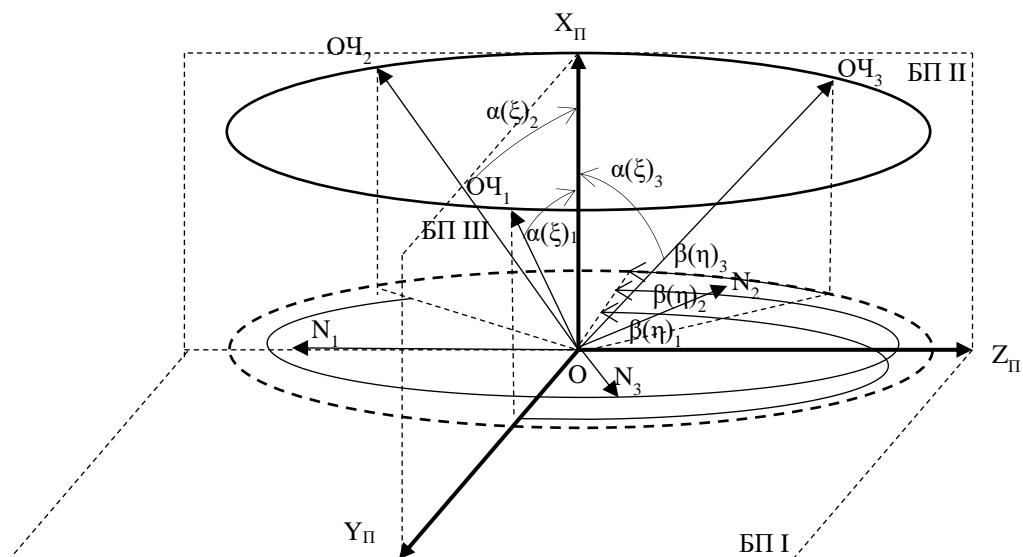


Рисунок 1.3 – Ориентация ОЧ АК (ГК) БИНС на «конусе» относительно ПСК для трех АК (трех ГК)

Использование избыточного количества измерительных приборов в БЧЭ повышает надежность и обеспечивает работоспособность системы управления изделий РКТ гражданского назначения при наличии в ней неисправностей. В соответствии с результатом работы [18] оптимальной с точки зрения количества ОЧ АК (ГК) является шестиосная кинематическая схема БИНС. ОЧ АК (ГК) в типовой шестиосной кинематической схеме БИНС расположены на «конусе» представлены на рисунке 1.4.

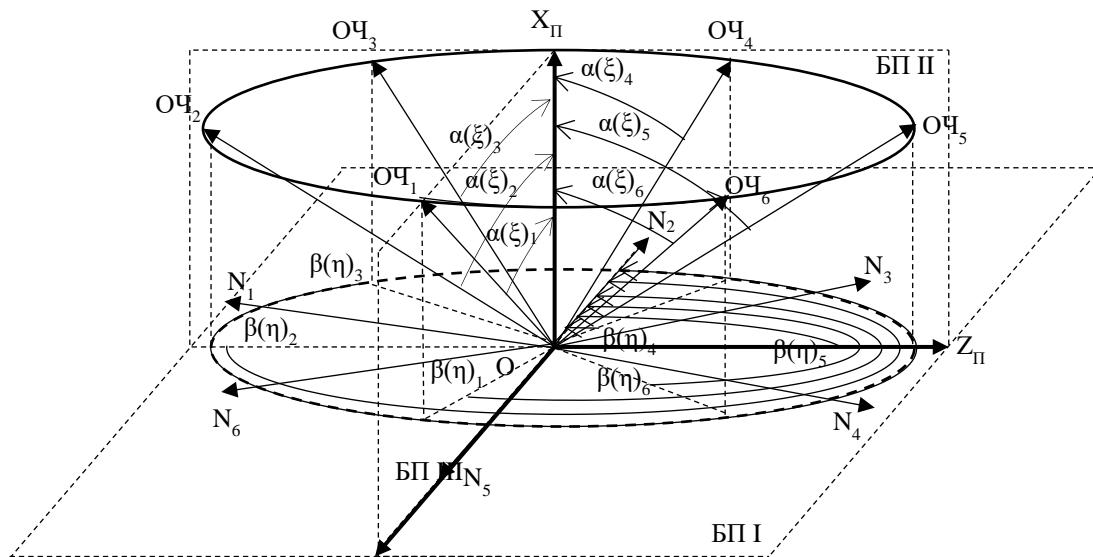


Рисунок 1.4 – Ориентация ОЧ АК (ГК) БИНС на «конусе» относительно ПСК для шести АК (шесть ГК)

В схемах на рисунках 1.3 и 1.4 ОЧ АК и ГК в номинальном положении совпадают.

Также распространение получили образцы БИНС с 4 ОЧ АК и ГК, в которых 3 ОЧ расположены «на конусе» и 1 ОЧ расположена по направлению высоты конуса. Поскольку подходы к оценке погрешностей БЧЭ БИНС с 4 и более ОЧ АК и ГК аналогичны, а также с целью сокращения приводимого объема математических выражений, в диссертации рассмотрены методики оценки погрешностей БЧЭ БИНС применительно к образцам БИНС с 4 ОЧ АК и ГК.

1.3. Погрешности в измерительной информации

Измерительная информация на выходе акселерометров и гироскопов в силу различных факторов, таких как деформация приборов в ходе эксплуатации, температурные изменения, погрешности установки ЧЭ в корпусе прибора и прочие, содержит в себе систематическую и случайную (шумовую) погрешности.

Основные систематические погрешности АК и ГК БИНС, рассматриваемые в рамках диссертационной работы:

- систематическая составляющая погрешности смещения нулевого сигнала измерителя – погрешность в измерении угловой скорости или линейного ускорения, постоянная на одном участке записи информации в нормальных климатических условиях. Погрешность проявляется в фиксированном значении отличия измеренного сигнала от реально действующего на ОЧ;

- систематическая составляющая погрешности масштабного коэффициента выходного сигнала измерителя – погрешность отношения изменения в выходном сигнале к изменению выходного воздействия, она является величиной постоянной на одном участке записи информации в нормальных климатических условиях. Систематическая составляющая погрешности масштабного коэффициента обычно определяется как коэффициент или функция преобразования выходного сигнала;

- углы, характеризующие отклонение номинальной ориентации ОЧ – погрешности фактической ориентации ОЧ относительно их номинального значения. Наиболее часто выражаются матрицей направляющих косинусов или углами Эйлера-Крылова.

Систематические погрешности накапливаются с течением времени под воздействием внешних факторов таких, как температура, магнитное поле, вибрации, изменение ориентации измерительной оси относительно номинального положения под внешним воздействием и др.

Систематические погрешности изменяются от запуска к запуску и не изменяют своего значения на протяжении всего полета ЛА.

В работе рассматривались следующие случайные (шумовые) погрешности измерительной информации АК и ГК БИНС, которые вносят основной вклад в ошибку измерений:

- случайное блуждание выходного сигнала измерителя (белый шум);
- случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала измерителя (розовый шум или фликкер-шум);
- случайная составляющая погрешности масштабного коэффициента измерителя (коричневый шум).

Случайные погрешности изменяются в запуске, меняют свои значения на протяжении полета ЛА и проявляются в виде разброса результатов измеряемых величин.

Другие виды шумовых составляющих в рамках диссертационной работы не рассматривались по причине значительно меньшего вклада в ошибку современных БИНС, что показано в работе [A22].

Белый шум может быть представлен в виде последовательности случайных чисел, распределенных по нормальному закону. Спектр мощности белого шума не зависит от частоты.

Розовый шум (фликкер-шум) обладает одинаковой мощностью в логарифмической шкале частот. Розовый шум может быть определен комбинацией марковских состояний шумов.

Известен способ [90] генерирования розового шума путем сложения нескольких релаксационных процессов (1.20), образующих самоподобную прогрессию с коэффициентом подобия 10 (или меньше – для лучшей сходимости), каждый из процессов имеет свое значение времени релаксации τ . Релаксационный процесс с дискретными значениями времени x_n задается с помощью генератора случайных чисел, который позволяет получать независимые случайные числа r_n , подставляемые затем в рекуррентное соотношение:

$$x_0 = 0, \quad (1.19)$$

$$x_{n+1} = \rho \cdot x_n + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot r_n, \quad (1.20)$$

$$\rho = \exp\left(\frac{-1}{\tau}\right), \quad (1.21)$$

где x_n – моделируемый релаксационный процесс с дискретными значениями времени;

ρ – требуемый коэффициент корреляции между соседними случайными значениями;

r_n – независимые случайные числа;

τ – время релаксации.

Коричневый шум, характеризующий случайную составляющую погрешности масштабного коэффициента, представляет собой проинтегрированный один раз по времени белый шум.

1.4. Моделирование измерительной информации

В рамках диссертационной работы проводилось моделирование измерительной информации с использованием ММП, включающей систематические и случайные погрешности выходных сигналов АК и ГК БИНС.

При моделировании случайные составляющие ММП генерируются в определенном диапазоне измерений (определяется среднеквадратическим отклонением (СКО)) для различных законов распределения случайных чисел, например, равномерного или нормального законов распределения.

Моделирование проводилось в условиях действия эквивалентов силы ускорения свободного падения g и угловой скорости вращения Земли Ω . Абсолютное значение вектора g принималось равным $9.815974121 \text{ м/с}^2$. Абсолютное значение вектора Ω принималось равным 15.041 угл.с/с .

Данные моделировались на определенном интервале времени с длиной такта опроса Δt .

Моделирование проводилось в среде MATLAB.

Для моделирования измерительной информации АК и ГК использовались ММП выходной информации (формулы (1.1) – (1.3) и (1.4) – (1.6) соответственно) описанные в разделе 1.1.

Систематические составляющие погрешности M_i , M'_i , Sa_i , Sg_i , $\Delta\alpha_i$ ($\Delta\xi_i$) и $\Delta\beta_i$ ($\Delta\eta_i$) задавались в виде констант, моделируемых для каждого участка с определенным СКО (1σ).

Случайные составляющие погрешности масштабного коэффициента ΔMa_i и ΔMg_i , а также случайные составляющие погрешности нулевого сигнала ΔSa_i и ΔSg_i моделировались в виде последовательности случайных чисел,

распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием (МО) и СКО (1σ).

Случайное блуждание выходного сигнала ΔNa_i (ΔNg_i) моделировалось в соответствии с данными работы [A5], как полусумма k -элементов ($k=1..log_2L$) выборки из последовательности случайных чисел $\Delta RW(m)$ в зависимости от текущих значений i и k по формулам (1.22), (1.23).

$$\Delta Na_i (\Delta Ng_i) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\lceil \log_2(L) \rceil} \Delta RW(m), \quad (1.22)$$

$$m = k \cdot L + \lceil (i - 1) \cdot 2^{-k} \rceil, \quad (1.23)$$

где ΔRW – коэффициент случайного блуждания выходного сигнала, $\text{м}/\text{с}^2$;

m – индекс суммируемой случайной величины ΔRW ;

$\lceil \cdot \rceil$ – операция взятия целой части вещественного числа;

L – суммарное количество моделируемых показаний, б/р.

Генерирование шума случайного блуждания $\Delta RW(m)$ осуществлялось поциальному закону распределения с нулевым МО и СКО (1σ).

1.5. Выводы по главе

1. Предложены ММП АК и ГК БИНС. Предложены математические выражения, описывающие вклад различных составляющих ММП в формирование проекций измеряемых величин на ОЧ БИНС.

2. Предложены кинематические схемы БИНС, рассматриваемых в рамках диссертационной работы. Предложены матрицы перехода от ОЧ БИНС к осям ПСК, а также описания углов характеризующих номинальную ориентацию и отклонение номинальной ориентации ОЧ в БЧЭ.

Для произвольного числа АК (ГК) в БЧЭ с точки зрения обеспечения необходимой точности БЧЭ оптимальными конфигурациями ОЧ относительно ПСК является «конус» или «додекаэдр».

Также распространение получили образцы БИНС с 4 ОЧ АК и ГК, в которых 3 ОЧ расположены «на конусе» и 1 ОЧ расположена по направлению высоты конуса. Рассмотрены методики оценки погрешностей БЧЭ БИНС применительно к образцам БИНС с 4 ОЧ АК и ГК.

3. Рассмотрены систематические составляющие погрешности выходной информации ЧЭ БИНС:

- систематическая составляющая погрешности смещения нулевого сигнала измерителя;
- систематическая составляющая погрешности масштабного коэффициента выходного сигнала измерителя;
- углы, характеризующие отклонение номинальной ориентации ОЧ.

4. Рассмотрены случайные составляющие погрешности выходной информации ЧЭ БИНС:

- случайное блуждание выходного сигнала измерителя (белый шум);
- случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала измерителя (розовый шум или фликкер-шум);
- случайная составляющая погрешности масштабного коэффициента измерителя (коричневый шум).

5. При моделировании случайные составляющие ММП генерируются в определенном диапазоне измерений (определяется СКО) для различных законов распределения случайных чисел, например, для равномерного или нормального законов распределения.

Моделирование проводилось в условиях действия эквивалентов силы ускорения свободного падения g и угловой скорости вращения Земли Ω .

Систематические составляющие погрешности задавались в виде констант, моделируемых для каждого участка с определенным СКО (1σ).

Случайные составляющие погрешности масштабного коэффициента, а также случайные составляющие погрешности нулевого сигнала моделировались в виде последовательности случайных чисел, распределенных по нормальному закону с нулевым МО и СКО (1σ).

Случайное блуждание выходного сигнала моделировалось, как полусумма элементов выборки из последовательности случайных чисел.

Глава 2. Оценка систематических составляющих погрешности чувствительных элементов в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы

Оценка погрешностей (калибровка) ЧЭ БИНС заключается в определении численных значений систематических составляющих ММП ЧЭ БИНС, необходимых для получения оценки результатов измерений физических величин с максимальной точностью. Известны методики оценки систематических составляющих погрешности ЧЭ БИНС [83, 87].

Полученные в ходе калибровки оценки составляющих моделей погрешностей ЧЭ используются для осуществления алгоритмической компенсации систематических погрешностей измерений ГК и АК в соответствии с определенной ММП.

В работе были рассмотрены методы оценки систематических погрешностей АК и ГК БИНС, которые можно классифицировать следующим образом:

1. Калибровка по прямым измерениям.
2. Скалярная калибровка.
3. Косвенная калибровка.

2.1. Методы оценки систематических составляющих погрешности

Калибровка по прямым измерениям

В процессе калибровки по прямым измерениям осредненная на определенном интервале выходная информация АК и ГК, измеренная в конкретных положениях ОЧ АК (ГК), сравнивается с эталонными, известными с высокой точностью, значениями, действующими на БЧЭ физическими величинами в конкретных положениях ОЧ АК (ГК). Наиболее часто встречаются испытания, при которых БЧЭ выставляют в определенные статические относительно Земной

поверхности положения. В качестве метрологического эталона для АК применяют значение вектора ускорения силы тяжести g , а для ГК – значение вектора скорости вращения Земли Ω . При этом ориентация БЧЭ относительно этих векторов должна быть известна с высокой точностью.

Наиболее часто используемая для данного типа калибровки методика последовательных поворотов, изложенная в работах [36, А3, А6], реализуется с помощью наклонно-поворотных столов.

При калибровке ГК для динамичных объектов используются двух- и трехосные стенды, платформы которых последовательно вращаются вокруг всех осей. Как правило, фиксируется целое число оборотов за конечный интервал времени, и используется либо среднее значение угловой скорости вращения платформы стенда по соответствующей оси (описание приведено в [84, 85]), либо значение угла поворота (описание приведено в [94]). Синхронно со списыванием угла поворота платформы стенда осуществляется опрос ЧЭ, при этом учитываются значения проекций векторов угловой скорости вращения Земли Ω и ускорения силы тяжести g на оси БЧЭ.

При использовании БЧЭ БИНС на объектах с уровнем перегрузок до 20 g и более для калибровки блока АК используют специальные стены – центрифуги.

В качестве примера использования метода калибровки по прямым измерениям рассмотрим принцип действия данного метода для оценки систематической составляющей погрешности смещения нулевого сигнала ММП измерительной информации АК. В процессе испытаний, которые проводятся в соответствии с установленной программой испытаний, поворотный стол выставляется в различные положения: измерительными осями вверх и вниз относительно местной вертикали. Далее определяются матрицы перехода от географической системы координат (ГСК) в стартовую систему координат (ССК), с помощью которых проекции эталонных векторов кажущегося ускорения пересчитываются из ГСК в ПСК.

Систематическая составляющая погрешности смещения нулевого сигнала ММП измерительной информации АК определяется по каждой оси как разность

между измеренным осредненным значением и пересчитанным на эту ось эталонным значением ускорения силы тяжести g в положениях, когда соответствующий АК ориентирован вертикально вверх и вертикально вниз.

Калибровка по прямым измерениям, основанная на осреднении значений измерений позволяет находить оценки систематической составляющей погрешности смещения нулевого сигнала, систематической составляющей погрешности масштабного коэффициента, углов, характеризующих отклонение номинальной ориентации ОЧ АК и ГК.

Косвенная калибровка

Косвенная калибровка (калибровка по косвенным измерениям) проводится после проведения калибровки по прямым измерениям, в процессе которой предварительно оценены:

- систематическая погрешность смещения нулевого сигнала АК;
- систематическая погрешность масштабного коэффициента АК;
- углы, характеризующие отклонение номинальной ориентации ОЧ АК;
- систематическая составляющая погрешности смещения нулевого сигнала ГК.

Процедура такой калибровки подробно описана в докладах [19, 68].

Косвенная калибровка позволяет оценить систематическую составляющую погрешности масштабного коэффициента ГК и углы, характеризующие отклонение номинальной ориентации ОЧ ГК.

При косвенной калибровке также возможно оценивать углы, характеризующие отклонение номинальной ориентации ОЧ АК, и систематическую составляющую погрешности смещения нулевого сигнала АК.

С помощью косвенной калибровки нельзя оценить систематическую погрешность масштабного коэффициента АК и систематическую составляющую погрешности смещения нулевого сигнала ГК. Это не позволяет использовать указанный метод как основной для оценки всех рассматриваемых в рамках работы систематических погрешностей БЧЭ БИНС.

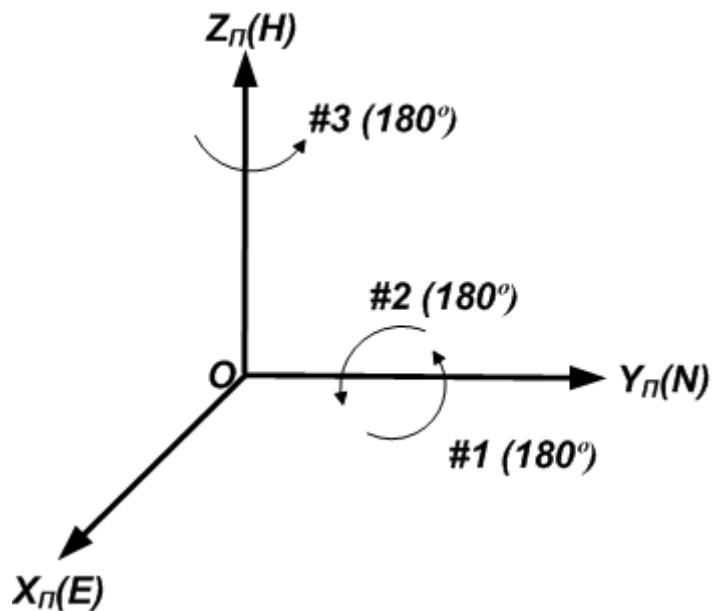
Отличие процедуры косвенной калибровки от калибровки по прямым измерениям в том, что ориентации фиксируются в начале и в конце поворота, а обработка информации производится как в фиксированных положениях, так и в процессе разворотов.

Метод прямой калибровки позволяет оценивать систематические погрешности ЧЭ БИНС с произвольной ориентацией их ОЧ, в частности для избыточных БИНС. С этой точки зрения метод косвенной калибровки на данном этапе может быть применен для БИНС, включающей тройку ортогональных АК и тройку ортогональных ГК, ОЧ которых в номинальном положении совпадают с ПСК $OX_{п}Y_{п}Z_{п}$.

В косвенной калибровке на вход алгоритмов оценивания погрешностей ЧЭ БИНС поступают горизонтальные составляющие кажущейся скорости, формируемые в осях ГСК. Затем происходит пересчет приращений кажущейся скорости, измеряемых АК, в оси ГСК с помощью матрицы направляющих косинусов, рассчитанной по показаниям ГК. Таким образом, обработка измерительной информации задействует «быстрые» алгоритмы БИНС, которые подразумевают решение задач:

- определения параметров ориентации по информации ГК;
- пересчета приращений кажущейся скорости с осей АК в оси ГСК.

Калибровка систематических погрешностей ЧЭ БИНС на практике проводится на двухосном поворотном столе и состоит из девяти поворотов БЧЭ БИНС, состоящих из трех серий по три поворота. Первая серия поворотов БЧЭ схематично изображена на рисунке 2.1.



4.

Рисунок 2.1 – Начальное положение ПСК и углы поворотов для первой серии поворотов ПСК при косвенной калибровке систематических погрешностей БЧЭ БИНС

В начальном положении оси ПСК OX_{Π} , OY_{Π} , OZ_{Π} направлены соответственно на восток, север и вверх. Первый поворот – это поворот на 180° вокруг оси OY_{Π} , которая направлена на север. По окончании этого поворота оси ПСК OX_{Π} , OZ_{Π} направлены соответственно на запад и вниз. Второй поворот вокруг той же оси приводит оси ПСК в первоначальное положение. Третий и последний поворот вокруг вертикальной оси приводят к тому, что оси ПСК OX_{Π} , OY_{Π} оказываются направленными соответственно на запад и на юг.

Вторая и третья серии поворотов аналогичны первой, за исключением того, что в первоначальном положении во второй серии поворотов оси OX_{Π} , OY_{Π} , OZ_{Π} направлены соответственно на север, вверх и на восток; в третьей серии – вверх, на восток и на север.

В начале и в конце каждого из поворотов БИНС фиксируется на 3-5 минут. Если время разворота составит 1-2 минуты, общее время проведения одной серии разворотов составит 25-35 минут. Все это время информация БЧЭ БИНС записывается в память.

При возможности желательно провести все три серии разворотов в одном запуске БИНС.

Проблемой является закрепление БИНС на поворотном столе в различных ориентациях.

В соответствии с информацией, представленной в работе [95], косвенная калибровка, не предъявляет жесткие требования к оборудованию по точности, и для ее реализации требуется лишь недорогое поворотное устройство, а не вращающийся стенд.

Платформа стенда, на которой закрепляется БИНС, может быть установлена в программное положение с точностью 1-2°. При этом погрешности ГК, которые зависят от измеряемой угловой скорости и не могут быть откалиброваны при прямой калибровке, с помощью косвенной калибровки могут быть откалиброваны с точностью:

- по масштабным коэффициентам на уровне $10^{-5} \div 10^{-6}$;
- по углам взаимной привязки осей чувствительности – на уровне единиц угловых секунд.

Скалярная калибровка

Способ скалярной калибровки подразумевает построение системы уравнений, составленной в соответствии с ММП ЧЭ БИНС. Построенная система уравнений является избыточной относительно уточняемых параметров. Для ее численного решения используется минимизация функционала от суммы квадратов разностей левой и правой частей уравнений.

Известны методики скалярной калибровки трехосных БИНС [2, 3, 41, 88], где в качестве эталонной информации используются не векторы измеряемых величин угловой скорости $\vec{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ и линейного ускорения $\vec{g} = (g_x, g_y, g_z)$, а скалярные величины, функционально связанные с этими векторами. В гравитационном поле Земли для ГК такой скалярной величиной будет являться угловая скорость вращения Земли Ω , а для АК – величина ускорения силы тяжести g .

Согласно скалярному методу калибровки [41] необходимо вычислить скалярную величину нормированного вектора, компонентами которого является

измерительная информация прибора, и сравнить ее с известным эталонным значением. Разность между скалярным произведением нормированного вектора и его эталонным значением в первом приближении линейно зависит от погрешностей измерительных осей АК (ГК).

В работах [3, 41] рассмотрены основные особенности скалярного метода калибровки блока ГК и АК, который позволяет оценить систематическую составляющую погрешности смещения нулевого сигнала, систематическую составляющую погрешности масштабного коэффициента и углы, характеризующие отклонение номинальной ориентации ОЧ АК и ГК. В соответствии с [41] в рамках скалярной калибровки не предъявляется жестких требований к испытательному оборудованию в части точности выставки БЧЭ.

В статье [3] предложена математическая модель выходных сигналов (2.1) БЧЭ и применен метод скалярной калибровки. БЧЭ представляет собой триаду одноосных ГК G_x, G_y, G_z и АК A_x, A_y, A_z , связанных с основанием прибора и осями ОХYZ, изображен на рисунке 2.2.

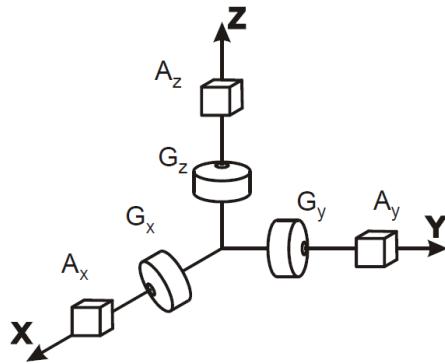


Рисунок 2.2 – БЧЭ, состоящий из АК A_x, A_y, A_z и ГК G_x, G_y, G_z , соосных с осями ПСК

ММП выходной информации АК A_x, A_y и A_z описывает оцениваемые ускорения \vec{a} и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} U_{x_A} &= B_{x_A} + (S_{x_A} + E_{x_A})a_x + \Delta_{xz_A}a_y - \Delta_{xy_A}a_z + n_{x_A}, \\ U_{y_A} &= B_{y_A} + (S_{y_A} + E_{y_A})a_y - \Delta_{yz_A}a_x + \Delta_{yx_A}a_z + n_{y_A}, \\ U_{z_A} &= B_{z_A} + (S_{z_A} + E_{z_A})a_z + \Delta_{zy_A}a_x - \Delta_{zx_A}a_y + n_{z_A}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где U_{i_A} – проекция линейного ускорения на ОЧ i -го АК A_i , где $i = x, y, z$;

B_{i_A} – смещение нулевого сигнала АК A_i , где $i = x, y, z$;

S_{i_A} – масштабный коэффициент АК A_i , где $i = x, y, z$;

E_{i_A} – погрешность масштабного коэффициента АК A_i , где $i = x, y, z$;

a_i – проекция измеряемого ускорения АК A_i , где $i = x, y, z$;

$\Delta_{ix_A}, \Delta_{iy_A}, \Delta_{iz_A}$ – коэффициенты, пропорциональные углам,

характеризующим отклонение номинальной ориентации осей АК A_i , где $i = x, y, z$ (первый индекс – ось расположения АК, второй индекс – ось, вокруг которой повернут АК на угол пропорциональный коэффициенту);

n_{i_A} – случайное блуждание выходного сигнала АК A_i , где $i = x, y, z$.

ММП выходной информации ГК G_x, G_y и G_z имеет вид аналогичный ММП (2.1) выходной информации АК A_x, A_y и A_z . ММП выходной информации ГК описывает оцениваемую угловую скорость $\vec{\omega}$.

Скалярная калибровка проводится на неподвижном основании в гравитационном поле Земли, поэтому кажущееся ускорение \vec{a} заменяется на проекции ускорения силы тяжести \vec{g} , а угловая скорость $\vec{\omega}$ на угловую скорость вращения Земли $\vec{\Omega}$.

Приведем уравнения (2.1) к безразмерной форме, поделив каждое уравнение выходного сигнала АК (2.1) на соответствующий масштабный коэффициент S_{j_A} и модуль вектора \vec{g} ($g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}$).

Новые обозначения безразмерных выходных сигналов АК и величин правых частей задаются согласно формуле (2.2).

$$u_{ja} = \frac{U_{j_A}}{S_{j_A}g}; \quad \vec{g}_j = \frac{\vec{g}_j}{g}; \quad b_{ja} = \frac{B_{j_A}}{S_{j_A}g}; \quad e_{ja} = \frac{E_{j_A}}{S_{j_A}g}; \quad n_{ja} = \frac{n_{j_A}}{S_{j_A}g}, \quad (2.2)$$

где u_{ja} – безразмерная величина измерительной информации АК A_j , ($j = x, y, z$);

\vec{g}_j – нормированный вектор ускорения силы тяжести, где $j = x, y, z$;

b_{ja} – безразмерная величина смещения нулевого сигнала АК A_j , где $j = x, y, z$;

e_{ja} – безразмерная величина погрешности масштабного коэффициента АК A_j ,

где $j = x, y, z$;

n_{ja} – безразмерная величина случайного блуждания выходного сигнала АК A_j , где $j = x, y, z$.

