**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

Барковского Ярослава Юрьевича,

студента 3 курса

специальность «радиофизика»

Научный руководитель:

ассистент кафедры ИиКС РФиКТ

С.В. Василенко

Минск, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 4](#_Toc41974810)

[ГЛАВА 1 Введение в инерциальную навигацию 5](#_Toc41974811)

[1.1 Инерциальная навигация 5](#_Toc41974812)

[1.2 Конфигурации инерциальных систем 5](#_Toc41974813)

[1.2.1 Системы с стабилизированной платформой 6](#_Toc41974814)

[1.2.2 Бесплатформенные системы 7](#_Toc41974815)

[ГЛАВА 2 ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ 9](#_Toc41974816)

[2.1 Гироскоп 9](#_Toc41974817)

[2.1.1 Типы гироскопов 9](#_Toc41974818)

[2.2.1.1 Механический гироскоп 9](#_Toc41974819)

[2.2.1.2 Оптический гироскоп 10](#_Toc41974820)

[2.2.1.3 MEMS гироскоп 11](#_Toc41974821)

[2.2 Акселерометр 12](#_Toc41974822)

[2.2.1 Типы акселерометров 13](#_Toc41974823)

[2.2.1.1 Механический акселерометр 14](#_Toc41974824)

[2.2.1.2 Твёрдотельный акселерометр 14](#_Toc41974825)

[2.2.1.3 MEMS акселерометр 15](#_Toc41974826)

[2.3 Ошибки в инерциальных измерительных приборах 15](#_Toc41974827)

[2.3.1 Диапазон ввода 16](#_Toc41974828)

[2.3.2 Диапазон ввода 16](#_Toc41974829)

[2.3.3 Случайное блуждание (дрейф) угла 16](#_Toc41974830)

[2.3.4 Случайное блуждание (дрейф) скорости 17](#_Toc41974831)

[2.3.5 Постоянное смещение 17](#_Toc41974832)

[2.3.6 Фликкер-шум / Нестабильность смещения 18](#_Toc41974833)

[2.3.7 Не ортогональность датчика (Несоосность) 19](#_Toc41974834)

[2.3.8 Температурные эффекты 19](#_Toc41974835)

[2.3.9 Ошибки калибровки 19](#_Toc41974836)

[2.3.10 G зависимость (эффект ускорения) 20](#_Toc41974837)

[2.3.11 Шум квантования 20](#_Toc41974838)

[2.3.12 Синусоидальный шум 20](#_Toc41974839)

[ГЛАВА 3 Моделирование ДАТЧИКОВ В СРЕДЕ MATLAB 21](#_Toc41974840)

[3.1 Navigation Toolbox 21](#_Toc41974841)

[3.2 Введение в симуляцию измерений IMU 21](#_Toc41974842)

[3.2.1 Accelparams class 21](#_Toc41974843)

[3.2.2 Моделирование акселерометра 22](#_Toc41974844)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 27](#_Toc41974845)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 28](#_Toc41974846)

[ПРИЛОЖЕНИЯ 29](#_Toc41974847)

# ВВЕДЕНИЕ

В 21 веке невозможно представить жизнь человечества без каких-либо электронных датчиков. Они буквально находятся везде, при помощи них люди решают множество каждодневных, и не только, проблем, те же датчики движения, температуры, давления, света, датчики магнитного поля находятся буквально на каждом шагу, в одном только смартфоне, который есть практически у каждого современного человека, можно найти акселерометр, гироскоп, барометр, компас (магнитометр), датчик Холла, датчик приближения и т.д. И это только в смартфоне, трудно будет представить сколько этих датчиков будет находиться на каком-нибудь современном судне или ракете, и насколько будет сложным их устройство и анализ.

В этой работе будет рассмотрен широкий класс электронных датчиков, а именно цифровые электронные инерциальные датчики. В основном эти датчики используются в каких-либо средствах передвижения, например: суда, самолёты, ракеты и др. Данные датчики используются в сфере навигации, в основном для определения координат и параметров движения различных объектов и управления их движением путём анализа и преобразования полученных данных с датчиком. Ниже будут описаны основы инерциальной навигации, где основную роль играют инерциальные датчики, такие как гироскоп, акселерометр, магнитометр и др. А так же основные виды этих датчиков (гироскоп, акселерометр) и их особенности.

# 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 Рис. 1.

### 1.2.1 Системы с стабилизированной платформой

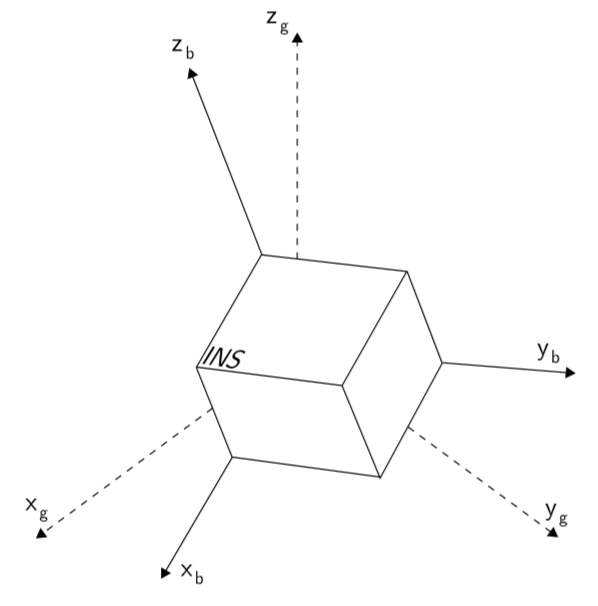


Рис. 1 система координат навигационной системы

В системах с стабилизированной 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 Рис. 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.

