

На правах рукописи



КУПОРОСОВА ЕЛЕНА СЕРАФИМОВНА

**АВТОНОМНАЯ ПЕРСОНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НАЗЕМНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
С КОРРЕКЦИЕЙ УГЛОВ НАКЛОНА ПО ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность: 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие
системы (в приборостроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

КАЗАНЬ 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ» (КНИТУ-КАИ) на кафедре «Автоматика и управление».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Потапов Анатолий Андреевич

Официальные оппоненты: **Калихман Дмитрий Михайлович**
доктор технических наук,
филиал ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина» –
ПО «Корпус», г. Саратов, начальник лаборатории

Корнилов Анатолий Викторович
кандидат технических наук,
ПАО «АНПП «ТЕМП-АВИА», г. Арзамас,
ведущий инженер

Ведущая организация: Акционерное общество «Инерциальные технологии «Технокомплекса», г. Раменское

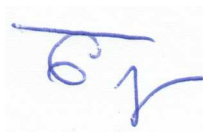
Защита состоится «11» июня 2019 года в 16⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.079.06 при КНИТУ-КАИ по адресу: 420015, г. Казань, ул. Л. Толстого, д. 15 (учебное здание № 3, ауд. 216).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КНИТУ-КАИ. Электронный вариант автореферата размещен на сайте КНИТУ-КАИ (www.kai.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10, КНИТУ-КАИ, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.079.06.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.079.06,
кандидат технических наук



Бердников Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В связи с ростом потребностей в обеспечении высокой точности определения местоположения наземных подвижных объектов широкое распространение получают комплексные информационно-измерительные системы (ИИС), построенные на базе бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) и спутниковой радионавигации. Особое место среди таких систем занимают пешеходные навигационные системы, применяемые для наземного позиционирования подвижного объекта (человека, служебной собаки или робота) при выполнении спасательных или других оперативных работ в зданиях с разветвленной коридорной сетью.

Для решения данных задач возникает потребность в автономной персональной ИИС, которая обеспечивала бы требуемую точность определения местоположения в условиях наличия прерываний в сигналах спутниковой навигации, их неудовлетворительного качества или полного отсутствия. Возможность построения автономной персональной ИИС зависит от габаритов, энергопотребления и стоимости инерциальных датчиков первичной информации (ДПИ) – акселерометров и датчиков угловых скоростей. Требованиям минимальных габаритов, энергопотребления и стоимости удовлетворяют чаще всего современные микроэлектромеханические датчики. Однако, этим датчикам свойственны такие погрешности, как шум и значительный дрейф нуля, которые, не будучи скомпенсированными, приводят к росту погрешностей определения ориентации и местоположения. Несмотря на появление на рынке дешевых инерциальных датчиков, точность решения навигационной задачи остается низкой, особенно при длительном применении (порядка десятков минут).

Задача повышения точности автономных персональных ИИС определения местоположения наземных подвижных объектов (ПО), ориентированных на применение микроэлектромеханических датчиков, остается на современном этапе их развития весьма актуальной.

Степень разработанности темы. Задача разработки автономных персональных ИИС решается на основе классических методов проектирования БИНС, широко представленных в работах отечественных и зарубежных авторов (А.Ю. Ишлинский, Д.С. Пельпор, Ю.Н. Осокин, Е.Р. Рахтиенко, П.В. Бромберг, В.Я. Распопов, В.В. Матвеев, И.Х. Шаймарданов, А.А. Дзуев, W. Li, E. Foxlin).

Решением задач в области инерциальной навигации занимаются ведущие предприятия Российской Федерации, такие как АО «Инерциальные технологии «Технокомплекс» (г. Раменское), ПАО «АНПП «ТЕМП-АВИА» (г. Арзамас), АО «Научно-производственное объединение автоматики им. академика Н.А. Семихатова» (г. Екатеринбург), ОАО «Радиоавионика» (г. Санкт-Петербург), ГНЦ РФ АО «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор» (г. Санкт-Петербург) и другие, а также ряд зарубежных фирм, прежде всего Honeywell (США) и Inertial Elements (Индия).

Подходы, возможные для применения при построении пешеходных навигационных систем, изложены в работах как отечественных научных школ:

Тулский государственный университет, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Сибирский федеральный университет (г. Красноярск), Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова (г. Архангельск), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва), Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, так и зарубежных: Научный исламский университет Малайзии, г. Бандар Бару Нилаи (Малайзия); Геопространственный институт Университета Ноттингема (Великобритания); 26-й институт Китайской корпорации электронных технологий (Китай); Юго-восточный университет (Китай); Технический университет Тампере (Финляндия).

Несмотря на достижения в области разработки, проектирования и исследования автономных персональных ИИС, такие системы, как правило, нуждаются в коррекции определения позиционных координат с помощью использования более точных ДПИ, а также с помощью внешних и внутренних источников коррекции. Основным из внешних источников коррекции является глобальная навигационная спутниковая система, применение которой внутри зданий или в условиях плотной городской застройки невозможно в связи с искажением и периодическим отсутствием сигналов спутниковых радионавигационных систем. Поэтому при использовании инерциальной ИИС в этих условиях необходим дополнительный источник коррекции без накопления погрешностей с течением времени, входящий в состав самой ИИС.

Объектом исследования является автономная персональная ИИС определения местоположения наземного ПО в некотором пространстве, недоступном для применения средств спутниковой навигационной системы.

Предмет исследования - способы, модели и алгоритмы компенсации накапливающейся со временем погрешности в определении угловой ориентации блока ДПИ, а также в определении местоположения наземного ПО с помощью малогабаритных автономных персональных ИИС.

Целью работы является повышение точности определения местоположения наземного ПО с помощью автономной персональной ИИС за счет компенсации накапливающейся со временем погрешности в определении угловой ориентации блока ДПИ, закрепленного на ПО.

Научная задача заключается в научно-обоснованной технической разработке автономной персональной ИИС наземного позиционирования с коррекцией углов наклона по опорной поверхности.

Решение поставленной научной задачи исследования проводится по следующим основным направлениям:

- аналитический обзор состояния методов повышения точности автономных персональных ИИС наземного позиционирования;
- разработка способа определения углов наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта без накопления погрешности измерения;

- оценка погрешностей определения углов наклона блока ДПИ относительно опорной поверхности;
- разработка методов повышения точности работы автономной персональной ИИС наземного позиционирования;
- оценка эффективности применения методов повышения точности определения местоположения на имитационной математической модели ИИС.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач применялись основные положения теоретической механики, теории погрешностей технических измерений, методы статистической обработки и оптимальной фильтрации экспериментальных данных, методы проективной геометрии, методы анализа и синтеза измерительных каналов, методы экспериментального исследования и оценки эффективности ИИС, методы математического моделирования. Полученные результаты базируются на применении основных положений общей теории БИНС и теории построения комплексных навигационных систем.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1) Разработан новый способ и алгоритм определения углов наклона блока ДПИ относительно как опорной плоскости, так и плоскости горизонта, новизна которых заключается в компенсации накапливающейся с течением времени погрешности в определении этих углов посредством установки на блоке ДПИ нескольких дальномерных датчиков. Научная новизна подтверждена патентом РФ №2646941.