Разность между скалярной величиной нормированного измеряемого вектора выходного сигнала АК и его действительным значением, равным единице ($\overrightarrow{g_x^2} + \overrightarrow{g_y^2} + \overrightarrow{g_z^2} = 1$), пропорциональна погрешностям выходного сигнала АК согласно (2.3). Данная разность для АК составлена в соответствии с введенными обозначениями в (2.2).

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}(u_{xa}^2 + u_{ya}^2 + u_{za}^2 - 1) = \\ & = (b_{xa} + n_{xa})\overrightarrow{g_x} + (b_{ya} + n_{ya})\overrightarrow{g_y} + (b_{za} + n_{za})\overrightarrow{g_z} + e_{xa}\overrightarrow{g_x^2} + e_{ya}\overrightarrow{g_y^2} + e_{za}\overrightarrow{g_z^2} + \\ & + (\delta_{xz_a} - \delta_{yz_a})\overrightarrow{g_x}\overrightarrow{g_y} + (\delta_{zy_a} - \delta_{xy_a})\overrightarrow{g_x}\overrightarrow{g_z} + (\delta_{yx_a} - \delta_{zx_a})\overrightarrow{g_y}\overrightarrow{g_z}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

Коэффициентами в этой зависимости являются нормированные значения измеряемого ускорения $\overrightarrow{g_x}, \overrightarrow{g_y}, \overrightarrow{g_z}$ для АК. Для ГК формула (2.3) имеет аналогичный вид, коэффициентами соответствующей зависимости являются угловые скорости $\overrightarrow{\Omega_x}, \overrightarrow{\Omega_y}, \overrightarrow{\Omega_z}$, их степени и произведения.

В уравнении (2.3) искомыми неизвестными являются 18 параметров, которые искажают выходные сигналы БЧЭ. Шесть из них представляют собой разности углов, характеризующих отклонение номинальной ориентации осей приборов.

Для калибровки АК и ГК производят повороты БЧЭ в поле силы тяжести g вокруг определенного направления на фиксированные углы и в каждом положении получают нормированные выходные сигналы. Для решения уравнения (2.3) требуется минимум девять положений. В каждом положении БЧЭ одновременно измеряются выходные сигналы АК и ГК, поэтому минимальное число положений в два раза меньше общего числа исходных параметров.

Представим уравнения (2.3) и аналогичные уравнения для ГК в матрично-блочной форме:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ \dots \\ u_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & \vdots & 0 \\ \dots & \vdots & \dots \\ 0 & \vdots & \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ \dots \\ e_g \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

где u_a , u_g – векторы-столбцы размерности $(n \times 1)$ нормированных выходных сигналов БЧЭ, имеющие следующий вид:

$$u_a = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(u_{xa1}^2 + u_{ya1}^2 + u_{za1}^2 - 1) \\ \frac{1}{2}(u_{xa2}^2 + u_{ya2}^2 + u_{za2}^2 - 1) \\ \frac{1}{2}(u_{xa3}^2 + u_{ya3}^2 + u_{za3}^2 - 1) \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

$$u_g = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(u_{xg1}^2 + u_{yg1}^2 + u_{zg1}^2 - 1) \\ \frac{1}{2}(u_{xg2}^2 + u_{yg2}^2 + u_{zg2}^2 - 1) \\ \frac{1}{2}(u_{xg3}^2 + u_{yg3}^2 + u_{zg3}^2 - 1) \end{bmatrix}.$$

G , Ω – матрицы нормированных проекций ускорений и угловой скорости размерности $(n \times 9)$:

$$G = \begin{bmatrix} \overrightarrow{g_{x1}} & \overrightarrow{g_{y1}} & \overrightarrow{g_{z1}} & \overrightarrow{g_{x1}^2} & \overrightarrow{g_{y1}^2} & \overrightarrow{g_{z1}^2} & \overrightarrow{g_{x1}g_{y1}} & \overrightarrow{g_{x1}g_{z1}} & \overrightarrow{g_{y1}g_{z1}} \\ \cdot & \cdot \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \overrightarrow{\Omega_{x1}} & \overrightarrow{\Omega_{y1}} & \overrightarrow{\Omega_{z1}} & \overrightarrow{\Omega_{x1}^2} & \overrightarrow{\Omega_{y1}^2} & \overrightarrow{\Omega_{z1}^2} & \overrightarrow{\Omega_{x1}\Omega_{y1}} & \overrightarrow{\Omega_{x1}\Omega_{z1}} & \overrightarrow{\Omega_{y1}\Omega_{z1}} \\ \cdot & \cdot \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

e_a , e_g – векторы – столбцы искомых параметров размерности (9×1) каждый:

$$e_a = [b_{xa} + n_{xa} \ b_{ya} + n_{ya} \ b_{za} + n_{za} \ e_{xa} \ e_{ya} \ e_{za} \ \delta_{xz_a} - \delta_{yz_a} \ \delta_{xz_a} - \delta_{yz_a} \ \delta_{xz_a} - \delta_{yz_a}]^T, \quad (2.8)$$

$$e_g = [b_{xg} + n_{xg} \ b_{yg} + n_{yg} \ b_{zg} + n_{zg} \ e_{xg} \ e_{yg} \ e_{zg} \ \delta_{xz_g} - \delta_{yz_g} \ \delta_{xz_g} - \delta_{yz_g} \ \delta_{xz_g} - \delta_{yz_g}]^T, \quad (2.9)$$

Решая матричное уравнение (2.4) методом наименьших квадратов (МНК), получим:

$$\begin{bmatrix} \widehat{e}_a \\ \widehat{e}_g \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} G & \vdots & 0 \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ 0 & \vdots & \Omega \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} G & \vdots & 0 \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ 0 & \vdots & \Omega \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} G & \vdots & 0 \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ 0 & \vdots & \Omega \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \widehat{u}_a \\ \cdots \\ \widehat{u}_g \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

где \widehat{u} – оценки значений u ; \widehat{e}_a , \widehat{e}_g – оценки искомых параметров БЧЭ.

Благодаря МНК происходит сглаживание результатов. В силу того, что математическое ожидание шумов равно нулю, оценки параметров не содержат случайных помех ($M\{n_x\} = M\{n_y\} = M\{n_z\} = 0$).

Ориентация БЧЭ относительно географической системы координат оξηζ задается углами Эйлера – Крылова α, β, γ .

Переход от ГСК $o\xi\eta\zeta$ к ПСК OXYZ определяется матрицей направляющих косинусов A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Для неподвижного основания проекции на оси в матричной форме имеют вид:

$$\begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 0 \\ \Omega \cos \varphi \\ -\Omega \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

где φ – широта места.

Используя матричные уравнения, получим нормированные проекции ускорения \vec{g} и угловой скорости $\vec{\Omega}$:

$$\begin{aligned} \vec{g}_x &= -a_{13}; & \vec{\Omega}_x &= a_{12} \cos \varphi + a_{13} \sin \varphi; \\ \vec{g}_y &= -a_{23}; & \vec{\Omega}_y &= a_{22} \cos \varphi + a_{23} \sin \varphi; \\ \vec{g}_z &= -a_{33}; & \vec{\Omega}_z &= a_{32} \cos \varphi + a_{33} \sin \varphi; \end{aligned} \quad (2.13)$$

Следовательно, при решении уравнения выполнение таких вычислительных процедур с матрицами, как транспонирование, перемножение и обращение производится в основном с элементами матрицы A направляющих косинусов. Причем, если для АК широта местонахождения не влияет на вычисление их погрешностей, то для гироскопов это влияние имеет значение.

Обладая информацией об углах поворота $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ($i = 1, \dots, n$, где n – число испытаний) БЧЭ относительно ГСК $o\xi\eta\zeta$, а также измеряя и нормируя выходные сигналы БЧЭ, по заранее вычисленным элементам матрицы направляющих косинусов, можно с помощью МНК оценить погрешности ММП БЧЭ. Отметим, что с ростом числа испытаний n ($n_{\min} = 9$) происходит сглаживание результатов.

При решении матричного уравнения (2.4) могут возникать вырожденные матрицы. Для решения этой проблемы углы поворота тройки АК должны быть

разными, например, углы α могут изменяться от 0° до 360° с шагом 40° , углы β – от 0° до 80° с шагом 10° , а углы γ – от 0° до 360° с шагом 40° .

В настоящем разделе были рассмотрены некоторые известные методы по оценке систематических составляющих погрешности ЧЭ БИНС.

В данном разделе приведено описание преимуществ и недостатков рассмотренных методов оценки систематических погрешностей, а также произведен сравнительный анализ рассматриваемых методов [A1].

Калибровка по прямым измерениям, основанная на осреднении полученных измерений, позволяет оценить систематические составляющие погрешности смещения нулевого сигнала, масштабного коэффициента АК, углы неортогональности АК и систематическую составляющую погрешности смещения нулевого сигнала ГК. С помощью калибровки по прямым измерениям нельзя оценить систематическую погрешности масштабного коэффициента ГК и углы неортогональности ГК.

Преимуществами калибровки по прямым измерениям систематических погрешностей ЧЭ БИНС являются:

- возможность проведения оценок систематических параметров в различных ориентациях ОЧ БЧЭ БИНС;
- возможность применения для БИНС с избыточным количеством ОЧ.

Калибровка по прямым измерениям систематических погрешностей ЧЭ БИНС имеет следующие недостатки:

- отсутствует возможность оценки всего перечня систематических погрешностей БЧЭ БИНС, рассматриваемых в рамках работы;
- наличие существенного влияния шумов на точность калибровки;
- погрешности привязки осей БЧЭ к осям стенда имеют существенное влияние на точность оценки;
- влияние на точность калибровки инструментальных погрешностей испытательного стенда: ошибок выставки испытательного стенда в плоскости горизонта, ошибок датчиков угла, неперпендикулярности осей испытательного стенда, неточной привязки угловой ориентации осей стенда к осям ГСК.

Косвенный метод калибровки основан на алгоритмах БИНС, математически моделирующих инерциальную систему координат и решающих такие задачи, как определение параметров ориентации и пересчет приращений измерительной информации из ОЧ прибора в оси ГСК.

Преимущества косвенного способа калибровки систематических погрешностей ЧЭ БИНС:

- отсутствие жестких требования к испытательному оборудованию по точности (отсутствие необходимости в наличии дорогостоящего прецизионного стендового оборудования);

- отсутствие жестких требований к выставляемым положениям в процессе калибровки (платформа стендса, на которой закрепляется БИНС, устанавливается в программное положение с точностью $1 - 2^\circ$);

- возможность выполнения калибровки погрешностей ГК, которые зависят от измеряемой угловой скорости (не могут быть откалиброваны при прямой калибровке).

Косвенный метод калибровки имеет следующие недостатки:

- отсутствует возможность оценки всего перечня систематических погрешностей БЧЭ БИНС, рассматриваемых в рамках работы;

- наличие строгих требований по процедуре калибровки (ориентации БЧЭ относительно стендса);

- отсутствие возможности применения для БИНС с избыточным количеством ОЧ.

Скалярный метод калибровки, заключается в вычислении скалярной величины вектора измерений и сравнении его с известным скалярным значением измеряемого вектора. Он позволяет определять систематическую составляющую погрешности смещения нулевого сигнала, систематическую составляющую погрешности масштабного коэффициента и углы, характеризующие отклонение номинальной ориентации ОЧ АК и ГК.

Преимущества скалярного способа калибровки систематических погрешностей ЧЭ БИНС:

- возможность оценки всего перечня систематических погрешностей БЧЭ БИНС, рассматриваемых в рамках работы;
- возможность применения для БИНС с избыточным количеством ОЧ;
- отсутствие жестких требований к выставке испытательного оборудования;
- отсутствие жестких требований к выставляемым положениям в процессе калибровки;
- возможность комплексной оценки параметров – по результатам одной серии измерений возможно произвести калибровку АК и ГК;
- методические ошибки скалярного способа калибровки компенсируются процедурой итерационного уточнения результатов.

Классический скалярный метод калибровки систематических погрешностей ЧЭ БИНС имеет следующие недостатки:

- не оцениваются погрешности выставки отдельных гироскопов и акселерометров (углы неортогональности), оценка производится для пары измерителей;
- применяются только при условии наличия высокоточных измерений нормированных выходных сигналов датчиков;
- отсутствует гарантированная возможность получения результата – возможно появление вырожденных матриц при проведении расчетов.

2.2. Скалярная калибровка с использованием метода многопараметрической оптимизации

В диссертационной работе была разработана методика калибровки блока инерциальных измерителей БИНС с избыточным набором чувствительных элементов с использованием метода многопараметрической оптимизации (МПО) вместо МНК.

В рамках разработанной методики с использованием метода МПО проводится минимизация функционала от суммы квадратов разностей левой

и правой частей, избыточной относительно уточняемых параметров системы уравнений.

Рассмотрим настоящую методику на примере калибровки АК четырехосной БИНС с некомпланарными ОЧ (для четырех ГК БЧЭ БИНС калибровка проводится аналогично).

В ходе калибровки уточняются систематические составляющие типовой ММП измерительной информации АК БЧЭ БИНС, описанной в разделах 1.1 и 1.2, включающие масштабные коэффициенты, значения смещений нулевых сигналов и углы, характеризующие ориентацию ОЧ в БЧЭ.

Для БЧЭ БИНС с избыточным количеством АК формируются так называемые «рабочие тройки» векторов по показаниям каждого из трех АК, ОЧ которых не лежат в одной плоскости. Для варианта наличия в измерительном блоке четырех АК формируются четыре «рабочие тройки». Используя любую тройку АК, возможно оценить абсолютную величину ускорения, действующего на прибор.

Затем для каждой «рабочей тройки» записываются проекции в прямоугольную систему координат, с использованием значений углов, определяющих ориентацию ОЧ в блоке. По этим проекциям рассчитывается модуль вектора действующего ускорения или угловой скорости на прибор по данным с рассматриваемой «рабочей тройки».



Рисунок 2.3 – Схема применения скалярного способа калибровки с использованием МПО

Таким образом, для каждой «рабочей тройки» каждого участка записи информации записывается уравнение, где в левой части располагаются оцениваемые характеристики, а в правой – модуль вектора ускорения или угловой скорости, действующих на прибор. Этот модуль вектора известен с высокой точностью для каждого участка записи информации.

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_i) = \|\bar{X}_{\text{ОЦ}}\|, \quad (2.14)$$

где f – функция от оцениваемых параметров;

Π_i – оцениваемые параметры ($i = 1, 2, \dots, n$);

$\|\bar{X}_{\text{ОЦ}}\|$ – модуль вектора действующего на БИНС ускорения или угловой скорости, рассчитанный с использованием оцениваемых параметров.

Для решения такой системы уравнений составляется функционал вида:

$$\sum (\|\bar{X}_{\text{ОЦ}}\| - \|\bar{X}_{\text{ЭТ}}\|)^2 \rightarrow \min \quad (2.15)$$

где $\|\bar{X}_{\text{ЭТ}}\|$ – известное с высокой точностью эталонное значение действующего на БИНС ускорения или угловой скорости.

Оптимизация функционала (2.15) осуществляется с использованием способа многопараметрической оптимизации. Представленные в разделе 2.3. результаты расчетов получены с использованием адаптивного метода покоординатного спуска. Порядок применения метода покоординатного спуска изложен в [10].

Источниками эталонной информации могут служить данные с высокоточных инерциальных измерительных средств, установленных на изделие. Например, данные с гиростабилизированной платформы. Или данные средств спутниковой навигации. Также могут использоваться известные с высокой точностью геодезические параметры.

Рассмотрим методику для уточнения составляющих ММП блока акселерометров БЧЭ БИНС, включающего в себя четыре измерителя.

По показаниям каждого из трех АК формируются «рабочие тройки» векторов. Для четырех АК в блоке формируются четыре «рабочие тройки». Это возможно делать, когда никакие три ОЧ АК не лежат в одной плоскости, то есть, используя

любую тройку измерителей можно оценить величину ускорения, действующего на прибор.

С помощью математической модели прибора для каждой «рабочей тройки» записываются проекции в ПСК, по которым затем рассчитывается общее значение действующего ускорения на прибор по данным с каждой «рабочей тройки».

Переход от проекций на ОЧ АК к проекциям на ОЧ ПСК происходит с помощью матрицы перехода M_A , в которую входят погрешность ориентации ОЧ i -го МА по отношению к ее номинальному положению (углы α, β).

Для варианта с четырьмя АК формула перехода выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \Delta w_{A1} \\ \Delta w_{A2} \\ \Delta w_{A3} \\ \Delta w_{A4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{A11} & M_{A12} & M_{A13} \\ M_{A21} & M_{A22} & M_{A23} \\ M_{A31} & M_{A32} & M_{A33} \\ M_{A41} & M_{A42} & M_{A43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta w_{x_\Pi} \\ \Delta w_{y_\Pi} \\ \Delta w_{z_\Pi} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

где M_A – матрица, связывающая ОЧ АК с ОЧ ПСК;

$\Delta w_{i\Pi}$ – проекция каждого ускорения на ОЧ ПСК ($i = X, Y, Z$).

Таким образом, для каждой «рабочей тройки» каждого выставляемого положения записывается уравнение, где в левой части располагаются уточняемые характеристики ММП БЧЭ прибора, а в правой – модуль вектора ускорения, действующего на прибор.

Для варианта с четырьмя АК записывается четыре таких уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\| \begin{pmatrix} M_{A11} & M_{A12} & M_{A13} \\ M_{A21} & M_{A22} & M_{A23} \\ M_{A31} & M_{A32} & M_{A33} \end{pmatrix}^{-1} * \begin{pmatrix} \Delta W_{A1} \\ \Delta W_{A2} \\ \Delta W_{A3} \end{pmatrix} \right\| = \|\bar{a}\| \\ \left\| \begin{pmatrix} M_{A11} & M_{A12} & M_{A14} \\ M_{A21} & M_{A22} & M_{A24} \\ M_{A41} & M_{A42} & M_{A44} \end{pmatrix}^{-1} * \begin{pmatrix} \Delta W_{A1} \\ \Delta W_{A2} \\ \Delta W_{A4} \end{pmatrix} \right\| = \|\bar{a}\| \\ \left\| \begin{pmatrix} M_{A11} & M_{A13} & M_{A14} \\ M_{A31} & M_{A33} & M_{A34} \\ M_{A41} & M_{A43} & M_{A44} \end{pmatrix}^{-1} * \begin{pmatrix} \Delta W_{A1} \\ \Delta W_{A3} \\ \Delta W_{A4} \end{pmatrix} \right\| = \|\bar{a}\| \\ \left\| \begin{pmatrix} M_{A22} & M_{A23} & M_{A24} \\ M_{A32} & M_{A33} & M_{A34} \\ M_{A42} & M_{A43} & M_{A44} \end{pmatrix}^{-1} * \begin{pmatrix} \Delta W_{A2} \\ \Delta W_{A3} \\ \Delta W_{A4} \end{pmatrix} \right\| = \|\bar{a}\| \end{array} \right. , \quad (2.17)$$

где $\|\bar{a}\|$ – модуль вектора ускорения, действующего на прибор.

Предполагается, что модуль вектора, действующего на прибор ускорения, известен с высокой точностью. Рассматривается набор ориентаций БЧЭ, исходя из построения системы уравнений (2.18) избыточной по отношению к уточняемым паспортным характеристикам БЧЭ БИНС. Далее минимизируется разность между оценкой модуля вектора действующего на прибор ускорения в каждом уравнении и соответствующим эталонным значением. При этом варьирование оцениваемых параметров ММП БИНС приводит к их уточнению.

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n) = \|\bar{a}\| , \quad (2.18)$$

где f – функция от оцениваемых параметров, равная действующему на прибор ускорению;

Π_i – оцениваемые параметры ($i = 1, 2, \dots, n$), включающие в себя масштабные коэффициенты, смещения нулей и углы α, β .

Для решения системы (2.18) составляется функционал вида:

$$\sum (f - \|\bar{a}\|)^2 \rightarrow \min \quad (2.19)$$

Оптимизация функционала осуществляется с привлечением адаптивного метода покоординатного спуска. Поочередно для каждой калибруемой составляющей ММП рассматривается ее изменение на заданный шаг в обе стороны (положительную и отрицательную). При снижении общего рассогласования оценки вектора g с его эталоном такое изменение сохраняется. Шаг также

изменяется в зависимости от попытки изменения составляющей. А именно, при успешном исходе шаг увеличивается, при неуспешном – уменьшается.

Кроме того, вместо метода покоординатного спуска может быть использован другой метод оптимизации, в зависимости от особенностей оцениваемой математической модели погрешностей. Например, метод градиентного спуска. Оценка точности скалярной калибровки в зависимости от применения различных методов оптимизации может быть предметом дальнейших исследований.

При использовании методики для стендовой калибровки образцов БИНС для каждого исследуемого прибора по результатам моделирования вырабатываются соответствующие критерии по необходимому количеству итераций алгоритма и уровню рассогласования между измеренным и эталонным \mathbf{g} для получения нужной точности при оценке параметров ММП БИНС.

Для оценки минимально необходимого количества участков записи информации, используемой в обработке для уточнения определенных характеристик, рассчитывается ранг системы уравнений, составленной для всех «рабочих троек» некомпланарных векторов, входящих в БИНС.

Ранг системы (2.17) равен 2 (расчеты приведены в работе [A19]). Исходя из этого, для уточнения 4 характеристик, например, 4 масштабных коэффициентов или 4 значений смещений нулевого сигнала, требуется минимум 2 участка записи информации.

Исходя из ранга системы (2.17), определяется количество положений блока АК, в которых происходит съем измерительной информации. Это диктуется тем, что оценка определенного количества параметров ММП требует соответствующего числа линейно-независимых уравнений.

В общем случае, для оценки n -составляющих ММП необходимо как минимум ($[n / \text{ранг}]_{\text{Целая часть}} + 1$) различных характерных положений.

При необходимости получить оценки 4 смещений нулевых сигналов, 4 масштабных коэффициентов и 5 из 8 углов (3 угла фиксированы для однозначного определения ориентации ОЧ в пространстве), характеризующих отклонение номинальной ориентации ОЧ, при ранге системы равном 2, требуется

13 линейно-независимых уравнений и соответственно не менее 7 различных положений, в которых произведена запись измерительной информации БЧЭ БИНС.

2.3. Практические результаты применения скалярного способа калибровки с использованием метода многопараметрической оптимизации

В MatLab реализовано программно-математическое обеспечение (ПМО), позволяющее оценивать погрешности ММП ЧЭ БИНС по начальному задаваемому уровню измерительных данных на определенных участках записи информации и соответствующих им эталонных значений физических величин.

Начальные значения моделируемых систематических составляющих погрешности ММП БИНС выбирались на уровне, близком к характеристикам БИНС реальных образцов БИНС, входящих в состав систем управления изделий РКТ гражданского назначения, с избыточным количеством измерительных осей. Уходы моделировались с использованием датчика случайных чисел, равномерно распределенными в диапазоне +/- максимальный уход характеристик за весь срок эксплуатации. Начальный шаг метода покоординатного спуска оценки выбирался на один порядок меньше, чем максимальное значение моделируемых уходов, на практике было выявлено, что в таких условиях наиболее быстро достигаются результаты расчета.

Для оценки составляющих ММП БЧЭ БИНС необходимо определить оптимальное количество и характер выставляемых положений (разворотов) в условиях определенных ограничений, связанных, во-первых, с конструктивными особенностями самого исследуемого образца прибора и, во-вторых, собственно с наличием возможности выставки в необходимые положения (разворотов).

Каждой уточняемой составляющей ММП БЧЭ БИНС свойственно определенное положение (разворот), где она определяется с максимальной точностью. При минимизации количества выставляемых положений (разворотов)

задача выбора этих положений сводится к нахождению положений (разворотов), в которых хорошо определяется максимальное количество уточняемых составляющих.

Так, при оценке составляющих ММП АК необходимое количество выставляемых положений определялось следующим образом. Множество оцениваемых параметров для всех четырех некомпланарных однотипных ОЧ БЧЭ БИНС состоит из 16-ти параметров: относительной погрешности масштабного коэффициента ΔM_i (4 параметра), смещения нулевого сигнала τ_i (4 параметра) и углов отклонения α_i (4 параметра) и β_i (4 параметра), где $i = 1, \dots, 4$.

Для однозначного задания ориентации ПСК БИНС в пространстве какие-либо три угла из наборов α_i и β_i (один из набора α_i и два из набора β_i либо два из набора α_i и один из набора β_i) должны быть зафиксированы (а, значит, не подлежат уточнению). Следовательно, суммарное количество оцениваемых параметров ММП АК снижается до 13-ти.

Для оценки 13-ти параметров теоретически достаточно семи независимых положений. Практически же, для рассматриваемой реализации БЧЭ БИНС наилучший результат по точности оценки был достигнут при девяти выставляемых положениях. Шесть положений из девяти образованы путем последовательной выставки каждой из осей ПСК $OX_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ вдоль направления действия вектора \vec{g} (вертикально вверх и вниз) и три положения – путем последовательной выставки каждой пары осей ПСК симметрично относительно плоскости, перпендикулярной действию вектора \vec{g} .

Методика оценки систематических погрешностей ММП ЧЭ БИНС на основе многопараметрической оптимизации апробирована на примере оценки ММП АК как для условий моделирования информации АК в девяти характерных положениях ПСК БИНС, так и путем обработки информации АК, зарегистрированной при испытаниях образцов приборов на отработочных позициях АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова» в наземных условиях.

Проведено сравнение использования методов МНК и МПО при реализации метода скалярной калибровки.

При моделировании измерительной информации АК численные значения оцениваемых составляющих ММП задавались равными соответствующим значениям паспортных параметров образцов БИНС, входящих в состав систем управления изделий РКТ гражданского назначения. В качестве зафиксированных углов отклонения фактической ориентации ОЧ АК от расчетного положения использованы углы α_4 , β_1 и β_4 , которые можно увидеть на рисунке 1.4. Уточнение всех составляющих ММП АК проводилось при задании начальных значений, равных «0».

Результаты оценки составляющих ММП АК для условий моделирования на 100 запусках измерительной информации АК в девяти характерных положениях представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Средняя на 100 запусках относительная погрешность определения составляющих ММП БЧЭ БИНС с 4 АК для случая моделирования измерительной в девяти характерных положениях

Метод	МПО		МНК	
Наименование погрешности	Относительная погрешность для 1-4 АК, %	Среднее по группе уточняемых параметров, %	Относительная погрешность, %	Среднее по группе уточняемых параметров, %
Погрешность масштабного коэффициента	1,10 ⁻¹¹	1,394 ⁻¹¹	8,771 ⁻⁰⁷	6,572 ⁻⁰⁷
	1,755 ⁻¹¹		1,003 ⁻⁰⁶	
	1,184 ⁻¹¹		2,377 ⁻⁰⁷	
	1,534 ⁻¹¹		5,103 ⁻⁰⁷	
Смещение нулевого сигнала	1,284 ⁻⁰⁸	2,523 ⁻⁰⁸	2,895 ⁻⁰⁵	1,642 ⁻⁰⁴
	3,885 ⁻⁰⁹		1,231 ⁻⁰⁴	
	8,357 ⁻⁰⁸		1,139 ⁻⁰⁴	
	6,288 ⁻¹⁰		3,907 ⁻⁰⁴	
Углы α отклонения ОЧ	1,109 ⁻⁰⁸	1,168 ⁻⁰⁸	1,686 ⁻⁰⁴	2,478 ⁻⁰⁴
	2,216 ⁻⁰⁹		8,410 ⁻⁰⁵	
	2,174 ⁻⁰⁸		4,907 ⁻⁰⁴	
	-		-	
Углы β отклонения ОЧ	-	1,202 ⁻⁰⁸	-	4,408 ⁻⁰⁴
	1,390 ⁻⁰⁸		6,094 ⁻⁰⁴	
	1,014 ⁻⁰⁸		2,721 ⁻⁰⁴	
	-		-	

Анализ данных, приведенных в таблице 2.1, показал, что применение метода МПО вместо МНК оказывает влияние на точность оценки параметров ММП АК,

увеличивая точность оценки для рассматриваемого случая приблизительно на четыре порядка.

В таблицах 2.2 и 2.3 представлены оценки параметров ММП АК, сделанные по реальной информации АК, зарегистрированной в процессе последовательной выставки ПСК $OX_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ относительно местной ГСК ОНЕ в девять характерных положений. Выставка ПСК относительно ГСК обеспечивалась с расчетной точностью ~ 3 угл. мин посредством разворотов двухосного поворотного стола с установленным на нем образцом БИНС.

