

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 621.395.6: 004.722.45

На правах рукописи

МУХА
Артём Владимирович

**МЕТОДЫ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
НАВИГАЦИОННЫХ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ СИСТЕМ
СПУТНИКОВОЙ И ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра техники и технологий

по специальности 1-39 81 01 – Компьютерные технологии
проектирования электронных систем

Минск 2019

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ПИСКУН Геннадий Адамович**,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры проектирования информационно-
компьютерных систем учреждения образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **РАЗУМЕЙЧИК Вита Станиславовна**,
кандидат технических наук, доцент кафедры
электронных вычислительных машин и систем
учреждения образования «Брестский
государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «26» июня 2019 г. года в 14⁰⁰ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, копр. 1, ауд. 408, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Управление современными мобильными системами осуществляется на основе информации с различных навигационных систем. Навигационные системы имеют погрешности, обусловленные внешними по отношению к системе и внутренними факторами. Обеспечение требуемых качественных характеристик навигационных систем может осуществляться двумя способами: конструкторским и алгоритмическим. Конструкторский способ предполагает наличие новой технологической базы, длительного времени и серьезных финансовых затрат. Алгоритмический способ позволяет достичь требуемого результата за короткое время с минимальными техническими и финансовыми затратами. Использование алгоритмического способа, естественно, не ограничивает реализацию новых конструкторских решений.

Наиболее полная алгоритмическая компенсация погрешностей навигационной системы осуществляется методами комплексирования и последующей обработки информации посредством алгоритмов оценивания, идентификации, управления и экстраполяции. Обычно коррекция навигационной системы проводится с использованием внешних источников информации. Однако при использовании инерциальных навигационных систем (ИНС) при коррекции от внешних измерительных систем теряется такое ценное качество ИНС, как автономность.

Успешное решение задач управления мобильными системами во многом определяется уровнем развития измерительной техники. Информационные сигналы измерительных систем имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования мобильных систем. Повышение точности измерительной информации предполагает исследование погрешностей и последующую их компенсацию алгоритмическим и конструктивным путем. При функционировании мобильных систем в условиях активных и пассивных помех используется автономная ИНС. ИНС является первоисточником ошибок при выполнении мобильными системами поставленных задач. Поэтому необходимо из большого числа представленных ИНС выбрать наиболее эффективные и точные навигационные системы. Данную проблему помогает решить методика тестирования спутниковой и инерциальной навигационной системы, основанная на алгоритме сверке данных, который позволяет сравнить заявленные технические характеристики испытуемых с реальными показаниями и на практике увидеть работоспособность ИНС. Поэтому выбор, тестирование, определение и последующая компенсация ошибок автономной ИНС мобильных систем является важной и актуальной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

С расширением сферы применения глобальной навигационной спутниковой системы, ужесточаются и требования к точности, устойчивости, надежности, накладываемые на пространственно-временные параметры, оцениваемые навигационным приемником. Точность определяемых навигационными приемниками пространственных параметров, зависит как от режима его работы, так и от метода обработки измерений. Эта зависимость проявляется, когда происходит изменение режима работы навигационного приемника.

В связи с изложенным, актуальной задачей является поиск общего для всех спутниковых и инерциальных навигационных систем метода тестирования, которое бы позволило выявить наиболее эффективные и точные навигационные системы с целью экономии времени и повышению качества разрабатываемых устройств.

Степень разработанности проблемы

Исследования методов и способов повышения точности навигационных систем осуществлялось на основе построения теоретических моделей с использованием работ как отечественных, так и зарубежных ученых. В частности, стоит отметить работы таких ученых, как: Сбитенькова М. А., Чан Нгок Хыонг, Сембаева Д. Б. и т.д.

Одним из недостатков исследований, представленных в современной технической литературе, является нехватка практических примеров методов повышения точности и методик тестирования навигационных систем. Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе разработки методики тестирования спутниковой и инерциальной навигационной системы.

Цель и задачи исследования

Целью магистерской диссертации является определение методов и способов повышения точности навигационных мобильных устройств на базе систем спутниковой и инерциальной навигации, а также разработка методики тестирования спутниковой и инерциальной навигации с выявлением наиболее точных и эффективных систем, соответствующих своим техническим характеристикам.

