

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

УДК 629.056.8:004.94

На правах рукописи

ЖИХ
Андрей Иванович

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ
ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

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: **РОЛИЧ Олег Чеславович**,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры проектирования информационно-
компьютерных систем учреждения образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **КИРИЧУК Андрей Викторович**,
магистр техники и технологии, заместитель
директора представительства ЗАСО
«Промтрансинвест» в г.Минске №3

Защита диссертации состоится «27» июня 2019 г. года в 9⁰⁰ 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

Навигационные приборы – это устройства, которые используются для определения местоположения и направления движения.

Одним из самых распространенных видов навигации является спутниковая навигация. Данный вид навигации дает возможность достаточно точно определять географические координаты объекта, а также получать информацию о скорости и направлении движения приемника спутникового сигнала. Принцип работы этой системы базируется на измерении расстояния от антенны, которая установлена на движущемся объекте, до спутников, положение которых известно с большой точностью.

Еще один вид навигационной системы – инерциальная навигация. Основная идея инерциальной навигации в том, что, взяв за основу некоторую начальную информацию о местоположении объекта, отслеживать перемещения объекта на основании показаний нескольких датчиков – гироскопа и акселерометра. Подобная система навигации не требует данных о внешних воздействиях, не излучает энергии, не зависит от внешних сигналов и географических карт. Точность инерциальной навигационной системы, не зависящая от высоты и характеристики рельефа, почти полностью определяется соответствующими характеристиками элементов аппаратуры.

Если проанализировать выше перечисленные достоинства и недостатки спутниковой и инерциальной навигации, то можно прийти к выводу, что интегрирование этих двух систем в одну навигационную систему скомпенсирует их недостатки.

Так как спутниковая навигация зависит от внешних факторов, связь с которыми может быть прервана, а инерциальная навигация является полностью автономной, то при наступлении случаев, когда одна из этих систем не сможет полноценно функционировать, для выполнения задач навигации и определения маршрута движения будет задействована другая система.

Учитывая все вышеперечисленное, разработка интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы позволит определять местоположение движущегося объекта и задавать маршрут его движения практически при любых условиях эксплуатации, что доказывает актуальность темы диссертации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время все большее применение в различных сферах находят беспилотные объекты и системы. Они могут применяться для выполнения различных задач, в том числе и задач, представляющих опасность для человека. Поэтому все больше возрастает необходимость в использовании систем, позволяющих определять местоположение мобильного объекта и корректировать параметры его движения. Таких систем становится все больше, но большинство из них базируются на методах спутниковой навигации, т.к. спутниковая навигация является наиболее распространенным и простым методом решения подобных задач. Но существуют условия, когда спутниковая навигация является ненадежным методом определения местоположения и корректировки маршрута автономного объекта. В данных ситуациях целесообразно использовать методы инерциальной навигации.

Степень разработанности проблемы

Исследования методов определения координат с использованием спутниковой и инерциальной навигации проводились в работах как отечественных, так и зарубежных ученых. В частности, стоит отметить работы таких ученых Фридлендер Г.О., Кузовков Н.Т., Салычев О.С., Серапинас Б. Б и т.д.

Одним из недостатков исследований, представленных в современной технической литературе, является нехватка практических примеров интеграции спутниковой и инерциальной навигации в одну работоспособную систему.

Предложенное исследование направлено на устранение отмеченного недостатка на основе рассмотрения теоретических основ спутниковой и инерциальной навигации, моделирования сигналов инерциальных датчиков, обоснования и разработки электрической структурной и электрической принципиальной схем интегрированной навигационной системы, реализации методов фильтрации показаний инерциальных датчиков.

Цель и задачи исследования

Целью магистерской диссертации является исследование принципов работы спутниковых и инерциальных навигационных систем, компьютерное моделирование интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы, получение и анализ сигналов датчиков инерциальной навигации.

Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

- анализ архитектуры и принципов функционирования навигационных систем;
- анализ моделей сигналов датчиков и способы их фильтрации от шумов;
- разработка электрических структурной и принципиальной схем;
- моделирование интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы и на практическом примере получение и анализ сигналов инерциальных датчиков.