2) Разработано новое устройство определения углов наклона блока ДПИ относительно как опорной плоскости, так и плоскости горизонта, новизна которого заключается в компенсации накапливающейся с течением времени погрешности в определении угловой ориентации блока ДПИ за счет применения схемы комплексирования инерциальной и дальномерной систем угловой ориентации (СУО). Научная новизна подтверждена патентом РФ №2649026.

3) Разработана имитационная математическая модель автономной персональной ИИС, позволяющая:

- исследовать работу системы в процессе моделирования движения блока ДПИ с заданными изменениями его линейных и угловых координат во времени;
- оценить точность определения местоположения ПО при подаче на вход модели ИИС информации, полученной с реальных датчиков в ходе выполнения натурного эксперимента.

Практическая ценность работы:

1) Разработан способ, который позволяет определять углы наклона блока ДПИ на основе информации, полученной посредством лучевого сканирования опорной поверхности, что обеспечивает возможность обнуления накапливающихся погрешностей измерений углов крена и тангажа блока ДПИ.

2) Получены формулы определения углов наклона блока ДПИ, позволяющие выполнить калибровку дальномерной СУО в лабораторных условиях методами математического планирования эксперимента с применением соответствующего контрольно–измерительного оборудования и

алгоритмически скомпенсировать возможные инструментальные погрешности системы.

3) Построена имитационная математическая модель автономной персональной ИИС, позволяющая решать задачи, связанные с проектированием ИИС.

Положения, выносимые на защиту:

1) Научно-обоснованная техническая разработка автономной персональной ИИС наземного позиционирования с коррекцией углов наклона по опорной поверхности за счет улучшения ее технических характеристик и расширения эксплуатационных возможностей (п. 1 паспорта специальности 05.11.16).

2) Новый способ и алгоритм определения углов наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта (п. 6 паспорта специальности 05.11.16).

3) Новое устройство определения углов наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта с применением комплексирования инерциальной и дальномерной СУО, позволяющее повысить точность инерциальной ИИС (п. 6 паспорта специальности 05.11.16).

4) Имитационная математическая модель автономной персональной ИИС, которая позволяет задавать программу движения ПО и блока ДПИ, формировать текущие значения угловых и линейных параметров движения объекта, производить оценку точности работы ИИС при различных режимах (п. 5 паспорта специальности 05.11.16).

Достоверность результатов обеспечивается:

- применением адекватных математических моделей и использованием современных методов анализа информационно-измерительных систем;
- использованием для построения алгоритмов данных об изменении кинематических параметров движения ПО, полученных экспериментально;
- результатами оценки эффективности применения разработанной системы современными методами математического моделирования;
- опытом реализации и внедрения научно-технических результатов.

Реализация и внедрение результатов работы. Научно-технические результаты внедрены и использованы в ООО Специальное Конструкторское Бюро «Новые Технологии» (г. Казань) в виде способа и устройства определения углов наклона блока инерциальных измерителей комплексной СУО относительно плоскости горизонта. Имитационная математическая модель навигационной системы прошла испытания и подтвердила свою работоспособность. Результаты внедрения подтверждены соответствующим актом.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения» (г. Казань, 2015, 2017 гг.), на Внутривузовской молодежной научной конференции «Иностранный язык как средство профессиональной коммуникации» (г. Казань, 2016 г.), на международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения-2017» (г. Москва, 2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них две статьи в журналах, включенных в актуальный Перечень ВАК по специальности 05.11.16, два патента РФ на изобретение, три публикации в сборниках трудов и тезисов докладов на международных конференциях.

Личный вклад автора заключается в научно-техническом обосновании разработки автономной персональной ИИС наземного позиционирования с коррекцией углов наклона по опорной поверхности; в разработке нового способа и алгоритма определения углов наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта; в разработке нового устройства определения углов наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта с применением комплексирования инерциальной и дальномерной СУО; в разработке математической модели движения автономной персональной ИИС, в апробации, опубликовании и внедрении результатов исследования. Все теоретические и экспериментальные результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии. Публикации, отражающие основные результаты диссертации, написаны автором лично. Патенты разработаны совместно с научным руководителем.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы (в приборостроении)» по пунктам:

1) «Научное обоснование перспективных информационно-измерительных ... систем, ... повышение эффективности существующих систем» (разработаны принципы построения автономной персональной ИИС наземного позиционирования с коррекцией углов наклона по опорной поверхности) – п.1 паспорта специальности 05.11.16.

2) «Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых ... образцов информационно-измерительных ... систем, улучшение их технических, эксплуатационных ... характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений» (разработаны новые способ и алгоритм определения углов наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта) – п.6 паспорта специальности 05.11.16.

3) «Методы анализа технического состояния, диагностики и идентификации информационно-измерительных ... систем» (разработана имитационная математическая модель для оценки точности работы ИИС) – п.5 паспорта специальности 05.11.16.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 74 наименования, и пяти приложений. Работа без приложений изложена на 152 страницах, включая 42 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, определены цели, объект и задачи исследования, защищаемые положения, представлены практическая ценность и научная новизна диссертационной работы.

В первой главе проведен аналитический обзор состояния методов повышения точности автономных персональных ИИС наземного позиционирования. Проанализированы требования и особенности построения персональных ИИС. К данным системам предъявляются следующие требования: малые массогабаритные характеристики, малая стоимость элементной базы, универсальность, полная автономность и помехозащищенность.

Систематизированы и изучены существующие подходы, позволяющие повысить точность персональных ИИС без использования сигналов спутниковой навигации. Выполнена их классификация с выявлением достоинств и недостатков, позволяющая провести сравнительную оценку методов с точки зрения их практического применения.

Методы повышения точности системы при анализе удобнее разделить на методы повышения точности работы ДПИ и методы повышения точности алгоритма счисления пути. Методы повышения точности работы ДПИ заключаются в компенсации систематических погрешностей методами калибровки и случайных – методами оптимальной фильтрации. В данной работе рекомендована калибровка устройства вычисления опорных углов для конкретной конструкции дальномерной СУО с целью компенсации инструментальных погрешностей. Приемы оптимальной фильтрации применены при разработке схемы комплексирования инерциальной и дальномерной СУО, имеющих различные области частот случайных погрешностей.

К методам повышения точности алгоритма счисления пути относятся методы коррекции по нулевой скорости и методы эвристического снижения дрейфа. Однако, первые из них накладывают ограничение на область установки блока ДПИ на ПО (датчики должны быть расположены только на обуви), а также требуют дополнительной калибровки для учета темпа ходьбы ПО. Вторые методы могут быть использованы в зданиях, коридоры которых имеют только прямоугольную форму. При исследовании реальной системы *Osmium MIMU22TP* (Индия), где использован метод коррекции по нулевой скорости, погрешность счисления пути составила 26,6 %, что исключает возможность длительного применения этой системы.