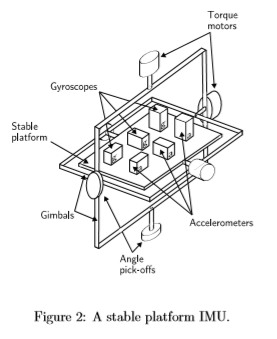


Рис. 2 пример стабилизированной платформы IMU

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 стабилизированной 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;

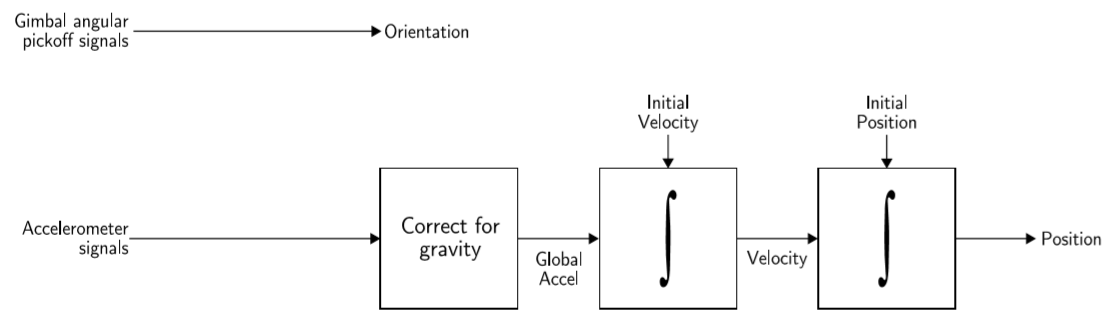


Рис. 3 Алгоритм инерциальной навигации стабилизированной платформы

### 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 (Рис. 4) 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.

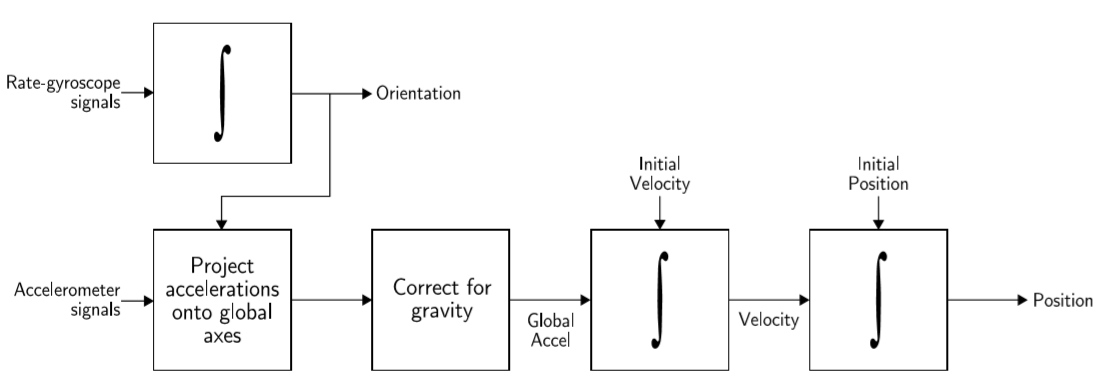


Рис. 4 Алгоритм инерциальной навигации бесплатформенной системы

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 ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

## 2.1 Гироскоп

Гироскоп - устройство, способное реагировать на изменение углов ориентации тела, на котором оно установлено, относительно инерциальной системы отсчёта. Простейший пример гироскопа — юла (волчок).

### 2.1.1 Типы гироскопов

Всего выделяют 3 основных типа гироскопов:

* Механические;
* Оптические;
* MEMS – гироскопы.

### 2.2.1.1 Механический гироскоп

Обычный гироскоп состоит из вращающегося колеса, установленного на двух подвесах, которые позволяют ему вращаться во всех трех осях, как показано на Рис. 5. Эффект сохранения момента импульса состоит в том, что вращающееся колесо будет сопротивляться изменениям в ориентации. Следовательно, когда механический гироскоп подвергается колесо останется неподвижным, а карданы изменят своё положение. Для измерения ориентации устройства можно считать углы между соседними карданами используя угловые датчики. Обратите внимание, что обычный гироскоп измеряет ориентацию. В отличие от почти всех современных гироскопов (включая оптические и MEMS-типы, описанные в разделах 3.1.2 и 3.1.3) гироскопы скорости, которые измеряют угловую скорость.

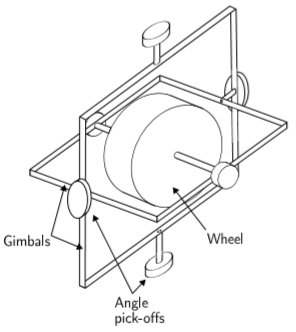


Рис. 5 простейший механический гироскоп

Основным недостатком механических гироскопов является то, что они содержат движущиеся части. Движущиеся части вызывают трение, которое, в свою очередь, приводит к дрейфу выходного сигнала с течением времени. Чтобы минимизировать трение используют подшипники высокой точности и специальные смазочные материалы, что увеличивает стоимость устройства. Механические гироскопы также требуется несколько минут, чтобы согреться, что не идеально во многих ситуациях.