Поставленная цель работы определяет **следующие основные задачи:**

1. Провести обзор и анализ работы спутниковых и инерциальных систем навигации, а также провести анализ методов и способов повышения точности мобильных навигационных систем;

2. Разработать методику тестирования спутниковой и инерциальной навигации на основе алгоритма сверки данных;

3. На основе разработанной методики тестирования навигационных систем экспериментально выявить наиболее точные и эффективные спутниковые и инерциальные навигационные системы, соответствующие техническим характеристикам.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) ОСВО 1-39 81 01-2012 специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы российских и зарубежных авторов в области навигации спутниковых и инерциальных систем, влияния помех на определение местоположения, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в разработке методики тестирования спутниковых и инерциальных навигационных систем, позволяющей выявить наиболее точные и эффективные системы, соответствующих своим техническим характеристикам.

Теоретическая значимость работы заключается в детальном анализе существующих методов и способов повышения точности спутниковых и инерциальных навигационных систем с учетом их особенностей.

Практическая значимость диссертации состоит в разработанной методике тестирования навигационных систем, которая позволяет на основе разработанного алгоритма определить наиболее эффективные и точные спутниковые и инерциальные навигационные системы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Классификация и систематизация методов и способов повышения точности спутниковых и инерциальных навигационных систем, построенная на анализе ошибочного определения местоположения, позволяющая выявить наиболее характерные искажения при определенных условиях эксплуатации навигационных систем.

2. Методика тестирования навигационных мобильных устройств на базе систем спутниковой и инерциальной навигации, основанная алгоритме сверки данных, позволяющая выявить наиболее точные и эффективные системы.

3. Результаты тестирования спутниковой и инерциальной навигационной системы, основанные на разработанной методике тестирования навигационных мобильных устройств на базе систем спутниковой и инерциальной навигации, позволяющие выявить потенциально неэффективные навигационные системы.

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на 13-ой международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникации» (г. Севастополь, Российская Федерация, 2017) 54-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Республика Беларусь, 2018 г.), 55-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Республика Беларусь, 2019 г.).

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 8 печатных работах. В их числе 5 тезисов, которые опубликованы в сборниках материалов научных конференций, оставшиеся 3 приняты к опубликованию.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе приведен обзор основных характеристик спутниковых и инерциальных навигационных систем. Дана классификация режимов работы навигационного приемника. Представлен анализ методов повышения точности спусковых и инерциальных навигационных систем.

Во второй главе представлена методика тестирования спутниковой и инерциальной навигационной системы, основанная на разработанном алгоритме сверки данных.

В третьей главе представлены экспериментальные данные тестирования, основанные на разработанной методике, проведен анализ результатов тестирования спутниковой и инерциальной навигационной системы.

В приложении представлены публикации автора, акт внедрения, справка на антиплагиат и графический материал, иллюстрирующий основные результаты диссертационной работы.

Общий объем диссертационной работы составляет 85 страниц. Из них 64 страницы основного текста, 13 иллюстраций на 13 страницах, 17 таблиц на 17 страницах, библиографический список из 48 наименований на 4 страницах, список собственных публикаций соискателя из 8 наименований на 2 страницах, 4 приложения на 18 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблем определения местоположения в пространстве, а также представлено обоснование актуальности темы диссертации.

В **общей характеристике** работы показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований.

В **первой главе** были исследованы системы спутниковой и инерциальной навигации *GPS*, ГЛОНАСС, *Galileo*.

Рассмотрена структура системы *GPS*, а именно выделены и исследованы следующие сегменты: космический сегмент, сегмент управления, сегмент пользователя; а также были выделены методы получения координат при помощи *GPS*: автономная навигация, дифференциальные фазовые измерения, дифференциальное координирование.

Исследована спутниковая система ГЛОНАСС, ее особенности и принципы работы. Приведено математическое описание структуры сигнала ГЛОНАСС. Была исследована глобальная спутниковая система *Galileo*.

Изучены источники ошибок спутниковых измерений и рассмотрен геометрический фактор снижения точности (*GDoP*).

Исследованы инерциальные навигационные системы (ИНС). В работе сравниваются платформенные и бесплатформенные ИНС.

Проанализированы современные методы повышения точности мобильных навигационных устройств, а именно:

- метод формирования измерений на основе сигналов с датчиков угла прецессии;
- коррекция мобильных навигационных систем с помощью фильтра Калмана;
- методы снижения влияния многолучевости;

- метод выбора навигационно-космических аппаратов (НКА) с использованием информации о соотношении сигнал/шум;
- метод определения многолучевости на основе сравнения соотношения сигнал/шум на разных частотах;
- метод сглаживания измерений;
- метод контроля целостности на основе сигналов глобальной спутниковой навигационной системы;
- контроль измерений, содержащих многолучевость;
- кодовый детектор;
- векторное отслеживание.