Обработка информации произведена по двум прогонам с длительностью регистрации информации в каждом выставляемом положении ~ 5 мин и ~ 1 мин соответственно. При этом составляющие ММП АК, уточненные посредством многопараметрической оптимизации, сравнивались с паспортными данными исследуемого образца БИНС, представленными разработчиком прибора.

Таблица 2.2 – Относительная погрешность определения масштабного коэффициента АК по информации, зарегистрированной с выхода образца БИНС в девяти выставляемых положениях

Наименование погрешности	Паспорт	Прогон 1 (~ 5 мин)		Прогон 2 (~ 1 мин)	
		Оценка	Отличие от паспорта, %	Оценка	Отличие от паспорта, %
Масштабный коэффициент $\times 10^{-4}$, м/с	7,52268	7,52278	0,00130	7,52283	0,00204
	7,65248	7,65263	0,00196	7,65274	0,00344
	7,59648	7,59645	0,00039	7,59647	0,00018
	7,59414	7,59385	0,00383	7,59397	0,00223

Как следует из таблицы 2.2, относительная погрешность определения цены единицы младшего разряда каждого из 4-х АК, находится на уровне 10^{-3} % при заданном разработчиком допустимом уровне ее изменения 0,02 %.

Как следует из данных, представленных в таблице 2.3, в части смещения нулевого сигнала, максимальное отличие от паспорта разработчика составило $\sim (-0,00086)$ м/с², в части углов отклонения ОЧ АК от расчетного положения –

$\sim(-0,000351)$ рад. Обе цифры находятся в допуске ($\pm 2 \cdot 10^{-3}$ м/с², ± 45 угл.с соответственно), заданном разработчиком прибора.

Таблица 2.3 – Отличие составляющих ММП АК, полученных по информации, зарегистрированной с выхода образца БИНС в девяти выставляемых положениях, от паспортных данных разработчика

Наименование погрешности	Паспорт	Прогон 1 (~5 мин)		Прогон 2 (~1 мин)	
		Оценка	Отличие от паспорта	Оценка	Отличие от паспорта
Смещение нулевого сигнала, м/с ²	0,01436	0,01439	0,00003	0,01448	0,00012
	0,00654	0,00688	0,00034	0,00695	0,00041
	0,00978	0,00981	0,00003	0,00993	0,00015
	0,00383	0,00328	-0,00055	0,00297	-0,00086
Углы α отклонения Оч, рад	0,000528	0,000679	0,000151	0,000616	0,000088
	0,001355	0,001355	0	0,001369	0,000014
	-0,001305	-0,001444	0,000139	-0,001366	-0,000061
	-0,001583	-0,001583	0	-0,001583	0
Углы β отклонения Оч, рад	0,001373	0,001373	0	0,001373	0
	-0,000049	-0,000229	-0,000180	-0,000147	-0,000257
	-0,001120	-0,001188	-0,000068	-0,001214	-0,000351
	0,000056	0,000056	0	0,000056	0

В работе [А12] рассматриваются вопросы поиска минимально необходимого набора ориентаций БЧЭ БИНС в пространстве для оценки требуемого состава точностных характеристик: масштабных коэффициентов, смещений нулевого сигнала и углов, характеризующих ориентацию измерителей в БЧЭ.

Составляющие ММП АК и ГК моделировались на уровнях, представленных согласно таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Уровень масштабного коэффициента, смещения нулевого сигнала и углов отклонения номинальной ориентации для моделирования измерительной информации АК и ГК

Характеристика	Значение характеристики для АК	Значение характеристики для ГК
Масштабный коэффициент	$2 \cdot 10^{-4}$ м/с	$7 \cdot 10^{-8}$ рад
Смещение нулевого сигнала	10^{-2} м/с ²	$7 \cdot 10^{-6}$ рад/с
Углы отклонения номинальной ориентации ОЧ	0°	0°

Изначально были найдены участки записи информации в стационарном положении (в условиях действия угловой скорости вращения Земли и ускорения свободного падения), в которых данный способ реализуем (по аналогии с [41]). Далее путем случайного варьирования величин ϑ, ψ, φ были подобраны статические положения БЧЭ БИНС, в которых уточняются все характеристики с достаточной точностью для АК и ГК.

Хотя теоретически уточнение может производиться при наличии минимум 7 участков записи информации, для простоты нахождения такого набора было взято избыточное количество участков записи информации в количестве 10 участков.

Углы ϑ, ψ, φ , характеризующие статические положения, в которых возможно уточнение характеристик для АК и ГК приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Углы ϑ, ψ, φ характеризующие статические положения, в которых возможно уточнение характеристик образца БИНС для АК и ГК для 10 участков записи информации

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол ϑ	190	150	30	270	90	30	150	0	10	120
Угол ψ	350	0	50	90	120	340	210	30	210	30
Угол φ	320	250	250	250	20	160	160	90	10	90

В таблице 2.6 представлены погрешности оценки погрешностей БЧЭ БИНС по результатам скалярной калибровки для 100 запусков программы. Для каждой характеристики рассчитывалось среднее и максимальное значение по всем ОЧ и 100 запускам.

Таблица 2.6 – Погрешности оценки погрешностей БЧЭ БИНС по результатам скалярной калибровки для 100 запусков программы для 10 участков записи информации

№	Характеристика	Среднее значение	Максимальное значение	Моделируемый уход (максимальное значение)
1	Масштабные коэффициенты АК, м/с	$5.71 \cdot 10^{-10}$	$1.42 \cdot 10^{-9}$	$1.04 \cdot 10^{-5}$
2	Смещения нулевого сигнала АК, $\text{м}/\text{с}^2$	$2.96 \cdot 10^{-5}$	$5.62 \cdot 10^{-5}$	$5.00 \cdot 10^{-4}$
3	Углы отклонения ОЧ АК, °	$2.41 \cdot 10^{-4}$	$5.79 \cdot 10^{-4}$	$5.56 \cdot 10^{-3}$
4	Масштабные коэффициенты ГК, рад	$6.15 \cdot 10^{-13}$	$1.48 \cdot 10^{-12}$	$7.08 \cdot 10^{-10}$
5	Смещения нулевого сигнала ГК, рад/с	$3.89 \cdot 10^{-10}$	$9.66 \cdot 10^{-10}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$
6	Углы отклонения ОЧ ГК, °	$7.06 \cdot 10^{-4}$	$1.49 \cdot 10^{-3}$	$5.56 \cdot 10^{-3}$

В соответствии с результатом работы [20] при решении различных функциональных задач масштабные коэффициенты и/или смещения нулевого сигнала могут являться наиболее существенными характеристиками, определяющими точность навигации. Исходя из этого, на следующем этапе рассматривалась возможность уточнения только этих характеристик по 4 участкам записи информации.

В таблице 2.7 приведены погрешности оценки масштабных коэффициентов и смещений нулевых сигналов ОЧ БЧЭ БИНС по результатам скалярной калибровки для 100 запусков программы для четырех участков записи информации из таблицы 2.1 под № 1–4.

Таблица 2.7 – Погрешности оценки масштабных коэффициентов и смещений нулевого сигнала БЧЭ БИНС по результатам скалярной калибровки для 100 запусков программы для 4 участков записи информации из таблицы 2.5 под № 1–4

№	Характеристика	Среднее значение	Максимальное значение	Моделируемый уход (максимальное значение)
1	Масштабные коэффициенты АК, м/с	$9.28 \cdot 10^{-9}$	$4.14 \cdot 10^{-8}$	$1.04 \cdot 10^{-5}$
2	Смещения нулевого сигнала АК, $\text{м}/\text{с}^2$	$4.21 \cdot 10^{-4}$	$1.77 \cdot 10^{-3}$	$5.00 \cdot 10^{-4}$
3	Углы отклонения ОЧ АК, °	$2.79 \cdot 10^{-3}*$	$5.55 \cdot 10^{-3}*$	$5.56 \cdot 10^{-3}$

Продолжение таблицы 2.7

4	Масштабные коэффициенты ГК, рад	$3.63 \cdot 10^{-12}$	$1.93 \cdot 10^{-11}$	$7.08 \cdot 10^{-10}$
5	Смещения нулевого сигнала ГК, рад/с	$3.96 \cdot 10^{-9}$	$1.98 \cdot 10^{-8}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$
6	Углы отклонения ОЧ ГК, °	$2.71 \cdot 10^{-3}*$	$5.54 \cdot 10^{-3}*$	$5.56 \cdot 10^{-3}$
Примечание: * – значения задаваемое при моделировании, уточнение не производилось				

В таблицах 2.7, 2.9, 2.11, 2.12 серым цветом выделены ячейки, в которых расположены значения, превышающие максимальную величину моделируемой погрешности.

Поскольку шумовые составляющие на данном этапе не моделировались, в случае успешного уточнения характеристик их отличие от заданных определялось такими параметрами, как вычислительная ошибка, погрешность, вызванная квантованием по уровню и по времени, а также вследствие ухода характеристик, которые не оценивались (для случаев, когда стоит задача оценки части характеристик).

Дополнительно было проведено моделирование измерительной информации со снижением на порядок максимального моделируемого ухода характеристик, которые не оценивались в рассматриваемом случае – углам отклонения ОЧ АК. При этом максимальное значение смещения нулевого сигнала четырех АК на 100 запусках составило $1.83 \cdot 10^{-4}$ м/с², что не превышает максимальной величины моделируемого ухода смещения нулевого сигнала АК ($5.00 \cdot 10^{-4}$ м/с²).

Если рассматривать ориентации четырех положений из таблицы 2.5 под № 1–4, переход между ними осуществляется посредством разворотов на различные углы: одного разворота на угол φ и по три разворота на углы ϑ и ψ .

С целью упрощения перехода между статическими положениями, сокращения количества разворотов, а также использования только разворотов на 90° в процессе моделирования измерительной информации АК и ГК в четырех положениях производилось последовательное варьирование величин φ, ϑ, ψ на угол 10° и последующая скалярная калибровка.

По результатам варьирования величин φ, ϑ, ψ были подобраны положения, переход между которыми осуществляется посредством одного разворота на 90° по углу ϑ , одного разворота на 90° по углу ψ , а по углу φ ориентация оставалась неизменный для всех четырех положений (таблица 2.8).

Таблица 2.8 – Углы ϑ, ψ, φ , характеризующие статические положения, в которых возможно уточнение масштабных коэффициентов и смещений нулевого сигнала БЧЭ БИНС для 4 участков записи информации

№	1	2	3	4
Угол ϑ	190	190	100	100
Угол ψ	350	260	350	260
Угол φ	320	320	320	320

В процессе варьирования φ, ϑ, ψ была отмечена следующая тенденция: калибровка характеристик БЧЭ в условиях теоретически минимального количества участков записи информации возможна, когда ось разворота между статическими положениями и направлениями вектора свободного падения и вектора угловой скорости вращения Земли в статических положениях не соосны какой-либо ОЧ, и не находятся под одним углом к двум, либо более ОЧ.

Погрешности оценки масштабного коэффициента и смещения нулевого сигнала БИНС для 4 участков записи информации в соответствии с таблицей 2.8 по результатам скалярной калибровки для 100 запусков ПМО представлены в таблице 2.9.

При моделировании измерительной информации АК в соответствии с таблицей 2.8 и в дальнейшем уход углов отклонения ОЧ АК также был снижен на порядок, как и на предыдущем этапе.

Таблица 2.9 – Погрешности оценки масштабных коэффициентов и смещений нулевого сигнала БЧЭ БИНС по результатам скалярной калибровки для 100 запусков программы для 4 участков записи информации из таблицы 2.8

№	Характеристика	Среднее значение	Максимальное значение	Моделируемый уход (максимальное значение)
1	Масштабные коэффициенты АК, м/с	$1.56 \cdot 10^{-9}$	$6.54 \cdot 10^{-9}$	$1.04 \cdot 10^{-5}$
2	Смещения нулевого сигнала АК, м/с ²	$6.31 \cdot 10^{-5}$	$3.24 \cdot 10^{-4}$	$5.00 \cdot 10^{-4}$
3	Углы отклонения ОЧ АК, °	$2.79 \cdot 10^{-4}*$	$5.55 \cdot 10^{-4}*$	$5.56 \cdot 10^{-4}$
4	Масштабные коэффициенты ГК, рад	$1.66 \cdot 10^{-9}$	$9.24 \cdot 10^{-9}$	$7.08 \cdot 10^{-10}$
5	Смещения нулевого сигнала ГК, рад/с	$1.42 \cdot 10^{-6}$	$9.66 \cdot 10^{-6}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$
6	Углы отклонения ОЧ ГК, °	$2.71 \cdot 10^{-3}*$	$5.54 \cdot 10^{-3}*$	$5.56 \cdot 10^{-3}$

Примечание: * – значения задаваемое при моделировании, уточнение не производилось

Для компенсации повышенных значений, полученных по смещению нулевого сигнала ГК, может использоваться измерительная информация, записанная в процессе разворота между двумя статическими положениями. В таблице 2.10 представлены погрешности оценки масштабного коэффициента и смещения нулевого сигнала ГК, полученные по результатам обработки 5 участков записи информации: четырех статических положений в соответствии с таблицей 2.5 и равномерного разворота на угол 90° в течение 1800 с из положения (190, 350, 320) в положение (190, 260, 320).

Таблица 2.10 – Погрешности оценки масштабных коэффициентов и смещений нулевого сигнала ГК БИНС по результатам скалярной калибровки для 100 запусков программы для 4 участков записи информации из таблицы 2.8 и равномерного разворота на 90°

№	Характеристика	Среднее значение	Максимальное значение	Моделируемый уход (максимальное значение)
1	Масштабные коэффициенты ГК, рад	$3.79 \cdot 10^{-12}$	$1.88 \cdot 10^{-11}$	$7.08 \cdot 10^{-10}$
2	Смещения нулевого сигнала ГК, рад/с	$4.28 \cdot 10^{-9}$	$1.84 \cdot 10^{-8}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$
3	Углы отклонения ОЧ ГК, °	$2.71 \cdot 10^{-3}*$	$5.54 \cdot 10^{-3}*$	$5.56 \cdot 10^{-3}$

Примечание: * – значения задаваемое при моделировании, уточнение не производилось

На следующем этапе рассматривалась возможность калибровки четырех характеристик (масштабных коэффициентов или смещений нулевого сигнала) АК и ГК. Для АК рассматривались два участка записи информации: (190, 350, 320) и (190, 260, 320). Для ГК помимо этих двух положений учитывался разворот между ними на угол 90° в течении 1800 с. В таблице 2.11 представлены погрешности оценки масштабных коэффициентов АК и ГК БЧЭ БИНС.

Таблица 2.11 – Погрешности оценки масштабных коэффициентов БЧЭ БИНС по результатам скалярной калибровки для 100 запусков программы для 2 и 3 участков записи информации для АК и ГК соответственно

№	Характеристика	Среднее значение	Максимальное значение	Моделируемый уход (максимальное значение)
1	Масштабные коэффициенты АК, м/с	$3.75 \cdot 10^{-8}$	$2.76 \cdot 10^{-7}$	$1.04 \cdot 10^{-5}$
2	Смещения нулевого сигнала АК, $\text{м}/\text{с}^2$	$2.56 \cdot 10^{-4}*_{\text{}}$	$4.99 \cdot 10^{-4}*_{\text{}}$	$5.00 \cdot 10^{-4}$
3	Углы отклонения ОЧ АК, $^\circ$	$2.79 \cdot 10^{-4}*_{\text{}}$	$5.55 \cdot 10^{-4}*_{\text{}}$	$5.56 \cdot 10^{-4}$
4	Масштабные коэффициенты ГК, рад	$1.32 \cdot 10^{-8}$	$8.65 \cdot 10^{-8}$	$7.08 \cdot 10^{-10}$
5	Смещения нулевого сигнала ГК, $\text{рад}/\text{с}$	$6.82 \cdot 10^{-6}*_{\text{}}$	$1.45 \cdot 10^{-5}*_{\text{}}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$
6	Углы отклонения ОЧ ГК, $^\circ$	$2.71 \cdot 10^{-3}*_{\text{}}$	$5.54 \cdot 10^{-3}*_{\text{}}$	$5.56 \cdot 10^{-3}$

Примечание: * – значения задаваемое при моделировании, уточнение не производилось

Повышенные значения масштабных коэффициентов ГК вызваны величиной моделируемого ухода смещений нулевого сигнала ГК. Так при снижении уровня уходов в 200 раз среднее и максимальное значения уходов масштабного коэффициента ГК по результатам калибровки составляют $6.14 \cdot 10^{-11}$ рад и $4.92 \cdot 10^{-10}$ рад соответственно, что не превышает максимальной величины моделируемого ухода масштабных коэффициентов ГК ($7.08 \cdot 10^{-10}$ рад).

В таблице 2.12 представлены погрешности оценки смещений нулевого сигнала АК и ГК БИНС.

Таблица 2.12 – Погрешности оценки смещения нулевых сигналов БЧЭ БИНС по результатам скалярной калибровки для 100 запусков программы для 2 и 3 участков записи информации для АК и ГК соответственно

№	Характеристика	Среднее значение	Максимальное значение	Моделируемый уход (максимальное значение)
1	Масштабные коэффициенты АК, м/с	$5.06 \cdot 10^{-9}*$	$1.05 \cdot 10^{-8}*$	$1.04 \cdot 10^{-8}$
2	Смещения нулевого сигнала АК, м/с ²	$1.96 \cdot 10^{-4}$	$7.88 \cdot 10^{-4}$	$5.00 \cdot 10^{-4}$
3	Углы отклонения ОЧ АК, °	$2.79 \cdot 10^{-4}*$	$5.55 \cdot 10^{-4}*$	$5.56 \cdot 10^{-4}$
4	Масштабные коэффициенты ГК, рад	$3.55 \cdot 10^{-10}*$	$7.08 \cdot 10^{-10}*$	$7.08 \cdot 10^{-10}$
5	Смещения нулевого сигнала ГК, рад/с	$2.92 \cdot 10^{-6}$	$1.73 \cdot 10^{-5}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$
6	Углы отклонения ОЧ ГК, °	$2.71 \cdot 10^{-3}*$	$5.54 \cdot 10^{-3}*$	$5.56 \cdot 10^{-3}$

Примечание: * – значения задаваемое при моделировании, уточнение не производилось

Повышенные оценки максимальных значений смещения нулевых сигналов АК и ГК обусловлены высокими значениями моделируемого ухода масштабных коэффициентов АК и ГК. Так при снижении уровня моделируемых уходов в 10^5 раз для АК и 200 раз для ГК максимальные значения уходов смещения нулевых сигналов АК и ГК по результатам калибровки составляют $4.48 \cdot 10^{-4}$ м/с² и $1.45 \cdot 10^{-5}$ рад/с соответственно, что не превышает максимальной величины моделируемого ухода смещения нулевых сигналов АК ($5.00 \cdot 10^{-4}$ м/с²) и ГК ($1.45 \cdot 10^{-5}$ рад/с) соответственно.

Методика оценки параметров ММП БИНС посредством многопараметрической оптимизации по сравнению с классическими методиками калибровки может использовать измерительную информацию, зарегистрированную в любых положениях, и допускает возможность ограничиться меньшим количеством измерительных данных. Например, для калибровки четырехосной системы с использованием метода прямых измерений потребуется 16 выставляемых положений, с использованием скалярной калибровки – 7-9 положений.

Разработанная методика может применяться для уточнения полного и сокращенного набора уточняемых параметров ММП в зависимости от имеющейся информации.

Разработанное ПМО предназначается для использования при апостериорной оценке погрешностей АК и ГК БЧЭ БИНС по результатам испытаний. ПМО может быть легко адаптировано под любую кинематическую схему БЧЭ БИНС.

Теоретические выкладки подтверждены результатами испытаний с образцами БИНС на отработочных позициях АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова».

Разработанная методика, описание которой приведено в разделе 2.2, позволяет достигать следующих технических результатов:

- повысить точность оценки параметров ММП ЧЭ БИНС (даже в условиях ограниченного объема фактически имеющейся измерительной информации);
- упростить и ускорить процесс оценки параметров ММП ЧЭ БИНС;
- снизить требования по выставляемым характерным положениям и разворотам блока инерциальных измерителей, что позволяет проводить оценку параметров ММП ЧЭ БИНС в условиях ограниченной подвижности БЧЭ БИНС.

2.4. Выводы по главе

1. Рассмотрены методы оценки систематических погрешностей АК и ГК БИНС – калибровка по прямым измерениям, скалярная калибровка, косвенная калибровка.

2. Преимуществами калибровки по прямым измерениям систематических погрешностей ЧЭ БИНС являются:

- возможность проведения оценок систематических параметров в различных ориентациях ОЧ БЧЭ БИНС;
- возможность применения для БИНС с избыточным количеством ОЧ.

Калибровка по прямым измерениям систематических погрешностей ЧЭ БИНС имеет следующие недостатки:

- отсутствует возможность оценки всего перечня систематических погрешностей БЧЭ БИНС, рассматриваемых в рамках работы;
- существенное влияние шумов на точность калибровки;
- погрешности привязки осей БЧЭ к осям стенда имеют существенное влияние на точность выработки параметров ориентации;
- влияние на точность калибровки инструментальных погрешностей испытательного стенда.

3. Преимущества косвенного способа калибровки систематических погрешностей ЧЭ БИНС:

- отсутствие жестких требований к испытательному оборудованию по точности;
- отсутствия жестких требований к выставляемым положениям в процессе калибровки.

Косвенный метод калибровки имеет следующие недостатки:

- отсутствует возможность оценки всего перечня систематических погрешностей БЧЭ БИНС, рассматриваемых в рамках работы;
- строгие требования по процедуре калибровки;
- отсутствие возможности применения для БИНС с избыточным количеством ОЧ.

4. Преимущества скалярного способа калибровки систематических погрешностей ЧЭ БИНС:

- возможность оценки всего перечня систематических погрешностей БЧЭ БИНС, рассматриваемых в рамках работы;
- возможность применения для БИНС с избыточным количеством ОЧ;
- отсутствие жестких требований к угловой выставке испытательного оборудования;
- отсутствие жестких требований к выставляемым положениям в процессе калибровки;

- комплексная оценка параметров – по результатам одной серии измерений возможно произвести калибровку АК и ГК;

- методические ошибки скалярного способа калибровки компенсируются процедурой итерационного уточнения результатов.

Классический скалярный метод калибровки систематических погрешностей ЧЭ БИНС имеет следующие недостатки:

- не оцениваются погрешности выставки отдельных гироскопов и акселерометров (углы неортогональности), оценка производится для пары измерителей;

- применение только в условиях наличии высокоточных измерений нормированных выходных сигналов датчиков;

- отсутствует гарантированная возможность получения результата – возможно появление вырожденных матриц при проведении расчетов.

5. В рамках диссертационной работы была разработана методика калибровки блока инерциальных измерителей БИНС с избыточным набором чувствительных элементов с использованием методов МПО.

6. Преимущества разработанной методики скалярной калибровки заключаются в следующем:

- повышении точности оценки параметров ММП БИНС (в том числе в условиях ограниченного объема фактически имеющейся измерительной информации);

- упрощении и ускорении процесса оценки параметров ММП БИНС;

- снижении требований по выставляемым характерным положениям и разворотам БЧЭ БИНС, что позволяет проводить оценку параметров ММП в условиях ограниченной подвижности блока инерциальных измерителей.

7. Создан инструмент, позволяющий производить моделирование измерительной информации АК и ГК в различных пространственных положениях и в процессе разворотов между этими положениями с внесением инструментальных погрешностей (погрешность масштабного коэффициента, погрешность смещения нуля, погрешности ориентации ОЧ в БЧЭ, квантование по

уровню и времени), а также компенсировать эти погрешности посредством скалярной калибровки.

Калибровка характеристик БЧЭ БИНС в условиях минимального количества участков записи информации возможна, когда ось разворота между статическими положениями и направление вектора эталонной физической величины в статических положениях не соосны какой-либо ОЧ, и не находятся под одним углом к двум, либо более ОЧ.

Скалярный способ калибровки хорошо применим для случая, когда поставлена задача уточнить все характеристики, оказывающие существенное влияние на суммарную погрешность измерений. При оценке части характеристик необходимо иметь информацию о максимальной величине уходов остальных характеристик.

Приведено описание ориентаций ПСК относительно ГСК, в которых, при записи измерительной информации БЧЭ БИНС возможно производить уточнения всего комплекса рассматриваемых параметров ММП БИНС и части характеристик в условиях ограничений по разворотам БИНС.

8. ПМО, реализующее данную методику, протестировано с положительным результатом на примере обработки акселерометрической измерительной информации, полученной как путем моделирования, так и в процессе испытаний образцов БИНС на отработочных позициях АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова».

Глава 3. Оценка случайных составляющих погрешности чувствительных элементов в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы

На точность БЧЭ БИНС навигационного класса наряду с систематическими погрешностями оказывают влияние стохастические (случайные) характеристики сигналов.

Рассмотрены различные методы оценки случайных погрешностей АК и ГК БИНС, которые можно классифицировать следующим образом:

1. Метод статистического анализа, который основан на нахождении среднего значения и дисперсии. Статистический метод является простым в реализации, но малоэффективным для определения наличия различных типов шумов, содержащихся в выходном сигнале измерителей, а также для их оценки.

2. Метод спектральной плотности мощности сигнала, который позволяет выявить наличие конкретных шумовых компонент, присутствующих в сигнале измерительных приборов. Метод подробно описан в статье [57].

3. Метод вариации Аллана (ВА). Подробно описан в работах [92, 98, 100].
Данный метод позволяет оценить, как качественный, так и количественный вклад случайных погрешностей БЧЭ БИНС.

В ходе выполнения исследований была разработана методика оценки случайных погрешностей БЧЭ БИНС на основе метода вариации Аллана, которая также описана в статье [A3].

3.1. Методы оценки случайных составляющих погрешности

Оценка случайных составляющих погрешности с помощью статистического метода

Статистический метод принципиально схож с методом прямых измерений. Основными статистическими характеристиками являются математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение. Описание метода приведено в учебном пособии [75].

Математическое ожидание при больших количествах измерений стремится к среднему значению всех измерений, которое вычисляется по формуле:

$$M = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n}, \quad (3.1)$$

где n – количество измерений;

x_1, \dots, x_n – полезная измерительная информация.

Среднеквадратическое отклонение вычисляется по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - M)^2}, \quad (3.2)$$

где n – количество измерений;

M – математическое ожидание измерений;

x_i – полезная измерительная информация ($i=1 \dots n$).

Отклонение значений выходного сигнала измерительного прибора от ожидаемых значений с нормальным законом распределения вероятностей называют случайным блужданием выходного сигнала, которое представляет собой компоненту аддитивного белого шума. Характеристикой данного шума можно считать среднеквадратическое отклонение.

Оценка случайных составляющих погрешности с помощью метода спектральной плотности мощности (СПМ)

Рассмотрим метод оценки случайных составляющих погрешностей АК и ГК БИНС, в основе которого лежит вычисление СПМ.

СПМ – это функция, описывающая распределение мощности сигнала в зависимости от частоты, то есть мощность, приходящаяся на единичный интервал частоты. В соответствии с данными, приведенными в докладах [19, 20] СПМ имеет размерность мощности, деленной на частоту, то есть энергии (интенсивности) сигнала.

Оценка СПМ может выполняться методом преобразования Фурье, предполагающего получение спектра в области частот сопоставлением функции времени (t) и функции частоты (ω).

Преобразование Фурье $F_T(k)$ для дискретного сигнала x_n имеет следующий вид:

$$F_T(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad (3.3)$$

где N – количество значений полезного сигнала измерительного прибора;

n – номера дискретных временных точек полезного сигнала измерительного прибора ($n=0, 1, \dots, N-1$);

x_n – полезный сигнал измерительного прибора;

k – индекс частоты сигнала.

СПМ (функция плотности спектра мощности) или энергетический спектр сигнала определяется согласно следующей формуле:

$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|F_T(k)|^2}{T}, \quad (3.4)$$

где $F_T(k)$ – преобразование Фурье;

ω – частота дискретизации выходного сигнала измерительного прибора;

T – период времени, на котором определен полезный сигнал измерительного прибора.

Общую ошибочную компоненту сигнала для СПМ можно представить в виде суммы шумовых составляющих с помощью следующего полинома:

$$S(f) = (2\pi f)^2 \tau_0 Q^2 + N^2 + \left(\frac{B}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{f} + \left(\frac{K}{2\pi}\right) \frac{1}{f^2} + \left(\frac{R^2}{2\pi f^3}\right), \quad (3.5)$$

где K – случайная составляющая погрешности масштабного коэффициента измерительного прибора;

B – случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала измерительного прибора;

N – случайное блуждание выходного сигнала измерительного прибора;

R – тренд приращения выходного сигнала;

Q – шум квантования.

f – частота дискретизации выходного сигнала.

Для определения численных значений коэффициентов R , K , B , N , Q необходимо аппроксимировать данные СПМ посредством полинома (3.5).