Проведен обзор технических решений в области комплексирования инерциальных ДПИ с датчиками, работа которых основана на других физических принципах (система радиомаяков, визуальные средства коррекции, шагомеры и др.). Использование системы радиомаяков требует специальной инфраструктуры (радиомаяки, Wi-Fi роутеры, ультразвуковые передатчики и т.д.). Использование визуальных средств коррекции и картографических баз данных требует знание карты местности или здания, что усложняет применение данных методов. Использование шагомеров, а также создание виртуального датчика скорости с учетом особенностей походки человека не является универсальным методом и требует дополнительной калибровки под каждого конкретного пользователя.

В ходе анализа выявлено, что все рассмотренные методы повышения точности в основном направлены на компенсацию погрешности интегрирования скорости движения объекта. Существующие подходы, касающиеся компенсации

погрешностей определения угловой ориентации блока ДПИ, являются на сегодняшний день недостаточными. Поэтому актуально рассмотреть способ определения углов наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта с помощью дополнительных датчиков, использующих неинерциальный принцип измерения, свободных от радиотехнических помех и допускающих по своим геометрическим параметрам компактную установку на блоке ДПИ.

Сформулированы цель, задача научного исследования и направления ее решения в данной диссертации.

Во второй главе разработан способ определения углов наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта без накопления погрешности измерения.

При выполнении оперативных работ строительные конструкции здания (пол, потолок, стены и т.д.) могут служить вспомогательной системой отсчета для альтернативного определения углов наклона блока ДПИ. Рассмотрен способ использования системы отсчета такого рода, для реализации которого необходимо установить на блоке ДПИ несколько дальномеров (ДМ), измеряющих расстояния от мест их установки до опорной поверхности, измерительные оси которых ориентированы определенным образом относительно системы координат, связанной с блоком ДПИ. Поскольку результаты измерения ДМ зависят от углового положения блока ДПИ относительно горизонтальной опорной поверхности, была построена схема дополнительной СУО с ДМ (рисунок 1).

Проведен обзор типов датчиков, измеряющих расстояния до объектов, в нашем случае до опорной поверхности. Использование лазерных дальномеров выбрано в качестве приоритетного.

Построены математические модели расстояний, измеряемых ДМ, установленными на блоке ДПИ, от точек отсчета, связанных с блоком ДПИ, до опорных поверхностей как горизонтальных, так и имеющих уклон по отношению к плоскости горизонта. Исходными данными для решения задачи являлись параметры кинематической модели движения ПО и геометрические параметры расположения опорной поверхности. Задача решена с использованием методов проективной геометрии.

Разработан алгоритм определения углов наклона блока ДПИ относительно опорной поверхности, которые названы опорными углами, на основе выбранной конструктивной схемы расположения ДМ на блоке ДПИ и информации с ДМ об измеряемых ими расстояниях.

Получены формулы определения углов наклона блока ДПИ относительно опорной поверхности (опорных углов крена $\gamma_{\text{он}}$ и тангажа $\vartheta_{\text{он}}$) для схемы с тремя и четырьмя ДМ. В качестве примера приведены формулы (1), (2) для схемы с тремя ДМ.

$$\tilde{\gamma}_{\text{он}} = \arctg \left(\frac{\sqrt{3}(\tilde{L}_3 - \tilde{L}_2)(\tilde{L}_1 \cos \sigma + r_d) \sin \sigma}{(\tilde{L}_1 \tilde{L}_2 + \tilde{L}_1 \tilde{L}_3 + \tilde{L}_3 \tilde{L}_2) \cos^2 \sigma + 2r_d(\tilde{L}_2 + \tilde{L}_3 + \tilde{L}_1) \cos \sigma + 3r_d^2} \right); \quad (1)$$

$$\tilde{\vartheta}_{\text{оп}} = \arctg \left(\frac{Q(\tilde{L}_1, \tilde{L}_2, \tilde{L}_3)}{\sqrt{V(\tilde{L}_1, \tilde{L}_2, \tilde{L}_3)}} \right), \quad (2)$$

где $Q(\tilde{L}_1, \tilde{L}_2, \tilde{L}_3) = \sin \sigma \left\{ \left[2\tilde{L}_2\tilde{L}_3 - \tilde{L}_1(\tilde{L}_3 + \tilde{L}_2) \right] \cos \sigma - (2\tilde{L}_1 - \tilde{L}_3 - \tilde{L}_2)r_d \right\}$;

$$V(\tilde{L}_1, \tilde{L}_2, \tilde{L}_3) = \left[(\tilde{L}_1\tilde{L}_2 + \tilde{L}_1\tilde{L}_3 + \tilde{L}_3\tilde{L}_2) \cos^2 \sigma + 2r_d(\tilde{L}_2 + \tilde{L}_3 + \tilde{L}_1) \cos \sigma + 3r_d^2 \right]^2 + 3 \left[(\tilde{L}_3 - \tilde{L}_2)(\tilde{L}_1 \cos \sigma + r_d) \sin \sigma \right]^2;$$

$\tilde{L}_1, \tilde{L}_2, \dots, \tilde{L}_N$ – нормированные сигналы на выходах ДМ, пропорциональные соответствующим расстояниям до опорной поверхности;

r_d, σ – конструктивные параметры установки ДМ на блоке ДПИ (с номинальными значениями $r_{di}=r_d, \sigma_i=\sigma, i \in 1, N$).