Погрешности в спутниковых измерениях могут возникнуть в случае, когда приемник в области видимости находит малое количество спутников. Единственное решение в повышении точности спутниковых измерений на данный момент – это наблюдение большего количества спутников.

Во **второй главе** проведен анализ характеристик инерциальной навигационной системы ГЛ-ВГ109 и спутниковой навигационной системы МПН-М7. Выявлены основные технические характеристики, которые будут испытываться на практике.

Для тестирования инерциальной системы используется робот FUNUC M-20iA (рисунок 1) и инерциальный модуль БИНС ГЛ-ВГ109.



Рисунок 1 – Внешний вид робота для проведения тестирования инерциального модуля

Разработана и представлена методика тестирования инерциальных и спутниковых навигационных систем, построенная на алгоритме сверки данных (рисунок 2), полученных в ходе тестирования с заявленными техническими характеристиками.

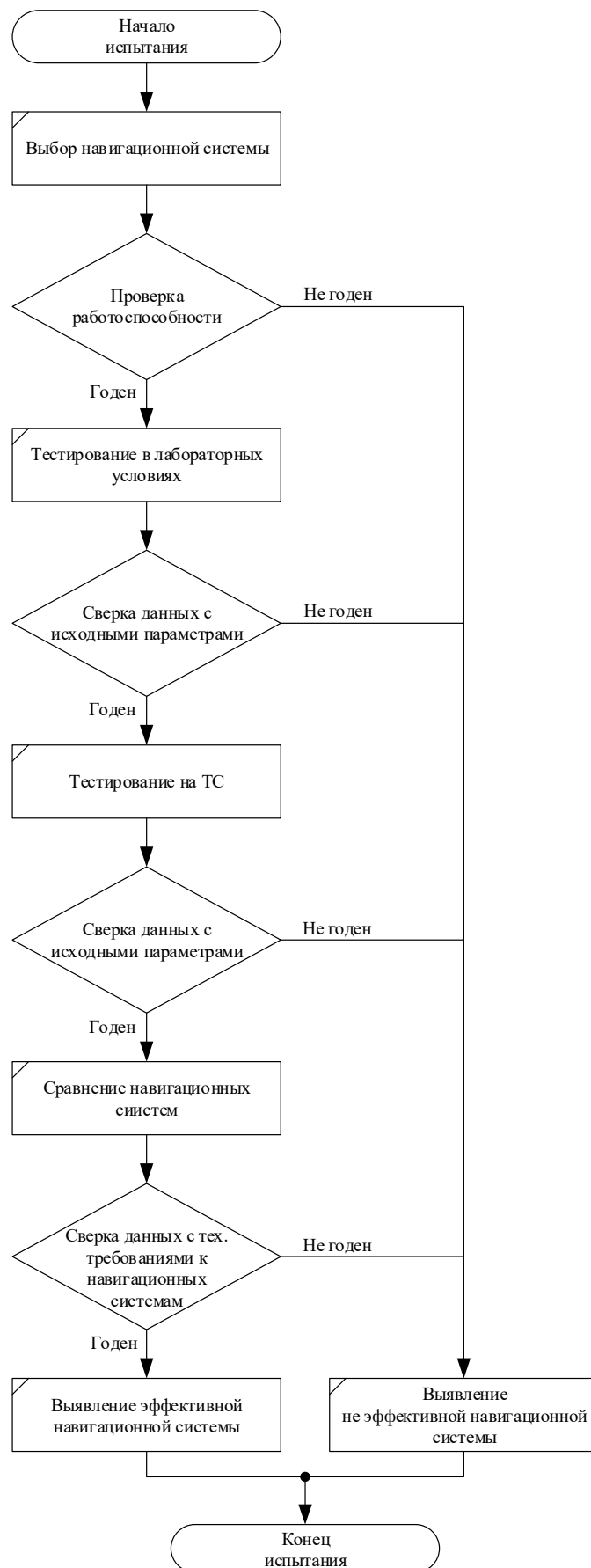


Рисунок 2 – Алгоритм тестирования спутниковых и инерциальных навигационных систем

Испытания проводят в лабораторных и в полевых условиях. В ходе испытаний оцениваются основные параметры БИНС ГЛ-ВГ109:

- угол крена;
- угол тангажа;
- угол курса;
- время восстановления угла курса;
- ошибка, накапливаемая со временем при определении координат после отключения *GPS*-сигнала;

Для тестирования спутникового навигационной систем используется навигационный приемник МНП-М7-ЦВИЯ.468157.113. Испытания проводят в лабораторных и в полевых условиях. В ходе испытаний оценивается круговое вероятностное отклонение определения координат *GPS*-антенн.

