**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ФАКУЛЬТЕТ РАДИОФИЗИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Кафедра информатики и компьютерных систем**

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ**

Курсовая работа

Барковский Ярослав Юрьевич

Студент 3 курса

Специальность

«радиофизика»

Научный руководитель:

Ассистент кафедры ИиКС

С.В. Василенко

Минск, 2020

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

[**ВВЕДЕНИЕ** 3](#_Toc41945722)

[**ГЛАВА 1 Введение в инерциальную навигацию** 4](#_Toc41945723)

[**1.1 Инерциальная навигация** 4](#_Toc41945724)

[**1.2 Конфигурации инерциальных систем** 4](#_Toc41945725)

[**1.2.1 Системы со стабильной платформой** 5](#_Toc41945726)

[**1.2.2 Бесплатформенные системы** 7](#_Toc41945727)

[**ГЛАВА 2 ОБЗОР АКСЕЛЕРОМЕТРА** 9](#_Toc41945728)

[**2.1 Описание акселерометра** 9](#_Toc41945729)

[**2.2 Типы акселерометров** 9](#_Toc41945730)

[**2.2.1 Механический** 10](#_Toc41945731)

[**2.2.2 Твёрдотельный** 11](#_Toc41945732)

[**2.2.3 MEMS акселерометры** 11](#_Toc41945733)

[**2.3 Ошибки в инерциальных измерительных приборах** 12](#_Toc41945734)

[**2.3.1 Диапазон ввода** 12](#_Toc41945735)

[**2.3.2 Постоянное смещение** 13](#_Toc41945736)

[**2.3.3 Случайное блуждание (шум датчика)** 13](#_Toc41945737)

[**2.3.4 Фликкер-шум (Нестабильность смещения нуля)** 14](#_Toc41945738)

[**2.3.5 Thermo-Mechanical White Noise / Velocity Random Walk** 14](#_Toc41945739)

[**2.3.6 Температурные эффекты** 14](#_Toc41945740)

[**2.3.7 Ошибки калибровки** 14](#_Toc41945741)

[**ЗАКЛЮЧЕНИЕ** 15](#_Toc41945742)

[**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ** 16](#_Toc41945743)

# **ВВЕДЕНИЕ**

# **ГЛАВА 1 Введение в инерциальную навигацию**

## **1.1 Инерциальная навигация**

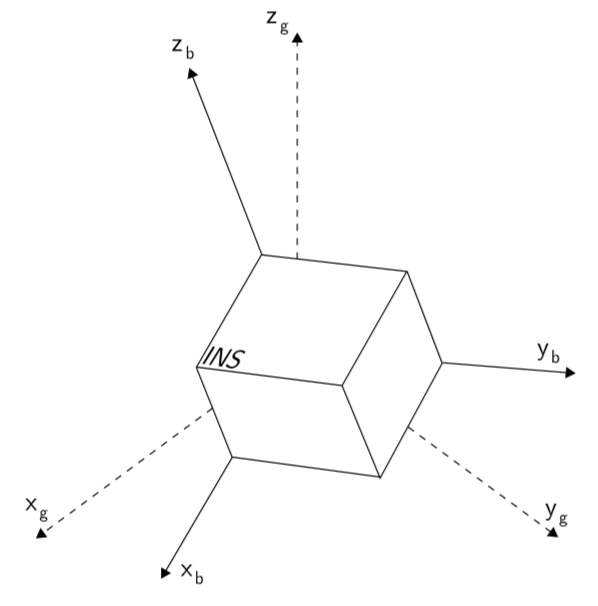
Инерциальная навигация - это автономная навигационная техника, в которой измерения, обеспечиваемые акселерометрами и гироскопами используются для отслеживания положения и ориентации объекта относительно известного начала отсчёта, ориентация и скорость. Инерциальные измерительные модули (IMU) обычно содержат три ортогональных скоростные гироскопы и три ортогональных акселерометра для измерения угловой скорости и линейного ускорения соответственно. Обрабатывая сигналы от этих устройств, можно отслеживать положение и ориентацию устройства.

Инерциальная навигация используется в широком спектре приложений, включая навигацию самолетов, тактику и стратегические ракеты, космические корабли, подводные лодки и корабли. Последние достижения в строительстве MEMS устройства позволили изготовить небольшие и легкие инерциальные навигационные системы. Эти особенности расширили диапазон возможных применений инерциальной навигации, включив такие области, как захват движения людей и животных.

