ИБРАЕВ АЙДОС САЯТУЛЫ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Ибраева А.С., на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D074600 – Космическая техника и технологии»

Актуальность исследования. В современном мире глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) играют ключевую роль во многих областях, таких как гражданская и военная авиация, морская и наземная навигация или геоматика. Информация GPS является основным источником навигационной информации для автономных автомобилей, поскольку позволяет достаточно точно определять местоположение движущегося транспортного средства в реальном режиме времени, и обладает точностью, не зависящей от времени.

GPS - это система для определения точного местоположения объекта на поверхности Земли с помощью созвездии из 24 спутников в любом месте, в любое время и при любых погодных условиях. Для определения фактического местоположения объекта в трехмерном пространстве (x, y, z) с точностью до 20 метров, GPS-приемнику необходима информация не менее 4 навигационных спутников. Также, работа в так называемом режиме дифференциальной коррекции (DGPS - Дифференциальный GPS), используя информацию как минимум 5 спутников, позволяет понизить погрешность позиционирования до 2 см. Однако, навигация транспортного средства, основанная на GPS имеет один существенный недостаток: наличие различных препятствии, таких как деревья, туннели, высокие здания, специальные глушилки сигналов, могут вызвать прерывание сигнала, а значит потерю навигационной информации в течение неопределенного периода времени. Для беспилотных транспортных средств, (наши эксперименты были реализованы с использованием одного из таких автомобилей), такая ситуация равносильна временному отказу системы управления. Оптимальным решением этой проблемы является интеграция информации GPS с инерциальной системой навигации (ИНС).

Инерциальные навигационные системы (ИНС) появились раньше спутниковых навигационных систем (СНС) и получили широкое распространение в навигации морских и воздушных судов, геодезии, космической и ракетной технике. ИНС определяют местоположение транспортного средства путем измерения линейного ускорения и угловой скорости, оказываемого на систему в инерциальной системе отсчета с помощью инерциальных блоков измерений (IMU). IMU – это система блоков

измерений, состоящая из датчиков угловых скоростей (гироскопов) и акселерометров. Если начальное положение автотранспорта известна, то с помощью IMU и одометра можно определить его местоположение в любой момент времени без помощи внешних сигналов. Хотя, ИНС способна рассчитывать местоположение движущихся объектов без каких-либо дополнительных навигационных данных, полученных от других устройств, они подвержены накапливаемым со временем случайным ошибкам. Такие погрешности приводят к высокому отклонению конечного результата при определении местоположения объекта. Поэтому, в мировой практике для улучшения результатов навигации, ИНС интегрируется с другой системой навигации.

Интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы (ИНС/СНС) являются самым перспективным классом из всех ныне существующих современных навигационных систем. Они позволяют объединить достоинства и скомпенсировать недостатки, присущие использованию ИНС и GPS по отдельности. Преимуществами ИНС/GPS по сравнению с обычным СНС, являются: непрерывность сигнала (функционирование при отсутствии GPS сигналов), возможность расчета угловой ориентации объекта, высокая частота получения навигационных данных. В интегрированных системах появляется возможность использовать недорогие, легкие и компактные ИНС, построенные на базе микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков. Автономное использование таких ИНС затруднено ввиду нестабильности системных характеристик МЭМС гироскопов и акселерометров, которые при определении навигационных данных ведут к быстрому накоплению ошибки.

В данной работе описывается вариант интеграции ИНС и СНС с помощью специального математического аппарата, называемого фильтрацией Калмана, который позволяет оценивать ошибки инерциальных датчиков, сопоставляя измерения GPS – скорость и местоположение – с расчетными данными ИНС.

Помимо требований к точности в настоящее время к навигационным системам предъявляются требования по таким параметрам, как целостность, доступность и непрерывность навигационного обеспечения. Мерой целостности является вероятность обнаружения выхода рабочих характеристик системы (прежде всего точности) из требуемого предела и сообщения о нем в течение заданного временного интервала. Доступность определяется вероятностью получения потребителем достоверной информации в заданный момент времени с требуемой точностью. Непрерывность характеризуется вероятностью обеспечения системой достоверной информации на заданном интервале времени. Достоверность, в свою очередь, определяется как способность навигационной системы поддерживать с заданной вероятностью свои характеристики в требуемых пределах на определенном промежутке времени в каком-либо районе.