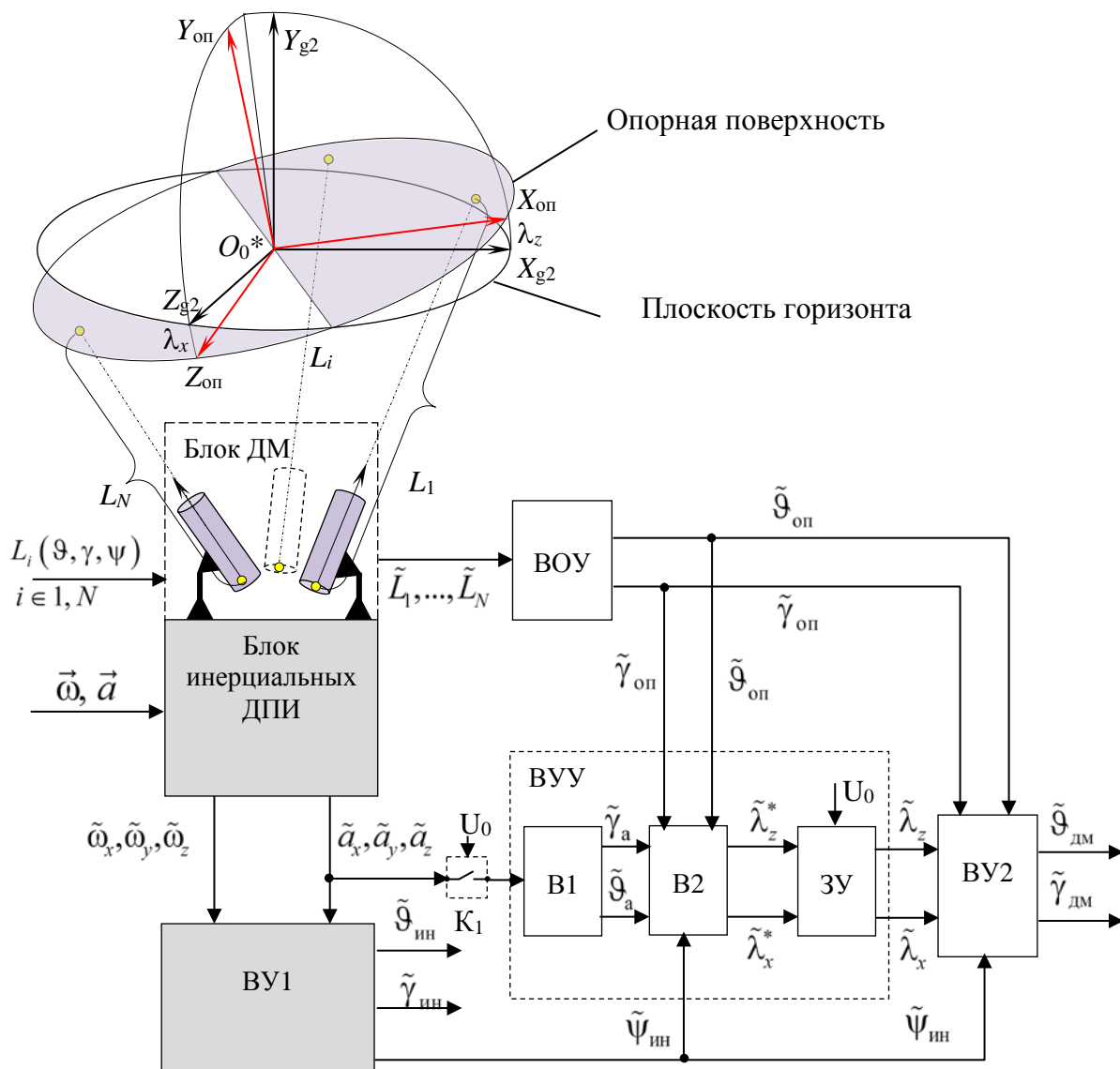


Рисунок 1 – Схема дополнительной СУО с ДМ

Разработан алгоритм определения углов наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта без накопления погрешности измерения, который позволяет применить его для общего случая, когда плоскость опорной поверхности имеет уклон относительно плоскости горизонта, задаваемый двумя углами – λ_z, λ_x . Определены углы уклона опорной поверхности относительно плоскости горизонта $\tilde{\lambda}_z, \tilde{\lambda}_x$ на основе информации с акселерометров блока ДПИ и информации с дальномерной СУО. Получены формулы (3) определения сигналов $\tilde{\vartheta}_{\text{дм}}$ и $\tilde{\gamma}_{\text{дм}}$, пропорциональных углам наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта $\vartheta_{\text{дм}}$ и $\gamma_{\text{дм}}$ соответственно.

$$\tilde{\vartheta}_{\text{дм}} = \arctg\left(\frac{AB + C\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 - C^2}\right); \quad \tilde{\gamma}_{\text{дм}} = \arctg\left(\frac{-PQ - R\sqrt{P^2 + Q^2 - R^2}}{P^2 - R^2}\right), \quad (3)$$

где $A = \cos\tilde{\lambda}_z \cos\tilde{\lambda}_x; B = (\cos\tilde{\psi}_{\text{ин}} \sin\tilde{\lambda}_z \cos\tilde{\lambda}_x + \sin\tilde{\lambda}_x \sin\tilde{\psi}_{\text{ин}}); C = \sin\tilde{\vartheta}_{\text{оп}};$

$$P = \cos\tilde{\psi}_{\text{ин}} \sin\tilde{\lambda}_x - \sin\tilde{\lambda}_z \cos\tilde{\lambda}_x \sin\tilde{\psi}_{\text{ин}}; R = \cos\tilde{\gamma}_{\text{оп}} \cos\tilde{\vartheta}_{\text{оп}};$$

$$Q = \cos\tilde{\lambda}_z \cos\tilde{\lambda}_x \cos\tilde{\vartheta}_{\text{дм}} + (\sin\tilde{\lambda}_z \cos\tilde{\lambda}_x \cos\tilde{\psi}_{\text{ин}} + \sin\tilde{\lambda}_x \sin\tilde{\psi}_{\text{ин}}) \sin\tilde{\vartheta}_{\text{дм}};$$

$\tilde{\psi}_{\text{ин}}$ - сигнал, пропорциональный углу рысканья ψ и вычисленный по алгоритму инерциального счисления пути;

$\tilde{\lambda}_x$ и $\tilde{\lambda}_z$ - вычисленные значения угловых координат негоризонтальности опорной поверхности.

Разработанные алгоритмы инвариантны к высоте движения блока ДПИ, которая является переменным параметром в процессе движения ПО.

В третьей главе проведена оценка погрешностей определения углов наклона блока ДПИ относительно опорной поверхности.

По сравнению с погрешностями ДМ и методическими погрешностями алгоритма основной вклад в погрешность определения углов наклона блока ДПИ вносят инструментальные погрешности. Рассмотрено влияние отклонения геометрических характеристик кинематической схемы установки системы ДМ на платформе блока ДПИ от их номинальных значений на погрешность определения углов наклона блока ДПИ.

Получены уравнения чувствительности погрешностей вычисления опорных углов крена и тангажа дальномерной СУО к погрешностям установки системы ДМ на блоке ДПИ для схемы с тремя ДМ ($N=3$) и с четырьмя ($N=4$) ДМ.

$$\Delta\tilde{\gamma}_{\text{оп}} = \sum_{i=1}^N \beta_{\gamma}^{r_{di}} \Delta r_{di} + \sum_{i=1}^N \beta_{\gamma}^{y_{di}} \Delta y_{di} + \sum_{i=1}^N \beta_{\gamma}^{\mu_i} \Delta \mu_i + \sum_{i=1}^N \beta_{\gamma}^{v_i} \Delta v_i + \sum_{i=1}^N \beta_{\gamma}^{\sigma_i} \Delta \sigma_i, \quad (4)$$

$$\Delta\tilde{\vartheta}_{\text{оп}} = \sum_{i=1}^N \beta_{\vartheta}^{r_{di}} \Delta r_{di} + \sum_{i=1}^N \beta_{\vartheta}^{y_{di}} \Delta y_{di} + \sum_{i=1}^N \beta_{\vartheta}^{\mu_i} \Delta \mu_i + \sum_{i=1}^N \beta_{\vartheta}^{v_i} \Delta v_i + \sum_{i=1}^N \beta_{\vartheta}^{\sigma_i} \Delta \sigma_i. \quad (5)$$

где $\beta_{\gamma}^{x_i}, \beta_{\vartheta}^{x_i}$ - коэффициенты чувствительности погрешностей $\Delta\tilde{\gamma}_{\text{оп}}$ и $\Delta\tilde{\vartheta}_{\text{оп}}$ к отклонению параметра x_i от своего номинального значения ($x_i = r_{di}, y_{di}, \mu_i, v_i, \sigma_i, i \in 1, N$).