### 2.2.1.2 Оптический гироскоп

Волоконно-оптический гироскоп (FOG) использует интерференцию света для измерения угловой скорости. FOG состоит из большой катушки оптического волокна. Чтобы измерить вращение, два световых луча направляются в катушку в противоположных направлениях. Если датчик вращается, то луч движущийся в направлении вращения будет проходить более длинный путь к другому концу волокна, чем луч, движущийся против вращения, как показано на Рис. 6. Этот эффект известнен как эффект Саньяка. Когда лучи выходят из волокна, они объединяются. Фазовый сдвиг, вызванный эффектом Саньяка, вызывает помехи лучей, в результате чего получается комбинированный луч, интенсивность которого зависит от угловой скорости. Поэтому возможно измерить угловую скорость, измеряя интенсивность объединенного луча

Кольцевые лазерные гироскопы (RLG) также основаны на эффекте Саньяка. Разница FOG и RLG заключается в том, что в RLG лазерные лучи направляются по замкнутому пути с использованием зеркал, а не оптических волокон.

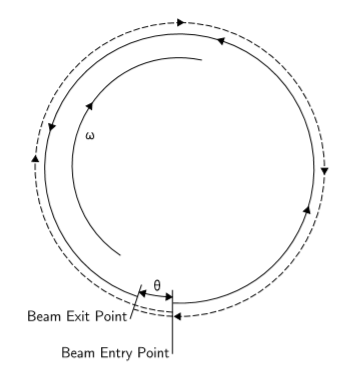


Рис. 6 Эффект Саньяка — появление фазового сдвига встречных электромагнитных волн во вращающемся кольцевом интерферометре.

В отличие от механических гироскопов, оптические гироскопы не содержат движущихся частей и требуют всего несколько секунд для запуска. Точность оптического гироскопа в значительной степени зависит от длины светопропускания путь (чем больше, тем лучше), который ограничен размером устройства.

### 2.2.1.3 MEMS гироскоп

Несмотря на годы разработки, механические и оптические гироскопы все еще имеют большое количество деталей и требуют для деталей с высокоточными допусками и сложными методами сборки. В результате они остаются дорогими. В отличие от датчиков MEMS, построенных с использованием кремниевых методов микрообработки (MEMS гироскоп может состоять всего из трех частей) и относительно дешевой стоимостью изготовления.

В MEMS-гироскопах используется эффект Кориолиса, который утверждает, что в системе отсчета вращение при угловой скорости ω масса m, движущаяся со скоростью v, испытывает силу:

, (1)

где m – масса, ω – угловая скорость, v – скорость движения

MEMS гироскопы содержат вибрирующие элементы для измерения эффекта Кориолиса. Простейшая вибрирующий элемент состоит из единственной массы, которая приводится в движение вдоль оси привода, как показано на Рис. 7. При вращении гироскопа вдоль перпендикулярной чувствительной оси возникает вторичная вибрация, вызванная силой Кориолиса. Угловая скорость может быть рассчитана путем измерения этого вторичного вращения.

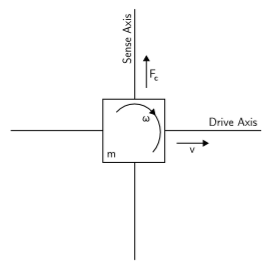


Рис. 7 простой вибрирующий элемент MEMS гироскопа

Преимущества:

* Меньшие размеры
* Низкий вес
* Меньшее кол-во деталей
* Сборка легче
* Дешевле
* Быстрее запускается
* Низкое энергопотребление
* Прочная конструкция
* Высокая надёжность
* Низкие эксплуатационные расходы
* Совместим с операциями в агрессивных средах

## 2.2 Акселерометр

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.

### 2.2.1 Типы акселерометров

Простейший пример акселерометра представляет собой некоторый груз закреплённый на пружинах, как видно на Рис. 8. В этом параграфе будут описаны эти два типа акселерометра, а также акселерометры MEMS. Для полного понимания будет появляться необходимость отсылаться на схему [1].

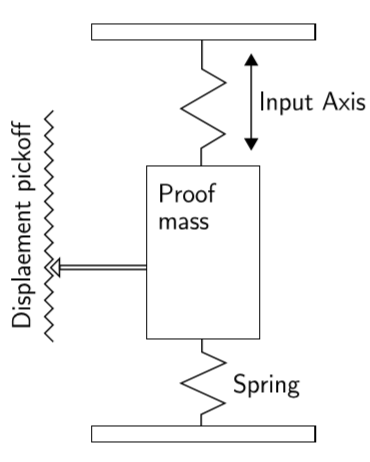


Рис. 8 схема простейшего акселерометра [1]

### 2.2.1.1 Механический акселерометр

Механический акселерометр состоит из массы, подвешенной на пружинах, как показано на Рис. 9. 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

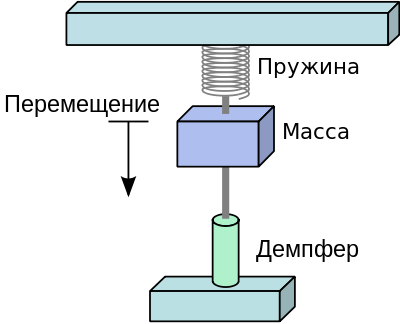


Рис. 9 механический акселерометр

### 2.2.1.2 Твёрдотельный акселерометр

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. 10.