Различные типы шумов на графике СПМ представлены прямыми линиями с разными наклонами. На рисунке 3.1, приведена характерная идеализированная СПМ с различными наклонами для различных типов шумов. В соответствии с материалами работы [97] для реальных данных СПМ будет иметь постепенные переходы между различными наклонами СПМ, а не резкие (рисунок 3.1), и наклоны могут отличаться от типовых значений.

На рисунке 3.1 представлен вид типовой график СПМ.

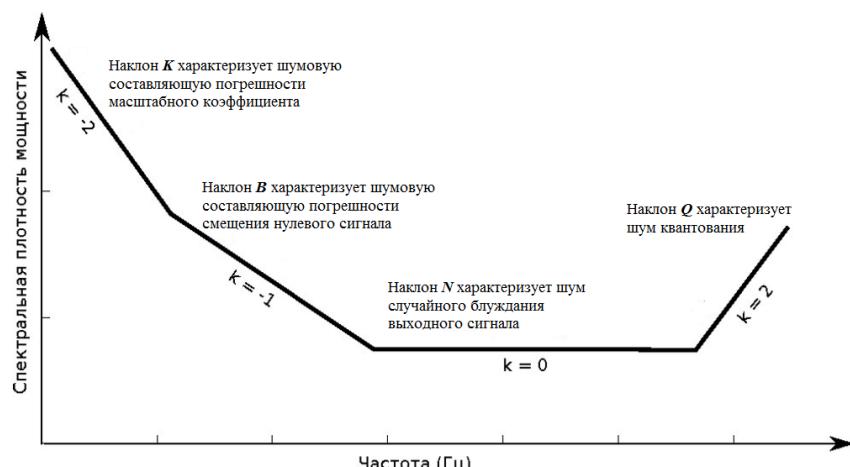


Рисунок 3.1 – Типовой график СПМ

На рисунке 3.2 в логарифмическом масштабе представлена аппроксимация функции СПМ полиномом (3.5). Здесь функция СПМ обозначена синим цветом, аппроксимирующий полином (3.5) – красным цветом, типовые наклоны графика СПМ – прямыми линиями.

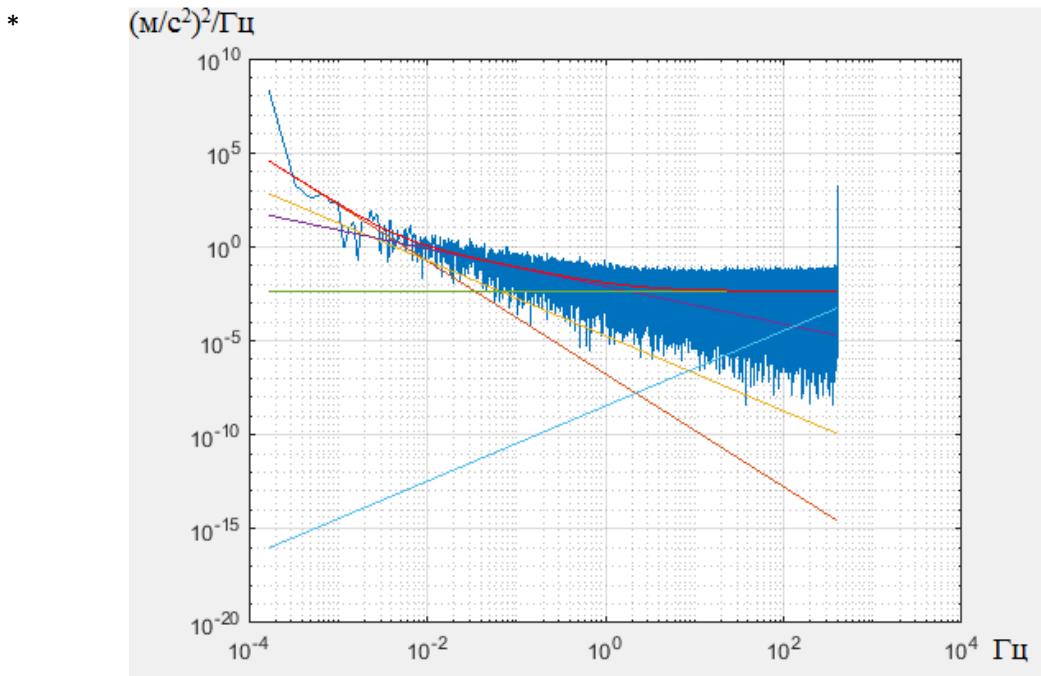


Рисунок 3.2 – Аппроксимация оценок СПМ с помощью полинома (3.5) на примере АК

Оценка случайных составляющих погрешности с помощью метода вариации Аллана

Для оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС также применяется метод ВА, описание которого приведено в трудах [1, 8, 57, 62, 72, 98].

ВА характеризует шум в полезной информации измерительных приборов и представима в виде функции, зависящей от времени осреднения измерительной информации.

ВА для набора данных измерительной информации x_1, \dots, x_L определяется как среднее дисперсий соседних пар данных x_{n-1} и x_n .

Дисперсия σ^2 двух показаний x_{n-1} и x_n измерительного прибора относительно их среднего значения $\frac{x_{n-1}+x_n}{2}$ вычисляется по формуле (3.6).

$$\sigma^2 = \frac{1}{2-1} \left[x_{n-1} - \frac{x_{n-1} + x_n}{2} \right]^2 + \left[x_n - \frac{x_{n-1} + x_n}{2} \right]^2 = \frac{(x_{n-1} - x_n)^2}{2}. \quad (3.6)$$

ВА вычисляется по формуле (3.7).

$$\sigma_A^2(\Delta t) = \frac{1}{2(L-1)} \sum_{n=1}^{L-1} (x_n - x_{n-1})^2, \quad (3.7)$$

где L - количество данных полезной информации измерительного прибора; x_{n-1} и x_n – соседние пары данных полезной информации измерительного прибора ($n = 1, \dots, L-1$);

Δt – временной интервал осреднения полезной выходной информации, в данном случае шаг съема измерительной информации.

В данном случае интервал осреднения равен шагу съема измерительной информации Δt . В общем случае в силу того, что на практике ВА определяется как среднее значение дисперсий средних значений для соседних выборок измерений, а не самих измерений, то интервал осреднения равен интервалу τ – «временному участку между средними значениями выборок».

В зависимости от целей и вычислительных возможностей метод ВА можно реализовать с различными временными шагами осреднения измерительной информации, такими как полный шаг перебора, шаг перебора по степеням двойки и равномерный шаг в логарифмической шкале.

Классически расчет ВА основан на переборе с фиксированным шагом τ , который называют «полным шагом» перебора.

В общем случае расчет ВА с полным шагом перебора можно описать в следующем виде:

1. Массив из L измерений полезной выходной информации измерительного прибора, измеренных с некоторой частотой дискретизации (3.8) (через равные промежутки времени τ), разбивается на K выборок.

Частота дискретизации рассчитывается по формуле (3.8):

$$\omega = 1/\Delta t, \quad (3.8)$$

где ω – частота дискретизации, Гц;

τ - время осреднения выборки полезной информации измерительного прибора , с.

2. Каждая из выборок содержит M измерений полезной выходной информации измерительного прибора, посредством усреднения которой определяется среднее значение элементов i -ой выборки $X_i = \frac{x_1 + \dots + x_M}{M}$, ($i = 1, \dots, K$). Связь количества измерений выборки и времени осреднения информации задается формулой (3.9).

$$\tau = M / \omega, \quad (3.9)$$

где M - количество осредняемой измерительной информации в выборке, б/р;

ω – частота дискретизации, Гц;

τ - время осреднения выборки полезной информации измерительного прибора , с.

3. При этом ВА представляет собой дисперсию разницы средних значений X_i и X_{i+1} , рассчитанных по двум соседним выборкам.

Таким образом, ВА рассчитывается по формуле (3.10).

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{i=1}^{K-1} (X_{i-1} - X_i)^2, \quad (3.10)$$

где K – количество выборок из L измерений информации ЧЭ б/р;

τ – интервал осреднения информации измерительного прибора ($\tau = M\Delta t$), с;

M – число элементов в выборке из измерительной информации;

Δt – шаг съема полезной информации ЧЭ;

X_i – среднее значение i -ой выборки из L измерений информации ЧЭ, угл.с (ГК), м/с² (АК);

X_{i+1} – среднее значение $(i+1)$ -ой выборки из L измерений информации ЧЭ, угл.с (ГК), м/с² (АК).

При практическом применении метод ВА с полным шагом перебора имеет высокую точность, но его недостатком является большое количество итераций, выполняющихся в расчетах, и как следствие требующих больших вычислительных возможностей компьютера и значительных затрат времени. Альтернативным

способом расчета ВА является формирование интервала осреднения с шагом по степеням двойки следующего вида:

$$\{\tau_k\} = \{\Delta t 2^k\}, \quad (3.11)$$

где k – номер расчетного интервала осреднения τ_k полезной информации ЧЭ ($k=0, 1, \dots, NK$, где $NK=[\log_2(L/2)]_{цч}$ – количество интервалов осреднения, L – количество полезной информации ЧЭ, $[...]$ – целая часть);

Δt – шаг съема полезной информации ЧЭ.

Интервал осреднения с шагом по степеням двойки сокращает время вычислений ВА за счет того, что расчеты ведутся с более редким шагом, но при этом теряется точность расчетов.

Оценка случайных погрешностей ЧЭ БИНС основана на рекомендациях известного руководства из стандарта [98], заключающихся в идентификации пяти типовых шумовых составляющих измерительного тракта путем нахождения соответствующих коэффициентов полинома $p_A^2(\tau)$, аппроксимирующего кривую ВА $\sigma_A^2(\tau)$ и имеющего следующий вид:

$$\sigma_A^2(\tau) \approx p_A^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}. \quad (3.12)$$

Для определения численных значений коэффициентов R, K, B, N, Q при аппроксимации экспериментальных данных ВА $\sigma_A^2(\tau)$ посредством полинома (3.12) используется МНК, который рекомендован в руководстве [98].

Таким образом, в оценке случайных погрешностей ЧЭ БИНС с помощью метода ВА реализуются следующие этапы:

1. Получение исходной информации для оценки шумовой структуры.
2. Получение значений ВА по формуле (3.10) с определенным шагом осреднения измерительной информации (полный шаг перебора / шаг по степеням двойки / равномерный шаг в логарифмической шкале).
3. Составление и минимизация целевой функции, характеризующей расхождение ВА $\sigma_A^2(\tau)$ и аппроксимирующего полинома $p_A^2(\tau)$, с целью получения коэффициентов полинома (3.12).

При анализе коэффициентов проводится построение $\sigma_A(\tau)$ – графика ВА в зависимости от времени осреднения τ в логарифмическом масштабе по обеим осям. В таблице 3.1 показаны типовые углы наклона $\sigma_A(\tau)$ – графика с описанием их характеристик.

Наклон «-2» характеризует шум квантования. Возникновение шума квантования обусловлено наличием в составе измерительных каналов сервисной электроники. Аналоговый сигнал (напряжение) с выхода измерителя подается на вход блока сервисной электроники, где посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП) входной сигнал преобразуется в дискретный цифровой код. При этом АЦП преобразует сигнал с ограниченной точностью, зависящей от целого ряда его характеристик: частоты дискретизации, разрешающей способности, наличием нелинейности и т.д. Вследствие этого, значение исходного аналогового сигнала, поступающего на вход в АЦП будет отличаться от выходного, преобразованного сигнала.

Наклон «-1» характеризует аддитивную составляющую белого шума. В ряде зарубежных и отечественных работ, в том числе в работе [57], для данного вида шума ГК часто используется термин Angle Random Walk (случайное блуждание угла). Такое название обусловлено тем, что случайное блуждание оказывает влияние на результат интегрирования. В связи с этим, можно предположить, что для АК указанный термин может трактоваться как случайное блуждание кажущейся скорости.

Наклон «0» характеризует нестабильность смещения нуля (розовый шум). Данный вид шума связан с блоком сервисной электроники. В работе [62] отмечается, что розовый шум характерен практически для всех компонент элементной базы, используемой для построения сервисной электроники блока АК инерциальных навигационных систем.

Наклон «+1» характеризует случайное блуждание выходного сигнала. Физическая природа возникновения данного вида шума слабо исследована.

Наклон «+2» характеризует тренд выходного сигнала. Данный вид шума проявляется в виде постоянного ухода значения выходного сигнала

измерительного канала. В основном такой уход обусловлен условиями окружающей среды, стабильностью источников питания и т.д.

Таблица 3.1 – Характеристика графика ВА в логарифмическом масштабе по обеим осям

Наклон $\sigma_A^2(\tau)$ - графика	Коэффициент полинома $p_A^2(\tau)$	Тип погрешности
-2	Q	Шум квантования
-1	N	Белый шум приращения выходного сигнала / Случайное блуждание выходного сигнала
0	B	Фликкер-шум выходного сигнала / нестабильность смещения нуля
+1	K	Коричневый шум приращения выходного сигнала / Случайное блуждание скорости изменения выходного сигнала
+2	R	Тренд приращения выходного сигнала

На рисунке 3.3 показаны типовые углы наклона $\sigma_A(\tau)$ – графика с описанием их характеристик для АК.

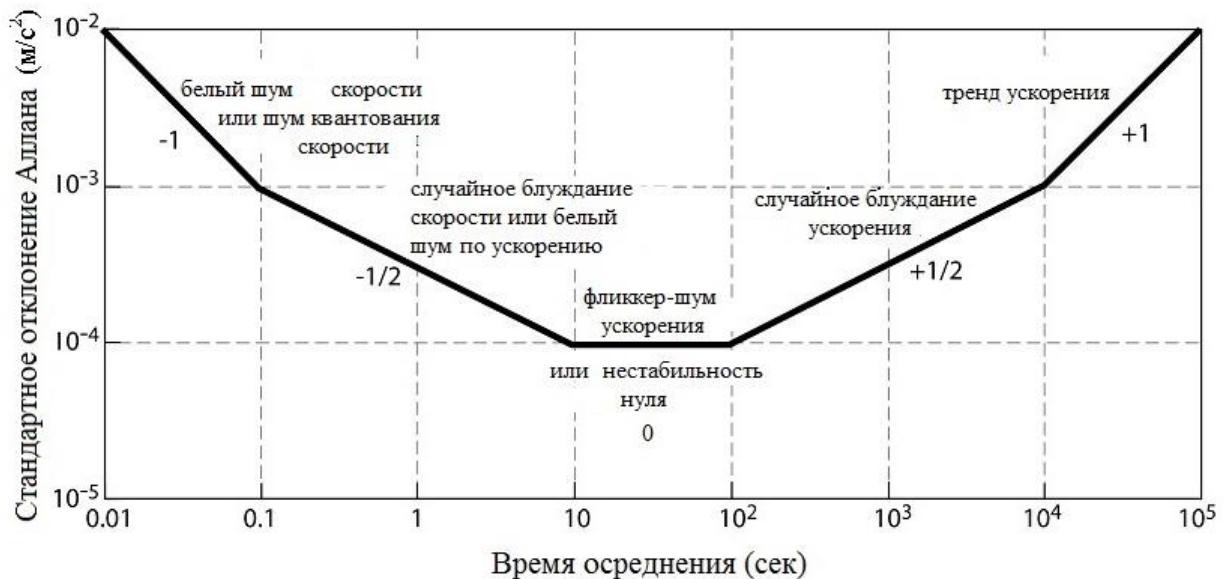


Рисунок 3.3 – Характерные наклоны графика стандартного отклонения Аллана (квадратный корень из ВА) в зависимости от времени осреднения для данных линейного ускорения акселерометра

На рисунке 3.4 показаны типовые углы наклона $\sigma_A(\tau)$ – графика с описанием их характеристик для ГК.

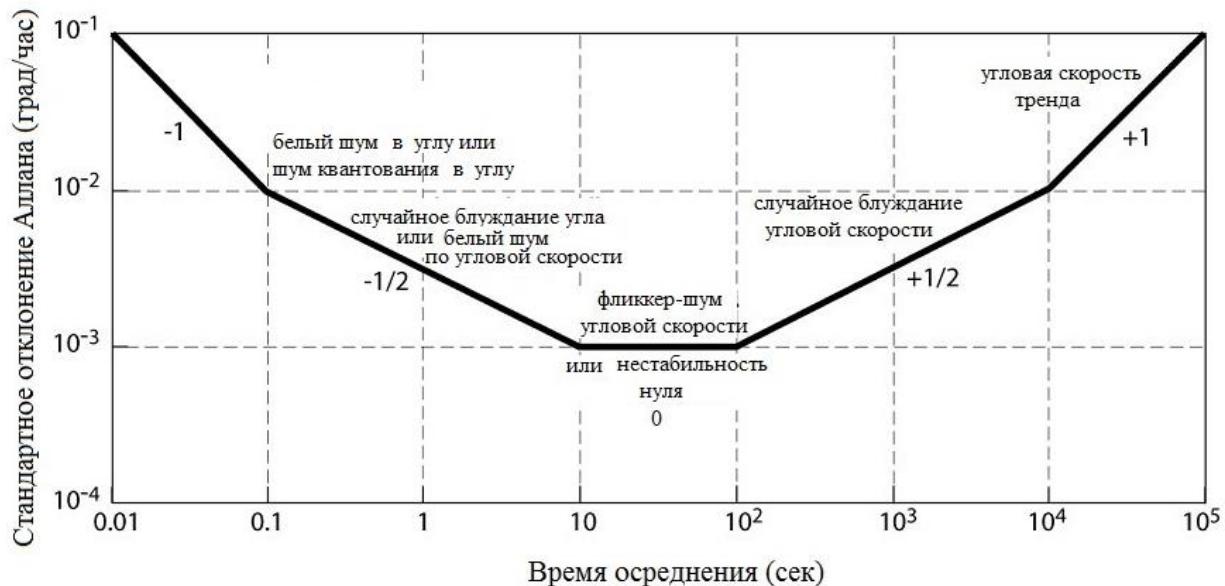


Рисунок 3.4 – Характерные наклоны графика стандартного отклонения Аллана (квадратный корень из ВА) в зависимости от времени осреднения для данных угловой скорости гироскопа

В качестве методов оценки случайных составляющих ЧЭ БИНС были рассмотрены следующие методы: статистический метод, метод СПМ и метод ВА.

Статистический метод получения оценки шума основан на исключении точно известного полезного выходного сигнала измерительного прибора из сигнала измерительного прибора с шумом.

Преимущество статистического метода оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС в том, что метод позволяет оценить общий количественный вклад шума в сигнале измерительного прибора.

Недостаток статистического метода оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС в том, что он не позволяет получить количественные оценки отдельных шумовых составляющих погрешности ЧЭ БИНС.

Метод СПМ позволяет определить оценки случайных составляющих погрешности масштабного коэффициента, смещения нулевого сигнала и оценку шума случайного блуждания выходной информации.

Преимущество метода СПМ для оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС заключается в возможности определения количественных оценок всех случайных составляющих погрешностей ЧЭ БИНС.

Недостатки метода СПМ:

- трудоемкое вычисление СПМ с помощью преобразования Фурье;
- невысокая точность определения оценок случайных погрешностей АК и ГК БИНС.

Метод ВА позволяет определить оценки случайных составляющих погрешности масштабного коэффициента, смещения нулевого сигнала и оценку шума случайного блуждания выходной информации АК и ГК.

Преимущества метода ВА:

- показания измерителя регистрируются при стационарном положении самого ЧЭ;
- отсутствуют специальные требования к ориентации ЧЭ относительно измеряемой величины;
- высокая точность определения шумовых характеристик;
- определение набора различных шумовых характеристик в рамках одного участка записи информации.

Недостатком метода ВА для оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС являются повышенные требования к вычислительным ресурсам при его реализации.

3.2. Методика оценки случайных составляющих погрешности с использованием адаптивного метода вариации Аллана

С целью повышения точности оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС и оптимизации вычислительных ресурсов была предложена новая методика на основе метода вариации Аллана.

Во-первых, предлагается производить расчет значений вариации Аллана с шагом осреднения, представляющим собой расширенную версию шага по степеням двойки за счет уменьшения шага расчета по шкале времени в 20 раз

с одновременным сохранением его равномерности в логарифмическом масштабе. Равномерный шаг в логарифмической шкале имеет следующий вид:

$$\{\tau_k\} = \{\Delta t [2^{0,05k}]_{\text{цч}}\} \quad (3.13)$$

где k – номер расчетного интервала осреднения τ_k полезной информации измерительного прибора ($k = 0, 1, \dots, NK$, где $NK = 20 [\log_2(L/2)]_{\text{цч}}$ – количество интервалов осреднения, L – количество полезной информации измерительного прибора, $[...]_{\text{цч}}$ – целая часть);

Δt – шаг съема полезной информации измерительного прибора.

Расчет значений ВА с равномерным шагом в логарифмическом масштабе существенно сокращает время вычисления ВА по сравнению с полным перебором интервалов осреднения и не теряет точности по сравнению с шагом по «степеням двойки», что подтверждается результатами, приведенными в работе автора [A5].

В рамках работы проводился расчет значений вариации Аллана по данным, моделируемым на интервалах 1, 3 и 6 ч. При этом длительность такта опроса составляла 4 мс. Таким образом, используя формулу (3.13) можно рассчитать отношение требуемых вычислительных затрат при реализации предлагаемого шага расчета и классического шага (полный перебор).

Для 1 ч сокращение вычислительных затрат составляет $\approx 2 \cdot 10^3$ раз, для 3 ч – $\approx 6 \cdot 10^3$ раз, для 6 ч – $\approx 10^4$ раз.

Для определения численных значений коэффициентов R, K, B, N, Q полинома (3.12) при аппроксимации экспериментальных данных ВА $\sigma_A^2(\tau)$ предлагается также использовать не МНК, а МПО. Практические результаты применения метода ВА, приведенные в работе [A5] подтверждают, что способ МПО по сравнению с МНК дает более точные оценки при определении шумовых характеристик (однозначный вывод нельзя сделать только для шума квантования).

Для оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС методом ВА на одном из его этапов необходимо осуществлять аппроксимацию ВА $\sigma_A^2(\tau)$ полиномом $p_A^2(\tau)$ (3.12). Таким образом, требуется минимизировать целевую функцию, характеризующую отличие ВА $\sigma_A^2(\tau)$ от аппроксимирующего полинома $p_A^2(\tau)$.

В МНК целевая функция имеет следующий вид:

$$f(R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2) = \sum (p_A^2(\tau_k) - \sigma_A^2(\tau_k))^2 \rightarrow \min \quad (3.14)$$

где $p_A^2(\tau_k)$ – аппроксимирующий полином вида на интервале осреднения τ_k ;

$\sigma_A^2(\tau_k)$ - ВА на интервале осреднения τ_k ;

R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2 – оцениваемые коэффициенты полинома $p_A^2(\tau)$;

Для оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС с помощью МНК решение сводится к нахождению минимума функции (3.14) и составляется система уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \frac{df(R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2)}{dR} = 0, \\ \frac{df(R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2)}{dK} = 0, \\ \vdots \\ \frac{df(R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2)}{dQ} = 0. \end{cases} \quad (3.15)$$

где R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2 – оцениваемые коэффициенты полинома $p_A^2(\tau)$;

f – целевая функция.

Полученная система уравнений решается методом подстановки или методом Крамера, в результате чего находятся искомые оцениваемые коэффициенты R, K, B, N, Q полинома $p_A^2(\tau)$.

Для оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС с помощью метода МПО составляется целевая функция особого вида, например, вида (3.16). При минимизации целевой функции происходит варьирование оцениваемых коэффициентов, что приводит к их уточнению.

$$\min_{R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2} \left(\sum_{k=0}^{NK} \text{Abs} \left(\log_2 \left(\sigma_A^2(\tau_k) \right) - \log_2 \left(p_A^2(\tau_k) \right) \right) \right), \quad (3.16)$$

где NK – количество интервалов осреднения измерительной информации;

$p_A^2(\tau_k)$ – аппроксимирующий полином вида на интервале осреднения τ_k ;

$\sigma_A^2(\tau_k)$ - ВА на интервале осреднения τ_k ;

R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2 – оцениваемые коэффициенты полинома $p_A^2(\tau)$.

Оценка случайных погрешностей ЧЭ БИНС с помощью МПО функционала (3.16) осуществляется с помощью адаптивного метода покоординатного спуска. Поочередно для каждого оцениваемого коэффициента полинома $p_A^2(\tau)$ рассматривается его изменение на заданный шаг в обе стороны (положительную и отрицательную). При снижении общего рассогласования ВА $\sigma_A^2(\tau_k)$ с полиномом $p_A^2(\tau_k)$ на шаге осреднения измерительной информации τ_k такое изменение сохраняется. Шаг также изменяется в зависимости от попытки изменения коэффициента. При успешном исходе шаг увеличивается, при неуспешном – уменьшается.

Следует отметить, что МНК может дать некорректный результат (как в работах [A5, A6, 70, 91]) в виде отрицательных значений без соответствующих фазовых ограничений на коэффициенты аппроксимирующего полинома, что, в свою очередь, не позволит сделать физическую интерпретацию полученных оценок. Методику на основе МНК, как и на основе МПО, можно реализовать с помощью адаптивного метода покоординатного спуска, но с учетом более высокой точности метода МПО рекомендуется использовать последний.

3.3. Практические результаты применения методики оценки случайных составляющих погрешности с использованием адаптивного метода вариации Аллана

Сравнительный анализ использования метода наименьших квадратов и метода многопараметрической оптимизации в методе вариации Аллана

Целью численного эксперимента являлась сравнительная оценка погрешностей определения шумовых характеристик при аппроксимации кривой Аллана посредством МНК и МПО.

Моделирование измерительной информации выходного сигнала осуществлялась согласно ММП описанной в главе 1 с имитацией типовых шумовых составляющих погрешности выходного сигнала маятникового акселерометра, представленных в таблице 3.1.

В таблице 3.2 определены значения параметров ММП с которыми проводилось моделирование измерительной информации АК.

Таблица 3.2 – Значения параметров АК ММП БИНС

Параметр	Характеристика	Значение	Единица измерения
Δt	Такт опроса выходного сигнала МА	0,004	с
M	Цена единицы младшего разряда	0,0007	м/с^2
SN	Номинальное значение смещения нулевого сигнала МА	0,03	м/с^2
ΔM	Скорость ухода масштабного коэффициента МА	$4,8 \cdot 10^{-10}$	м/с^2
$\sigma(\varepsilon_{\Delta M})$	СКО случайной составляющей скорости ухода МА	$9,7 \cdot 10^{-10}$	м/с^2
$\sigma(\varepsilon_{SN})$	СКО случайной составляющей смещения нулевого сигнала МА	0,02	м/с^2
$\sigma(f_{SN})$	СКО нестабильности нулевого сигнала МА	0,002	м/с^2

Соотношения, связывающие значения измеряемой величины с кодовой информацией на выходе МА, содержащие шумы измерений, на текущий момент времени представлены в главе 1.

Типовой вид ВА $\sigma_A^2(\tau)$ по акселерометрическим модельным данным для трех независимых реализаций на трехчасовом интервале наблюдения с временным шагом $\log_{10}2$ и $(\log_{10}2)/20$ представлен на рисунке 3.5.

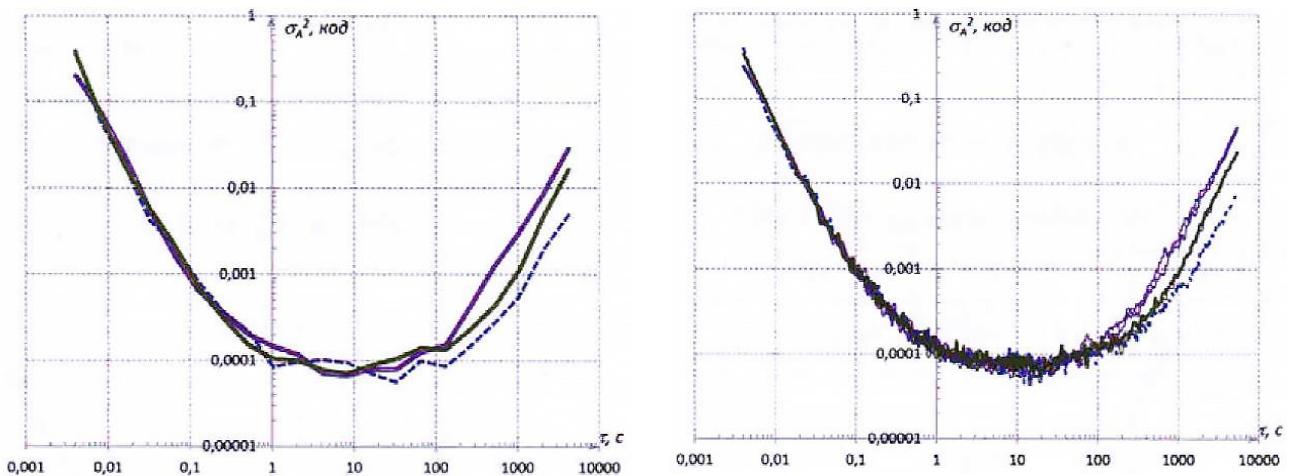
а) ВА, построенная с шагом $\log_{10}2$ по времениб) ВА, построенная с шагом $(\log_{10}2)/20$ по времени

Рисунок 3.5 – Типовой вид ВА $\sigma_A^2(\tau)$ по акселерометрическим модельным данным для трех независимых реализаций на трехчасовом интервале наблюдения с временным шагом а) $\log_{10}2$ и б) $(\log_{10}2)/20$

Отличие между графиками соответствующих реализаций с ростом времени осреднения увеличивается. Как следствие, оценки уровня шумов в измерениях, полученные по отдельным реализациям, могут иметь невысокую точность. Особенно это касается коричневого шума и фликкер-шума в измерительном канале.