## **1.2 Конфигурации инерциальных систем**

Почти все IMU попадают в одну из двух категорий, системы со стабильной платформой и бесплатформенные системы, которые будут подробнее рассмотрены ниже. Разница между двумя категориями - это система отсчета, в которой работают гироскопы и акселерометры.

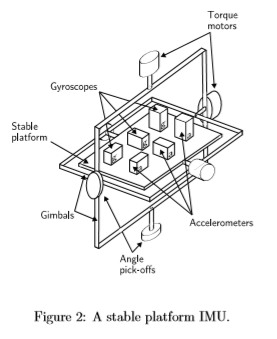
В этом отчете мы будем ссылаться на систему координат навигационной системы в качестве рамки тела и на систему координат, в которой мы используем как глобальную систему координат, как показано на рисунке 1.



**Рисунок 1 – пример стабильной платформы IMU**

### **1.2.1 Системы со стабильной платформой**

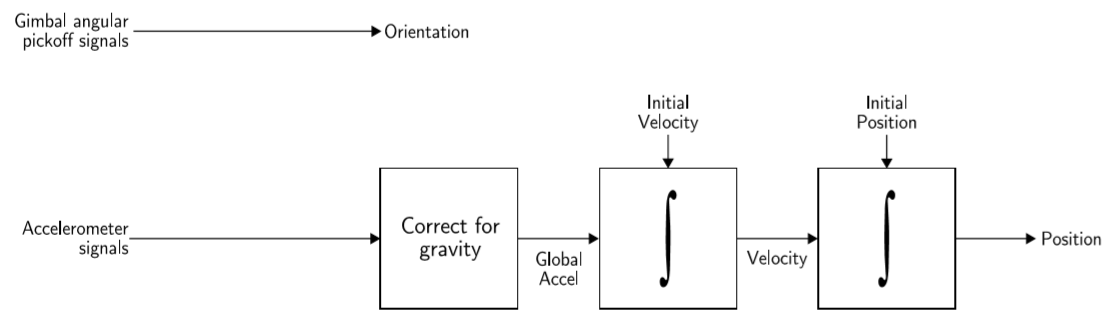
В системах с устойчивой платформой инерционные датчики установлены на платформе, которая изолирована от любого внешнего вращательного движения. Другими словами, платформа удерживается на одной линии с главной рамкой. Это достигается путем монтажа платформы с помощью карданов (рам), которые обеспечивают свободу платформы во все три оси, как показано на рисунке 2. Гироскопы (gyroscopes), установленные на платформе, обнаруживают любые повороты платформы. Эти сигналы поступают обратно в моментные двигатели (torque motors), которые вращают карданные подвески, чтобы нейтрализовать такие вращения, следовательно, поддерживая платформу на одной линии с главной рамкой.



**Рисунок 2 – пример стабильной платформы IMU**

Для отслеживания ориентации устройства можно читать углы между соседними карданами, используя угловые датчики(angle pick-offs). Для расчета положения устройства используются сигналы с платформы, на которой установлены акселерометры, значения которых после дважды интегрируются. Обратите внимание, что необходимо вычесть ускорение из-за силы тяжести из вертикальных значений перед выполнением интеграции. Алгоритм инерциальной навигации стабильной платформы (рис. 3) состоит из нескольких шагов:

* Ориентацию получаем из значений угловых датчиков
* Полученные сигналы с акселерометров изменяются с поправкой на гравитацию;
* После интегрируем полученные ускорения и получаем начальные скорости;
* После опять интегрируем и получаем искомое положение акселерометра;