Обеспечение заданных уровней точности и указанных качественных показателей надежности предъявляет особые требования к современным и

перспективным системам навигации маневренной техники. К числу основных современных бортовых систем навигации прежде всего следует отнести инерциальные (ИНС) и спутниковые навигационные системы (СНС). Инерциальные навигационные системы уже давно являются штатным оборудованием на крупных самолетах. Авиационным стандартом для высокоточных ИНС гражданских самолетов считается точность, соответствующая ошибке по координате в 1 морскую милю за час полета (1,8 км/час). Известны также примеры реализации более точных систем, в которых ошибка определения координат не превышает нескольких сот метров за час полета. Спутниковые навигационные системы стали активно использоваться в авиационных приложениях лишь в последнее десятилетие и быстро завоевывают место в штатном составе бортового оборудования. Опыт эксплуатации СНС показал, что при многих положительных качествах СНС не могут удовлетворить всем предъявляемым сегодня требованиям по качественным характеристикам, перечисленным выше.

Различают четыре основных уровня интеграции СНС и ИНС:

- Раздельные системы (Separate Systems). При этом способе автономные спутниковые навигационные решения координаты и скорости объекта обычно просто заменяет соответствующую информацию инерциальной системы.

- Свободно соединенные или слабо связанные системы (Loosely Coupled Systems). Здесь решается задача коррекции решения ИНС при помощи позиционных и скоростных автономных решений спутниковой навигационной системы.

- Тесно интегрированные системы (Tightly Coupled Systems). При таком варианте интеграции первичная информация приемника сигналов СНС (кодовые псевдодальности, доплеровские псевдоскорости, фазовые измерения) используются в качестве корректирующих измерений для ИНС.

- Глубокое интегрирование (Deep Integration), в добавок к варианту тесной интеграции, предусматривает обратную связь на корреляторы СНС, что приводит, по сути, к построению нового аппаратного комплекса, чувствительными элементами которого являются как инерциальные датчики - акселерометры, гироскопы, датчики угловой скорости, так и корреляторы СНС.

Первый вариант интеграции в настоящее время редко применяется. Второй вариант давно стал стандартным, отработанным способом интеграции инерциальных и спутниковых навигационных систем. Третий вариант - тесная интеграция ИНС и СНС, новое направление, которое в настоящее время только-только начало активно прорабатываться на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Последний, четвертый вариант - глубокая интеграция – самое малоизученное новейшее направление, которое является естественным развитием тесно интегрированных комплексов.

Исследуемая задача известна, ей посвящены многие публикации. Однако в этих публикациях, как правило, не описываются важные для

приложений и реализаций математические модели и детали алгоритмов интеграции, а приводятся лишь конечные результаты функционирования интегрированных систем. При этом практически отсутствуют источники, в которых была бы описана четкая алгоритмическая схема, пригодная для написания программного обеспечения. Во многом это связано с тем, что данное программное обеспечение является либо коммерческой тайной, либо интеллектуальной собственностью разработчика программного обеспечения.

Таким образом, в настоящее время существует актуальная научнотехническая проблема совершенствования и разработки новых алгоритмов и методов обработки сигналов и информации в комплексированных инерциально-спутниковых навигационных системах.

Так как для создания тесносвязанных и глубоко-интегрированных систем требуется доступ к внутренним составляющим приемников спутниковой навигации, в данной работе выбор пал на слабосвязанный метод интеграции для создания интеграции ИНС/СНС, ИНС/Одометрия, ИНС/СНС/Одометрия на основе фильтра Калмана.

Цель исследования – создание полностью автономной, высокоточной, сохраняющей роботоспособность при условиях недоступности информации спутниковой навигации, относительно дешевой инерциально-спутниковой системы навигации, и исследование методов и алгоритмов повышения ее точности.

Задачи исследования:

- Методы компенсации ошибок инерциальных датчиков;
- разработка математической модели ИНС;
- Определение координат транспортного средства с помощью одометрии;
- Разработка програмно-математического обеспечения гибридных систем ИНС/Одометрия и ИНС/СНС/Одометрия.

Объект исследования. Объектом исследования диссертационной работы является система, состоящая из ГНСС приемника, дешевых трехосного акселерометра и гироскопа, и одометра.

Предмет исследования. Алгоритмы интеграции инерциальных и спутниковых навигационных систем, алгоритмы повышения точности ИНС.

Методы исследования. Для исследовании использовались методы математического анализа, математической статистики, линейной алгебры и многоразмерой геометрии, теории оптимальной фильтрации, прикладного программирования. Для постановки задачи использовались математический аппарат теории спутниковой и инерциальной навигации, а также компьютерное моделирование.

Положения, выносимые на защиту. По результатам исследования решены следующие задачи:

- Разработаны и протестированы программно-математические обеспечения шестипозиционной и девятипозиционной калибровки инерциальных датчиков для устранения различных типов погрешностей ИНС;

- Разработан програмно-математический комплекс определения координат с помощью ИНС состоящего из трехосного акселерометра и гироскопического датчика;

- Разработана програмно-математическая модель локализации транспортных средств с использованием одометрии;

- Разработан алгоритм слабосвязанной интеграции навигационной информации различных датчиков: ИНС/одометрия и ИНС/СНС/Одометрия с использованием Фильтра Калмана;

- Все разработанные методы и алгоритмы протестированы на основе экспериментальных измерении проведенных с помощью реальных датчиков установленных на реальных беспилотных автомобилях. Осуществлен анализ полученных результатов.