С целью повышения достоверности оценок шумовых характеристик проведена статистическая обработка 30 независимых трехчасовых реализаций по группам шумовых составляющих следующего вида: (Q + N), (Q + B), (Q + K), (Q + R), которые в терминах таблицы 1 раздела 2 наряду с квантованием содержали задаваемые по отдельности составляющие белого шума, фликкер-шума, коричневого шума и тренда приращения выходного сигнала соответственно.

Для каждой пары шумовых составляющих погрешности на рисунке 3.6 представлен типовой вид ВА $\sigma_A^2(\tau)$ и аппроксимирующего полинома $p_A^2(\tau)$ с указанием численных значений моделируемых шумовых характеристик.

Как видно из рисунка 3.6 а), б), в), г), кривая ВА $\sigma_A^2(\tau)$ на всех четырех графиках содержит участок с наклоном «-2», свойственным шуму квантования. Для остальных шумовых характеристик также четко прослеживается наличие на кривой ВА $\sigma_A^2(\tau)$ участков с характерными наклонами «-1», «0», «+1» и «+2»,

свойственными белому шуму, фликкер-шуму, коричневому шуму и тренду приращения выходного сигнала соответственно.

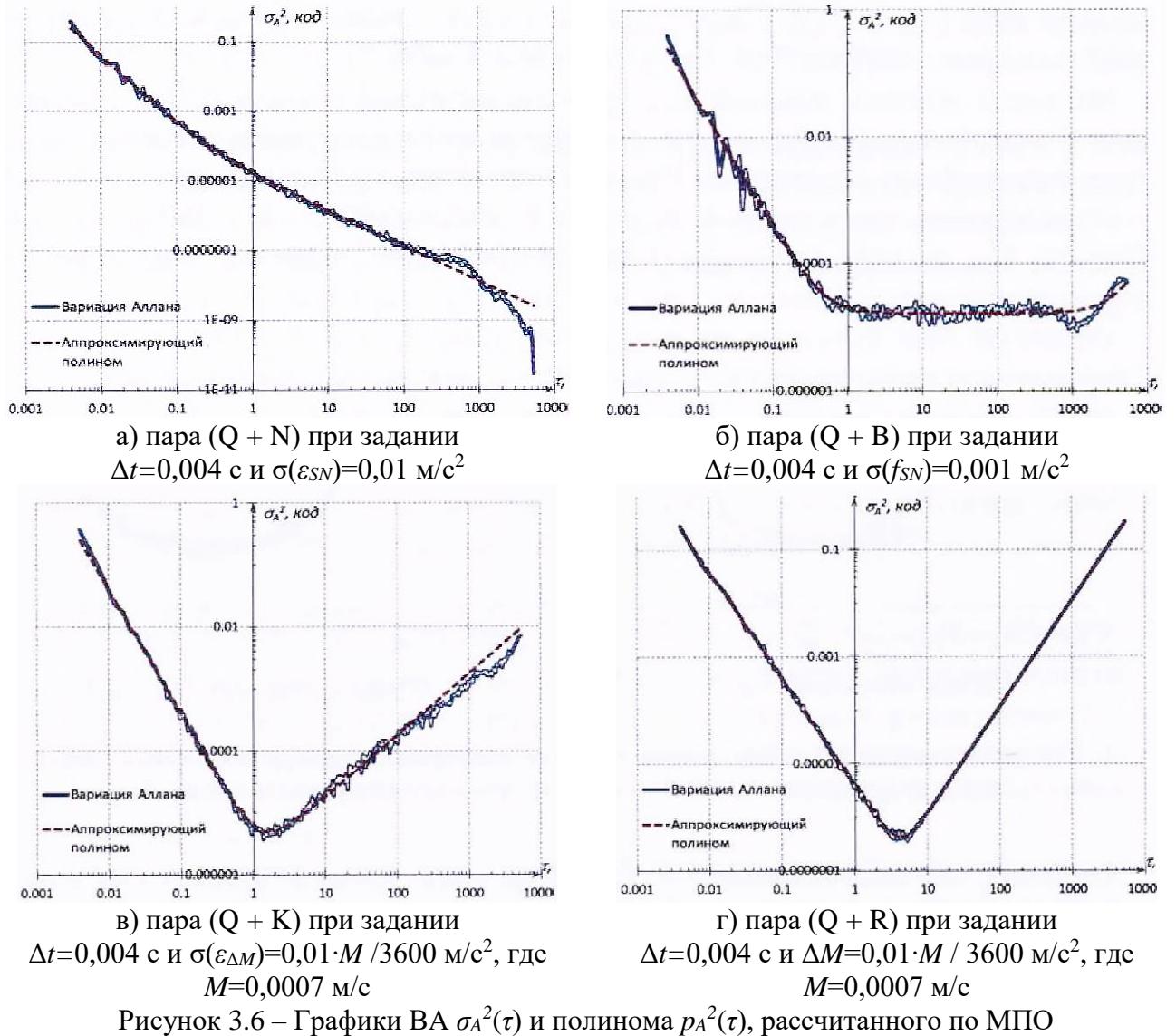


Рисунок 3.6 – Графики ВА $\sigma_A^2(\tau)$ и полинома $p_A^2(\tau)$, рассчитанного по МПО

Результаты статистической обработки в виде относительных погрешностей и среднеквадратических отклонений (СКО) оценок определения уровня шума представлены в таблицах 3.3 и 3.4 для условий расчета ВА $\sigma_A^2(\tau)$ с шагом $\log_{10}2$ и $(\log_{10}2)/20$ соответственно. При этом шум квантования Q пересчитывался в уровень квантования по времени q по формуле (3.17):

$$q = 2\sqrt{3} \cdot Q, \quad (3.17)$$

где q – уровень квантования по времени;

Q – шум квантования.

Отсутствие в четвертом варианте моделирования (пара Q + R) в терминах таблицы 1 случайных составляющих погрешности приводит к тому, что обработка ведется по одной и той же кривой ВА $\sigma_A^2(\tau)$. Вследствие этого соответствующие результаты таблиц 3.3 и 3.4 характеризуют методические погрешности используемых МНК и МПО.

Таблица 3.3 – Относительные погрешности определения коэффициентов полинома $p_A^2(\tau)$ при расчете ВА на трехчасовой реализации с шагом $\log_{10}2$ по времени

Метод аппроксимации ВА		МНК		МПО	
Условия моделирования		Оцениваемый коэффициент, размерность	Отклонение от номинала $\times 10^{-5}$ (%)	СКО $\times 10^{-5}$	Отклонение от номинала $\times 10^{-5}$ (%)
Обозначения	Значения				
Δt , с	0,004	q, с	0,398 (0,1)	12,922	15,947 (4,0)
$\sigma(\varepsilon_{SN})$, м/с ²	0,01	N, \sqrt{c}	25,869 (7,2)	20,423	3,492 (1,0)
Δt , с	0,004	q, с	28,415 (7,1)	21,040	3,205 (0,8)
$\sigma(f_{SN})$, м/с ²	0,001	B, б/р	84,774 (14,8)	129,32	1,076 (0,2)
Δt , с	0,004	q, с	16,042 (4,0)	28,545	4,111 (1,0)
$\sigma(\varepsilon_{\Delta M})$, м/с	$1,9 \times 10^{-9}$	K, $1/\sqrt{c}$	61,219 (24,6)	64,157	8,526 (3,4)
Δt , с	0,004	q, с	8,071 (2,0)	6,269	4,529 (1,1)
ΔM , м/с	$1,9 \times 10^{-9}$	R, с ⁻¹	0,078 (0,5)	0,070	0,005 (0,0)
					0,015

Таблица 3.4 характеризует методические погрешности используемых МНК и МПО на трехчасовой реализации с шагом $(\log_{10}2) / 20$ по времени.

Таблица 3.4 - Относительные погрешности определения коэффициентов полинома $p_A^2(\tau)$ при расчете ВА на трехчасовой реализации с шагом $\log_{10}20$ по времени

Метод аппроксимации ВА		МНК		МПО	
Условия моделирования		Оцениваемый коэффициент, размерность	Отклонение от номинала $\times 10^{-5}$ (%)	СКО $\times 10^{-5}$	Отклонение от номинала $\times 10^{-5}$ (%)
Обозначения	Значения				
Δt , с	0,004	q, с	8,829 (2,2)	29,012	1,103 (0,3)
$\sigma(\varepsilon_{SN})$, м/с ²	0,01	N, \sqrt{c}	57,447 (15,9)	89,670	0,670 (0,2)
Δt , с	0,004	q, с	130,608 (32,7)	37,826	6,980 (1,8)
$\sigma(f_{SN})$, м/с ²	0,001	B, б/р	138,725 (24,3)	172,185	25,890 (4,5)
					16,704

Таблица 3.4 - Относительные погрешности определения коэффициентов полинома $p_A^2(\tau)$ при расчете ВА на трехчасовой реализации с шагом $\log_{10}20$ по времени

Метод аппроксимации ВА		МНК		МПО	
Условия моделирования	Оцениваемый коэффициент, размерность	Отклонение от номинала $\times 10^{-5}$ (%)	СКО $\times 10^{-5}$	Отклонение от номинала $\times 10^{-5}$ (%)	СКО $\times 10^{-5}$
		Обозначения	Значения		
$\Delta t, \text{с}$	0,004	q, с	14,347 (3,6)	7,928	2,542 (0,6)
$\sigma(\varepsilon_{\Delta M}), \text{м/с}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	K, $1/\sqrt{\text{с}}$	45,321 (18,2)	47,167	7,107 (2,9)
$\Delta t, \text{с}$	0,004	q, с	5,258 (1,3)	1,570	0,829 (0,2)
$\Delta M, \text{м/с}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	R, с^{-1}	0,021 (0,1)	0,020	0,001 (0,0)
					0,003

Анализ представленных в таблицах 3.3 и 3.4 данных показал следующее:

1. Точность определения шумовых составляющих для шага $\log_{10}20$ выше, чем для шага $\log_{10}2$ («степени двойки»);
2. Способ МПО по сравнению с МНК дает более точные оценки при определении шумовых характеристик (однозначный вывод нельзя сделать только для шума квантования);
3. При оценке шума квантования результаты МПО и МНК соизмеримы между собой, при этом способу МПО можно отдать предпочтение по совокупности статистических результатов.

В связи с относительно большой ($>1\%$) погрешностью определения уровня коричневого шума для условий моделирования, приведенных на рисунке 3.6 в), были сделаны дополнительные расчеты при увеличенном в два раза (до 6 часов) интервале наблюдений. В этом случае погрешность определения уровня коричневого шума уменьшилась примерно в 2 раза.

В целом, для оценки основных шумовых характеристик измерительных трактов по методу ВА рекомендуется использовать метод МПО в виде предложенного логарифмического критерия полиномиальной аппроксимации кривой ВА $\sigma_A^2(\tau)$.

Сравнительный анализ методов оценки случайных погрешностей

С целью проведения сравнительного анализа эффективности методов оценки шумовых составляющих погрешности ЧЭ БИНС, таких как статистический метод, метод СПМ и метод ВА, проведено моделирование измерительной информации ЧЭ

БИНС и оценка случайных составляющих погрешности на основе рассматриваемых методов. Результатом применения методов являются количественные оценки трех основных шумовых погрешностей АК и ГК БИНС: случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента, случайной составляющей погрешности смещения нуля, шума случайного блуждания выходного сигнала. В работе также рассчитана погрешность определения данных оценок, характеризующая отличие полученных оценок шумов от известных паспортных значений реального образца БИНС в соответствии с ММП БИНС описанной в главе 1.

Моделирование зашумленной измерительной информации АК и ГК БИНС проводилось в среде Matlab. Для удобства эксперимента предполагалось, что вектор линейного ускорения, оцениваемый АК БИНС, односторонний с вектором ускорения силы тяжести, а вектор, оцениваемый ГК БИНС односторонний с вектором скорости вращения Земли. Ряд шумовых составляющих погрешности АК и ГК внесен в моделируемую выходную информацию АК (линейные ускорения) и ГК (угловые скорости) согласно ММП АК (ГК).

Для моделирования зашумленной измерительной информации АК БИНС были использованы данные случайных погрешностей реального образца БИНС, представленные в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – СКО случайных составляющих погрешности АК

№ п/п	Параметр	Характеристика	Значение параметра (СКО)	Единица измерения
1	dMK_a	Случайная составляющая масштабного коэффициента АК	0,0009	%
2	dSa	Коэффициент случайного блуждания выходного сигнала АК	0,08	$\text{м}/\text{с}^2$
3	RW_a	Случайная составляющая смещения нулевого сигнала АК	0,012	$\text{м}/\text{с}^2$

Для моделирования зашумленной измерительной информации ГК БИНС были использованы данные случайных погрешностей реального образца БИНС, представленные в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – СКО случайных составляющих погрешности ГК

№ п/п	Параметр	Характеристика	Значение параметра (СКО)	Единица измерения
1	dMK_g	Случайная составляющая масштабного коэффициента ГК	0,00035	%
2	dSg	Коэффициент случайного блуждания выходного сигнала ГК	0,015	угл.с/с
3	RW_g	Случайная составляющая смещения нулевого сигнала ГК	0,0018	угл.с/с

Наличие шумов в измерительной информации АК БИНС обуславливает случайный характер результатов ее моделирования. В связи с этим необходимо многократно вычислить измерительную информацию АК (ГК) БИНС с целью получить по всем ее наборам осредненные результаты погрешностей определения оценок шумов АК (ГК) БИНС для статистического метода, метода СПМ и метода ВА. Было определено минимальное число наборов моделируемой измерительной информации АК (ГК) БИНС с использованием теории вероятностей и теории статистики с целью получения оценки с необходимой точностью.

Рассмотрим обоснование необходимого количества запусков программы для оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента АК. Рассуждения относительно случайной составляющей погрешности смещения нуля и случайного блуждания выходного сигнала проводятся аналогичным образом как для АК, так и для ГК.

Из работы [75] известно, что с вероятностью 0,9973 оценка случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента, полученная в k -ом запуске ($k=1..∞$, т.е. при любом запуске) находится в следующем интервале:

$$(\mu_{gen.c} - 3*\sigma_{gen.c} < Ma_k' < \mu_{gen.c} + 3*\sigma_{gen.c}), \quad (3.18)$$

где Ma_k' – оценка случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента в k -ом запуске программы;

$\mu_{gen.c}$ – МО генеральной совокупности наблюдений (бесконечного множества оценок случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента);

$\sigma_{\text{ген.с}}$ – СКО генеральной совокупности наблюдений (бесконечного множества оценок случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента).

Из теории статистики известно, что дисперсия выборки σ^2 , рассчитанная по формуле (6.8), связана с дисперсией генеральной совокупности $\sigma_{\text{ген.с}}^2$ (дисперсия бесконечного множества наблюдений) соотношением (6.9), которое означает, что разница дисперсии выборки σ^2 и дисперсии генеральной совокупности $\sigma_{\text{ген.с}}^2$ уменьшается с увеличением количества наблюдений n . При выборке объемом n в 101 элемент относительная разница дисперсии выборки σ^2 и дисперсии генеральной совокупности $\sigma_{\text{ген.с}}^2$ составляет не более 1%. Таким образом, СКО генеральной совокупности $\sigma_{\text{ген.с}}$ погрешности оценок случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента в интервале (6.7) было оценено посредством СКО σ выборки, рассчитанного по 101 погрешности оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (\delta Ma'_k - \mu)^2}{n - 1}, \quad (3.19)$$

где $\delta Ma'_k$ – погрешность оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента в k -ом запуске программы;

n – количество оценок случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента (количество запусков программы; $n = 101$);

μ – МО выборки погрешности оценок случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента, рассчитанное по 101 запуску программы.

Связь дисперсии выборки σ^2 и дисперсии генеральной совокупности $\sigma_{\text{ген.с}}^2$ имеет следующий вид:

$$\sigma_{\text{ген.с}}^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n (\delta Ma'_k - \mu_{\text{ген.с}})^2}{n - 1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sigma^2, \quad (3.20)$$

где $\delta Ma'_k$ – погрешность оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента в k -ом запуске программы;

n – количество оценок случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента (количество запусков программы; $n = 101$);

$\mu_{gen.c}$ - МО генеральной совокупности наблюдений (бесконечного множества оценок случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента).

Для расчета интервала (3.18) необходимо также оценить МО генеральной совокупности $\sigma_{gen.c}^2$. Из теории математической статистики известно, что с вероятностью 0,999 МО выборки μ отличается от МО генеральной совокупности $\mu_{gen.c}$ на величину, не превышающую доверительный интервал Δx , который рассчитывается по формуле (3.21). Таким образом, МО генеральной совокупности $\mu_{gen.c}$ в интервале (3.18) было оценено посредством добавления к МО выборки μ доверительного интервала Δx . Доверительный интервал можно рассчитать для выборки любого объема (более 2-ух элементов). Для удобства была выбрана ранее рассчитанная выборка объема n равного 101 элементу.

$$\Delta x = \frac{t_{p,n} * \sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3.21)$$

где $t_{p,n}$ – коэффициент доверия (критерий Стьюдента), соответствующий доверительной вероятности p равной 0,999 и выборке n объемом в 101 элемент;

n – количество оценок случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента (количество запусков программы; $n = 101$);

σ – СКО оценок случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента, рассчитанное по 101 запуску программы.

В работе в результате применения статистического метода, метода СПМ и метода ВА рассчитаны оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС и погрешности их определения по 101 запуску программы. Погрешности оценок шумов ЧЭ БИНС для 101 запуска рассчитывались по следующей формуле:

$$\varepsilon = \left(\frac{P - P'}{P} \right) \cdot 100\%, \quad (3.22)$$

где P – паспортное значение случайной погрешности ЧЭ БИНС (случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента / случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала / случайного блуждания выходного сигнала);

P' - оцененное значение случайной погрешности ЧЭ БИНС (случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента / случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала / случайного блуждания выходного сигнала).

Для расчета интервала (3.21) были оценены МО и СКО генеральной совокупности оценок случайных погрешностей АК БИНС согласно положениям, представленным в данном разделе. Для АК результаты расчетов представлены в таблицах 3.7 и 3.8. В таблицах 3.7 и 3.8 приняты следующие обозначения:

μ_i^a – оцененное МО погрешности оценок шумов АК БИНС, полученных в результате применения i -го метода ($i=\text{стат, СПМ, ВА}$; где стат – статистический метод, СПМ – метод СПМ, ВА – метод ВА) по 101 реализации программы;

σ_i^a – оцененное СКО погрешности оценок шумов АК БИНС, полученных в результате применения i -го метода ($i=\text{стат, СПМ, ВА}$; где стат – статистический метод, СПМ – метод СПМ, ВА – метод ВА) по 101 реализации программы.

Таблица 3.7 – Оцененные МО погрешностей оценок шумов АК БИНС, рассчитанных по результатам 100 запускам программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА

Параметры	$\mu_{\text{стат}}^a$	$\mu_{\text{СПМ}}^a$	$\mu_{\text{ВА}}^a$
Случайная составляющая погрешности масштабного коэффициента, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	113,25	5,24
Шум случайного блуждания выходного сигнала, %.	-21,31	0,97	0,73
Случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	1,41	-0,08

Таблица 3.8 – Оцененные СКО погрешностей оценок шумов АК БИНС, рассчитанных по результатам 100 запускам программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА

Параметры	$\sigma_{\text{стат}}^a$	$\sigma_{\text{СПМ}}^a$	$\sigma_{\text{ВА}}^a$
Случайная составляющая погрешности масштабного коэффициента, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	89,79	16,66
Шум случайного блуждания выходного сигнала, %.	18,6	0,77	1,003
Случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	1,12	1,56

Для расчета интервала (3.18) также были оценены МО и СКО генеральной совокупности оценок случайных погрешностей ГК БИНС согласно положениям, представленным в настоящем разделе. Для ГК результаты представлены в таблицах 3.9 и 3.10. В таблицах 3.9 и 3.10 приняты следующие обозначения:

μ_i^g – оцененное МО погрешности оценок шумов ГК БИНС, полученных в результате применения i -го метода ($i=\text{стат, СПМ, ВА}$; где стат – статистический метод, СПМ – метод СПМ, ВА – метод ВА) по 101 реализации программы;

σ_i^g – оцененное СКО погрешности оценок шумов ГК БИНС, полученных в результате применения i -го метода ($i=\text{стат, СПМ, ВА}$; где стат – статистический метод, СПМ – метод СПМ, ВА – метод ВА) по 101 реализации программы.

Таблица 3.9 – Оцененные МО погрешностей оценок шумов ГК БИНС, рассчитанных по результатам 101 запуска программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА

Параметры	$\mu_{\text{стат}}^g$	$\mu_{\text{СПМ}}^g$	$\mu_{\text{ВА}}^g$
Случайная составляющая погрешности масштабного коэффициента, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	–	-61,41
Шум случайного блуждания выходного сигнала, %.	-107,79	–	0,36
Случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	–	-0,08

Таблица 3.10 – Оцененные СКО погрешностей оценок шумов ГК БИНС, рассчитанных по результатам 101 запуска программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА

Параметры	$\sigma_{\text{стат}}^g$	$\sigma_{\text{СПМ}}^g$	$\sigma_{\text{ВА}}^g$
Случайная составляющая погрешности масштабного коэффициента, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	–	7,93
Шум случайного блуждания выходного сигнала, %.	72,61	–	0,52
Случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	–	1,66

Были рассчитаны МО погрешностей оценок шумов АК БИНС по результатам 101 запуска программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА. Результаты расчетов представлены в таблице 3.11.

В таблицах 3.11 и 3.12 приняты следующие обозначения:

μ_i^a – МО погрешности оценок шумов АК БИНС, полученных в результате применения i -го метода ($i=\text{стат, СПМ, ВА}$; где стат – статистический метод, СПМ – метод СПМ, ВА – метод ВА) по 101 реализации программы;

σ_i^a – СКО погрешности оценок шумов АК БИНС, полученных в результате применения i -го метода ($i=\text{стат, СПМ, ВА}$; где стат – статистический метод, СПМ – метод СПМ, ВА – метод ВА) по 101 реализации программы.

Таблица 3.11 – МО погрешностей оценок шумов АК БИНС, рассчитанных по результатам 101 запуска программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА

Параметры	$\mu_{\text{стат}}^a$	$\mu_{\text{СПМ}}^a$	$\mu_{\text{ва}}^a$
Случайная составляющая погрешности масштабного коэффициента, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	4,04	0,89
Шум случайного блуждания выходного сигнала, %.	-26,17	-1,36	0,47
Случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	1,18	-0,48

В работе рассчитаны СКО погрешностей оценок шумов АК БИНС по результатам 101 запуска программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА. Результаты расчетов представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 - СКО погрешностей оценок шумов АК БИНС, рассчитанных по результатам 101 запуска программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА

Параметры	$\sigma_{\text{стат}}^a$	$\sigma_{\text{СПМ}}^a$	$\sigma_{\text{ва}}^a$
Случайная составляющая погрешности масштабного коэффициента, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	89,79	16,66
Шум случайного блуждания выходного сигнала, %.	18,6	0,77	1,003
Случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	1,12	1,56

В таблицах А.1, А.2 и А.3 приложения А представлены оценки случайных составляющих погрешности АК БИНС, полученные статистическим методом, методом СПМ и методом ВА по каждому из 101 запуска программы.

В работе рассчитаны МО погрешностей оценок шумов ГК БИНС по результатам 101 запуска программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА. Результаты расчетов представлены в таблице 3.13.

В таблицах 3.13 и 3.14 приняты следующие обозначения:

μ_i^g – МО погрешности оценок шумов ГК БИНС, полученных в результате применения i -го метода ($i=\text{стат, спм, ва}$; где стат – статистический метод, спм – метод СПМ, ва – метод ВА) по 101 реализации программы;

σ_i^g – СКО погрешности оценок шумов ГК БИНС, полученных в результате применения i -го метода ($i=\text{стат, спм, ва}$; где стат – статистический метод, спм – метод СПМ, ва – метод ВА) по 101 реализации программы.

Таблица 3.13 – МО погрешностей оценок шумов ГК БИНС, рассчитанных по результатам 101 запуска программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА

Параметры	$\mu_{\text{стат}}^g$	$\mu_{\text{спм}}^g$	$\mu_{\text{ва}}^g$
Случайная составляющая погрешности масштабного коэффициента, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	-147,79	-63,48
Шум случайного блуждания выходного сигнала, %.	-126,76	0,98	0,22
Случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	-1,6	-0,52

В работе рассчитаны СКО погрешностей оценок шумов ГК БИНС по результатам 101 запуска программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА. Результаты расчетов представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – СКО погрешностей оценок шумов ГК БИНС, рассчитанных по результатам 101 запуска программы для статистического метода, метода СПМ и метода ВА

Параметры	$\sigma_{\text{стат}}^g$	$\sigma_{\text{спм}}^g$	$\sigma_{\text{ва}}^g$
Случайная составляющая погрешности масштабного коэффициента, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	81,63	7,93
Шум случайного блуждания выходного сигнала, %.	72,61	0,26	0,52
Случайная составляющая погрешности смещения нулевого сигнала, %.	Не определяется, т.к. метод не позволяет оценить данный шум	1,28	1,66

В таблицах А.1, А.2 и А.3 приложения А представлены оценки случайных составляющих погрешности ГК БИНС полученные статистическим методом, методом СПМ и методом ВА по каждому из 101 запуска программы.

Был проведен сравнительный анализ [A2] методов оценки шумовых составляющих погрешности БЧЭ БИНС, таких как статистический метод, метод СПМ и метод ВА. Были рассмотрены существующие разновидности методов ВА, более подробно рассмотрен модифицированный метод ВА с применением МПО, который позволяет более точно и более быстро (более чем в 10^3 раз для рассматриваемых массивов данных) проводить расчеты значений ВА и получать более точные оценки шумовых характеристик в сравнении с классическим методом ВА с применением МНК.

Результатом применения методов являются количественные оценки трех основных шумовых погрешностей ЧЭ БИНС: случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента, случайной составляющей погрешности смещения нуля, шума случайного блуждания выходного сигнала.

В ходе работы рассчитана погрешность оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента АК БИНС по 101 запуску программы для различных методов. Статистический метод не позволил определить данный показатель. У метода СПМ МО погрешности оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента составило 4,04 %, а у метода ВА 0,89 %.

Далее в работе рассчитана погрешность оценки случайного блуждания выходного сигнала АК БИНС по 101 запуску программы для различных методов. У статистического метода МО погрешности оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала составило 26,17 %, у метода СПМ – 1,36 %, у метода ВА – 0,47 %.

Также рассчитана погрешность оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала АК БИНС по 101 запуску программы для различных методов. Статистический метод не позволил определить данный показатель. У метода СПМ МО погрешности оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала составило 1,18 %, у метода ВА – 0,48 %.

В ходе эксперимента рассчитана погрешность оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента ГК БИНС по 101 запуску программы для различных методов. Статистический метод не позволил определить данный показатель. У метода СПМ МО погрешности оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента составило 147,79 %, у метода ВА – 63,48 %.

Далее в работе рассчитана погрешность оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала ГК БИНС по 101 запуску программы для различных методов. Статистический метод не позволил определить данный показатель. У метода СПМ МО погрешности оценки случайной составляющей смещения нулевого сигнала составило 1,60 %, у метода ВА – 0,52 %.

Также рассчитана погрешность оценки случайного блуждания выходного сигнала ГК БИНС по 101 запуску программы для различных методов. У статистического метода МО погрешности оценки случайного блуждания выходного сигнала ГК составило 126,76 %, у метода СПМ – 0,98 %, у метода ВА – 0,22 %.