Область исследования

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

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы советских, русских и зарубежных авторов в направлении исследования спутниковой навигации, инерциальной навигации, методов оптимальной фильтрации показаний навигационных датчиков.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из ресурсов Интернет, а также материалов научных изданий, конференций и семинаров.

Научная новизна

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в математическом и компьютерном моделировании интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы.

Теоретическая значимость работы заключается в математических моделях инерциально-спутниковой навигационной системы и цифровой обработки сигналов датчиков инерциальной навигации.

Практическая значимость диссертации состоит в предложенных архитектуре интегрированной инерциально-спутниковой системы навигации и принципиальных основах построения ее модулей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Архитектура навигационной системы, заключающаяся в интегрировании спутниковой и инерциальной навигации.
2. Алгоритм фильтрации сигналов датчиков инерциальной навигации, заключающийся в комбинировании метода средних значений и фильтра Маджвика.
3. Математические модели инерциально-спутниковой навигационной системы и цифровой обработки сигналов датчиков инерциальной навигации.

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 8 печатных работах. В их числе 3 тезиса докладов на научных конференциях, 5 статей в электронном научном журнале. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 34 страницы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе приведен аналитический обзор теоретических основ спутниковой и инерциальной навигации. Рассмотрены основные методики расчета положения объекта в пространстве на базе сигналов спутниковой и инерциальной навигации. Также была рассмотрена архитектура гибридной инерциально-спутниковой навигационной системы.

Во второй главе представлены сравнительные характеристики методов фильтрации цифровых массивов данных. Были рассмотрены модели сигналов инерциальных датчиков на примере показаний акселерометра. Также была рассмотрена модель процесса преобразования сигналов инерциальных датчиков на примере упрощенного фильтра Кальмана.

В третьей главе представлены результаты разработки электрических структурной и принципиальной схем. Был разработан тестовый прототип интегрированной навигационной системы на базе решения *Arduino*. Представлен эксперимент, целью которого является получение и анализ сигналов датчика акселерометра, гироскопа и цифрового компаса. Также на основании полученных сигналов датчиков была рассмотрена работа алгоритма фильтра Маджвика.

В приложении представлены публикации автора и акт внедрения.

Объем основного текста диссертации – 120. Работа содержит 29 рисунков. Библиографический список включает 32 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрены основные сферы применения спутниковых и инерциальных навигационных систем, рассмотрены достоинства и недостатки применения каждой из этих систем, предложен вариант решения в виде интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы.

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** приведен анализ теоретических основ спутниковой и инерциальной навигации. Рассмотрены основные методики расчета положения объекта в пространстве на базе сигналов спутниковой и инерциальной навигации. Рассмотрена архитектура гибридной инерциально-спутниковой навигационной системы

Во **второй главе** проведен сравнительный анализ основных методов фильтрации цифровых массивов данных, были выявлены достоинства, недостатки и предпосылки к использованию каждого метода.

Проведен анализ моделей сигналов инерциальных датчиков на примере датчика акселерометра и гироскопа, исходя из которого можно сделать вывод, что наличие шумов в исходных сигналах значительно затрудняет работу алгоритмов навигационной системы и для решения этой проблемы необходимо применять методы фильтрации.

Также были рассмотрены модели процессов преобразования сигналов инерциальных датчиков на примере сигнала акселерометра. К этому сигналу был применен упрощенный фильтр Кальмана.

В **третьей главе** был проведен сравнительный обзор таких сред микропроцессорного моделирования, как *Proteus*, *Micro-Cap*. Также были рассмотрены платформы для проектирования устройств, такие как *Arduino* и *Raspberry Pi*.

Следующим шагом работы стало обоснование и проектирование электрических структурной (рисунок 1) и принципиальной схем интегрированной навигационной системы.

При проектировании электрической принципиальной схемы было проведено обоснование и подбор элементной базы для будущего устройства. Один из УГО электрической принципиальной схемы показан на рисунке 2.