Проведен полный факторный эксперимент типа 2^3 (для 3-х ДМ) и 2^4 (для 4-х ДМ) в пространстве конструктивных параметров установки ДМ на блоке ДПИ при их допустимом изменении относительно номинальных значений, соответствующих современным реальным техническим возможностям.

Установлено, что основное влияние на величину погрешности определения опорных углов оказывают углы μ , σ ориентации измерительных осей ДМ относительно платформы, на которой они установлены. Инструментальные погрешности линейных координат приводят к погрешности вычисления опорных углов на величину порядка сотых долей градуса. Предельные области погрешностей вычисления опорных углов крена и тангажа составляют $\pm (1,6 \dots 1,8)^\circ$ для системы с четырьмя ДМ и $\pm (1,5 \dots 2,4)^\circ$ для системы с тремя ДМ.

Разработаны рекомендации по дальнейшей алгоритмической компенсации возможных инструментальных погрешностей системы. Получены коррекционные формулы определения опорных углов для системы с тремя ДМ при наличии горизонтальной опорной поверхности, предложен алгоритм компенсации инструментальных погрешностей конструктивных параметров установки ДМ в лабораторных условиях, даны рекомендации по определению параметров амортизирующего подвеса блока ДПИ на ПО методами факторного эксперимента.

В четвертой главе разработаны методы повышения точности работы автономной персональной ИИС наземного позиционирования. Для системного объединения разработанных алгоритмов определения углов наклона блока ДПИ решена задача их схемной реализации и построения комплексной системы на основе комплексирования инерциальной и дальномерной СУО с возможностью дополнительного повышения точности на базе эвристических методов.

Разработана схема автономной персональной ИИС наземного позиционирования (рисунок 2), которая включает в себя комплексную систему угловой ориентации (СУО) и вычислительное устройство (ВУ2), формирующее на выходе координаты местоположения ПО.

Разработано устройство определения углов наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта с применением схемы комплексирования инерциальной и дальномерной СУО. Блок-схема комплексной СУО приведена на рисунке 3. Она содержит инерциальную СУО, дальномерную СУО и блок компенсации, состоящий из двух структурно одинаковых схем компенсации, каждая из которых содержит два сумматора и низкочастотный фильтр.

Постоянные времени T_1 , T_2 низкочастотных фильтров блока компенсации определены из условия минимума установившейся дисперсии погрешности оценки полезного сигнала. Благодаря комплексированию выходные сигналы содержат значения измеряемых углов и существенно ослабленные погрешности выходных сигналов датчиков блоков ДПИ и ДМ. Структура схемы комплексной СУО построена с учетом того, что частотный спектр шумовых помех дальномеров находится правее граничных частот $1/T_i$, $i=1, 2$, а частотный спектр шумовых помех инерциальных датчиков – левее этих частот.