В результате анализа результатов было установлено, что погрешность оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента АК БИНС, полученной с помощью метода ВА, с вероятностью 0,9973 не выйдет за пределы интервала (-44,73; 55,22) б/р, погрешность оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала АК БИНС – (- 4,76; 4,61) м/с², погрешность оценки случайного блуждания выходного сигнала АК – (- 2,27; 3,74) м/с².

Аналогичным образом для ГК установлено, что погрешность оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента ГК БИНС, полученной с помощью метода ВА, с вероятностью 0,9973 не выйдет за пределы интервала (-85,19; -37,63) б/р, погрешность оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала ГК БИНС – (- 5,08; 4,91) угл.с/с, погрешность оценки случайного блуждания выходного сигнала АК – (- 1,21; 1,93) угл.с/с.

Таким образом, сравнивая погрешности оценок шумов ММП ЧЭ БИНС, полученных с помощью различных методов, можно заключить, что предложенная методика на основе метода ВА не только позволяет оценить все рассматриваемые типы шумов ММП ЧЭ БИНС, но и обладает более высокой точностью в отличие от статистического метода и метода СПМ.

3.4. Выводы по главе

1. Рассмотрены различные методы оценки случайных погрешностей АК и ГК БИНС: метод статистического анализа, метод СПМ сигнала, метод ВА.

2. Преимущество статистического метода оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС в том, что метод позволяет оценить общий количественный вклад шума в сигнале измерительного прибора.

Недостаток статистического метода оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС в том, что он не позволяет получить количественные оценки отдельных шумовых составляющих погрешности ЧЭ БИНС.

3. Преимущество метода СПМ для оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС заключается в возможности определения количественных оценок всех случайных составляющих погрешностей ЧЭ БИНС.

Недостатки метода СПМ:

- трудоемкое вычисление СПМ с помощью преобразования Фурье;
- невысокая точность определения оценок случайных погрешностей АК и ГК БИНС.

4. Преимуществами метода ВА:

- показания измерителя регистрируются при стационарном положении самого ЧЭ.
- отсутствуют специальные требования к ориентации ЧЭ относительно измеряемой величины;
- высокая точность определения шумовых характеристик;

- определение набора различных шумовых характеристик в рамках одного участка записи информации.

Недостатком метода ВА для оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС являются повышенные требования к требуемым вычислительным ресурсам при его реализации.

5. Предложенный в рамках работы способ расчета значений ВА с равномерным шагом в логарифмическом масштабе существенно (более чем в 10^3 раз для рассматриваемых массивов данных) сокращает время вычисления ВА по сравнению с полным перебором интервалов осреднения и не теряет точности по сравнению с шагом по «степеням двойки».

6. Для определения численных значений коэффициентов R, K, B, N, Q полинома (3.12) при аппроксимации экспериментальных данных ВА $\sigma_A^2(\tau)$ предлагается использовать не МНК, а МПО. Практические результаты применения метода ВА подтверждают, что способ МПО по сравнению с МНК дает более точные оценки при определении шумовых характеристик (однозначный вывод нельзя сделать только для шума квантования). При оценке шума квантования результаты МПО и МНК соизмеримы между собой, при этом способу МПО можно отдать предпочтение по совокупности статистических результатов.

7. МНК может дать некорректный результат в виде отрицательных значений без соответствующих фазовых ограничений на коэффициенты аппроксимирующего полинома. МНК, как и способ МПО, можно реализовать с помощью адаптивного метода покоординатного спуска, но с учетом более высокой точности метода МПО, рекомендуется использовать последний.

8. Сравнивая погрешности оценок шумов ММП ЧЭ БИНС, полученных с помощью различных методов, можно заключить, что метод ВА не только позволяет оценить все рассматриваемые типы шумов ММП ЧЭ БИНС, но и обладает более высокой точностью в отличие от статистического метода и метода СПМ.

Заключение

Вопросы повышения точности оценки систематических и случайных составляющих ММП гироскопов и акселерометров БИНС являются актуальным направлением исследований. Также актуальным является поиск путей сокращения вычислительных затрат и упрощения требуемых испытаний для записи необходимой измерительной информации ЧЭ БИНС.

Рассмотрены наиболее распространенные в сфере РКТ гражданского назначения методы оценки погрешностей БЧЭ БИНС и проведен их сравнительный анализ. Описан порядок практического применения методов оценки систематических и случайных погрешностей акселерометрических и гироскопических измерительных каналов БИНС, приведены преимущества и недостатки рассматриваемых методов.

По результатам сравнительного анализа существующих методов оценки систематических составляющих погрешности ЧЭ БИНС сделан вывод о том, что метод скалярной калибровки наиболее эффективен с точки зрения точности оценок погрешностей БЧЭ БИНС, временных затрат и ограничений на проведение испытаний. Аналогичное заключение можно сделать о применении метода ВА для оценки случайных погрешностей ЧЭ БИНС.

В ходе настоящего исследования разработаны методики оценки систематических и случайных составляющих ММП БЧЭ БИНС, обеспечивающие повышение точности, снижение вычислительных затрат на проведение оценки систематических и случайных составляющих ММП гироскопов и акселерометров в составе БИНС.

Для получения лучших результатов в оценке систематических погрешностей ЧЭ БИНС предложено внести изменения в классический метод скалярной калибровки, а именно – использовать метод МПО вместо МНК.

Применение МПО наиболее актуально для БЧЭ БИНС с избыточным количеством ЧЭ.

Доработанная методика оценки систематических погрешностей БЧЭ БИНС дает более точные результаты в сравнении с классическим методом скалярной калибровки с использованием МНК для рассматриваемых БЧЭ БИНС с избыточным количеством ОЧ.

Достоинством разработанной методики является также возможность уточнения не измеряемых напрямую параметров ММП БЧЭ БИНС.

Преимущества доработанного метода скалярной калибровки заключаются в повышении точности оценки параметров ММП БИНС, упрощении и ускорении процесса оценки параметров ММП БИНС, а также в снижении требований по выставляемым характерным положениям и разворотам БЧЭ БИНС.

Предложенная в рамках диссертационной работы методика оценки систематических погрешностей БЧЭ БИНС на основе метода расчета значений ВА с равномерным шагом в логарифмическом масштабе существенно (более чем в 10^3 раз для рассматриваемых массивов данных) сокращает вычислительные затраты на проведение расчета значений ВА по сравнению с полным перебором интервалов осреднения при этом сохраняя необходимую точность.

Для определения численных значений коэффициентов, характеризующих шумовые составляющие в измерительной информации ММП БЧЭ БИНС при аппроксимации экспериментальных данных ВА $\sigma_A^2(\tau)$, предлагается использовать не МНК, а МПО. Практические результаты применения метода ВА подтверждают, что способ МПО по сравнению с МНК дает более точные оценки при определении шумовых характеристик.

МНК может дать некорректный результат в виде отрицательных значений без соответствующих фазовых ограничений на коэффициенты аппроксимирующего полинома. МНК, как и способ МПО, можно реализовать с помощью адаптивного метода покоординатного спуска, но с учетом более высокой точности метода МПО, рекомендуется использовать последний.

Сравнивая погрешности оценок шумов ММП БЧЭ БИНС, полученных с помощью различных методов оценки систематических погрешностей, можно заключить, что метод ВА не только позволяет оценить все рассматриваемые типы

шумов ММП БЧЭ БИНС, но и обладает более высокой точностью в отличие от статистического метода и метода СПМ.

Результаты настоящего исследования используются в рамках разработки систем управления изделий РКТ гражданского назначения при стендовой калибровке на позициях АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова».

Потенциально разработанные методики могут быть использованы также в алгоритмах предстартовой и межполетной калибровки БИНС после того, как будут завершены их испытания и они будут введены в состав штатных бортовых средств различных объектов РКТ гражданского назначения.

Направлением перспективных работ является исследование различных методов МПО применительно к скалярной калибровке и аппроксимации коэффициентов полинома ВА для дальнейшего повышения точности и сокращения вычислительных затрат на проведение оценок.

Список сокращений

АК	— акселерометрический канал
АЦП	— аналого-цифровой преобразователь
БИНС	— бесплатформенная инерциальная навигационная система
БЧЭ	— блок чувствительных элементов
ВА	— вариация Аллана
ВОГ	— волоконно-оптический гироскоп
ГК	— гироскопический канал
ГСК	— географическая система координат
ИНС	— инерциальная навигационная система
ИСК	— инерциальная система координат
МА	— маятниковый акселерометр
ММП	— математическая модель погрешности
МНК	— метод наименьших квадратов
МО	— математическое ожидание
МПО	— многопараметрическая оптимизация
ОЧ	— ось чувствительности
ПМО	— программно-математическое обеспечение
ПСК	— приборная система координат
РКТ	— ракетно-космическая техника
СКО	— среднеквадратическое отклонение
СПМ	— спектральная плотность мощности
ССК	— стартовая система координат
ЧЭ	— чувствительный элемент

Список литературы

1. Авиев А.А. Экспериментальные исследования методом вариаций Аллана триады лазерных гироскопов с виброподставкой / Авиев А. А. [и др.] // Наука и образование МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Москва, 2016. – С.145-161.
2. Аврутов, В.В. Влияние погрешности поворота стенда на точность калибровки блока гироскопов и акселерометров / В.В.Аврутов, Т.Ю.Мазепа // Вісник НТУУ "КПІ". Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2012. – Вип. 43. – С.5–10.
3. Аврутов, В.В. О скалярной калибровке блока гироскопов и акселерометров / В.В. Аврутов // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Приладобудування. – 2010. – № 40. – С. 10–17.
4. Аврутов, В.В. О скалярной калибровке инерциального измерительного измерительного модуля / В.В. Аврутов, С.В. Головач, Т.Ю. Мазепа // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов, 2012. – С. 113–118.
5. Алексова Е.Ю., Жбанов Ю.К., Климов Д.М. Использование избытка осей чувствительности для повышения точности измерений. //МТТ, 2013, т. 48, № 5, с. 500-503.
6. Аллан Д.У. Вариация Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения / Д.У. Аллан // Гироэлектроника и навигация. – 2015. – №4(91). – С. 3 – 28.
7. Артемьев А.В. Оценка дрейфа гироскопических систем, построенных на базе микроэлектромеханических сенсоров / А.В. Артемьев [и др.] // Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук – Владивосток, 2017. – С.310-314.

8. Архипов А.В. Методы оценки случайных погрешностей микромеханических датчиков / А.В. Архипов, А.С. Тимошенков // Инженерный вест. Дона - 2018. - №4. – 21 с.
9. Атаманов, Н.А. Калибровка блока чувствительных элементов БИНС / Н.А. Атаманов, В.А. Троицкий, И.В. Гусев. // XII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов, 2005. – С. 162–164.
10. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс //: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. — 128 с: ил.
11. Бельский Л.Н., Водичева Л.В. Ускоренная прецизионная начальная выставка и калибровка ИНС летательного аппарата на подвижном основании // Гирокопия и навигация. 2001. № 4 (35). С. 3–18.
12. Бельский Л.Н., Водичева Л.В., Парышева Ю.В., Алиевская Е.Л. Повышение точности гирокомпасирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы при предстартовом подъеме летательного аппарата // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2012. С. 104–106.
13. Блажнов Б.А. Высокоточные волоконно-оптические гирокопы. Современное состояние и перспективы. / Блажнов Б.А. [и др.] // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления. Сборник трудов ВСПУ-2019 – Москва, - 2019. С.1330-1335.
14. Болотин Ю.В., Деревянкин А.В., Матасов А.И. Итерационная схема калибровки блока акселерометров при помощи гарантирующего подхода // Изв. РАН. Механ. твердого тела. 2008. № 3. 48–61.
15. Булгаков Б.В. Прикладная теория гирокопов. М. Изд-во МГУ, 1976, 401 с.
16. Вавилова И.Б., Голован А.А., Козлов А.В., Папуша И.А., Парусников Н.А. Сравнительный анализ различных вариантов калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы // XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 249–251.

17. Вдовин М.В. Обеспечение испытаний и результаты исследования ряда бесплатформенных инерциальных блоков на базе волоконно-оптических гироскопов / М.В. Вдовин, Д.А. Кутовой, О.И. Маслова, С.Ю. Перепелкина, П.В. Ситников, А.А. Федотов // Труды V НТК молодых ученых и специалистов. – Москва : ФГУП НПЦАП им. академика Н.А. Пилигина. – 2013. – С. 347–360.
18. Водичева Л.В. Инерциальные измерительные блоки перспективных изделий ракетно-космической техники: обеспечение отказоустойчивости / Водичева Л.В. [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. - №1. – С.28-44.
19. Водичева Л.В. Методика оценки точностных параметров прецизионного бесплатформенного измерительного блока на грубом поворотном стенде / Л.В. Водичева, Ю.В. Парышева // XXXI конференция памяти выдающегося конструктора гирокопических приборов Н. Н. Острякова. – 2018. – С.51-60.
20. Водичева Л.В. Предстартовая выставка и калибровка гибридной инерциальной измерительной системы: развороты бесплатформенного блока вокруг горизонтальной оси / Л.В. Водичева, Ю.В. Парышева, Е.Л. Алиевская // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – Санкт-Петербург: АО "Концерн "ЦНИИ Электроприбор", 2015. – С. 225 – 228.
21. Водичева Л.В., Алиевская Е.Л., Кокшаров Е.А., Парышева Ю.В. Повышение точности определения угловой скорости быстровращающихся объектов. //Гирокопия и навигация. 2012, № 1 (76), с. 27-41.
22. Водичева Л.В., Алиевская Е.Л., Парышева Ю.В. Начальная выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы на неподвижном основании: методы и их погрешности // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С. 71–74.
23. Водичева Л.В., Парышева Ю.В. Методика оценки точности косвенного метода калибровки бесплатформенного инерциального измерительного блока // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным

навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019. С. 193–203.

24. Водичева, Л.В., Парышева Ю.В. Оценка точностных параметров датчиков бесплатформенного инерциального измерительного блока с помощью относительно грубого поворотного стола / Гирокопия и навигация. – 2019. – №2(105). – С.162 – 178.
25. Гельфонд А.О. Исчисление конечных разностей. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. 400 с.
26. Голован А.А., Матасов А.И. Применение гарантирующего подхода для калибровки акселерометров на высокоточном стенде // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. С. 241–243.
27. Гохфельд, В.Д. К вопросу тарировки бесплатформенного инерциального блока в составе изделия / В.Д. Гохфельд, Д.А. Кутовой, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // Люльевские чтения: материалы десятой межрегиональной отраслевой научно-технической конференции, ОКБ "Новатор", 22 – 24 марта 2016 года. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С 123.
28. Грановский, В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] / В.А. Грановский, Т.Н. Синая. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.: ил.
29. Гусинский В.З., Лесючевский В.М., Литманович Ю.А., Столбов А.А. Алгоритм калибровки трехосного блока акселерометров, предназначенного для использования в БИНС. //XX11 научно-техническая конференция памяти Н.Н.Острякова. СПб. ЦНИИ «Электроприбор», 2000.
30. Деревякин, А.В. К теории калибровки блока акселерометров / А.В. Деревякин, А.И. Матасов // Сборник докладов XV Международная конференция по интегрированным навигационным системам. – С.-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – с. 71–72.

31. Деревянкин А.В., Матасов А.И. Формализация последовательной схемы калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем // АиТ. 2018. № 1. С. 66–83.
32. Дж. Медич. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. Пер. с англ. Под ред. А.С. Шаталова – Москва : «Энергия», 1973. – 440 с.
33. Джашитов, В.Э. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов; Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. –404с.
34. Джашитов, В.Э. Общая и прикладная теория гироскопов с применением компьютерных технологий / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов, А.В. Голиков; под ред. В.Г. Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2010. –154 с.
35. Драницына Е. В. Модель погрешностей волоконно-оптического гироскопа / Е. В. Драницына, Н. Г. Галиева // Материалы XVII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», 2015. – С.342-348.
36. Драницына Е.В. Калибровка измерительного модуля по навигационному решению БИНС: выбор плана движений стенда // Сб. матер. XXIV СанктПетербургской конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.:АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2017. С. 235–240.
37. Драницына Е.В. Калибровка измерительного модуля прецизионной БИНС на ВОГ. дис. кан. тех. наук. : 05.11.03 / Е.В. Драницына ; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. – Санкт-Петербург, 2016. – 89 с.
38. Егоров Ю.Г., Дзуев А.А. Синтез оптимальных программ калибровки акселерометров БИНС // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 5. С. 3–17.
39. Ермаков, В.С. Автоматизация калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем на волоконно-оптических гироскопах / Автореферат дис. ... канд. техн. наук. / В.С. Ермаков. – Пермь, 2007. – 16 с.

40. Збруцкий, А.В. Докалибровка блока акселерометров бесплатформенной инерциальной навигационной системы при тестовых наклонах объекта / А.В Збруцкий, Н.Г. Черняк, О.М. Грищенко // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник докладов, 2013. – С. 108–111.
41. Измайлов Е.А., Лепе С.Н., Молчанов А.В. и др. Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Сб. матер. Юбилейной XV Санкт-Петербургской конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО “Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2008. С. 145–154.
42. Измайлов, Е.А. Современные тенденции развития технологий инерциальных чувствительных элементов и систем летательных аппаратов / Е.А. Измайлов // Москва, Труды ФГУП «НПЦ АП», Системы и приборы управления, 2010, №1, С. 30–43.
43. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. М., Наука, 1976, 670с.
44. Климкович, Б.В. Калибровка БИНС в инерциальном режиме. Объединение скоростного и скалярного методов / Б.В.Климкович //Гирокопия и навигация. – 2014. – №3 (86). С. 29–40.
45. Климкович, Б.В. Определение запаздываний гироскопов и акселерометров при калибровке БИНС в навигационном режиме / Б.В. Климкович, А.М. Толочко. // Гирокопия и навигация. – 2015. – № 4 (91). – С.55–66.
46. Колеватов, А.П. Волоконно-оптический гироскоп бесплатформенных инерциальных систем навигационного класса. Разработка, термокомпенсация, испытания /А. П. Колеватов [и др.] // Гирокопия и навигация. – 2010. – № 3. – С. 49–60.
47. Коркишко, Ю.Н. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе ВОГ / Ю.Н. Коркишко [и др.] // Гирокопия и навигация. – 2014. – № 1 (84). – С. 14–25.

48. Коркишко, Ю.Н. Прецизионный волоконно-оптический гироскоп с расширенным диапазоном измерения угловых скоростей / Ю.Н. Коркишко [и др.] // XXI СанктПетербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов – СПб, – 2014. – С.183 – 190.
49. Кробка Н.И. Дифференциальные методы идентификации структуры шумов гироскопов / Н.И. Кробка // Гироскопия и навигация. – 2011. – №1(72). – С. 59 – 77.
50. Кробка Н.И. Новый некоммутативный кинематический эффект и его проявления в бесплатформенных инерциальных системах ориентации на основе волоконно-оптических гироскопов / Н.И. Кробка // Гироскопия и навигация. – 2009. – №1(64). – С. 36 – 51.
51. Кробка Н.И. О критериях качества гироскопов для бесплатформенных инерциальных си-стем / Н.И. Кробка // X научно-практическая конференция молодых специалистов и студен-тов памяти Главного конструктора академика В.И. Кузнецова. Сборник докладов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
52. Кузнецов, А.Г. Современные бесплатформенные инерциальные навигационные системы двух классов точности / А.Г. Кузнецов, Б.И. Портнов, Е.А. Измайлова // Труды Московского института электромеханики и автоматики. – ОАО "МИЭА", 2014. – Вып. 8. – С. 24–32.
53. Кутовой, В.М. Исследование характеристик бесплатформенного инерциального блока на базе ВОГ в процессе наземной отработки / В. М. Кутовой [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 2 (77). – С.98–111.
54. Кучерков, С.Г. Использование вариации Аллана при исследовании характеристик микромеханического гироскопа [Текст] / С.Г. Кучерков, Д.И. Лычев, А.И. Скалон, Л.А. Чертков // Гироскопия и навигация. – 2003. – №2(41). – С.98 – 104.
55. Лефевр, Э.К. Волоконно-оптический гироскоп: достижения и перспективы / Э.К. Лефевр // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 4 (79). – С. 3–9.
56. Листвин В. Н. Миниатюрные волоконно-оптические гироскопы / В.Н. Листвин, В.Н. Логозинский // Радиотехника и электроника, Т.50, №6. – 2005. – С. 1 – 9.

57. Литвин М. А. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации / М.А. Литвин [и др.] // Информационные процессы. – 2014. - № 4. – с. 327-339.
58. Марк Дж. Конические алгоритмы, учитывающие неидеальность частотной характеристики выходных сигналов гироскопов / Дж. Марк, Д. Тазарте // Гироскопия и навигация. – 2000. – №1(28). – С. 65 – 77.
59. Маслова О.И. Оценка погрешностей измерителя угловой скорости по результатам испытаний на стенде качания / О.И. Маслова, Ю.С. Тиунов // Ракетно-космическая техника: сборник тезисов VII научно-технической конференции молодых специалистов. Сер. XI. Системы управления ракетных комплексов. – Екатеринбург : ОАО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова», 2015. – С. 116 – 117.
60. Матасов А.И. Калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы при повороте вокруг вертикальной оси / А.И. Матасов, В.В. Тихомиров // Труды МАИ, 2015. - №89. – С. 1-34.
61. Матасов А.И., Тихомиров В.В. Калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы при повороте вокруг вертикальной оси // Тр. МАИ. Вып. 89. 2016. С. 1–34.
62. Матвеев В.В., Погорелов М. Г. Анализ погрешностей микромеханических гироскопов методом вариаций Аллана // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. №3. С.123-135.
63. Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2009. – 280 с.
64. Мешковский И.К. Трехосный волоконно-оптический гироскоп для морских навигационных систем / И.К. Мешковский, В.Е. Стригалев, Г.Б. Дейнека, В.Г. Пешехонов, Л.П. Несенюк // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб. : ЦНИИ "Электроприбор", 2009. – С. 7 – 12.

65. Моторин А.В. Оценка параметров случайных процессов методами нелинейной фильтрации и вариации Аллана / А.В. Моторин, В.А. Васильев // Материалы XVI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», 2014. – С. 180-187.
66. Николаев, С.Г. Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем по выходным сигналам модели ошибок / С.Г. Николаев, Ю.В. Ившина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – №4(200). – С. 95–105.
67. Павлов Д.В. / Математическая модель волоконно-оптического гироскопа для статической системы / Д.В. Павлов // Прикладная фотоника / Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого. – 2014. - №2. – С. 99 -106.
68. Парышева Ю.В. Оценка точности и результаты калибровки бесплатформенного измерительного блока для средств выведения / Ю.В. Парышева, Л.В. Водичева // XXXI конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова. – 2018. – С.62-71.
69. Парышева Ю.В., Водичева Л.В. Оценка точности и результаты калибровки бесплатформенного измерительного блока для средств выведения // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 62–72.
70. Пат. «Noise coefficient computing method used for Allan variance analysis technology» (CN 103345569 A от 09.10.2013).
71. Патюрель, И. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на основе ВОГ / И. Патюрель [и др.] // Гирокопия и навигация. – 2013. – № 3 (82). – С. 3–13
72. Первадчук В.П. Диагностика сигналов волоконно-оптических датчиков методами дисперсионного анализа / В. П. Первадчук [и др.] // НАУКА И БИЗНЕС: ПУТИ РАЗВИТИЯ. Информатика, вычислительная техника и управление. – Пермь, 2016. - №11(65). –С.17-21.
73. Пешехонов, В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем / В.Г. Пешехонов. // Гирокопия и навигация. – 2011. – №1(72). – С. 3–17.

74. Попков С. Л.. Следящие системы – Москва : «Высшая школа», 1963. – 304 с.
Практика следящих систем. Пер. с англ. / В.Р. Арендт, К.Дж. Сэвент. Под ред. Т.М. Райцына и А.В. Фатеева – Москва : «Госэнергоиздат», 1962. – 556 с.
75. Севастьянов Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики / Б. А. Севастьянов // Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 256 с
76. Синая, Т.Н. Вариация Аллана как оценка погрешности измерения / Т.Н. Синая // Гирокопия и навигация. – 2010. – №2(69). – С.29 – 36.
77. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений // Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – Москва : Наука, 1969. – 511 с.
78. Способ калибровки акселерометров: пат. № 2249793 С2 Рос. Федерации: МПК G01C 25/00 / Андреев А.Г., Ермаков В.С., Мафтер М.Б., Морозов В.А; патентообладатель ОАО «Пермская науч.-произв. приборостроительная комп.» – № 2002121700/28; заявл. 06.08.2002; опубл. 10.04.2005, Бюл. № 10.
79. Способ калибровки беспилотных инерциальных навигационных систем: пат. № 2406973 С2 Рос. Федерации: МПК G01C 25/00 / Андреев А.Г., Ермаков В.С., Николаев С.Г., Колеватов А.П.; патентообладатель ОАО «Пермская науч.-произв. приборостроительная комп.» – № 2009104034/28; заявл. 05.02.2009; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 35.
80. Способ калибровки гироскопических измерителей угловой скорости: пат. № 2156959 С1 Рос. Федерации: МПК G01C 25/00, G01P21/00 / изобретатель и заявитель Лебеденко О.С., Шепеть И.П., Сельвесюк Н.И., Иванов М.Н., Протасов К.А., Дорожкин А.Д. – № 99111602/28; заявл. 01.06.1999; опубл. 27.09.2000.
81. Степанов, А.О. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания / Изд. 2-е, испр. и доп. / А.О. Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2010.– 509 с.
82. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Техническая кибернетика. Книга 1. Измерительные устройства, преобразующие элементы и устройства. Колл. авторов. Под. ред. засл. деятеля науки и техники

РСФСР, д-ра техн. наук проф. В. В. Солодовникова. М., изд-во «Машиностроение», 1973, 671 с.

83. Устюгов, М.Н. Калибровка акселерометра бесплатформенной инерциальной навигационной системы / М.Н. Устюгов, М.А. Щипицына // Вестник ЮУрГУ. – 2006. – № 14. – С. 140–143.
84. Федоров, А.Е. Калибровка блока инерциальных чувствительных элементов и моделирование автономного режима функционирования инерциальной системы на базе монолитного трехкомпонентного лазерного гироскопа / А.Е. Федоров [и др.] // Новости навигации. – 2010г. – № 3. – с. 20–25.
85. Федоров, А.Е. Компенсации инструментальных погрешностей трехкомпонентного лазерного гироскопа моноблочной конструкции / А.Е. Федоров, Д.А. Рекунов // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов, 2009. – С. 42–47.
86. Чернодаров А.В., Иванов С.А. Идентификация моделей и адаптивная фильтрация шумов инерциальных измерителей // Труды МАИ. 2018. № 99.
87. Черняк, Н.Г. Калибровка навигационного маятникового акселерометра методом тестовых поворотов в гравитационном поле Земли / Н.Г. Черняк, Э. Хазинедарлу // Механіка гіроскопічних систем. – 2009. – № 20. – С. 100–110.
88. Шаврин, В.В. Калибровка микроэлектромеханических датчиков ускорений и угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах / В.В. Шаврин, А.С. Конаков, В.И. Тисленко // Доклады ТУСУРа. – 2012. – №1 (25), часть 2. С. 265–269.
89. Шаймарданов И.Х. Методика стендовой калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем различного класса точности: дис. кан. тех. наук: 05.11.03 / И.Х. Шаймарданов; Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана – Москва, 2019. – 16 с.
90. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные ряды [Текст] / М.Шредер. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 528 с.: ил.

91. Щербицкий Д. С. Определение коэффициентов модели случайной погрешности волоконно-оптического гироскопа методом регрессионного анализа / Д.С. Щербицкий, П.В. Дружинин // Навигация и управление движением. Материалы XVI конференции молодых ученых. – Санкт-Петербург : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2014. – С. 201 – 206.
92. Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards // Proceedings of the IEEE. 1966. V. 54, Iss. 2. P. 221-230. DOI: 10.1109/proc.1966.4634.
93. ALLAN VARIANCE SOFTWARE: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alamath.com>.
94. Bogatsky, I. A procedure for high-accuracy calibration of strapdown IMU on a lowaccuracy turntable / I. Bogatsky, O. Leonets // Proceedings of 2010 international symposium on internal technology and navigation. – 2010. – p.294–310.
95. Diesel, John W. Calibration of a Ring Laser Gyro Inertial Navigation System // Thirteenth Biennial Guidance Test Symposium. – Holloman Air Force Base, New Mexico, 1987. V. 1, SO1A, P. 1-37.
96. Fong, W.T., Ong, S.K., and Nee, A.Y.C., Method for In-Field User Calibration of an Inertial Measurement Unit without External Equipment, Meas. Science Technol., 2008, 19 085202.
97. IEEE STD 1293, 1998, IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear, Single-Axis, Nongyroscopic Accelerometers.
98. IEEE Std 1554-2005. IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.
99. IEEE Std 1559 –2009, IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology.
100. IEEE Std 952–1997, IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
101. Savage, P.G., Strapdown System Performance Analysis, RTO Lecture Series 232 (2004), Advances in Navigation Sensors and Integration Technology, St. Petersburg, 2004, pp. 4-1–4-33.
102. Syed Z. Design and implementation issues of a portable navigation system: PHD Thesis. – Calgary, Canada: The University of Calgary, 2009. – 230 p.