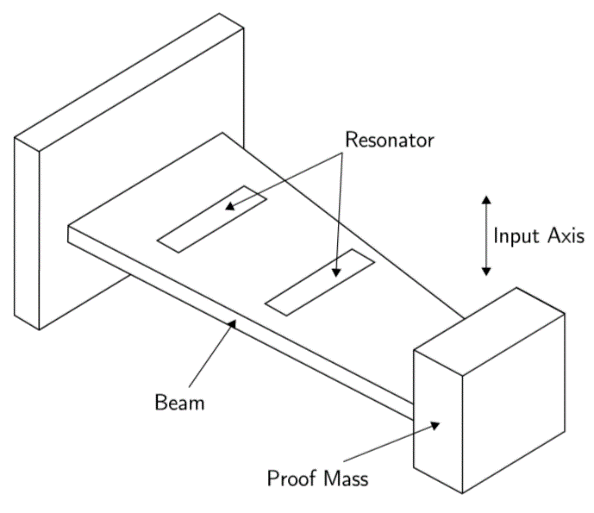


Рис. 10 SAW акселерометр

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.

### 2.2.1.3 MEMS акселерометр

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

Для использования данных, получаемых с датчиков навигационной системы, необходимо корректно выделить из выходного сигнала датчика информационную составляющую. Сделать это может быть проблематично, т.к. сигнал в значительной мере зашумлен различными типами шумовых составляющих. Показания y(t) датчиков можно представить в виде комбинации функций:

, (2)

Где t – время, u(t) – информационная составляющая сигнала, b(T) – уход показаний, вызванный изменением температуры окружающей среды, T – температура e(t) – шумовая компонента, N (a, ω, T, t) – ошибки, вызванные условиями среды, a/ω – реальные кинематические величины,

Посредством методов аппроксимации можно оценить только шумовую компоненту, зависящую от времени – e(t). Отклонение b(T) обычно постоянно. Описанные ниже шумовые составляющие приведены для гироскопов, отличия для акселерометров лишь в терминах и обусловлены они размерностью величины, измеряемой датчиком.

### 2.3.1 Диапазон ввода

Появление данного типа шума обусловлено дискретной природой датчика. Частота дискретизации АЦП и разрешающая способность датчика2 конечна, поэтому результаты, возвращаемые датчиком несколько отличаются от исходных аналоговых данных. В зависимости от типа аналого-цифрового преобразования шум может возникать из-за округления (до определённого разряда) сигнала или усечения (отбрасывания младших разрядов) сигнала. Шум квантования обладает малым временем корреляции, или, что эквивалентно, широкой полосой пропускания и легко может быть отфильтрован полосовым фильтром. Ошибка данного типа не накапливается с течением времени.

### 2.3.2 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.

### 2.3.3 Случайное блуждание (дрейф) угла

Дрейф угла – основная шумовая компонента в выходных данных MEMS-датчиков. Представляет собой компоненту аддитивного белого шума , проявляется в отклонении значений от ожидаемых случайным образом; влияет на результат интегрирования (для преобразования измеряемой датчиком угловой скорости в угол поворота): в случае, если датчик стационарен, ожидается, что результат интегрирования будет равен нулю, но под воздействием белого шума показания датчика колеблются случайным образом; при этом среднее отклонение растет с ростом времени.

Примером случайного блуждания является дрейф угла гироскопических датчиков (датчиков угловых скоростей). Для указанного типа датчиков значение дрейфа угла измеряется в ◦/√ч и характеризует точность датчика, которая ограничивается уровнем белого шума в выходном сигнале угловой скорости гироскопа. С ростом показателя дрейфа угла, увеличиваются отклонения в значениях углов и угловых скоростей. Дрейф угла в 0.003 ◦/√ч показывает, что спустя 6 минут ошибка угла составляет 0.001 ◦ , а спустя 1 минуту – 0.0004 ◦ .

### 2.3.4 Случайное блуждание (дрейф) скорости

Данный вид шума представляет собой случайное блуждание реально измеряемых датчиком физических величин, таких как ускорение, угловая скорость. Ошибка детерминированная, на больших промежутках времени (несколько часов) наблюдается медленное монотонное отклонение значений. Шум неизвестной природы с очень большим временем корреляции. Чтобы оценить его любым из методов аппроксимации, необходимо снять с датчиков значительное количество данных, но при этом на больших промежутках времени данные с датчика подвержены влияниям условий среды (в частности, наиболее существенное влияние оказывает изменение температуры в ходе эксперимента) и этот шум может теряться на фоне воздействий нестабильности среды. Измеряется в

### 2.3.5 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:

, (3)

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.

### 2.3.6 Фликкер-шум / Нестабильность смещения

Смещение MEMS-гироскопа со временем отклоняется из-за фикерного шума в электронике и других компонентах, подверженных случайному фикерству. Фликкер-шум - это шум со спектром 1/f (розовый шум), эффекты которого обычно наблюдаются на низких частотах в электронных компонентах. На высоких частотах шум фликера обычно затеняется белым шумом. Флуктуации смещения, возникающие из-за фликкер-шума, обычно моделируются как случайное блуждание.