Обоснованность и достоверность проведенных исследовании и результатов подтверждены корректным использованием методов и алгоритмов теории управления, а также достаточным объемом численного моделирования и полученными непротиворечивыми результатами, которые согласуются с известными данными, опубликованными в открытой печати. Все представленные в работе результаты численного моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями, проведенными автором.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

С теоретической точки зрения, разработана научно-методическое обеспечение для создания гибридных навигационных систем – совокупность способов и приемов, порядок их применения, интерпретации и получение результатов.

Разработанная гибридная система применима в различных сферах военной и бытовой навигации, таких как мониторинг перемещения различных подвижных объектов, высокоточная навигация наземных, судоходных, и аэрокосмических средств, навигация транспортных средств при отсутствии ГНСС сигналов, наведение ракет, и т.д. Также, такие системы наряду с системами распознования объектов и лазерной дальнометрии являются основными бортовыми комплексами при создании беспилотных автомобилей, которые в последнее время активно разрабатываются такими крупными компаниями, как Google, Yandex, Tesla, и др.

Личный вклад автора. Все поставленные задачи решены самостоятельно Ибраевым А.С.. Постановка задачи предложены отечественным научным консультантом и зарубежным научным консультантом.

Аппробация результатов исследования.

Полученные результаты по теме роботы были представлены в международных конеренциях «Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. LXX междунар. науч.-практ. конф. № 5(65).» 2 статьи, Международная конференция "Сатпаевские чтения - 2014: «Роль и место молодых ученых в реализации стратегии Казахстан-2050» 1 статья. По материалам диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, из

них 1 в журналах, индексируемых в базе Scopus, 3 в журналах, рекомендуемых ККСОН МОН РК, 3 – труды в материалах международных научных конференции.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников и приложения.

В первой главе описаны различные системы позиционирования и их концепции их функционирования, и рассмотрены их преимущества и недостатки для применения в гибридной системе. Представлены уравнения инерциальной системы навигации, и на их основе выведены уравнения погрешностей. Представлена новая алгоритмическая схема задачи определения положения и ориентации транспортного средства по информации, полученной из трехосного акселерометра и гироскопа с использованием матриц перехода между различными системами отсчета и методов интегрирования. Также, предложено использование одометрии для повышения точности инерциальной навигации. Показаны модели определения местоположения и курса транспортного средства на плоскости по данным, полученным от одометров, расположенных на двух колесах транспортного средства, и ограничения для этой модели. Представлены одометрические уравнения для двухколесных и четырехколесных моделей транспортного средства.

Во второй главе обсуждается различные методы повышения точности ИНС/СНС. Приводятся общие сведения про Калмановской фильтрации, обзор видам интеграции ИНС/СНС, и выбран метод слабосвязанной интеграции. Предложен алгоритм гибридной системы ИНС/Одометрия для случаев потери информации ГНСС в результате воздействии различных помех. Охарактеризованы модель реализуемого фильтра Калмана и его параметры. Объясняется методика синхронизация по времени между данными GPS и инерциальных датчиков. Также рассмотрены некоторые аспекты, такие как инициализация используемых фильтров, настройка их параметров. Подробно описаны виды системных погрешностей модуля инерциальной навигации, разработана методика шестипозиционного и девятипозиционного метода калибровки для компенсации самых существенных из них – нулевых смещении, масштабных коэффициентов и несоответствии осей акселерометров и гироскопов, и протестированы с помощью дешевых МЭМС датчиков.

В третьей главе описан процесс и результаты проведенных экспериментальных испытании, и их анализ. Сперва проводилась первичная обработка для данных каждого датчика: определена точность информации GPS, путем методов статических калибровок скомпенсированы системные погрешности ИНС такие как нулевое смещение, масштабный коэффициент и неортогоальность осей. Затем, приведены результаты интеграции ИНС/Одометрия, ИНС/СНС/Одометрия, и проведен анализ погрешности относительно эталонной траектории. Эксперименты проводились с помощью интелектуального автомобил CyBus научно-исследовательского центра

INRIA (Париж-Рокенкур, Франция). Также были использованы базы данных полученных от датчиков автоматизированного транспортного средства AnnieWay проекта KITTI (Karlsruhe, Germany). Програмное обеспечение реализовалось с помощью пакетов Matlab и Simulink.

В разделе заключении изложены выводы по результатам исследования, и ректомендации для дальнейших работ.

Приложение А – очень важный раздел, которое посвящено описанию системы отсчета и матриц переходов между ними, которые использовались в уравнениях и алгоритме механизации инерциальной навигации, для взаимосвязи инерциальной и спутниковой системы навигации.