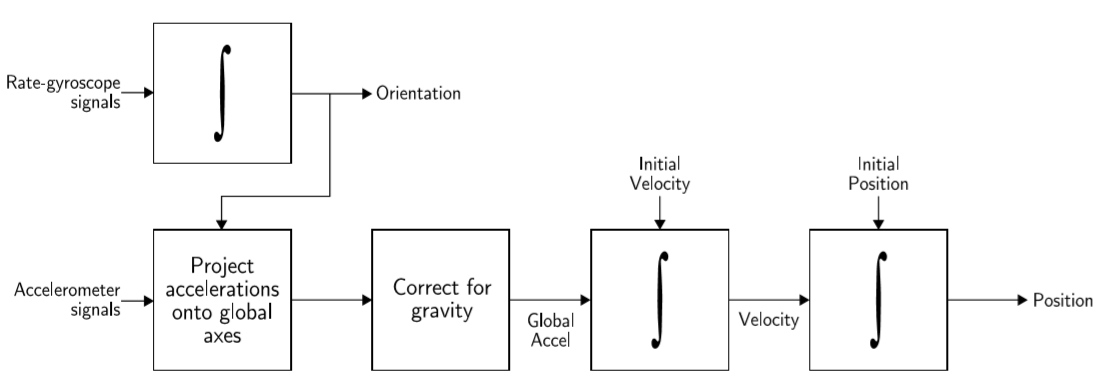


**Рисунок 3 – Алгоритм инерциальной навигации стабильной платформы**

### **1.2.2 Бесплатформенные системы**

В бесплатформенных системах инерционные датчики жестко закреплены на устройстве и, следовательно, выводятся величины, измеренные в рамке тела, а не в глобальной рамке.

Алгоритм инерциальной навигации бесплатформенной системы состоит из нескольких шагов:

* Интегрирование сигналов скоростных гироскопов и определение ориентации;
* Проецирование сигналов акселерометра на глобальные оси используя данные после интегрирования сигналов скоростных гироскопов;
* Гравитационная поправка;
* Интегрирование для получения начальной скорости;
* Повторное интегрирование и получение начальной позиции.

**Рисунок 4 – Алгоритм инерциальной навигации бесплатформенной системы**

Системы стабильных платформ и бесплатформенные основаны на одних и тех же базовых принципах. Бесплатформенные системы имеют меньшую механическую сложность и имеют тенденцию быть физически меньше стабильной платформы системы. Эти преимущества достигаются за счет увеличения вычислительной сложности. С уменьшением стоимости вычислений бесплатформенные системы стали доминирующим типом INS.

# **ГЛАВА 2 ОБЗОР АКСЕЛЕРОМЕТРА**

## **2.1 Описание акселерометра**

Акселерометр - прибор, измеряющий проекцию кажущегося ускорения (разности между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением). Как правило, акселерометр представляет собой чувствительную массу, закреплённую в упругом подвесе. Отклонение массы от её первоначального положения при наличии кажущегося ускорения несёт информацию о величине этого ускорения.

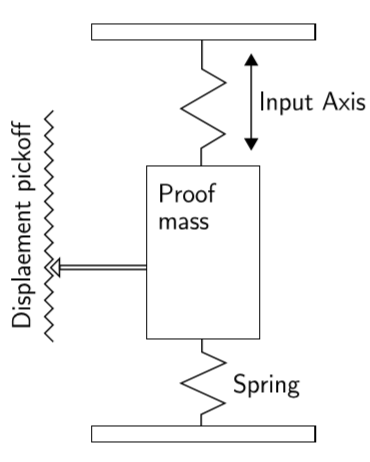
По конструктивному исполнению акселерометры подразделяются на однокомпонентные, двухкомпонентные, трёхкомпонентные. Соответственно, они позволяют измерять проекции кажущегося ускорения на одну, две и три оси.

Некоторые акселерометры также имеют встроенные системы сбора и обработки данных. Это позволяет создавать завершённые системы для измерения ускорения и вибрации со всеми необходимыми элементами.

Акселерометр может применяться как для измерения проекций абсолютного линейного ускорения (если известны величина и направление гравитационного ускорения в данной точке пространства), так и для косвенных измерений проекции гравитационного ускорения (при неподвижности акселерометра в гравитационном поле). Первое свойство используется для создания инерциальных навигационных систем, где полученные с помощью акселерометров измерения интегрируют, получая инерциальную скорость и координаты носителя. Акселерометры, наравне с гироскопами, являются неотъемлемыми компонентами систем навигации и управления самолётов, ракет и других летательных аппаратов, кораблей и подводных лодок. Второе свойство позволяет использовать акселерометры как для измерения уклонов, то есть в качестве инклинометров, так и в гравиметрии.

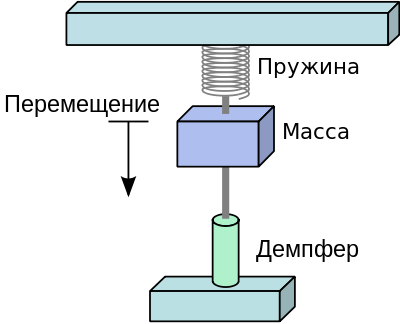
## **2.2 Типы акселерометров**

Простейший пример акселерометра представляет собой некоторый груз закреплённый на пружинах, как видно на Рисунке 5. В этом параграфе будут описаны эти два типа акселерометра, а также акселерометры MEMS. Для полного понимания будет появляться необходимость отсылаться на схему [1].