Измерение стабильности смещения описывает, как смещение устройства может изменяться в течение определенного периода времени, обычно около 100 секунд, в фиксированных условиях (обычно с постоянной температурой). Стабильность смещения обычно задается как значение 1σ с единицами ◦ / ч или ◦ / с для менее точных устройств. Под моделью случайного блуждания стабильность смещения можно интерпретировать следующим образом; Если Bt является известным смещением в момент времени t, то стабильность смещения 1σ, равная 0,01◦ / ч в течение 100 секунд, означает, что смещение во время (t + 100) секунд является случайной величиной с ожидаемым значением Bt и стандартным отклонением 0,01◦ / ч. , Со временем это свойство создает случайное блуждание в смещении гироскопа, стандартное отклонение которого растет пропорционально квадратному корню времени. По этой причине стабильность смещения иногда определяется измерением случайного блуждания смещения

, (2)

где BRW – случайное блуждание смещения, BS – значение стабильного смещения, t – временной интервал, для которого определяется стабильность смещения

В данном случае нас интересует, как эта ошибка влияет на ориентацию, полученную при интегрировании сигнала скоростного гироскопа. Если мы примем модель случайного блуждания смещения, то результатом интегрирования колебаний смещения будет случайное блуждание второго порядка по углу. В действительности колебания смещения не ведут себя как случайное блуждание. Если они это сделают, то неопределенность в смещении устройства будет расти без ограничений с увеличением времени. На практике смещение ограничено определенным диапазоном, и поэтому модель случайного блуждания является хорошим приближением к истинному процессу в течение коротких периодов времени.

### 2.3.7 Не ортогональность датчика (Несоосность)

Три гироскопа и три акселерометра установлены ортогонально друг другу. однако крепления имеют ошибки и поэтому не идеальные 90 градусов. Это приводит к корреляции между датчиками. Например, предположим, что одна ось точно направлена вверх, а IMU это нулевой уровень. Акселерометр на этой оси измеряет силу тяжести. Если бы две другие оси были совершенно ортогональны, они бы не измеряли влияние гравитации на показания. Если есть не ортогональность, другие оси также измеряют гравитацию, что приводит к корреляции в измерениях.

Влияние не ортогональности происходит в наборах датчиков (между акселерометрами или гироскопами), между комплектами датчиков или между комплектами датчиков и корпусом. Тщательное изготовление, а также заводская калибровка могут помочь минимизировать этот источник ошибки. Непрерывная оценка и коррекция во время работы системы также подход, используемый для минимизации этого эффекта. Смещение осей (между IMU и корпусом) можно устранить, выполнив *boresighting* вычисление для определения смещения между корпусом и осями датчика.

### 2.3.8 Температурные эффекты

Колебания температуры из-за изменений в окружающей среде и саморазогрев датчика вызывают движение в предвзятости. Обратите внимание, что такие движения не включены в измерения стабильности смещения, которые принимаются при фиксированных условиях.

Любое остаточное смещение, вызванное изменением температуры, приведет к ошибке ориентации, которая растет линейно со временем, как описано в разделе 2.3.5 . Связь между смещением и температурой часто нелинейна для датчиков MEMs. Большинство инерциальных единиц измерения (IMU) содержат внутренние датчики температуры, которые позволяют корректировать влияние смещения, вызванного температурой.

### 2.3.9 Ошибки калибровки

Ошибки калибровки (ошибки в масштабных коэффициентах, выравниваниях и линейных выходных сигналах) отображаются как ошибки смещения, которые видны только во время ускорения устройства. Обратите внимание, что эти «временные» ошибки смещения могут наблюдаться, даже когда устройство неподвижно из-за гравитационного ускорения.

### 2.3.10 G зависимость (эффект ускорения)

Некоторые гироскопы и акселерометры могут изменяться в зависимости от того, как датчик испытывает ускорение. Это наиболее часто встречается в микроэлектромеханических системах (MEMS) гироскопов, когда масса претерпевает ускорение вдоль чувствительной оси. Этот эффект может быть смоделирован и удален из измерений и часто включается в ступень состояния сигнала IMU перед выводом результатов измерений.

### 2.3.11 Шум квантования

Появление данного типа шума обусловлено дискретной природой датчика. Частота дискретизации АЦП и разрешающая способность датчика конечна, поэтому результаты, возвращаемые датчиком несколько отличаются от исходных аналоговых данных. В зависимости от типа аналого-цифрового преобразования шум может возникать из-за округления (до определённого разряда) сигнала или усечения (отбрасывания младших разрядов) сигнала. Шум квантования обладает малым временем корреляции, или, что эквивалентно, широкой полосой пропускания и легко может быть отфильтрован полосовым фильтром. Ошибка данного типа не накапливается с течением времени.

### 2.3.12 Синусоидальный шум

Синусоидальный шум– шум, порождаемый вибрациями в компонентах датчика. Принцип работы любых MEMS-датчиков основан на измерении вибрации/вращений компонентов устройства, особенно гироскопов, которые получают данные на основе измерения кориолисовой силы. Этим обусловлено зашумление выходного сигнала датчика псевдодетерменированной синусоидальной компонентой, непосредственно связанной с резонансной частотой его компонентов. При частоте шума, близкой к частоте сэмплирования датчика, практически незаметен на графике отклонения Аллана, т.к. он теряется на фоне белого шума (дрейфа угла) датчика.

# ГЛАВА 3 Моделирование ДАТЧИКОВ В СРЕДЕ MATLAB

При помощи пакета прикладных программ MATLAB можно моделировать различные инерциальные датчики, такие как: акселерометр, гироскоп, магнитрометр. Моделирование можно производить для различных идеальных значений датчиков, т.е. с отсутствием каких-либо ошибок или шумов. При моделировании так же можно производить его с учётом различных ошибок, смещений, диапазонов данных и т.д.