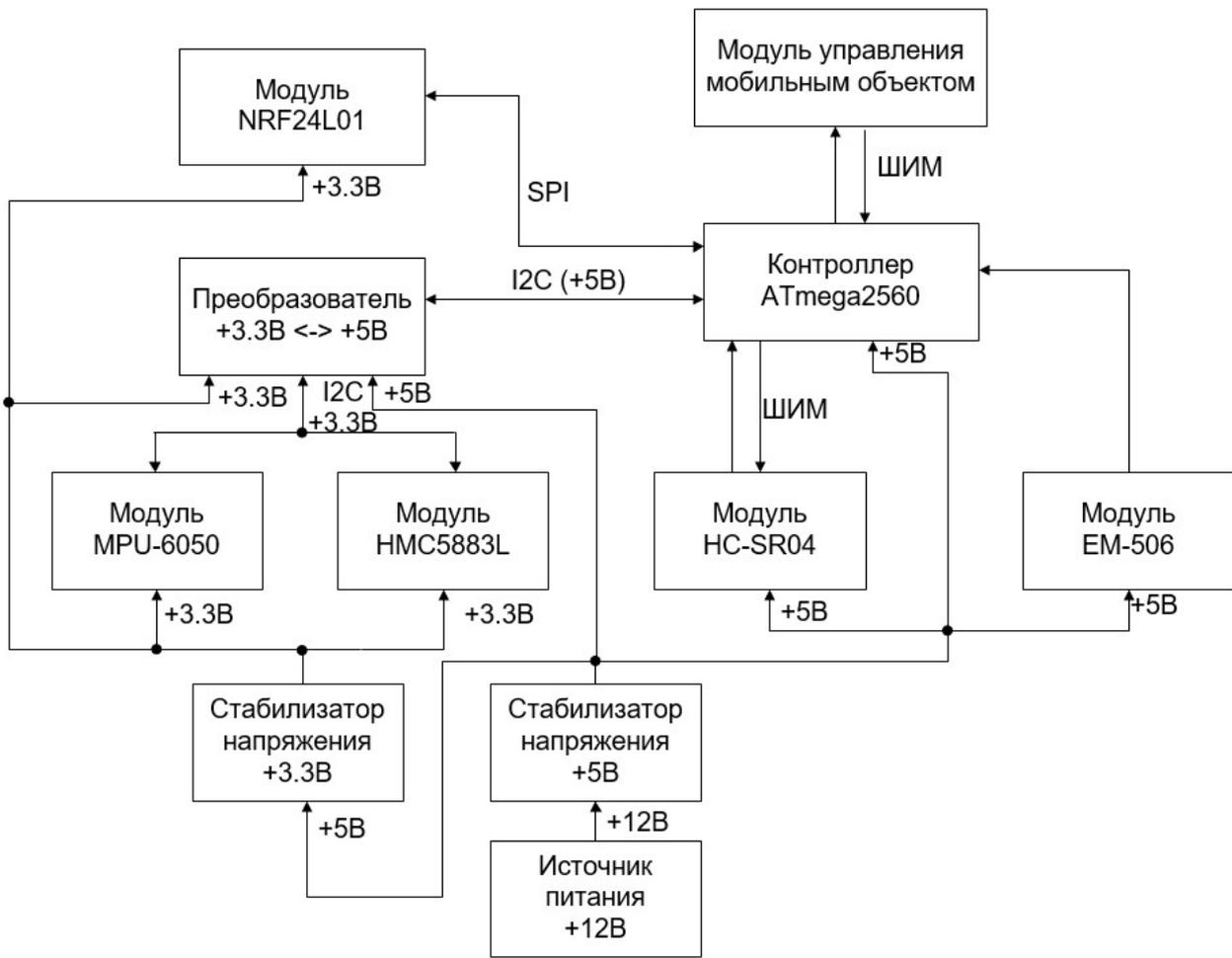


Рисунок 1 – Электрическая структурная схема интегрированной навигационной системы