103. Wu, Q., Wu, R., Han, F., and Zhang, R., A Three-Stage Accelerometer Self-Calibration Technique for Space-Stable Inertial Navigation Systems, Sensors, 2018, 18, 2888.
104. Yueming Zhao, Milan Horemuz, Lars E. Sjöberg STOCHASTIC Stochastic modeling and analysis of IMU sensor errors. Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, Vol. 22, 2011, pp. 437-449 ISSN 2083-2214.
105. Zhang, H., Wu, Y., Wu, W., Wu, M., and Hu, X., Improved Multi-Position Calibration for Inertial measurement Units, Meas. Science Technol., 2010. 21 015107.
106. Zhang, X. Allan Variance Analysis on Error Characters of MEMS Inertial Sensors for an FPGA-Based GPS/INS System // X.Zhang, Y.Li, P.Mumford, C.Rizos. – In Proceeding of the International Symposium on GPS/GNSS, Tokyo, Japan, 11 – 14 November 2008; pp. 127 – 133.

Список публикаций автора

В изданиях, рекомендованных ВАК:

- А1. Евсеев, В.И. Методика оценки случайных составляющих погрешности чувствительных элементов в составе беспилотной инерциальной навигационной системы / В.И. Евсеев, Д.А. Кутовой // Научно-технический журнал «Информация и Космос». – 2022. – № 2, С. 69-75.
- А2. Евсеев, В.И. Методика оценки систематических составляющих погрешности чувствительных элементов в составе беспилотной инерциальной навигационной системы / В.И. Евсеев, Д.А. Кутовой // Научно-технический журнал «Информация и Космос». – 2022. – № 1, С. 58-65.
- А3. Кутовой Д.А. Методика оценки характеристик измерителя угловой скорости посредством фильтра Калмана и вариации Аллана / Д.А. Кутовой [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева. – 2016. - № 2. С. 171-182.

А4. Кутовой, Д.А. Использование вариации Аллана для практического определения структуры шумов инерциальных измерителей / Д.А. Кутовой, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 67–72.

А5. К вопросу оценки шумовых составляющих измерительного тракта по методу вариации Аллана / Д.А. Кутовой [и др.] // Гирроскопия и навигация. – 2015. - №2 (89). – с. 30-39.

А6. Кутовой Д.А. Оценка основных характеристик бесплатформенного инерциального блока с использованием вариации Аллана / Д.А. Кутовой, П.В. Ситников, А.А. Федотов, В.Л. Якимов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета) № 1(43). – Самара : СГАУ. – 2014. – С. 201 – 209.

Результаты интеллектуальной деятельности:

А7. Патент №2626288 на «Способ определения погрешностей основных характеристик блока инерциальных измерителей», приоритет 21.03.2016, дата гос. регистрации 25.07.2017г.

А8. Патент №2638782 на «Способ определения шумов в измерительной информации чувствительных элементов инерциальных навигационных систем», приоритет 21.03.2016, дата гос. регистрации 15.12.2017г.

В изданиях, индексируемых Scopus:

А9. Kutovoy V.M. Influence of noise on the accuracy of navigation in inertial measuring channels / V.M. Kutovoy, D.A. Kutovoy, S.U. Perepelkina, A.A. Fedotov // 23nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Proceedings. – Saint Petersburg : State Research Centre of the Russian Federation CONCERN CSRI ELEKROPRIBOR, JSC – 2016. – P. 183 – 186.

А10. Kutovoi D.A. Estimating the Noise Components of Measurement Channel by Allan Variance Method / D. A. Kutovoi, O. I. Maslova, S. Yu. Perepelkina, A. A. Fedotov // Gyroscopy and Navigation, 2016, Vol. 7, No. 1, pp. 18–23.

A11. Kutowoy V.M. Use of Allan variance for practical assessment of noise structure of sins sensing elements / V.M. Kutowoy, D.A. Kutowoy, O.I. Maslova, S.U. Perepelkina, P.V. Sitnikov, A.A. Fedotov // 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Proceedings. – Saint Petersburg : State Research Centre of the Russian Federation CONCERN CSRI ELEKROPRIBOR, JSC – 2015. – Р. 249 – 252.

В других изданиях:

A12. Кутовой Д.А. Оценка паспортных параметров бесплатформенного инерциального блока по ограниченному набору ориентаций и переходу между ними / Д.А. Кутовой, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии. 2016. Сборник трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (1–3 июня 2016 г.) / Под ред. д.т.н., проф. А.А. Романова. – М.: АО «РКС», 2016. – С. 11-25.

A13. Кутовой Д.А. Оценка паспортных параметров бесплатформенного инерциального блока по ограниченному набору ориентаций и переходу между ними / Д.А. Кутовой, С.Ю. Перепелкина // Навигация и управление движением. Материалы XVIII конференции молодых ученых. – Санкт-Петербург : ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 295 – 304.

A14. Кутовой Д.А. Организация и проведение исследований инерциальных измерителей на позициях «НПО автоматики» / Д.А. Кутовой, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // 2я Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». Сборник докладов / Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – 2016. – С. 48 – 57.

A15. Кутовой В.М. Исследование модели измерительной акселерометрической информации бесплатформенного инерциального блока с использованием метода вариации Аллана / В.М. Кутовой, Д.А. Кутовой, О.И. Маслова, С.Ю. Перепелкина,

П.В. Ситников, А.А. Федотов // Труды VI НТК молодых ученых и специалистов «Приборы и системы управления ракетно-космических комплексов» – Москва : ФГУП «НПЦ АП», 2015. – С. 246–259.

А16. Кутовой Д.А. Использование вариации Аллана для практического определения структуры шумов чувствительных элементов БИНС / Д.А. Кутовой, С.Ю. Перепелкина, П.В. Ситников // Навигация и управление движением. Материалы XVII конференции молодых ученых. – Санкт-Петербург : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – С. 283–290.

А17. Кутовой Д.А. Исследование характеристик перспективных приборов на базе ВОГ / Н.И. Верховых, Д.А. Кутовой, О.И. Маслова, С.Ю. Перепелкина, В.С. Ситников, А.А. Федотов // Ракетно-космическая техника: научно-технический сборник. Системы управления ракетных комплексов. – Екатеринбург : АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова». – 2015. – С. 30 – 38.

А18. Кутовой Д.А. Использование вариации Аллана для практического определения структуры шумов чувствительных элементов БИНС / Д.А. Кутовой, О.И. Маслова, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // Ракетно-космическая техника: научно-технический сборник. Системы управления ракетных комплексов. – Екатеринбург : АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова». – 2015. – С. 14 – 24.

А19. Кутовой Д. А. Оценка параметров математической модели БИНС посредством многопараметрической оптимизации / Д.А. Кутовой, С.Ю. Перепелкина, П.В. Ситников // Навигация и управление движением. Материалы XVI конференции молодых ученых. – Санкт-Петербург : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2014. – С. 195 – 200.

А20. Кутовой В.М. Анализ моделируемой измерительной информации бесплатформенного инерциального блока с использованием метода вариации Аллана / В.М. Кутовой, Д.А. Кутовой, О.И. Маслова С.Ю. Перепелкина, П.В. Ситников, А.А. Федотов // Материалы XXIX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Острякова. – Санкт-Петербург : ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2014. – С. 334 – 341.

- A21. Кутовой Д. А. О применении многопараметрической оптимизации для оценки составляющих математической модели погрешностей блока чувствительных элементов БИНС / Д.А. Кутовой, Е.М. Миловидов, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // Сборник материалов молодежной конференции «Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники». – Королев Московской обл. : ИПК «Машприбор». – 2014. – С. 30 –38.
- A22. Кутовой Д.А. Некоторые практические вопросы использования вариации Аллана при исследовании бесплатформенного инерциального блока [Текст] / Д.А. Кутовой, П.В. Ситников // Навигация и управление движением. Материалы XV конференции молодых ученых. СПб.: ГНЦ РФ «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С.246-252.
- A23. Кутовой Д.А. Некоторые практические вопросы использования вариации Аллана при исследовании бесплатформенного инерциального блока / Д.А. Кутовой, П.В. Ситников, А.А. Федотов, В.Л. Якимов // Ракетно-космическая техника: научно-технический сборник. Сер. XI. Системы управления ракетных комплексов. – Екатеринбург : ФГУП «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова». – 2013. – С. 55 – 64.
- A24. Вдовин М.В. Обеспечение испытаний и результаты исследования ряда бесплатформенных инерциальных блоков на базе волоконно-оптических гироскопов / М.В. Вдовин, Д.А. Кутовой, О.И. Маслова, С.Ю. Перепелкина, П.В. Ситников, А.А. Федотов // Труды V НТК молодых ученых и специалистов. – Москва : ФГУП НПЦАП им. академика Н.А. Пилюгина. – 2013. – С. 347–360.
- A25. Кутовой Д.А. Использование избыточности измерителей блока чувствительных элементов бесплатформенного инерциального блока для повышения надёжности и точности / Д.А. Кутовой, О.И. Маслова, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // Итоги диссертационных исследований. Материалы IV Всероссийского конкурса молодых ученых. – Москва : РАН. – 2012. – С. 77–88.

Приложение А
(обязательное)

**Результаты расчета оценки случайных погрешностей
бесплатформенной инерциальной навигационной системы**

В таблице А.1 представлены оценки случайного блуждания выходного сигнала АК БИНС, полученные статистическим методом, методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения, рассчитываемая по формуле (3.22).

В таблице А.1 приняты следующие обозначения:

Sa'_{cstat} – оценка случайного блуждания выходного сигнала АК статистическим методом, $\text{м}/\text{с}^2$;

Sa'_{spm} – оценка случайного блуждания выходного сигнала АК методом СПМ, $\text{м}/\text{с}^2$;

Sa'_{va} – оценка случайного блуждания выходного сигнала АК методом ВА, $\text{м}/\text{с}^2$;

ε^s_{cstat} – погрешность оценки случайного блуждания выходного сигнала АК статистическим методом, %;

ε^s_{spm} – погрешность оценки случайного блуждания выходного сигнала АК методом СПМ, %;

ε^s_{va} – погрешность оценки случайного блуждания выходного сигнала АК методом ВА, %.

Таблица А.1 – Оценки случайного блуждания выходного сигнала АК БИНС, полученные статистическим методом, методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения

№ п/п	Sa'_{cstat} , $\text{м}/\text{с}^2$	ε^s_{cstat} , %	Sa'_{spm} , $\text{м}/\text{с}^2$	ε^s_{spm} , %	Sa'_{va} , $\text{м}/\text{с}^2$	ε^s_{va} , %
1	0,0893	-11,59	0,0790	-1,25	0,0797	0,39
2	0,0925	-15,61	0,0785	-1,93	0,0799	0,12
3	0,1336	-66,94	0,0805	0,58	0,0819	-2,44

Продолжение таблицы А.1

№ п/п	Sa'_{cmam} , м/с ²	ε^s_{cmam} , %	Sa'_{cnm} , м/с ²	ε^s_{cnm} , %	Sa'_{ea} , м/с ²	ε^s_{ea} , %
4	0,0994	-24,28	0,0788	-1,53	0,0797	0,40
5	0,0936	-17,06	0,0785	-1,93	0,0795	0,63
6	0,0862	-7,77	0,0783	-2,08	0,0785	1,88
7	0,0898	-12,25	0,0791	-1,17	0,0798	0,25
8	0,1048	-30,95	0,0780	-2,48	0,0788	1,56
9	0,0968	-20,96	0,0799	-0,08	0,0808	-1,05
10	0,0988	-23,52	0,0792	-1,00	0,0806	-0,72
11	0,1618	-102,21	0,0799	-0,10	0,0806	-0,72
12	0,0879	-9,89	0,0788	-1,46	0,0792	0,94
13	0,1082	-35,30	0,0801	0,14	0,0801	-0,12
14	0,1340	-67,52	0,0794	-0,73	0,0802	-0,25
15	0,1253	-56,57	0,0777	-2,82	0,0786	1,72
16	0,0928	-16,06	0,0789	-1,42	0,0801	-0,14
17	0,1100	-37,47	0,0776	-3,01	0,0788	1,51
18	0,0953	-19,08	0,0783	-2,14	0,0796	0,54
19	0,0978	-22,28	0,0780	-2,55	0,0803	-0,40
20	0,0994	-24,30	0,0791	-1,09	0,0804	-0,45
21	0,0876	-9,47	0,0786	-1,70	0,0798	0,25
22	0,0952	-18,97	0,0785	-1,86	0,0791	1,12
23	0,1284	-60,45	0,0799	-0,14	0,0808	-1,06
24	0,1008	-25,96	0,0797	-0,40	0,0804	-0,49
25	0,1107	-38,39	0,0780	-2,56	0,0787	1,65
26	0,0981	-22,68	0,0787	-1,67	0,0794	0,81
27	0,1062	-32,74	0,0795	-0,58	0,0802	-0,25
28	0,0982	-22,78	0,0781	-2,41	0,0790	1,31
29	0,0900	-12,48	0,0796	-0,55	0,0803	-0,33
30	0,1177	-47,15	0,0786	-1,74	0,0795	0,61
31	0,1178	-47,29	0,0797	-0,38	0,0810	-1,22

Продолжение таблицы А.1

№ п/п	Sa'_{cmam} , м/с ²	ε^s_{cmam} , %	Sa'_{cnm} , м/с ²	ε^s_{cnm} , %	Sa'_{ea} , м/с ²	ε^s_{ea} , %
32	0,0934	-16,70	0,0788	-1,53	0,0787	1,63
33	0,1008	-25,97	0,0791	-1,12	0,0801	-0,13
34	0,0960	-20,04	0,0789	-1,36	0,0800	-0,02
35	0,1031	-28,94	0,0787	-1,63	0,0796	0,46
36	0,0922	-15,21	0,0783	-2,08	0,0794	0,81
37	0,0901	-12,66	0,0788	-1,55	0,0799	0,10
38	0,1168	-45,98	0,0790	-1,30	0,0793	0,88
39	0,0922	-15,30	0,0794	-0,70	0,0805	-0,65
40	0,0920	-14,98	0,0786	-1,80	0,0793	0,87
41	0,1328	-65,97	0,0795	-0,67	0,0805	-0,60
42	0,1172	-46,54	0,0787	-1,66	0,0788	1,49
43	0,0974	-21,76	0,0795	-0,60	0,0804	-0,50
44	0,0984	-22,98	0,0788	-1,56	0,0794	0,71
45	0,0945	-18,18	0,0785	-1,89	0,0794	0,78
46	0,0935	-16,93	0,0784	-2,02	0,0792	0,98
47	0,0898	-12,22	0,0786	-1,81	0,0787	1,60
48	0,1058	-32,27	0,0787	-1,60	0,0795	0,65
49	0,1087	-35,93	0,0786	-1,72	0,0794	0,72
50	0,0878	-9,72	0,0781	-2,41	0,0786	1,78
51	0,1114	-39,29	0,0781	-2,36	0,0785	1,89
52	0,0916	-14,45	0,0784	-2,06	0,0791	1,11
53	0,0897	-12,10	0,0789	-1,38	0,0788	1,51
54	0,0870	-8,75	0,0786	-1,71	0,0783	2,07
55	0,0954	-19,31	0,0782	-2,20	0,0786	1,74
56	0,0914	-14,29	0,0787	-1,58	0,0783	2,08
57	0,0899	-12,33	0,0789	-1,42	0,0799	0,10
58	0,0950	-18,76	0,0790	-1,19	0,0800	0,01
59	0,0870	-8,78	0,0790	-1,24	0,0789	1,37

Продолжение таблицы А.1

№ п/п	Sa'_{cmam} , м/с ²	ε^s_{cmam} , %	Sa'_{cnm} , м/с ²	ε^s_{cnm} , %	Sa'_{ea} , м/с ²	ε^s_{ea} , %
60	0,0906	-13,29	0,0787	-1,68	0,0777	2,82
61	0,1159	-44,82	0,0783	-2,15	0,0791	1,11
62	0,1308	-63,54	0,0797	-0,33	0,0803	-0,32
63	0,1650	-106,31	0,0812	1,45	0,0816	-1,99
64	0,0998	-24,73	0,0790	-1,20	0,0799	0,12
65	0,0915	-14,43	0,0787	-1,58	0,0798	0,30
66	0,1174	-46,78	0,0789	-1,42	0,0793	0,84
67	0,1190	-48,71	0,0778	-2,76	0,0790	1,22
68	0,0933	-16,68	0,0782	-2,27	0,0783	2,13
69	0,0982	-22,72	0,0792	-0,96	0,0799	0,16
70	0,0956	-19,49	0,0788	-1,55	0,0794	0,71
71	0,0879	-9,82	0,0789	-1,40	0,0786	1,81
72	0,1193	-49,09	0,0795	-0,64	0,0792	1,00
73	0,1063	-32,88	0,0783	-2,10	0,0789	1,39
74	0,0959	-19,93	0,0796	-0,47	0,0805	-0,64
75	0,1048	-31,00	0,0794	-0,77	0,0799	0,11
76	0,0975	-21,93	0,0790	-1,27	0,0802	-0,23
77	0,0895	-11,93	0,0794	-0,69	0,0803	-0,39
78	0,0884	-10,48	0,0784	-2,03	0,0789	1,41
79	0,0921	-15,13	0,0793	-0,84	0,0800	-0,05
80	0,0933	-16,67	0,0793	-0,83	0,0807	-0,83
81	0,0981	-22,63	0,0783	-2,10	0,0796	0,52
82	0,0886	-10,81	0,0783	-2,11	0,0772	3,45
83	0,1011	-26,40	0,0793	-0,91	0,0798	0,25
84	0,0930	-16,22	0,0793	-0,87	0,0805	-0,57
85	0,0904	-13,02	0,0792	-0,94	0,0804	-0,44
86	0,1205	-50,60	0,0796	-0,44	0,0802	-0,29
87	0,0986	-23,21	0,0788	-1,53	0,0798	0,28

Продолжение таблицы А.1

№ п/п	Sa'_{cmam} , м/с ²	ε^s_{cmam} , %	Sa'_{cnm} , м/с ²	ε^s_{cnm} , %	Sa'_{va} , м/с ²	ε^s_{va} , %
88	0,0905	-13,09	0,0788	-1,53	0,0790	1,24
89	0,0910	-13,73	0,0792	-1,04	0,0798	0,23
90	0,0906	-13,19	0,0794	-0,72	0,0803	-0,33
91	0,1187	-48,32	0,0801	0,10	0,0809	-1,17
92	0,0876	-9,53	0,0792	-1,03	0,0801	-0,13
93	0,0889	-11,16	0,0788	-1,48	0,0798	0,31
94	0,0926	-15,77	0,0790	-1,28	0,0801	-0,14
95	0,0890	-11,28	0,0779	-2,66	0,0783	2,11
96	0,0943	-17,89	0,0786	-1,70	0,0791	1,13
97	0,0924	-15,54	0,0792	-1,02	0,0803	-0,33
98	0,0928	-16,05	0,0793	-0,88	0,0794	0,75
99	0,0988	-23,47	0,0795	-0,62	0,0805	-0,61
100	0,1077	-34,62	0,0789	-1,38	0,0799	0,10
101	0,0882	-10,19	0,0791	-1,17	0,0793	0,89

В таблице А.2 представлены оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента АК БИНС, полученные методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения.

В таблице А.2 приняты следующие обозначения:

Ma'_{cnm} – оценка случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента АК методом СПМ, б/р;

Ma'_{va} – оценка случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента АК методом ВА, б/р;

ε^m_{cnm} – погрешность оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента АК методом СПМ, %;

ε^m_{va} – погрешность оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента АК методом ВА, %.

Таблица А.2 – Оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента АК БИНС, полученные методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения

№ п/п	$Ma'_{спм}$, б/р	$\varepsilon^m_{спм}$, %	$Ma'_{ва}$, б/р	$\varepsilon^m_{ва}$, %
1	0,00120	33,43	0,00095	-5,17
2	0,00071	-20,64	0,00097	-7,55
3	0,00330	266,44	0,00102	-13,71
4	0,00150	66,65	0,00103	-14,78
5	0,00061	-32,01	0,00089	1,07
6	0,00000	-99,93	0,00062	30,58
7	0,00000	-100,00	0,00079	12,48
8	0,00185	105,21	0,00078	13,33
9	0,00179	98,45	0,00100	-10,65
10	0,00000	-100,00	0,00121	-34,40
11	0,00205	128,25	0,00060	32,95
12	0,00052	-42,24	0,00076	15,95
13	0,00099	9,80	0,00090	0,13
14	0,00177	96,56	0,00081	9,58
15	0,00156	73,78	0,00084	6,80
16	0,00000	-99,79	0,00085	6,05
17	0,00208	130,59	0,00096	-6,64
18	0,00057	-36,44	0,00121	-34,99
19	0,00078	-13,32	0,00099	-9,49
20	0,00044	-50,68	0,00081	9,57
21	0,00000	-100,00	0,00072	20,15
22	0,00000	-99,88	0,00100	-10,86
23	0,00174	92,99	0,00081	9,45
24	0,00170	89,05	0,00102	-13,13
25	0,00200	121,85	0,00082	8,58
26	0,00108	20,19	0,00100	-11,37
27	0,00194	116,01	0,00067	25,99

Продолжение таблицы А.2

№ п/п	Ma'_{cnm} , б/р	ε'^n_{cnm} , %	Ma'_{ea} , б/р	ε'^n_{ea} , %
28	0,00065	-28,32	0,00106	-18,30
29	0,00082	-9,00	0,00093	-3,81
30	0,00119	32,08	0,00087	3,11
31	0,00123	36,23	0,00121	-34,03
32	0,00070	-22,16	0,00070	22,02
33	0,00095	5,33	0,00107	-18,98
34	0,00049	-45,55	0,00078	13,47
35	0,00059	-34,91	0,00091	-1,53
36	0,00000	-100,00	0,00092	-2,03
37	0,00000	-100,00	0,00086	4,03
38	0,00155	72,08	0,00102	-13,64
39	0,00058	-35,92	0,00091	-1,41
40	0,00000	-100,00	0,00090	0,02
41	0,00299	231,91	0,00097	-8,04
42	0,00159	76,39	0,00087	3,77
43	0,00125	38,93	0,00086	4,14
44	0,00152	68,56	0,00121	-34,49
45	0,00167	85,97	0,00106	-17,45
46	0,00005	-94,85	0,00083	8,16
47	0,00094	4,06	0,00072	19,74
48	0,00078	-13,65	0,00094	-4,72
49	0,00000	-100,00	0,00079	12,15
50	0,00069	-23,16	0,00068	23,91
51	0,00233	159,19	0,00091	-1,33
52	0,00068	-24,49	0,00063	29,97
53	0,00023	-74,60	0,00072	19,53
54	0,00103	14,17	0,00074	18,33
55	0,00123	36,89	0,00085	5,85

Продолжение таблицы А.2

№ п/п	Ma'_{cnm} , б/р	ε'^n_{cnm} , %	Ma'_{ea} , б/р	ε'^n_{ea} , %
56	0,00000	-100,00	0,00061	32,29
57	0,00053	-40,78	0,00074	18,17
58	0,00164	82,52	0,00084	6,78
59	0,00106	17,72	0,00074	17,94
60	0,00167	86,03	0,00096	-6,28
61	0,00190	111,15	0,00061	32,52
62	0,00229	154,59	0,00119	-31,83
63	0,00429	376,88	0,00081	9,84
64	0,00075	-16,74	0,00096	-6,72
65	0,00061	-32,10	0,00074	17,86
66	0,00067	-25,91	0,00106	-17,40
67	0,00074	-18,18	0,00107	-18,54
68	0,00117	29,95	0,00090	0,21
69	0,00117	30,01	0,00093	-3,80
70	0,00000	-100,00	0,00073	18,96
71	0,00110	22,12	0,00059	34,77
72	0,00000	-100,00	0,00065	27,57
73	0,00215	139,35	0,00113	-25,68
74	0,00000	-100,00	0,00083	7,33
75	0,00069	-23,67	0,00084	7,01
76	0,00000	-100,00	0,00081	10,08
77	0,00012	-86,84	0,00081	10,19
78	0,00157	74,47	0,00102	-13,81
79	0,00049	-45,14	0,00093	-3,13
80	0,00000	-100,00	0,00104	-15,97
81	0,00000	-100,00	0,00098	-9,43
82	0,00129	43,17	0,00067	25,47
83	0,00058	-35,71	0,00113	-25,77

Продолжение таблицы А.2

№ п/п	$Ma'_{cнm}$, б/р	$\varepsilon'^n_{cнm}$, %	Ma'_{ea} , б/р	ε'^n_{ea} , %
84	0,00096	6,14	0,00102	-13,38
85	0,00000	-99,49	0,00081	9,63
86	0,00139	54,87	0,00087	3,67
87	0,00046	-49,25	0,00112	-24,23
88	0,00065	-28,30	0,00072	20,16
89	0,00106	17,40	0,00086	4,67
90	0,00081	-10,35	0,00079	12,69
91	0,00070	-22,67	0,00098	-9,13
92	0,00069	-23,43	0,00082	8,93
93	0,00041	-54,39	0,00089	0,90
94	0,00000	-100,00	0,00104	-15,66
95	0,00187	107,67	0,00113	-25,06
96	0,00120	33,51	0,00096	-6,55
97	0,00007	-92,15	0,00101	-11,97
98	0,00116	28,62	0,00094	-4,02
99	0,00000	-100,00	0,00096	-7,20
100	0,00000	-100,00	0,00092	-2,29
101	0,00079	-12,10	0,00097	-8,27

В таблице А.3 представлены оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала АК БИНС, полученные методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения.

В таблице А.3 приняты следующие обозначения:

$Rw'_{cнm}$ – оценка случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала АК методом СПМ, $\text{м}/\text{с}^2$;

Rw'_{ea} – оценка случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала АК методом ВА, $\text{м}/\text{с}^2$;

ε_{cplm}^r – погрешность оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала АК методом СПМ, %;

ε_{ea}^r – погрешность оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала АК методом ВА, %.