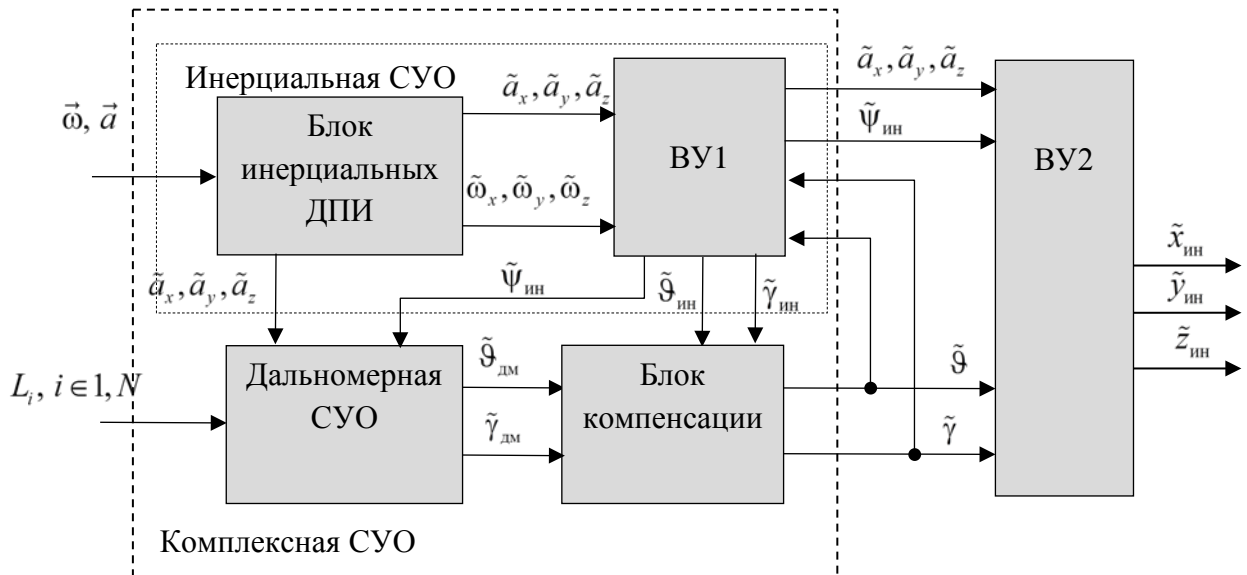


Рисунок 2 – Блок-схема автономной персональной ИИС наземного позиционирования

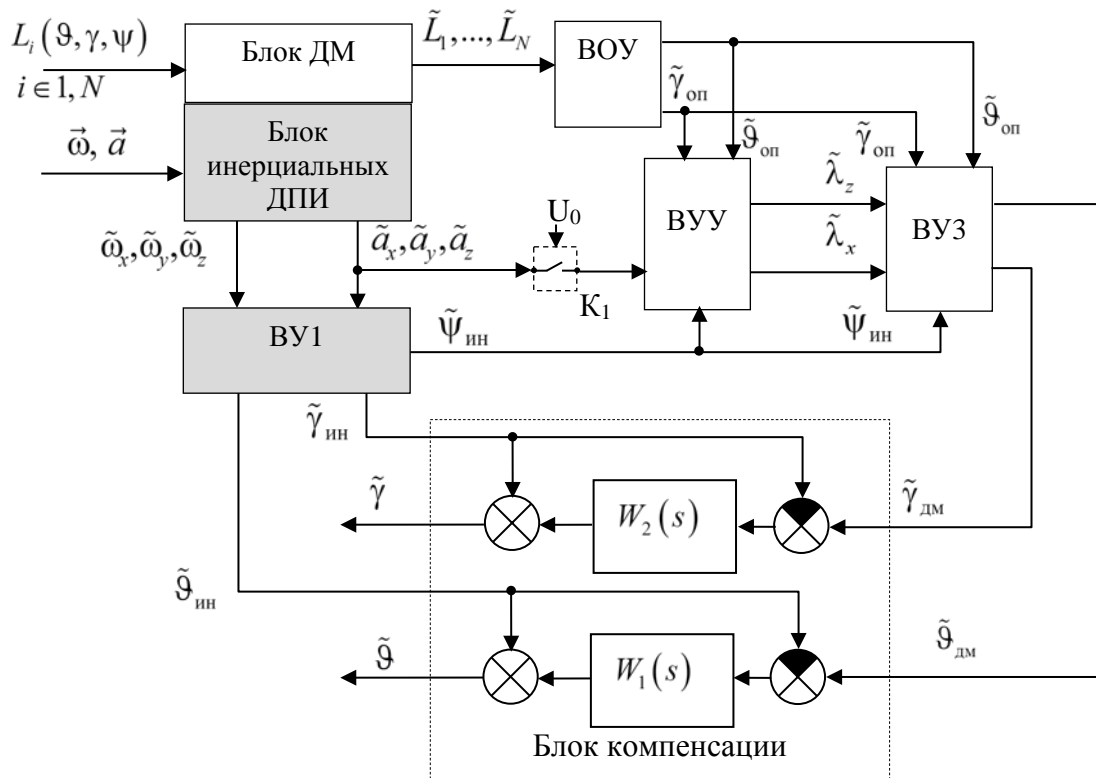


Рисунок 3 – Блок-схема комплексной СУО

Учитывая, что наземный объект (человек) имеет возможность эпизодически останавливаться, для уменьшения погрешностей интегрирования разработан алгоритм обнуления выходов интеграторов первого каскада, вычисляющих проекции скорости, при фиксации кратких (почти мгновенных) остановок ПО по показаниям акселерометров. Блок-схема, реализующая этот алгоритм, приведена на рисунке 4.

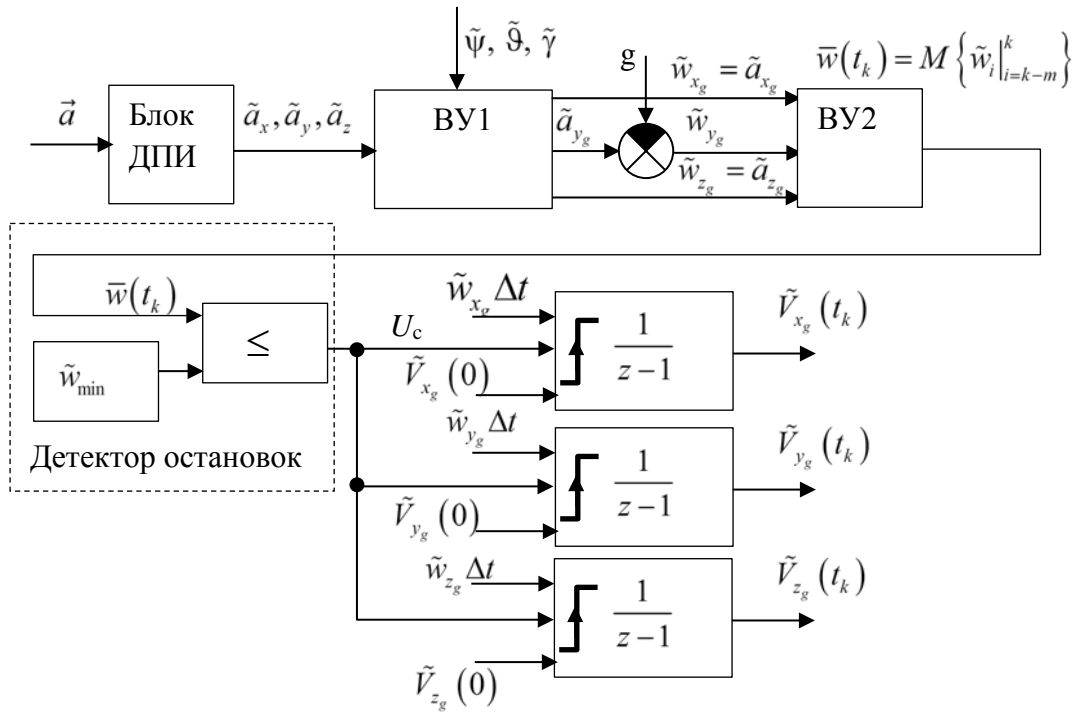


Рисунок 4 – Блок-схема, реализующая алгоритм обнуления выходов интеграторов

Если известна карта коридорной сети здания, в котором должны выполняться оперативные работы с применением персональной ИИС, то эта информация может быть использована для коррекции движения ПО по приоритетным направлениям, согласованным с картой коридорной сети. Блок-схема, реализующая подобный алгоритм, приведена на рисунке 5.

В пятой главе произведена оценка эффективности применения способов и алгоритмов, представленных в предыдущих главах, с использованием имитационной математической модели, реализованной в пакете MatLab & Simulink. Структурная схема модели состоит из трех базовых блоков первого уровня: Блок А – «Модель движения наземного ПО»; Блок В – «Персональная ИИС»; Блок Д – «Индикация параметров движения». Для управления режимами работы ИИС предусмотрен Блок С – «Управление структурой ИИС», обеспечивающий включение режимов «Комплексирование», «Сброс интеграторов» и «Коррекция на приоритетных направлениях».

Для построения математической модели использованы следующие подходы:

- характер и числовые значения параметров углового и поступательного продольного и бокового движений наземного ПО определены в результате статистической обработки массивов экспериментальных данных,
- модели инерциальных датчиков и модели ДМ построены с учетом случайных аддитивных погрешностей и зон нечувствительности,
- алгоритм инерциального счисления пути и фильтры схемы комплексирования инерциальной и дальномерной СУО реализованы в виде цифровых вычислителей с применением z – преобразования Лапласа.