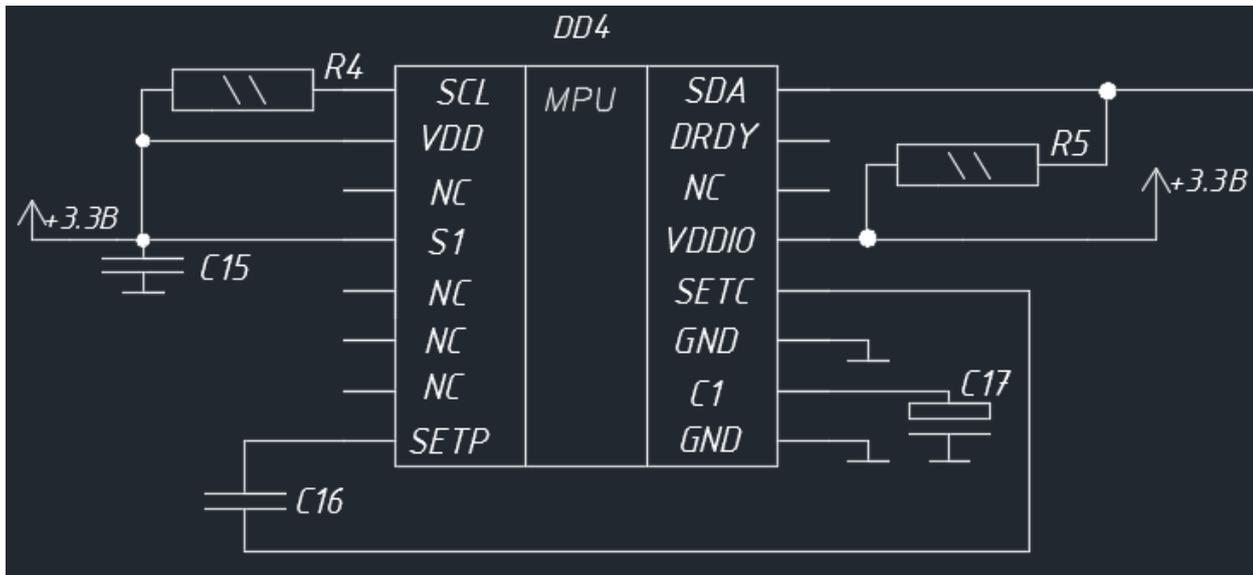


Рисунок 2 – УГО микросхемы HMC5883L в программе AutoCAD

Заключительным этапом стала сборка прототипа устройства интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы, представленного на рисунке 3.

Процесс соединения модулей с платой происходил на основании документации к каждому отдельному модулю. Программная прошивка создавалась в среде *CodeVisionAVR* на языке *C*.

К плате *Arduino* были подключены следующие модули:

- *GY-521* – модуль, содержащий микросхему *MPU-6050* трехосного акселерометра и гироскопа;
- *GY-273* – модуль, содержащий микросхему *HMC5883L* трехосного компаса-магнитомера;
- *GPS*-модуль *EM-506*, для получения *GPS*-координат объекта;
- *HC-SR04* – ультразвуковой дальномер;

Во время работы датчика был проведен следующий эксперимент: платформа устанавливалась высоте 5 и 30 см, и отпускалась с этой высоты три раза. Во время измерений формировался массив показаний датчиков, который был загружен на *SD*-карту и проанализирован в среде *Matlab*. Полученные в ходе эксперимента результаты представлены на рисунках 4 - 6.