Таблица А.3 – Оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала АК БИНС, полученные методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения

№ п/п	Rw'_{cplm} , б/р	ε_{cplm}^r , %	Rw'_{ea} , б/р	ε_{ea}^r , %
1	0,0122	1,57	0,0121	-1,20
2	0,0121	0,96	0,0118	1,68
3	0,0123	2,42	0,0120	-0,14
4	0,0122	1,48	0,0120	-0,35
5	0,0123	2,66	0,0120	-0,37
6	0,0121	0,74	0,0122	-1,42
7	0,0123	2,60	0,0122	-1,59
8	0,0121	0,94	0,0120	0,34
9	0,0122	1,41	0,0121	-0,50
10	0,0123	2,91	0,0119	0,50
11	0,0123	2,63	0,0122	-1,51
12	0,0121	1,13	0,0121	-1,11
13	0,0124	3,32	0,0125	-4,05
14	0,0122	1,35	0,0121	-0,59
15	0,0119	-0,84	0,0119	1,14
16	0,0122	1,89	0,0119	0,42
17	0,0121	0,67	0,0117	2,09
18	0,0120	0,41	0,0118	1,79
19	0,0121	0,65	0,0114	4,75
20	0,0121	1,22	0,0119	0,63
21	0,0121	0,87	0,0119	0,63
22	0,0122	1,73	0,0121	-0,53

Продолжение таблицы А.3

№ п/п	Rw'_{cnm} , б/п	ε_{cnm}^r , %	Rw'_{ea} , б/п	ε_{ea}^r , %
23	0,0124	3,08	0,0122	-1,55
24	0,0122	1,90	0,0122	-1,38
25	0,0121	0,95	0,0119	0,75
26	0,0120	0,37	0,0120	-0,29
27	0,0122	1,91	0,0122	-2,06
28	0,0120	0,28	0,0119	1,07
29	0,0123	2,81	0,0122	-2,00
30	0,0121	0,96	0,0120	0,25
31	0,0121	1,11	0,0119	0,99
32	0,0119	-0,88	0,0121	-0,78
33	0,0122	1,49	0,0119	0,85
34	0,0121	1,15	0,0119	0,79
35	0,0121	0,50	0,0119	0,46
36	0,0120	-0,31	0,0118	1,34
37	0,0122	1,32	0,0119	0,71
38	0,0121	1,17	0,0122	-1,45
39	0,0123	2,80	0,0121	-1,18
40	0,0120	-0,23	0,0120	0,21
41	0,0122	1,50	0,0120	0,20
42	0,0121	0,65	0,0121	-0,88
43	0,0124	3,12	0,0122	-1,47
44	0,0120	0,27	0,0120	0,03
45	0,0122	1,56	0,0119	0,59
46	0,0123	2,23	0,0120	-0,41
47	0,0121	0,61	0,0123	-2,14
48	0,0121	0,76	0,0120	0,11
49	0,0121	0,86	0,0120	-0,04
50	0,0122	1,29	0,0121	-0,85

Продолжение таблицы А.3

№ п/п	Rw'_{cnm} , б/п	ε_{cnm}^r , %	Rw'_{ea} , б/п	ε_{ea}^r , %
51	0,0119	-0,63	0,0120	-0,27
52	0,0119	-1,14	0,0119	1,00
53	0,0122	1,54	0,0123	-2,39
54	0,0121	0,96	0,0123	-2,15
55	0,0120	-0,33	0,0119	1,09
56	0,0123	2,74	0,0125	-3,78
57	0,0121	0,87	0,0120	0,23
58	0,0123	2,14	0,0120	-0,40
59	0,0122	1,30	0,0123	-2,58
60	0,0119	-0,71	0,0124	-3,41
61	0,0121	1,10	0,0120	-0,08
62	0,0122	1,34	0,0123	-2,26
63	0,0125	4,02	0,0125	-4,53
64	0,0121	0,97	0,0121	-1,15
65	0,0119	-0,43	0,0120	0,23
66	0,0121	0,67	0,0121	-0,65
67	0,0120	-0,02	0,0117	2,67
68	0,0120	-0,38	0,0121	-0,46
69	0,0121	0,68	0,0121	-0,56
70	0,0120	0,31	0,0120	-0,03
71	0,0121	1,05	0,0123	-2,86
72	0,0123	2,68	0,0125	-3,85
73	0,0121	1,25	0,0121	-0,82
74	0,0124	2,93	0,0122	-1,76
75	0,0122	1,32	0,0122	-1,66
76	0,0122	1,76	0,0120	-0,10
77	0,0122	1,84	0,0121	-1,14
78	0,0121	1,09	0,0121	-0,70

Продолжение таблицы А.3

№ п/п	Rw'_{cnm} , б/п	ε_{cnm}^r , %	Rw'_{ea} , б/п	ε_{ea}^r , %
79	0,0123	2,22	0,0121	-0,74
80	0,0121	0,71	0,0118	1,45
81	0,0121	1,09	0,0117	2,38
82	0,0122	1,27	0,0124	-3,52
83	0,0121	0,66	0,0121	-0,71
84	0,0123	2,18	0,0120	-0,13
85	0,0122	1,72	0,0119	0,47
86	0,0123	2,30	0,0122	-2,04
87	0,0122	1,83	0,0120	0,19
88	0,0121	0,98	0,0121	-1,17
89	0,0120	0,35	0,0121	-0,63
90	0,0120	-0,36	0,0120	-0,34
91	0,0125	4,04	0,0123	-2,81
92	0,0121	0,43	0,0118	1,59
93	0,0122	1,68	0,0121	-0,73
94	0,0121	1,02	0,0119	0,93
95	0,0118	-1,26	0,0119	1,05
96	0,0119	-0,65	0,0120	-0,31
97	0,0118	-1,52	0,0117	2,46
98	0,0123	2,09	0,0123	-2,53
99	0,0122	1,92	0,0122	-1,54
100	0,0121	0,42	0,0120	0,15
101	0,0122	1,58	0,0123	-2,40

В таблице А.4 представлены оценки случайного блуждания выходного сигнала ГК, полученные статистическим методом, методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения, рассчитываемая по формуле (3.22).

В таблице А.4 принятые следующие обозначения:

Sg'_{cstat} – оценка случайного блуждания выходного сигнала ГК статистическим методом, $\text{м}/\text{с}^2$;

Sg'_{cpl} – оценка случайного блуждания выходного сигнала ГК методом СПМ, $\text{м}/\text{с}^2$;

Sg'_{ba} – оценка случайного блуждания выходного сигнала ГК методом ВА, $\text{м}/\text{с}^2$;

ε^s_{cstat} – погрешность оценки случайного блуждания выходного сигнала ГК статистическим методом, %;

ε^s_{cpl} – погрешность оценки случайного блуждания выходного сигнала ГК методом СПМ, %;

ε^s_{ba} – погрешность оценки случайного блуждания выходного сигнала ГК методом ВА, %.

Таблица А.4 – Оценки случайного блуждания выходного сигнала ГК БИНС, полученные статистическим методом, методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения

№ п/п	Sg'_{cstat} , $\text{м}/\text{с}^2$	ε^s_{cstat} , %	Sg'_{cpl} , $\text{м}/\text{с}^2$	ε^s_{cpl} , %	Sg'_{ba} , $\text{м}/\text{с}^2$	ε^s_{ba} , %
1	0,0200	-33,38	0,0148	1,02	0,0150	0,29
2	0,0283	-88,64	0,0148	1,20	0,0149	0,55
3	0,0475	-216,49	0,0148	1,02	0,0149	0,37
4	0,0361	-140,79	0,0149	0,72	0,0150	-0,08
5	0,0295	-96,85	0,0149	0,89	0,0151	-0,34
6	0,0224	-49,25	0,0148	1,15	0,0151	-0,53
7	0,0373	-148,39	0,0148	1,19	0,0149	0,49
8	0,0431	-187,20	0,0149	0,74	0,0150	-0,25
9	0,0420	-180,30	0,0149	0,95	0,0150	0,16
10	0,0210	-40,09	0,0149	0,82	0,0148	1,36
11	0,0330	-120,27	0,0149	0,98	0,0148	1,46
12	0,0307	-104,69	0,0148	1,47	0,0150	0,22
13	0,0371	-147,56	0,0149	0,94	0,0149	0,69

Продолжение таблицы А.4

№ п/п	Sg'_{cmam} , м/с ²	ε^s_{cmam} , %	Sg'_{cnm} , м/с ²	ε^s_{cnm} , %	Sg'_{ea} , м/с ²	ε^s_{ea} , %
14	0,0491	-227,07	0,0149	0,72	0,0149	0,53
15	0,0337	-124,66	0,0149	0,99	0,0148	1,06
16	0,0631	-320,82	0,0148	1,23	0,0149	0,36
17	0,0430	-186,72	0,0148	1,59	0,0149	0,93
18	0,0403	-168,98	0,0149	0,77	0,0149	0,44
19	0,0323	-115,13	0,0149	0,89	0,0149	0,61
20	0,0336	-124,26	0,0149	0,90	0,0149	0,34
21	0,0339	-125,82	0,0148	1,45	0,0148	1,09
22	0,0234	-56,30	0,0149	0,91	0,0149	0,46
23	0,0295	-96,98	0,0149	0,86	0,0151	-0,50
24	0,0531	-253,75	0,0148	1,66	0,0149	0,59
25	0,0551	-267,40	0,0149	0,44	0,0151	-0,73
26	0,0303	-101,79	0,0149	0,88	0,0149	0,39
27	0,0525	-249,68	0,0148	1,18	0,0149	0,34
28	0,0304	-102,41	0,0148	1,22	0,0149	0,36
29	0,0350	-133,36	0,0148	1,47	0,0149	0,41
30	0,0286	-90,45	0,0149	0,92	0,0150	0,11
31	0,0304	-102,42	0,0149	0,89	0,0149	0,65
32	0,0283	-88,38	0,0148	1,00	0,0150	0,21
33	0,0359	-139,52	0,0149	0,66	0,0151	-0,48
34	0,0309	-106,01	0,0149	0,64	0,0150	-0,14
35	0,0287	-91,38	0,0149	0,69	0,0150	-0,15
36	0,0334	-122,65	0,0148	1,35	0,0151	-0,37
37	0,0310	-106,73	0,0149	0,74	0,0150	0,03
38	0,0436	-190,95	0,0149	0,57	0,0150	-0,28
39	0,0306	-103,99	0,0149	0,67	0,0150	-0,33
40	0,0231	-53,71	0,0149	0,85	0,0148	1,09
41	0,0374	-149,28	0,0149	0,88	0,0150	-0,19

Продолжение таблицы А.4

№ п/п	Sg'_{cmam} , м/с ²	ε^s_{cmam} , %	Sg'_{cnm} , м/с ²	ε^s_{cnm} , %	Sg'_{ea} , м/с ²	ε^s_{ea} , %
42	0,0357	-137,89	0,0148	1,20	0,0151	-0,33
43	0,0322	-114,89	0,0149	0,84	0,0150	0,33
44	0,0223	-48,37	0,0148	1,10	0,0149	0,35
45	0,0283	-88,56	0,0149	0,90	0,0149	0,45
46	0,0243	-61,75	0,0148	1,34	0,0149	0,49
47	0,0318	-111,77	0,0148	1,03	0,0148	1,16
48	0,0479	-219,49	0,0149	0,74	0,0151	-0,55
49	0,0463	-208,39	0,0149	0,79	0,0152	-1,01
50	0,0339	-126,27	0,0148	1,19	0,0149	0,67
51	0,0305	-103,07	0,0148	1,09	0,0149	0,55
52	0,0331	-120,70	0,0148	1,45	0,0150	0,03
53	0,0335	-123,23	0,0148	1,09	0,0149	0,76
54	0,0250	-66,56	0,0148	1,14	0,0149	0,49
55	0,0236	-57,51	0,0148	1,30	0,0149	0,75
56	0,0194	-29,46	0,0149	0,83	0,0150	-0,18
57	0,0798	-432,06	0,0149	0,58	0,0151	-0,51
58	0,0278	-85,60	0,0148	1,38	0,0149	0,60
59	0,0437	-191,48	0,0148	1,13	0,0150	0,30
60	0,0328	-118,78	0,0148	1,08	0,0149	0,63
61	0,0251	-67,52	0,0149	0,42	0,0150	-0,30
62	0,0378	-151,82	0,0149	0,77	0,0150	-0,22
63	0,0247	-64,85	0,0148	1,30	0,0148	1,09
64	0,0340	-126,71	0,0149	0,97	0,0150	0,02
65	0,0454	-202,40	0,0148	1,19	0,0150	-0,02
66	0,0309	-106,31	0,0148	1,20	0,0149	0,38
67	0,0262	-74,39	0,0149	0,92	0,0151	-0,58
68	0,0210	-40,09	0,0148	1,04	0,0149	0,34
69	0,0528	-251,83	0,0148	1,03	0,0148	1,22

Продолжение таблицы А.4

№ п/п	Sg'_{cmam} , м/с ²	ε^s_{cmam} , %	Sg'_{cnm} , м/с ²	ε^s_{cnm} , %	Sg'_{ea} , м/с ²	ε^s_{ea} , %
70	0,0355	-136,58	0,0148	1,07	0,0149	0,60
71	0,0225	-50,19	0,0149	0,61	0,0151	-0,46
72	0,0380	-153,33	0,0149	1,00	0,0150	0,19
73	0,0690	-359,69	0,0149	0,99	0,0151	-0,86
74	0,0291	-93,77	0,0149	0,91	0,0150	-0,31
75	0,0264	-76,24	0,0148	1,06	0,0150	-0,08
76	0,0330	-120,18	0,0149	0,77	0,0151	-0,36
77	0,0252	-67,85	0,0148	1,15	0,0149	0,81
78	0,0358	-138,68	0,0149	0,48	0,0150	-0,03
79	0,0437	-191,56	0,0148	1,31	0,0150	0,24
80	0,0249	-65,81	0,0148	1,05	0,0150	0,25
81	0,0486	-223,76	0,0149	0,49	0,0150	-0,12
82	0,0228	-52,09	0,0148	1,02	0,0150	-0,11
83	0,0245	-63,46	0,0148	1,04	0,0149	0,78
84	0,0224	-49,33	0,0149	0,86	0,0148	1,24
85	0,0321	-113,86	0,0148	1,11	0,0150	0,05
86	0,0264	-75,73	0,0149	0,84	0,0149	0,37
87	0,0347	-131,36	0,0148	1,12	0,0149	0,89
88	0,0272	-81,46	0,0149	0,96	0,0150	-0,10
89	0,0263	-75,50	0,0148	1,03	0,0151	-0,44
90	0,0450	-199,69	0,0149	0,59	0,0150	-0,27
91	0,0334	-122,96	0,0148	1,42	0,0149	0,49
92	0,0594	-296,29	0,0149	0,64	0,0151	-0,70
93	0,0238	-58,87	0,0149	0,99	0,0150	0,15
94	0,0206	-37,32	0,0149	0,86	0,0149	0,86
95	0,0242	-61,21	0,0149	0,99	0,0149	0,60
96	0,0208	-38,38	0,0149	0,98	0,0150	-0,21
97	0,0355	-136,85	0,0149	1,00	0,0150	0,21

Продолжение таблицы А.4

№ п/п	Sg'_{cmam} , м/с ²	ε^s_{cmam} , %	Sg'_{cnm} , м/с ²	ε^s_{cnm} , %	Sg'_{ea} , м/с ²	ε^s_{ea} , %
98	0,0309	-106,27	0,0149	0,56	0,0149	0,39
99	0,0256	-70,70	0,0149	0,98	0,0150	0,15
100	0,0297	-98,11	0,0148	1,41	0,0149	0,38
101	0,0405	-169,67	0,0149	0,59	0,0150	-0,19

В таблице А.5 представлены оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента ГК БИНС, полученные методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения.

В таблице А.5 приняты следующие обозначения:

Mg'_{cnm} – оценка случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента ГК методом СПМ, б/р;

Mg'_{ea} – оценка случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента ГК методом ВА, б/р;

ε^m_{cnm} – погрешность оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента ГК методом СПМ, %;

ε^m_{ea} – погрешность оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента ГК методом ВА, %.

Таблица А.5 – Оценки случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента ГК БИНС, полученные методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения

№ п/п	Mg'_{cnm} , б/р	ε^m_{cnm} , %	Mg'_{ea} , б/р	ε^m_{ea} , %
1	0,00069	-96,89	0,00053	-51,82
2	0,00073	-109,98	0,00061	-72,86
3	0,00094	-169,58	0,00056	-60,45
4	0,00113	-222,81	0,00059	-67,64
5	0,00072	-105,69	0,00062	-77,23
6	0,00062	-76,47	0,00058	-66,15
7	0,00066	-88,71	0,00058	-65,11

Продолжение таблицы А.5

№ п/п	Mg'_{cnm} , б/п	ε'^n_{cnm} , %	Mg'_{ea} , б/п	ε'^n_{ea} , %
8	0,00070	-99,27	0,00060	-70,04
9	0,00109	-212,11	0,00058	-66,85
10	0,00068	-94,97	0,00050	-43,06
11	0,00069	-96,79	0,00051	-45,43
12	0,00097	-176,45	0,00060	-71,15
13	0,00065	-85,76	0,00059	-67,30
14	0,00134	-283,94	0,00056	-60,97
15	0,00062	-75,99	0,00052	-47,15
16	0,00129	-269,57	0,00061	-75,10
17	0,00116	-231,99	0,00056	-59,80
18	0,00121	-246,33	0,00056	-60,52
19	0,00110	-214,02	0,00059	-67,47
20	0,00070	-101,34	0,00059	-68,78
21	0,00107	-204,54	0,00055	-58,36
22	0,00072	-106,29	0,00059	-68,51
23	0,00073	-108,63	0,00055	-57,51
24	0,00153	-338,33	0,00057	-62,44
25	0,00120	-242,12	0,00059	-69,81
26	0,00070	-98,93	0,00050	-41,90
27	0,00125	-256,29	0,00060	-71,83
28	0,00065	-85,97	0,00058	-65,77
29	0,00100	-185,84	0,00058	-66,95
30	0,00071	-101,44	0,00053	-52,51
31	0,00067	-90,45	0,00057	-62,56
32	0,00068	-95,29	0,00058	-66,24
33	0,00076	-117,75	0,00064	-83,93
34	0,00114	-226,65	0,00056	-60,35
35	0,00082	-135,31	0,00059	-67,56

Продолжение таблицы А.5

№ п/п	Mg'_{cnm} , б/п	ε'^n_{cnm} , %	Mg'_{ea} , б/п	ε'^n_{ea} , %
36	0,00081	-132,12	0,00056	-59,84
37	0,00072	-106,37	0,00060	-71,80
38	0,00117	-233,87	0,00059	-68,65
39	0,00099	-182,20	0,00058	-67,10
40	0,00086	-146,32	0,00053	-52,39
41	0,00093	-166,53	0,00061	-75,21
42	0,00087	-148,82	0,00062	-77,78
43	0,00092	-161,60	0,00059	-67,34
44	0,00064	-83,17	0,00058	-64,40
45	0,00054	-55,42	0,00054	-53,82
46	0,00059	-69,10	0,00056	-58,87
47	0,00085	-143,49	0,00056	-60,03
48	0,00116	-230,68	0,00060	-70,06
49	0,00080	-127,70	0,00064	-82,09
50	0,00081	-132,34	0,00052	-49,46
51	0,00069	-96,69	0,00056	-58,99
52	0,00062	-76,12	0,00057	-63,92
53	0,00067	-90,49	0,00056	-61,38
54	0,00078	-123,49	0,00053	-51,17
55	0,00071	-103,23	0,00058	-64,52
56	0,00070	-99,35	0,00054	-55,67
57	0,00197	-463,26	0,00057	-61,53
58	0,00078	-122,65	0,00056	-59,27
59	0,00101	-187,42	0,00062	-76,17
60	0,00076	-118,09	0,00057	-62,55
61	0,00086	-145,22	0,00058	-65,93
62	0,00115	-229,82	0,00057	-64,12
63	0,00096	-174,92	0,00056	-59,04

Продолжение таблицы А.5

№ п/п	Mg'_{cnm} , б/п	ε'^n_{cnm} , %	Mg'_{ea} , б/п	ε'^n_{ea} , %
64	0,00058	-65,40	0,00056	-60,53
65	0,00063	-78,75	0,00059	-69,50
66	0,00070	-99,88	0,00060	-72,24
67	0,00066	-89,01	0,00059	-69,10
68	0,00067	-90,44	0,00058	-65,07
69	0,00074	-112,34	0,00054	-53,16
70	0,00097	-176,51	0,00058	-64,75
71	0,00078	-124,22	0,00061	-72,94
72	0,00072	-105,47	0,00057	-63,70
73	0,00145	-314,44	0,00058	-66,12
74	0,00064	-83,30	0,00061	-75,42
75	0,00058	-66,38	0,00056	-59,65
76	0,00122	-247,92	0,00061	-73,01
77	0,00085	-142,28	0,00059	-67,98
78	0,00102	-191,48	0,00057	-62,18
79	0,00142	-304,42	0,00059	-69,63
80	0,00065	-86,38	0,00057	-63,57
81	0,00143	-309,97	0,00058	-66,17
82	0,00067	-92,63	0,00060	-71,91
83	0,00092	-163,51	0,00058	-66,54
84	0,00066	-88,90	0,00053	-51,03
85	0,00103	-193,40	0,00055	-56,79
86	0,00062	-76,08	0,00056	-61,33
87	0,00073	-108,53	0,00057	-62,98
88	0,00069	-96,65	0,00056	-61,33
89	0,00061	-74,53	0,00059	-67,20
90	0,00076	-116,79	0,00057	-61,74
91	0,00084	-139,71	0,00057	-61,48

Продолжение таблицы А.5

№ п/п	Mg'_{cnm} , б/р	ε'^{n}_{cnm} , %	Mg'_{ea} , б/р	ε'^{n}_{ea} , %
92	0,00213	-508,51	0,00058	-65,25
93	0,00062	-76,53	0,00056	-60,22
94	0,00083	-136,13	0,00053	-52,30
95	0,00067	-90,65	0,00056	-60,47
96	0,00056	-60,00	0,00052	-47,57
97	0,00075	-114,80	0,00055	-57,45
98	0,00061	-75,03	0,00055	-57,77
99	0,00062	-75,76	0,00056	-59,97
100	0,00082	-133,02	0,00057	-63,75
101	0,00110	-214,93	0,00058	-65,55

В таблице А.6 представлены оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала ГК БИНС, полученные методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения.

В таблице А.6 приняты следующие обозначения:

Rw'_{cnm} – оценка случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала ГК методом СПМ, $\text{м}/\text{с}^2$;

Rw'_{ea} – оценка случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала ГК методом ВА, $\text{м}/\text{с}^2$;

ε'^{r}_{cnm} – погрешность оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала ГК методом СПМ, %;

ε'^{r}_{ea} – погрешность оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала ГК методом ВА, %.

Таблица А.6 – Оценки случайной составляющей погрешности смещения нулевого сигнала ГК БИНС, полученные методом СПМ и методом ВА по результатам 101 запуска программы и погрешность их определения

№ п/п	Rw'_{cplm} , б/р	ε^r_{cplm} , %	Rw'_{ea} , б/р	ε^r_{ea} , %
1	0,00181	-0,45	0,00183	-1,46
2	0,00182	-1,04	0,00180	0,25
3	0,00180	0,14	0,00180	-0,04
4	0,00184	-2,16	0,00179	0,80
5	0,00184	-2,35	0,00179	0,56
6	0,00184	-2,19	0,00178	1,18
7	0,00183	-1,70	0,00181	-0,62
8	0,00182	-1,14	0,00178	0,85
9	0,00185	-2,88	0,00183	-1,89
10	0,00183	-1,48	0,00188	-4,53
11	0,00183	-1,62	0,00189	-5,00
12	0,00176	2,03	0,00173	4,10
13	0,00181	-0,56	0,00183	-1,48
14	0,00182	-1,32	0,00183	-1,54
15	0,00180	0,02	0,00184	-2,07
16	0,00183	-1,80	0,00179	0,57
17	0,00180	-0,06	0,00179	0,38
18	0,00187	-3,71	0,00186	-3,22
19	0,00181	-0,73	0,00184	-2,40
20	0,00182	-1,33	0,00181	-0,57
21	0,00185	-2,65	0,00184	-2,45
22	0,00184	-2,08	0,00184	-2,06
23	0,00184	-2,22	0,00179	0,72
24	0,00185	-2,63	0,00181	-0,33
25	0,00188	-4,45	0,00182	-1,18
26	0,00182	-0,95	0,00184	-2,04
27	0,00183	-1,51	0,00181	-0,72

Продолжение таблицы А.6

№ п/п	Rw'_{cnm} , б/п	ε_{cnm}^r , %	Rw'_{ea} , б/п	ε_{ea}^r , %
28	0,00184	-2,25	0,00180	0,08
29	0,00185	-2,78	0,00181	-0,40
30	0,00187	-3,86	0,00184	-2,05
31	0,00181	-0,77	0,00182	-1,08
32	0,00181	-0,41	0,00179	0,49
33	0,00180	0,19	0,00175	2,79
34	0,00182	-0,95	0,00183	-1,51
35	0,00182	-0,84	0,00182	-0,87
36	0,00185	-2,96	0,00177	1,49
37	0,00180	0,14	0,00181	-0,39
38	0,00184	-1,96	0,00182	-1,38
39	0,00185	-2,89	0,00180	-0,23
40	0,00177	1,49	0,00182	-1,30
41	0,00185	-2,78	0,00179	0,58
42	0,00182	-0,94	0,00175	3,01
43	0,00181	-0,56	0,00181	-0,63
44	0,00182	-1,06	0,00178	0,90
45	0,00186	-3,46	0,00185	-2,57
46	0,00185	-3,00	0,00182	-1,32
47	0,00181	-0,63	0,00183	-1,41
48	0,00182	-1,35	0,00178	1,26
49	0,00186	-3,08	0,00176	2,00
50	0,00184	-2,34	0,00184	-2,07
51	0,00185	-2,83	0,00184	-2,04
52	0,00187	-3,85	0,00179	0,39
53	0,00185	-2,58	0,00182	-1,23
54	0,00183	-1,49	0,00184	-2,32
55	0,00185	-2,70	0,00183	-1,88

Продолжение таблицы А.6

№ п/п	Rw'_{cnm} , б/п	ε_{cnm}^r , %	Rw'_{ea} , б/п	ε_{ea}^r , %
56	0,00185	-2,95	0,00182	-1,37
57	0,00182	-1,18	0,00179	0,39
58	0,00182	-1,11	0,00180	0,17
59	0,00183	-1,89	0,00179	0,34
60	0,00185	-2,70	0,00185	-2,56
61	0,00184	-2,29	0,00182	-0,96
62	0,00185	-2,65	0,00183	-1,82
63	0,00180	-0,02	0,00183	-1,60
64	0,00184	-2,13	0,00180	-0,03
65	0,00184	-2,43	0,00174	3,19
66	0,00178	1,02	0,00176	2,02
67	0,00187	-3,80	0,00178	0,93
68	0,00181	-0,78	0,00181	-0,69
69	0,00180	0,01	0,00185	-2,70
70	0,00178	1,02	0,00181	-0,36
71	0,00183	-1,43	0,00179	0,39
72	0,00182	-1,06	0,00180	-0,24
73	0,00185	-3,05	0,00177	1,83
74	0,00182	-1,28	0,00177	1,50
75	0,00186	-3,21	0,00181	-0,81
76	0,00180	0,03	0,00177	1,48
77	0,00183	-1,61	0,00182	-1,17
78	0,00180	-0,13	0,00182	-0,84
79	0,00180	0,09	0,00177	1,48
80	0,00184	-2,27	0,00181	-0,33
81	0,00182	-1,36	0,00182	-1,21
82	0,00184	-2,25	0,00179	0,59
83	0,00178	0,84	0,00181	-0,45

Продолжение таблицы А.6

№ п/п	Rw'_{cnm} , б/п	ε_{cnm}^r , %	Rw'_{ea} , б/п	ε_{ea}^r , %
84	0,00185	-2,96	0,00188	-4,44
85	0,00184	-1,96	0,00179	0,57
86	0,00187	-3,65	0,00185	-2,77
87	0,00184	-2,45	0,00182	-0,95
88	0,00183	-1,73	0,00181	-0,72
89	0,00184	-2,09	0,00176	2,31
90	0,00184	-2,30	0,00181	-0,49
91	0,00185	-2,84	0,00182	-1,33
92	0,00181	-0,58	0,00179	0,67
93	0,00183	-1,67	0,00183	-1,57
94	0,00181	-0,81	0,00188	-4,53
95	0,00179	0,42	0,00181	-0,34
96	0,00182	-0,84	0,00178	1,34
97	0,00183	-1,84	0,00182	-0,89
98	0,00183	-1,69	0,00183	-1,40
99	0,00180	-0,17	0,00179	0,60
100	0,00184	-2,11	0,00178	1,35
101	0,00185	-2,75	0,00182	-1,13

Приложение Б

Внедрение результатов диссертационной работы

Акционерное общество
«Научно-производственное объединение автоматики
имени академика Н.А. Семихатова»



АО «НПО автоматики»

Мамина Сибиряка ул., д. 145, г. Екатеринбург, 620075, тел.: (343) 355-95-25, факс: 263-76-26, e-mail: avt@proa.ru
ОКПО 07533030 ОГРН 1146685026509, ИНН 6685006917 / КПП 668501001. Телефайл 221276 MEZON RU.

Исх. № 310/236 от «21» июня 2022 г.

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный конструктор
АО «НПО автоматики»

С.Ф.Дерюгин

2022 г.

Акт внедрения

результатов диссертационной работы Кутового Дениса Алексеевича
на тему: «Методики оценки погрешностей, присущих блоку
чувствительных элементов в составе бесплатформенных
инерциальных навигационных систем»

Результаты диссертационной работы Д.А.Кутового, в том числе программно-алгоритмический аппарат и методики оценки систематических и случайных составляющих математической модели погрешности чувствительных элементов бесплатформенных инерциальных навигационных систем, внедрены в АО «НПО автоматики имени академика Н.А.Семихатова» и используются в рамках разработки систем управления изделий ракетно-космической техники при проведении стендовой отработки бесплатформенных инерциальных навигационных систем на позициях предприятия.

Применение указанных разработок позволило повысить точность оценки составляющих математической модели погрешности бесплатформенных инерциальных навигационных систем, испытываемых на позициях АО «НПО автоматики имени академика Н.А.Семихатова», а также упростить и ускорить процесс проведения испытаний.

Диссертационная работа Д.А.Кутового является актуальным исследованием, важным для практического использования при разработке и эксплуатации объектов ракетно-космической техники.

Начальник Научно-исследовательского
измерительного комплекса,
заместитель главного конструктора

А.В.Зорихин