В **третьей главе**, по разработанной ранее методике, проведено тестировании инерциальных и спутниковых навигационных систем.

По результатам тестирования БИНС в лабораторных условиях было выявлено:

- среднеквадратичное отклонение измерений угла курса составляет $\pm 2^\circ$;
- среднеквадратичное время определение угла курса составляет 16 с.
- значения среднеквадратичного отклонения измерений угла тангажа и крена остаются в пределах технических характеристик БИНС ГЛ-ВГ-109.

Результаты проведения испытаний в реальных условиях для инерциальной системы ГЛ-ВГ-109 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты исследования БИНС на ТС

№ п/п	Время после отключения <i>GPS</i> , мин	Отклонение, м	Примечание
1	0-2	Не более 10	
2	2	Не более 15	10-ти секундное хаотичное перемещение по карте в диапазоне 100 м, после 10-ти секунд отображение в пределах отклонения
3	3-6	Не более 10	
4	6	Не более 20	10-ти секундное хаотичное перемещение по карте в диапазоне 100 м, после 10-ти секунд отображение в пределах отклонения
5	7-8	Не более 15	
6	8,3	Не более 25	10-ти секундное хаотичное перемещение по карте в диапазоне 150 м, после 10-ти секунд отображение в пределах отклонения

Окончание таблицы 1

№ п/п	Время после отключения GPS, мин	Отклонение, м	Примечание
7	9-12	Не более 40	
8	12	Более 40	10-ти секундное хаотичное перемещение по карте в диапазоне 200 м, после 10-ти секунд отображение в пределах отклонения
9	15	Более 100	

Основываясь на данные, полученные в ходе эксперимента, были дополнены технические характеристики БИНС (таблица 2).

Таблица 2 – Обновленные технические характеристики БИНС ГЛ-ВГ109

Наименование	Значение
Среднеквадратическая погрешность угла курса, °	2
Среднеквадратичное время на обработку данных, с	16
Погрешность определения координат до 6 минут, м	±15
Погрешность определения координат от 6 до 10 минут, м	±30
Погрешность определения координат после 10 минут, м	более ±40

По результатам тестирования спутниковой навигационной системы было выявлено, что предел отклонения определения координат в динамическом тестировании *GPS*-антенн составляет в пределах 10 м.

Основываясь на данных полученных в ходе эксперимента, был сделан вывод, что БИНС ГЛ-ВГ109 не соответствует своим техническим требованиям, и при среднеквадратичном отклонении в $\pm 2^\circ$ ошибка определения местоположения ТС на скорости в 60 км/ч в течении 10 минут приводит к отдалению ТС от предполагаемого маршрута на расстояние ± 350 м. Данная ошибка недопустима для точного позиционирования ТС на местности. Методика тестирования спутниковой и инерциальной навигационной системы признана работоспособной и эффективной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Представлен обзор методов и способов повышения точности спутниковых и инерциальных навигационных систем, основанный на анализе причины ошибочного определения местоположения. Приведенный анализ

позволил сформулировать требования к алгоритму для оптимизации поиска наиболее эффективной и точной навигационной системы

2. Разработана методика тестирования навигационных мобильных устройств на базе систем спутниковой и инерциальной навигации, основанная на алгоритме сверке данных. Разработанная методика позволяет выявить и сформировать список наиболее точных и эффективных спутниковых и инерциальных навигационных системы.

3. Предоставлены экспериментальные данные результатов тестирования спутниковой и инерциальной системы, основанные на разработанной методике. По результатам тестирования было выявлено не соответствие заявленных технических характеристик инерциальной системы ГЛ-ВГ109 и слабая эффективность при использовании в реальных условиях. Использование методики тестирования спутниковой и инерциальной навигационной системы позволило выявить наиболее эффективные и точные навигационные системы, сократило времени и повысило качества разрабатываемых устройств.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” в учебный курс «Проектирование электронных модулей, устройств и систем».

СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Муха, А.В. Принцип динамического тестирования *GPS*-модуля / А.В. Муха, Н.И. Михнюк, В.С. Вёрстов, Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев // материалы 13-ой международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ – 2017», Севастополь, Российская Федерация / УО «СГУ». – Севастополь, 2017. – С. 186.

2. Михнюк, Н.И. Применение фотограмметрии для измерения деформаций объектов / Н.И. Михнюк, А.В. Муха, В.С. Вёрстов, Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев // материалы 13-ой международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ – 2017», Севастополь, Российская Федерация / УО «СГУ». – Севастополь, 2017. – С. 251.