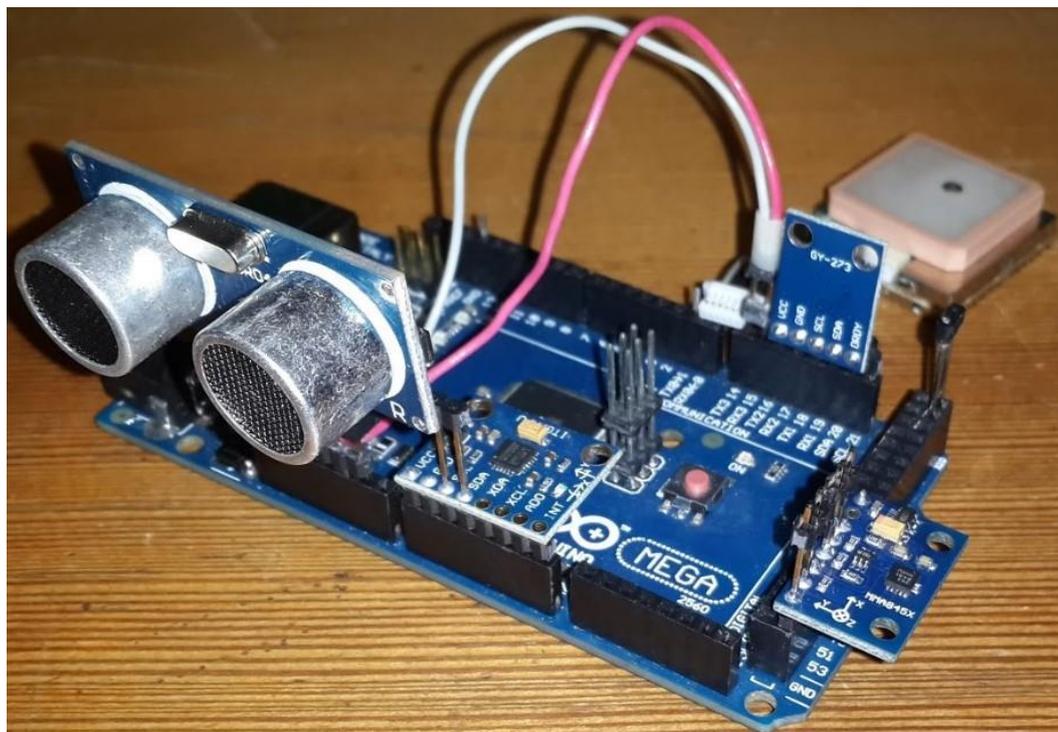


Рисунок 3 – Прототип интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы (вид сбоку)