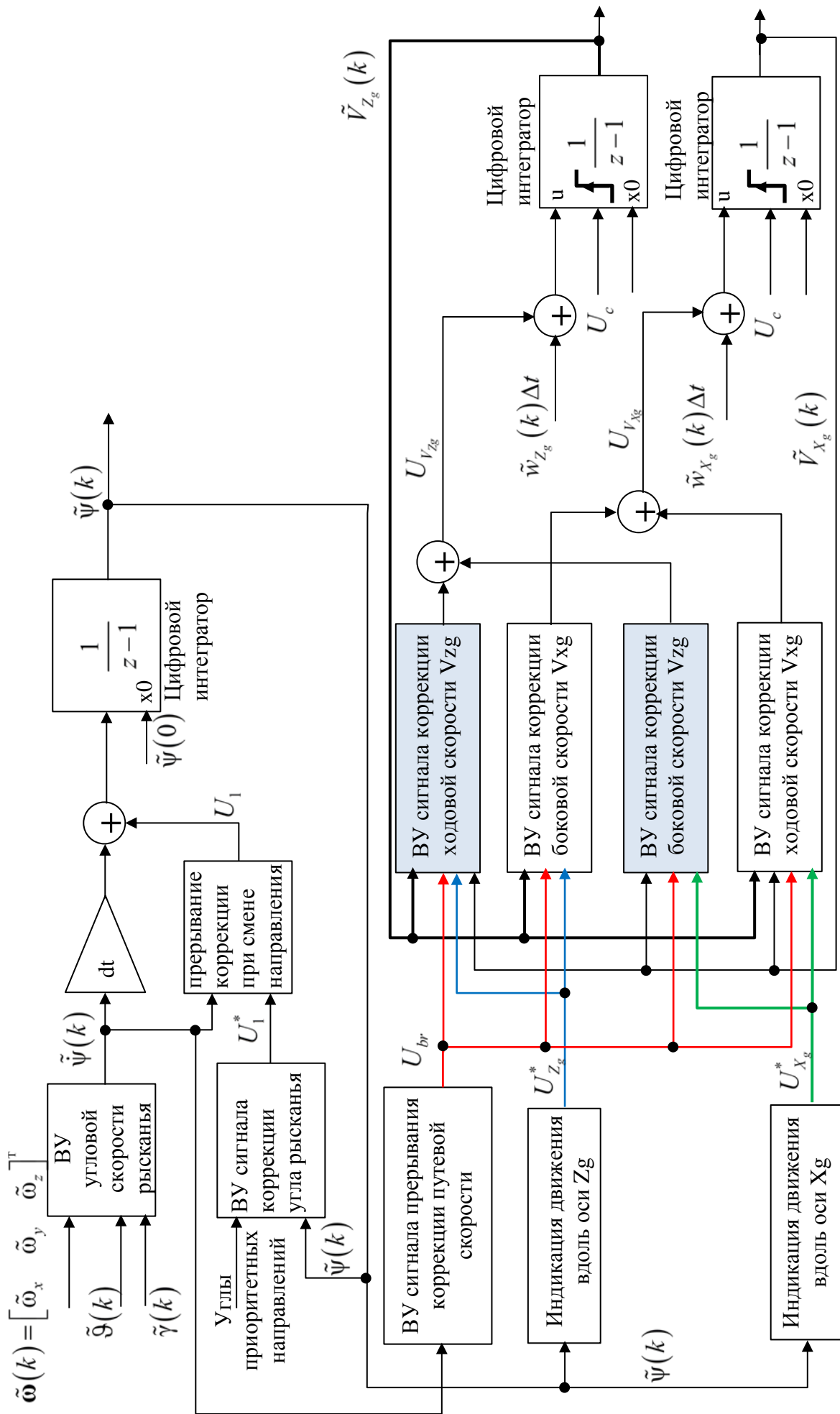


Рисунок 5 – Блок-схема, реализующая алгоритм коррекции скорости ПО на приоритетных направлениях

Созданная математическая модель персональной ИИС позволяет использовать в качестве тестовых сигналов имитационную модель движения наземного ПО, а также массивы с датчиков, полученные экспериментально. Модель предусматривает возможности дальнейшего развития при совершенствовании модели движения наземного ПО.

Получена интервальная оценка разработанного способа и алгоритма определения углов наклона блока ДПИ, которая подтверждает их работоспособность и эффективность (рисунок 6). Так, СКО погрешности вычисления угла тангажа инерциальной СУО равно $0,208^\circ$, а СКО той же погрешности для комплексной СУО равно $0,058^\circ$. При этом погрешность инерциальной СУО содержит постоянную составляющую с математическим ожиданием $0,257^\circ$, а математическое ожидание погрешности комплексной СУО близко к нулю.