## 3.1 Navigation Toolbox

Моделирование происходит при помощи тулбокса Navigation Toolbox.

Navigation Toolbox™ предоставляет алгоритмы и аналитические инструменты для разработки планирования движения и систем навигации. Тулбокс содержит настраиваемых поисковых и основанных на выборке планировщиков пути. Это также содержит модели датчика и алгоритмы для оценки положения мультидатчика. Можно создать 2D и 3D представления карты с помощью собственных данных или сгенерировать карты с помощью алгоритмов одновременной локализации и отображения (SLAM), включенных в тулбокс. Справочные примеры предусмотрены самоходные и приложения робототехники.

Можно сгенерировать метрики для сравнения оптимальности пути, гладкости и сравнительных тестов производительности. Разработчик карты SLAM приложение позволяет вам в интерактивном режиме визуализировать и отладить генерацию карты. Можно протестировать алгоритмы путем развертывания их непосредственно в оборудование (с MATLAB® Coder™ или Simulink® Coder).

## 3.2 Введение в симуляцию измерений IMU

Ниже будет показано, как симулировать измерения инерционного модуля измерения (IMU) с помощью imuSensor Системный объект. IMU может включать комбинацию отдельных датчиков, включая гироскоп, акселерометр и магнитометр. Можно задать свойства отдельных датчиков с помощью gyroparams, accelparams, и magparams, соответственно.

### 3.2.1 Accelparams class

Описание: Accelparams класс создает объект параметров датчика акселерометра. Можно использовать этот объект смоделировать акселерометр при симуляции IMU с imuSensor.

Конструкция: params = accelparams возвращает идеальный объект параметров датчика акселерометра со значениями по умолчанию.

params = accelparams(Name,Value) конфигурирует датчик акселерометра свойства объектов параметров с помощью одного или нескольких Name-Value парные аргументы. Name имя свойства и Value соответствующее значение. Name должен появиться в одинарных кавычках (''). Можно задать несколько аргументов пары "имя-значение" в любом порядке как (Name1,Value1,...,NameN,ValueN). Любые незаданные свойства берут значения по умолчанию.

При помощи accelparams можно задавать следующие параметры моделируемому датчику (в скобочках указаны единицы измерения):

* MeasurementRange – максимальное показание датчика.
* Resolution — размер шага цифровых измерений. При помощи этого параметра можно смоделировать эффекты квантования
* ConstantBias — постоянное смещение смещения датчика
* AxesMisalignment — смещение осей датчика (%)
* NoiseDensity — степень спектральная плотность шума датчика
* BiasInstability — нестабильность смещения смещения
* RandomWalk — интегрированный белый шум датчика
* TemperatureBias — смещение датчика от температуры
* TemperatureScaleFactor — скалирование ошибки от температуры

### 3.2.2 Моделирование акселерометра

Смоделируем идеальный случай в котором будут отсутствовать любые ошибки используя в качестве распределения ускорения распределение Лоренца (Рис. 11)

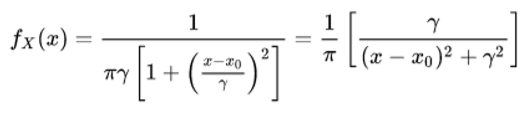


Рис. 11 Распределение Лоренца

Рисунок 1

Для моделирования акселерометра используется два файла MATLAB: main.m (Приложение А) и myFunc.m (Приложение Б).

После моделирования можно интегрированием получить скорость и положение некоторого объекта. Интегрирование будет производиться путём встроенной в MATLAB функции cumtrapz — интегрирование методом трапеций.

После полного выполнения кода для идеального случая получаем три графика: a(t), V(t), S(t) соответствующие графики на Рис. 12