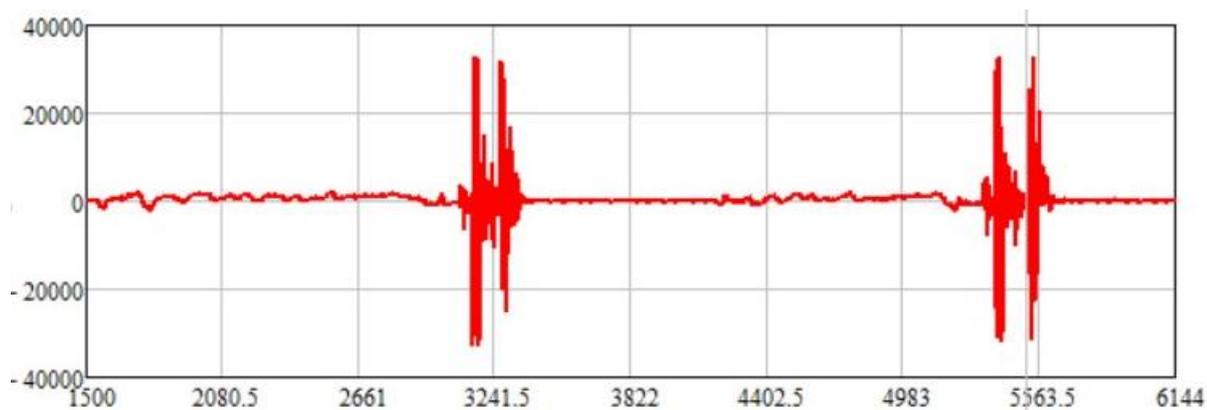


Рисунок 4 – Показания акселерометра по оси X при падении с высоты 5 см

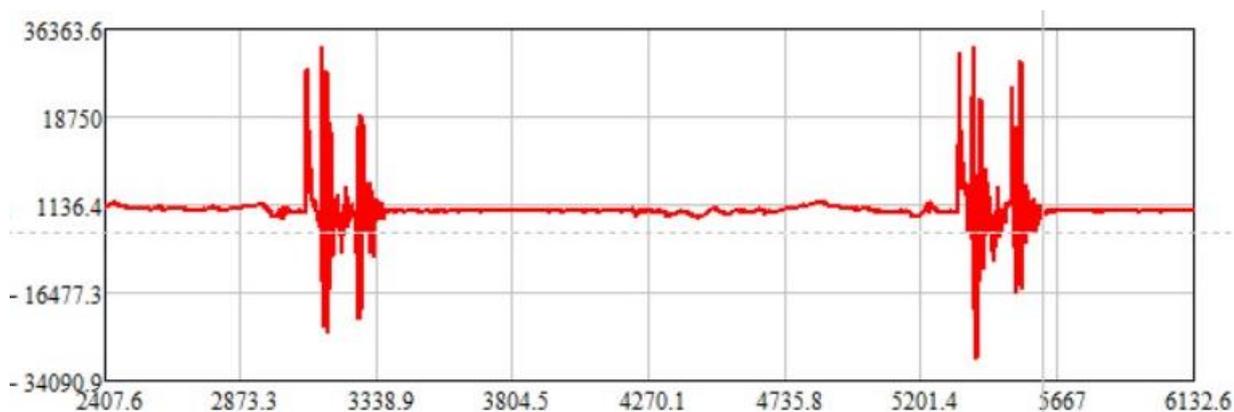


Рисунок 5 – Показания акселерометра по оси Y при падении с высоты 30 см

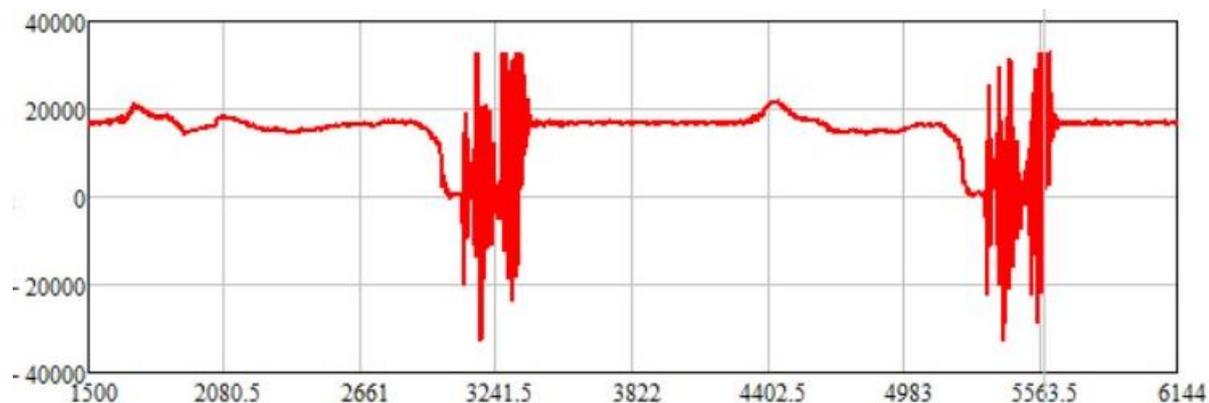


Рисунок 6 – Показания акселерометра по оси Z при падении с высоты 5 см

В ходе эксперимента получены показания акселерометра при ударе о твердую поверхность в момент свободного падения датчика. На приведенных выше графиках отчетливо видны моменты соударения датчика о твердую поверхность, но и здесь присутствуют зашумленность показаний. Также, с использованием среды моделирования *Matlab* был использован алгоритм фильтра Маджвика. На вход данного алгоритма были поданы данные акселерометра, гироскопа и трех осевого цифрового компаса, которые были получены с датчика MPU-6050 при последовательном вращении устройства от

0 до +90 градусов, а затем от +90 до -90 градусов по осям X, Y и Z (рисунок 7-9).