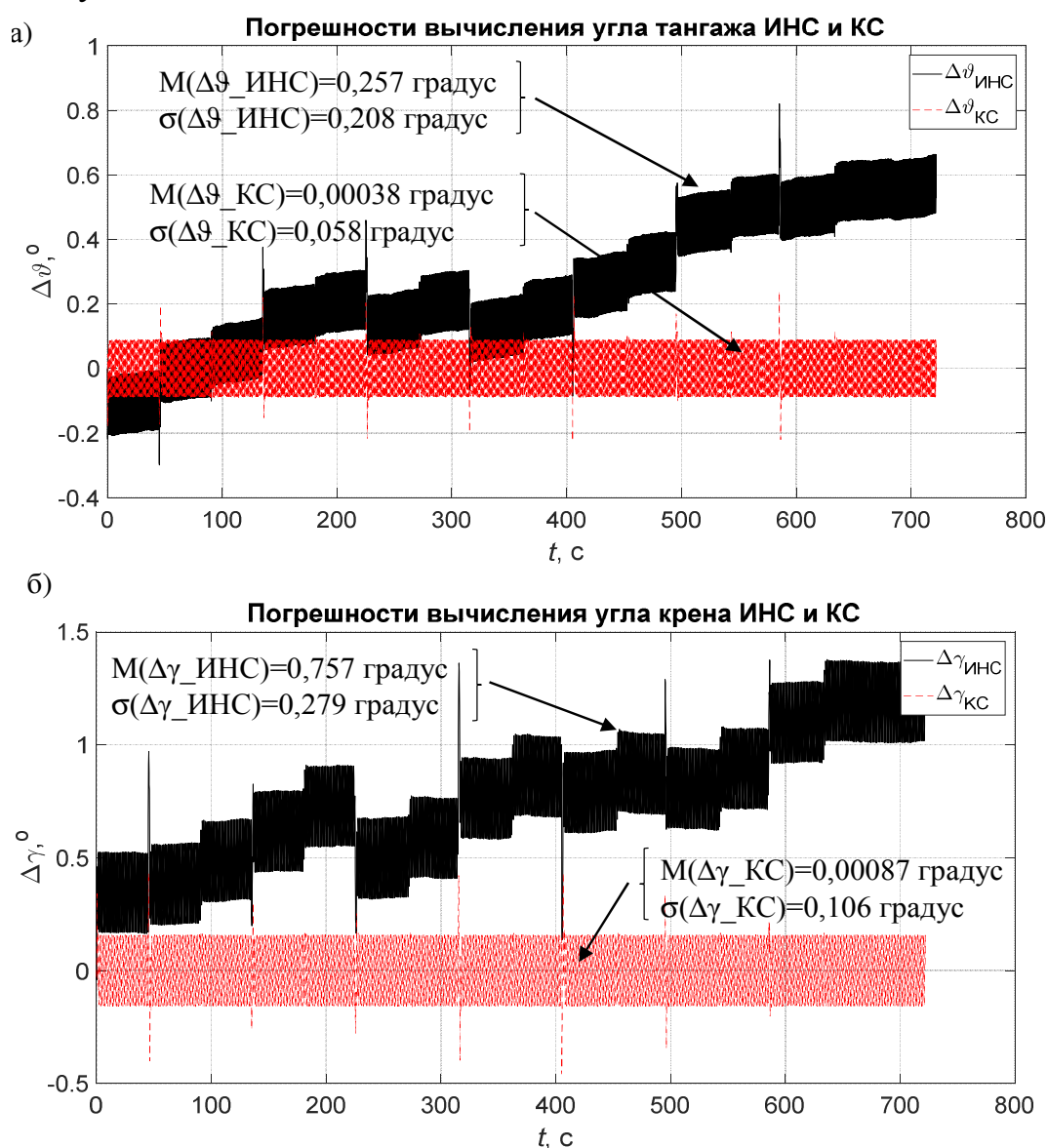


Рисунок 6 – Интервальная оценка способа и алгоритма определения углов наклона блока ДПИ: а – погрешности вычисления угла тангажа инерциальной системы (ИНС) и комплексной системы (КС); б- погрешности вычисления угла крена ИНС и КС

Произведена оценка точности определения координат местоположения ПО с помощью автономной персональной ИИС, результаты которой приведены в таблице и подтверждают работоспособность и эффективность разработанных способов и алгоритмов повышения ее точности.

Таблица. Результаты оценки точности определения координат местоположения ПО

Вариант	Длина линии пути, м	Вычисленный путь, м	Погрешность определения пройденного расстояния (СКО)		Расстояние между точкой старта и вычисленной точкой финиша (СКО)	
			м	%	м	%
Инерциальная ИИС без комплексирования	641,9	29870	29228	4553	18000	2804
При комплексировании с дальномерной СУО	641,9	661	19,1	2,98	103	16
При комплексировании и с алгоритмом обнуления	641,9	628	-13,9	-2,17	23	3,58
При комплексировании и с алгоритмом коррекции по приоритетным направлениям	641,9	619,1	-22,8	-3,55	1,0	0,16
При комплексировании и с алгоритмами обнуления и коррекции по приоритетным направлениям	641,9	629,5	-12,4	-1,93	3,2	0,5

В заключении представлены основные результаты и выводы по работе.

В приложении представлена оценка функционирования пешеходной навигационной системы *Osmium MIMU22TP*, кинематические схемы и системы координат, программа расчета коэффициентов чувствительности погрешностей вычисления опорных углов крена и тангажа, описание и структура имитационной математической модели автономной персональной ИИС, акт о внедрении результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнена научно-обоснованная техническая разработка автономной персональной ИИС наземного позиционирования, в которой обеспечено улучшение технических характеристик системы посредством существенного уменьшения погрешности определения местоположения за счет введения дополнительной СУО, использующей неинерциальный принцип измерения, а также расширение эксплуатационных возможностей системы за счет ее универсальности, полной автономности и помехозащищенности.

2. Разработан новый способ и алгоритм определения углов наклона блока ДПИ без накопления погрешности с течением времени относительно как опорной плоскости, так и плоскости горизонта, что позволяет расширить эксплуатационные возможности персональной ИИС, увеличив временной диапазон ее использования.

3. Разработано новое устройство определения углов наклона блока ДПИ относительно как опорной плоскости, так и плоскости горизонта с применением комплексирования инерциальной и дальномерной СУО, позволяющее на порядок уменьшить погрешность вычисления углов наклона блока ДПИ относительно плоскости горизонта.

4. Разработана имитационная математическая модель персональной ИИС, позволяющая задавать программу движения ПО, формировать текущие значения угловых и линейных параметров движения объекта, формировать интервальные оценки точности работы ИИС при различных режимах.

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО СКБ «Новые Технологии» (г. Казань) в виде способа и устройства определения углов наклона блока инерциальных измерителей комплексной системы угловой ориентации относительно плоскости горизонта. Имитационная математическая модель навигационной системы прошла испытания и подтвердила свою работоспособность. Новизна и полезность технических решений подтверждены двумя патентами РФ на изобретение.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Купоросова, Е.С. Определение параметров амортизирующего подвеса инерциального модуля на подвижном объекте методами факторного эксперимента / Е.С. Купоросова // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. - № 4 (80). – С. 143-149.

2. Купоросова, Е.С. Влияние гармонических колебаний блока инерциальных измерителей на погрешность работы алгоритма счисления пути пешеходной навигационной системы /Е.С. Купоросова // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2016. - № 90. – С. 1-18.

Патенты:

3. Способ определения углов наклона блока инерциальных измерителей комплексной системы угловой ориентации относительно плоскости горизонта: пат. 2646941 Рос. Федерация: МПК G 01 B 21/22 / Потапов А.А., Купоросова Е.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева» (КНИТУ-КАИ) - № 2016150236; заявл. 20.12.2016; опубл. 12.03.2018, Бюл. № 8. - 18 с: ил.

4. Устройство определения углов наклона блока инерциальных измерителей комплексной системы угловой ориентации относительно плоскости горизонта: пат. 2649026 Рос. Федерация: МПК G 01 В 21/22 / Потапов А.А., Купоросова Е.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева» (КНИТУ-КАИ) - № 2016150235; заявл. 20.12.2016; опубл. 29.03.2018, Бюл. № 10. - 20 с: ил.

Публикации в других изданиях:

5. Купоросова, Е.С. Статистический анализ выходных сигналов трехосевого датчика угловых скоростей инерциального модуля ADIS16405 / Е.С. Купоросова // XXII Туполевские чтения: материалы международной молодёжной научной конференции, г. Казань, 19-21 октября 2015 г. - Казань: Изд-во «Фолиант», 2015. – Т. 3. – С. 479-483.

6. Купоросова, Е.С. Состояние вопросов повышения точности работы блока датчиков первичной информации пешеходных навигационных систем / Е.С. Купоросова // Гагаринские чтения – 2017: сборник тезисов докладов XLIII Международной молодёжной научной конференции, г. Москва, 5-19 апреля 2017 г. – М.: Моск. авиационный (национальный исследовательский университет), 2017. – С. 860-861.

7. Купоросова, Е.С. Оценка эффективности алгоритмов обнуления скорости пешеходной инерциальной навигационной системы при разных способах крепления блока датчиков первичной информации / Е.С. Купоросова // XXIII Туполевские чтения: материалы международной молодёжной научной конференции, г. Казань, 8-10 ноября 2017 г. - Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2017. – Т. 2. – С. 479-483.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ Г34

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, Казань, К. Маркса, 10