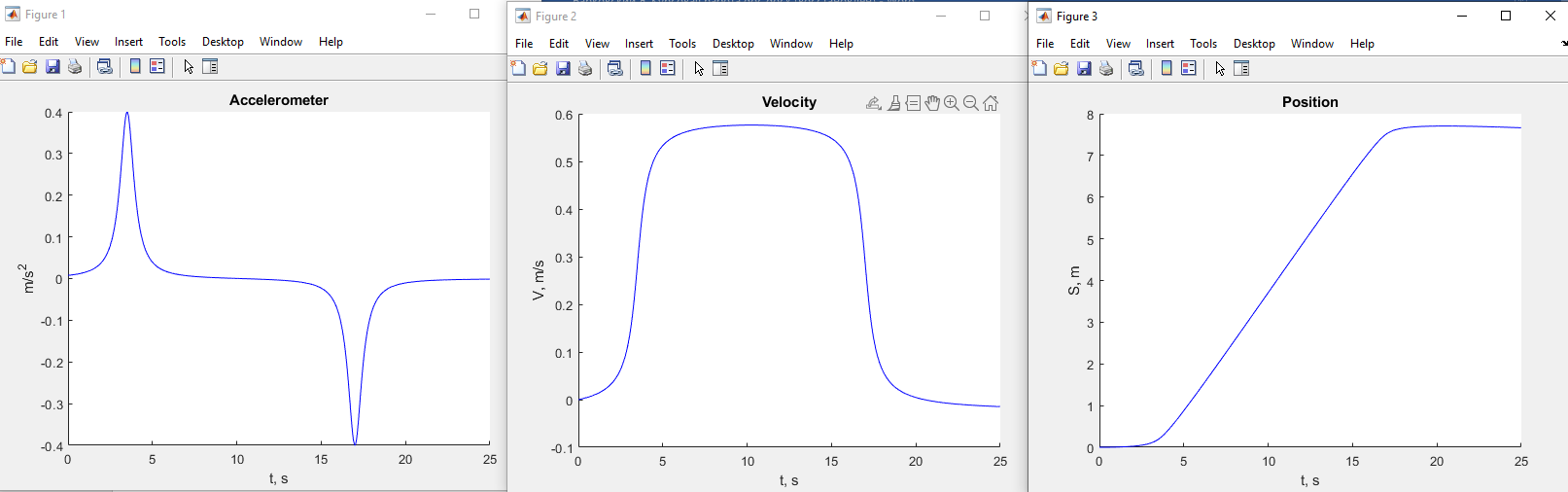


Рис. 12 моделирование идеального случая

После моделирования идеального случая можно проверить влияние ошибок на результат двойного интегрирования. Для этого будем задавать стабильность смещения (Bias Stability) BS = 0.15 и опять запустим код из Приложение А и Приложение Б, убрав знаки “%” перед функциями plot с параметром ‘red’ и поставив знак “%” перед функциями plot c параметром 'blue' в файле main.m. В результате моделирования и интегрирования получаем графики изображённые на Рис. 13

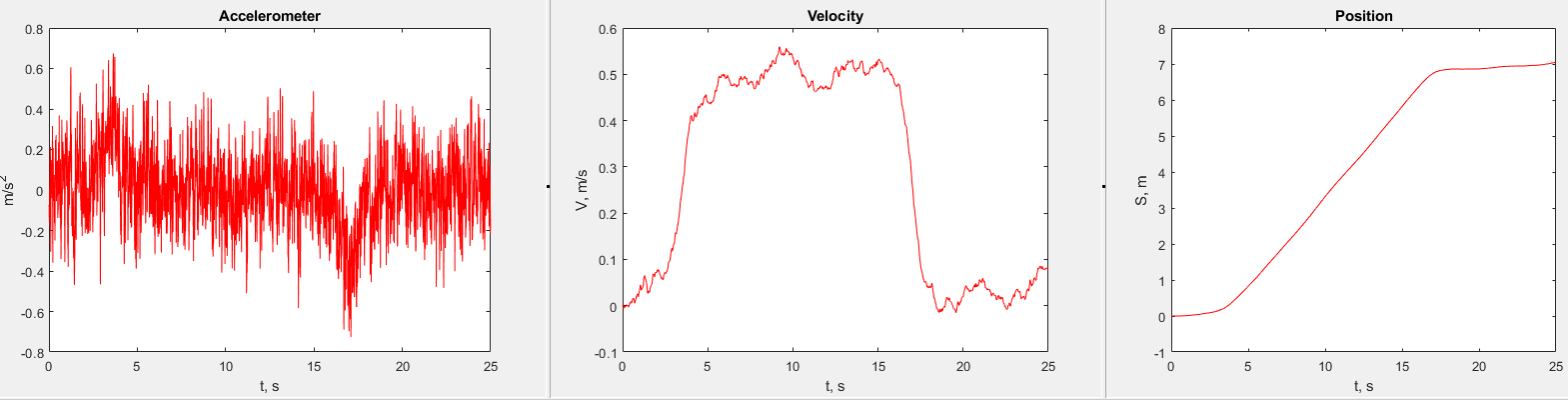


Рис. 13 моделирование с заданной стабильностью смещения

Для того чтобы ещё лучше отобразить различия полученных графиков произведём наложение их друг на друг друга. Перед моделированием необходимо убрать знак “%” перед функциями plot с параметром ‘blue’ файла main.m. Результат наложения графиков виден на Рис. 14, Рис. 15 , Рис. 16. Где красный цвет обозначает модуляцию с заданной стабильностью смещения, а синий цвет модуляцию без ошибок.

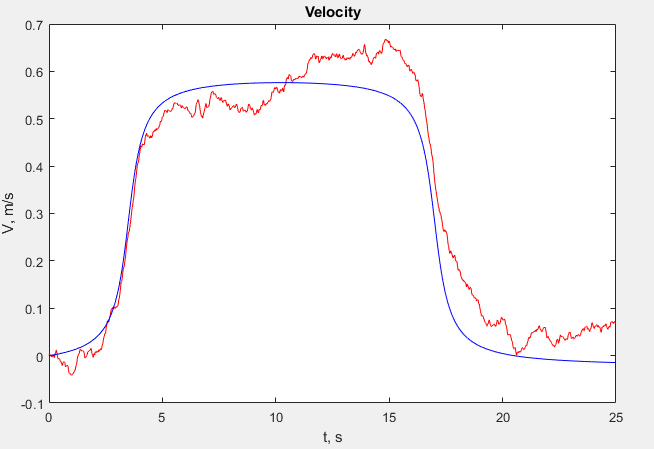


Рис. 14 результат наложения скоростей двух модуляций

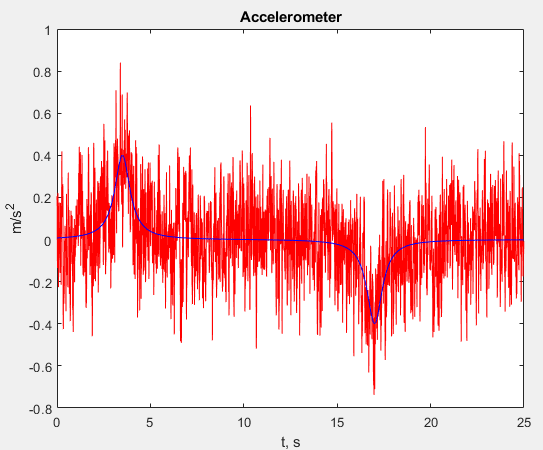


Рис. 15 результат наложения ускорений двух модуляций

После анализа графиков видно, что даже относительно небольшое значение стабильности смещения BS = 0.15 отличное от 0 имеет явное влияние на конечный результат интегрирования, что в принципе было оговорено в 2.3.6 для MEMS гироскопа.