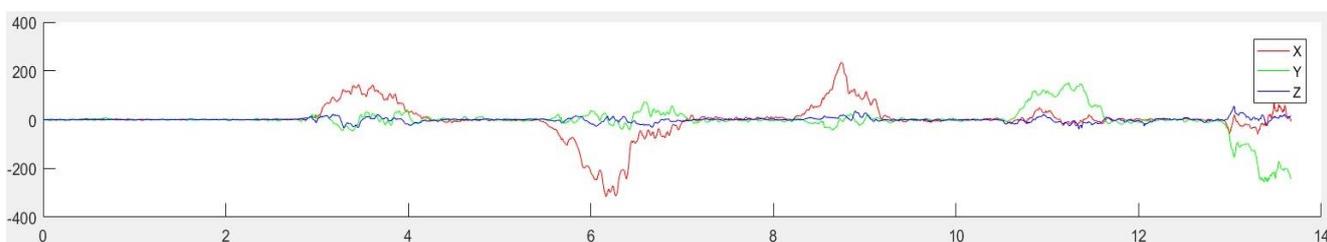


Рисунок 7 – Исходные показания датчика гироскопа

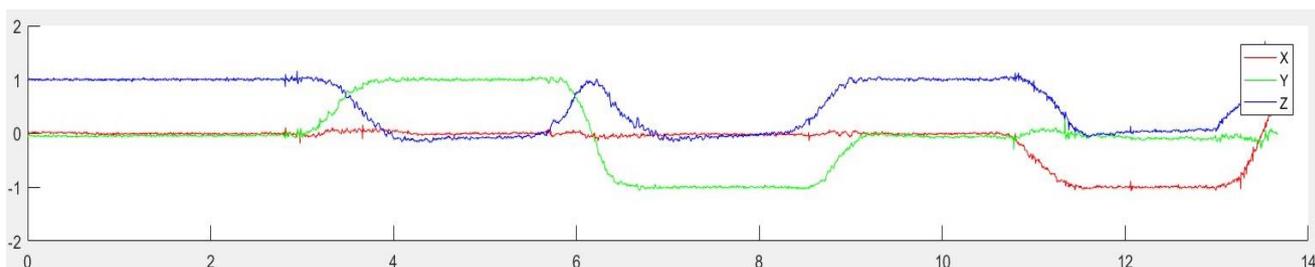


Рисунок 8 – Исходные показания датчика акселерометра

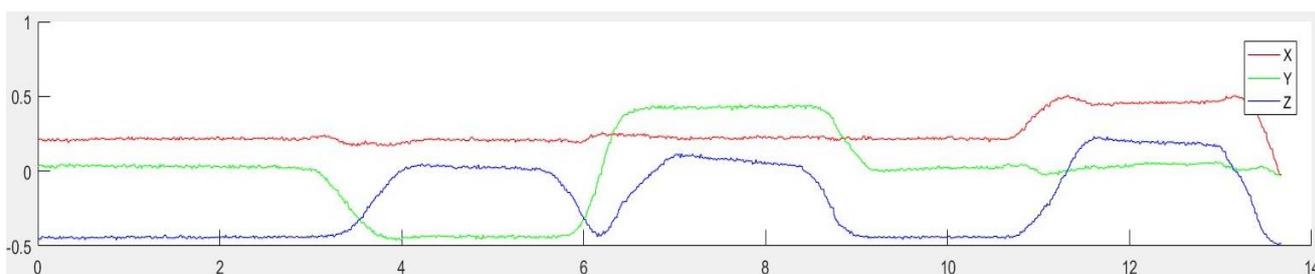


Рисунок 9 – Исходные показания датчика цифрового компаса

Результатом работы данного фильтра являются углы Эйлера, которые описывают поворот объекта в трехмерном пространстве. Таким образом, на собранном прототипе был проведен эксперимент по получению сигналов акселерометра, гироскопа и цифрового компаса, в ходе которого были визуализированы сигналы этих датчиков. Также был рассмотрен результат работы фильтра Маджвика, в результате которого были получены углы Эйлера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В магистерской диссертации был сделан большой упор на анализ теоретических сведений о функционировании инерциальных и спутниковых навигационных систем. Были исследованы основные методологии расчета положения объекта в пространстве на базе данных спутниковой и инерциальной навигации. Был проведен обзор основных датчиков, используемых в инерциальных навигационных системах.

Были рассмотрены и проанализированы следующие методы фильтрации цифровых массивов данных:

- метод средних значений;
- фильтр низких частот;
- комплементарный фильтр;
- фильтр Калмана.

Данные методы фильтрации имеют свои достоинства и недостатки, и их применение зависит от многих факторов, например: качество исходного оборудования, необходимая точность показаний приборов, условия эксплуатации и т.д.

Были рассмотрены и проанализированы модели сигналов инерциальных датчиков, из чего можно сделать вывод, что наличие шумов в исходных показаниях датчиков присутствуют практически всегда, и, чтобы получить максимально точные значения, необходимо применять фильтрацию этих показаний.

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 «Мобильные вычислительные системы».

СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Ролич, О.Ч. Общие принципы построения инерционно-спутниковых навигационных систем / О.Ч. Ролич, А.И. Жих, О.В. Долгий // Научные горизонты. – 2018. – № 3(7). – С. 225–229.
2. Ролич, О.Ч. Алгоритм детектирования движения транспортного средства с помощью акселерометра / О.Ч. Ролич, О.В. Долгий, А.И. Жих // Научные горизонты: в 2 т. – 2018. – Т.2 – № 11(15). – С. 138–143.
3. Долгий, О.В. Методы детектирования движения в навигационных контроллерах / О.В. Долгий, А.И. Жих // материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях»: в 2 т. – Рязань, 2018. – Т.2 – С. 66–68.
4. Долгий, О.В. Исследование погрешностей показаний спутникового приемника / О.В. Долгий, А.И. Жих // материалы 55-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 23–27 апреля 2019 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2019. – С.116–117.
5. Жих, А.И. Методы устранения погрешностей показаний акселерометра / А.И. Жих, О.В. Долгий // материалы 55-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 23–27 апреля 2019 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2019. – С.126–127.
6. Долгий, О.В. Комплексирование сигналов датчиков в навигационных системах на базе инерциальных элементов / О.В. Долгий, А.И. Жих, В.А. Гришечко // Научные горизонты. – 2019. – № 4(20). – С. 193–198.
7. Гришечко, В.А. Датчики автономного автомобиля / В.А. Гришечко, О.В. Долгий, А.И. Жих // Научные горизонты: в 2 т. – 2019. – Т.2 – № 5(21). – С. 77–82.
8. Жих, А.И. Датчики навигационных систем / А.И. Жих, В.А. Гришечко, О.В. Долгий // Научные горизонты: в 2 т. – 2019. – Т.2 – № 5(21). – С. 90–96.

РЭЗІЮМЭ

Жих Андрэй Іванавіч

Камп'ютэрнае мадэляванне інтэграванай інерцыйна-спадарожнікавай навігацыйнай сістэмы

Ключавыя словы: Камп'ютэрнае мадэляванне інтэграванай інерцыйна-спадарожнікавай навігацыйнай сістэмы

Мэта працы: даследаванне прынцыпаў працы спадарожнікавых і інерцыйных навігацыйных сістэм, а таксама камп'ютэрнае мадэляванне і фільтраванне сігналаў навігацыйных датчыкаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: выкананы дэталёвы аналіз тэарэтычных асноў спадарожнікавай і інерцыяльнай навігацыі, разгледжаны мадэляў сігналаў датчыкаў інерцыяльнай навігацыі на прыкладзе ўласнага прылады навігацыйнай сістэмы на базе *Arduino*.

Ступень выкарыстання: атрыманыя вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» у навучальныя курсы «Мабільныя вылічальныя сістэмы», «Праграмнае забеспячэнне мабільных сістэм»

Вобласць ужывання: сфера пабудовы навігацыйных сістэм, микропроцессорныя сістэмы.

РЕЗЮМЕ

Жих Андрей Иванович

Компьютерно моделирование интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы

Ключевые слова: инерциальная навигация, спутниковая навигация, датчики инерциальной навигации, акселерометр, гироскоп, цифровой компас.

Цель работы: исследование принципов работы спутниковых и инерциальных навигационных систем, а также компьютерное моделирование и фильтрация сигналов навигационных датчиков.

Полученные результаты и их новизна: выполнен детальный анализ теоретических основ спутниковой и инерциальной навигации, рассмотрены модели сигналов датчиков инерциальной навигации на примере собственного устройства навигационной системы на базе *Arduino*.

Степень использования: полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебные курсы «Мобильные вычислительные системы», «Программное обеспечение мобильных систем».

Область применения: сфера построения навигационных систем, микропроцессорные системы.

SUMMARY

Zhykh Andrei Ivanovich

Computer simulation of integrated inertial satellite navigation system

Keywords: inertial navigation, satellite navigation, inertial navigation sensors, accelerometer, gyroscope, digital compass.

The object of study: study the principles of operation of satellite and inertial navigation systems, as well as computer simulation and filtering of navigation sensor signals.

The results and novelty: a detailed analysis of the theoretical foundations of satellite and inertial navigation is carried out, models of signals from inertial navigation sensors are considered using the Arduino's own navigation system as an example.

Degree of use: the the results were introduced into the educational process at the department of design of information and computer systems of the educational institution «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» in the training courses «Mobile Computing Systems» and «Software for Mobile Systems».

Sphere of application: scope of construction of navigation systems, microprocessor-based systems.