3. Муха, А.В. Разновидности *GPS*-антенн для мобильных устройств / А.В. Муха, Н.И. Михнюк, В.С. Вёрстов, Г.А. Пискун // Компьютерное

проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 54 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апреля 2018 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники – Минск, 2018. – С.84 – 85.

4. Вёрстов, В.С. Датчики движения как средство экономии электроэнергии/ В.С. Вёрстов, И.В. Большелатов, А.В. Муха, Г.А. Пискун // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 54 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апреля 2018 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники – Минск, 2018. – С.40 – 43.

5. Михнюк, Н.И. Основные правила и рекомендации при проведении мобильной фотограмметрии // Н.И. Михнюк, А.В. Муха // «Научные стремления – 2018»: материалы международной научно-практической молодежной конференции, секция «Информационные технологии», Минск, Респ. Беларусь, 4–5 декабря 2018 г. / «Центр молодежных инноваций». – Минск, 2018. – Ч.1. – С. 83.

6. Муха, А.В. Методика тестирования инерциальных систем / А.В. Муха, Н.И. Михнюк, В.С. Вёрстов, Г.А. Пискун // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 55 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники – Минск, 2019.

7. Вёрстов В.С. Собственные шумы твердотельных датчиков движения на поверхностных акустических волнах / Аляшевич Н.А., Муха А.В., Галузо В.Е. // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 55 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники – Минск, 2019.

8. Муха, А.В. Методы повышения точности спутниковых навигационных систем // А.В. Муха // «*SCIENCE TIME*»: материалы международного электронно-научного журнала, Казань, Российская Федерация, 30 июня 2019 г. / «Научный центр». – Казань, 2019.

РЭЗІЮМЭ

Муха Арцём Уладзіміравіч

Метады і спосабы павышэння дакладнасці навігацыйных мабільных прылад на базе сістэм спадарожнікавай і інерцыяльнай навігацыі

Ключавыя словы: метады павышэння дакладнасці, методыка выпрабаванняў

Мэта працы: вызначэнне метадаў і спосабаў павышэння дакладнасці навігацыйных мабільных прылад на базе сістэм спадарожнікавай і інерцыяльнай навігацыі, распрацоўка методыкі тэставання спадарожнікавай і інерцыяльнай навігацыі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: выкананы аналіз сістэм спадарожнікавай і інерцыяльнай навігацыі. Прааналізаваны метаду і спосабы павышэння дакладнасці мабільны навігацыйных сістэм.

Распрацавана методыка тэставання навігацыйных мабільных прылад на базе сістэм спадарожнікавай і інерцыяльнай навігацыі. Праведзены аналіз вынікаў тэставання сістэм спадарожнікавай і інерцыяльнай навігацыі.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстановы адукацыі “Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі” ў навучальны курс «Праектаванне электронных модуляў, прылад і сістэм».

Вобласць ужывання: ваенная прамысловасць, авіяцыйная прамысловасць, геадэзія

РЕЗЮМЕ

Муха Артём Владимирович

Методы и способы повышения точности навигационных мобильных устройств на базе систем спутниковой и инерциальной навигации

Ключевые слова: методы повышения точности, методика испытаний.

Цель работы: определение методов и способов повышения точности навигационных мобильных устройств на базе систем спутниковой и инерциальной навигации, разработка методики тестирования спутниковой и инерциальной навигации.

Полученные результаты и их новизна: выполнен анализ систем спутниковой и инерциальной навигации. Проанализированы методы и способы повышения точности мобильных навигационных систем.

Разработана методика тестирования навигационных мобильных устройств на базе систем спутниковой и инерциальной навигации. Проведен анализ результатов тестирования систем спутниковой и инерциальной навигации.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” в учебный курс «Проектирование электронных модулей, устройств и систем».

Область применения: военная промышленность, авиационная промышленность, геодезия.

SUMMARY

Mukha Artsem Vladimirovich

Methods and ways of improving the accuracy of mobile navigation devices based on satellite and inertial navigation systems

Keywords: accuracy improvement methods, test method.

The object of study: to determine methods and ways of improving the accuracy of mobile navigation devices based on satellite and inertial navigation systems, development of testing methodology for satellite and inertial navigation.

The results and novelty: an analysis of satellite and inertial navigation systems has been performed. The method and ways of improve the accuracy of mobile navigation systems were analyzed.

A method for testing navigation mobile devices based on satellite and inertial navigation systems has been developed. The analysis of the results of testing satellite and inertial navigation systems was carried out.

Degree of use: the results implemented in the educational process at the department of design information and computer systems educational institution "Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics" in the training course « Design of electronic modules, devices and systems ».

Sphere of application: military industry, aviation industry, geodesy.