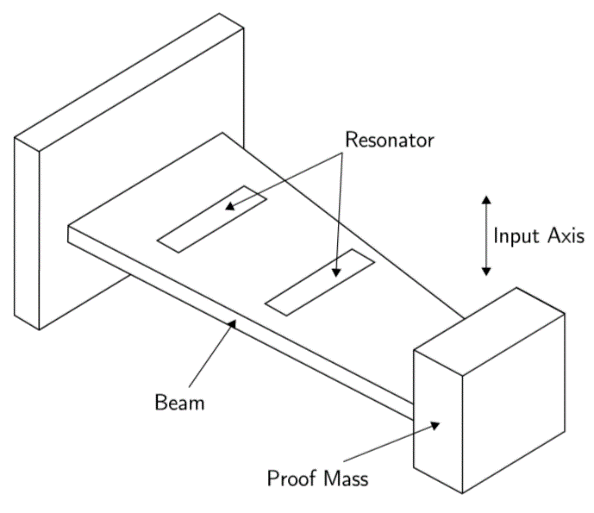
**Рисунок 5 – схема простейшего акселерометра [1]**

### **2.2.1 Механический**

Механический акселерометр состоит из массы, подвешенной на пружинах, как показано на рисунке 6. Масса измеряется с помощью датчика смещения, дающего сигнал, который пропорционален сила F действует на массу в направлении входной оси. Затем используется второй закон Ньютона F = ma для расчёта ускорения, действующего на устройство

**Рисунок 6 – механический акселерометр**

### **2.2.2 Твёрдотельный**

Твердотельные акселерометры можно разбить на различные подгруппы, включая поверхностные акустические волны, вибрационные, кремниевые и кварцевые приборы. Твердотельные акселерометры маленькие, надежные и прочные. Примером твердотельного акселерометра является акселерометр поверхностной акустической волны (SAW). SAW акселерометр состоит из балки, которая резонирует на определенной частоте, как показано на Рис. 7.

**Рисунок 7 – SAW акселерометр**

К одному концу балки прикреплена масса, которая может свободно двигаться. Другой конец жестко крепится. Когда ускорение применяется вдоль входной оси, балка изгибается. Это заставляет изменяться частоту поверхностной акустической волны изменяться пропорционально приложенной деформации. Измеряя это изменение частоты можно определить ускорение.

### **2.2.3 MEMS акселерометры**

Микромеханические кремниевые акселерометры используют те же принципы, что и механические и твердотельные датчики. Существует два основных класса акселерометров MEMS.

* Первый класс состоит из механических акселерометров (т.е. устройства, которые измеряют смещение поддерживаемой массы), изготовленные с использованием методов MEMS.
* Второй класс состоит из устройств, которые измеряют изменение частоты вибрирующего элемента, вызванное изменением напряжения, как в акселерометрах SAW (твёрдотельный).

Преимуществами MEMS-устройств является:

* маленький размер;
* низкий вес;
* прочная конструкция;
* низкое энергопотребление;
* короткое время запуска;
* недорого в производстве (в больших объемах);
* высокая надежность;
* низкие эксплуатационные расходы;
* совместимы с операциями в агрессивных средах;

## **2.3 Ошибки в инерциальных измерительных приборах**

В этом разделе будут рассмотрены ошибки измерений присущие большинству инерциальных датчиков, таких как акселерометры и гироскопы.

В этом разделе мы рассмотрим ошибки, которые возникают в MEMS-акселерометрах. Описанные типы ошибок ниже аналогичны таковым для гироскопов. Важное различие между ошибками, возникающими в акселерометрах, заключается в том, что они дважды интегрируются в порядок отслеживания положения, где сигналы гироскопа скорости интегрируются только один раз для отслеживания ориентации.

### **2.3.1 Диапазон ввода**

Диапазон ввода - это максимальная угловая скорость или ускорение, которые может правильно измерить IMU. Ускорение или вращение за пределами этого диапазона приводят к плохим измерениям или вовсе не производят измерений. Важно помнить об этом при выборе IMU, особенно в среде с высокой динамикой или с IMU с низким входным диапазоном.

Важно отметить, что сильная вибрация может привести к плохому результату, так как датчик будет уже насыщен сигналом. Фактический сигнал движения транспортного средства (или тела, являющегося объектом измерения) труднее отделить от шума, вызванного вибрацией. Полоса пропускания датчиков играет важную роль в способности датчиков измерять фактическое движение. Низкая пропускная способность означает, что высокочастотная вибрация не измеряется должным образом, итоговое измерение страдает от наложения сигналов друг на друга. По этой причине виброизоляция рекомендуется в ситуациях, когда присутствует значительная вибрация или низкая пропускная способность датчика.

### **2.3.2 Постоянное смещение**

Смещение акселерометра - это смещение его выходного сигнала от истинного значения, в . Постоянная ошибка смещения ǫ при двойном интегрировании вызывает ошибку в положении, которая растет со временем в квадрате. Накопленная ошибка в положении

где t - время интегрирования. Можно оценить смещение путем измерения долгосрочного среднего значения выходного сигнала акселерометра. когда он не подвергается ускорению. К сожалению, это осложняется гравитацией, так как компонент гравитации, действующий на акселерометр, будет выглядеть как смещение. Поэтому необходимо знать точную ориентацию устройства относительно гравитационного поля для измерения смещения. На практике это может быть достигнуто с помощью процедур калибровки, в которых устройство установлено на поворотном столе, чью ориентацию можно контролировать очень точно.

### **2.3.3 Случайное блуждание (шум датчика)**

Если датчик измеряет постоянный сигнал, случайный шум (ошибка) в измерении всегда появляется. Это описывается как случайный процесс и сводится к минимуму с использованием статистических методов. Интегрирование (механизация) ошибок случайного блуждания в измерениях приводит к случайному блужданию в конечном решении. Одна область, где случайный прогулка гироскопов играет важную роль в статическом выравнивании. Качество статического выравнивания напрямую связан с шумом датчиков. Случайное блуждание напрямую влияет на производительность GNSS + INS в периоды GNSS отключение, когда ошибка шума датчика приводит к тому, что ошибка решения становится неограниченной. град√ч, м/с√ч

### **2.3.4 Фликкер-шум (Нестабильность смещения нуля)**

Шум, возникающий в электронных компонентах датчика, подверженных случайному т.н. “мерцанию” (“flickering”). Имеет спектральную мощность, пропорциональную (розовый шум). Оказывает значительное влияние на низких частотах, с увеличением частоты интенсивность падает: график мощности шума в логарифмическом масштабе равномерно убывает; на высоких частотах перекрывается белым шумом. Наблюдается во многих электронных приборах.

### **2.3.5 Thermo-Mechanical White Noise / Velocity Random Walk**

### **2.3.6 Температурные эффекты**

### **2.3.7 Ошибки калибровки**

# **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

??

# **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Editors: Yurish, Sergey Y., Gomes, Maria T.S.R. (Eds.), Smart Sensors and MEMS. Proceedings of the NATO Adavanced Study Institute on Smart Sensors and MEMS, Povoa de Varzim, Portugal 8 - 19 September 2003. - С. 155-203.
2. M. Thiyagarajan, Chaitanya Raveendra ROLE OF WEB SERVICE IN INTERNET OF THINGS // - 2017. - С. 268-270.
3. Markku Laine RESTful Web Services for the Internet of Things // - 2019. - С. 1-3.
4. Ли П. Архитектура интернета вещей. ДМК Пресс, 2019. - 454 с.
5. D. Booth et al., “Web Services Architecture,” W3C Working Group Note, February 2014.
6. D. Booth and C.K. Liu, “Web Services Description Language (WSDL) Version 2.0 Part 0: Primer,” W3C Recommendation, June 2017.
7. W. Colitti, K. Steenhaut, and N. De Caro, “Integrating Wireless Sensor Networks with the Web,” Proc. Extending the Internet to Low Power and Lossy Networks (IP+SN’11), 2019.

<https://pdfs.semanticscholar.org/560b/ed0dfc17a829d45a6a199a23eacfacf4b6cb.pdf>

<https://cloud.google.com/solutions/iot>

<https://aws.amazon.com/ru/iot/>

<https://azure.microsoft.com/es-es/blog/microsoft-azure-iot-suite-connecting-your-things-to-the-cloud/>