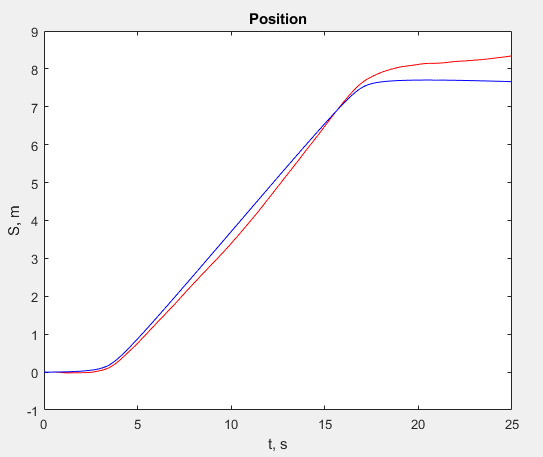
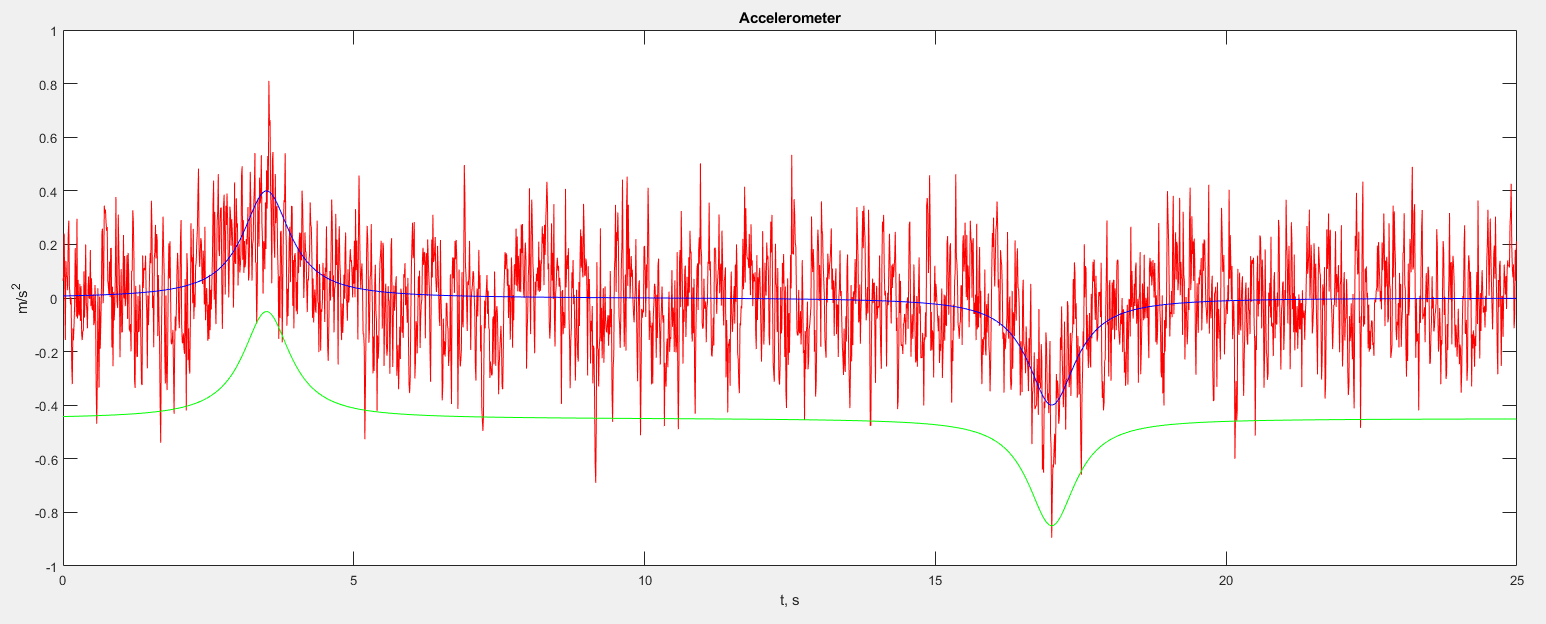


Рис. 16 результат наложения позиций двух модуляций

Проведём ещё одно моделирование, но уже с постоянным смещением, убрав знаки '%' перед функциями plot с параметром ‘green’ для построения очередной модели. Установим постоянное смещение равным 0.45 и не будем убирать отображение красной модели с заданной стабильностью смещения BS = 0.15. Результат моделирования и интегрирования представлен на Рис. 17, Рис. 18, Рис. 19, где они имеют зелёный цвет.

Рис. 17 наложение трех модуляций



В данном случае можно сразу же заметить как изменилось ускорение, а конкретно изменение на 0.45 , т.е. на заданное постоянное смещение. Последствия такого “радикального” изменения ускорения видны на графиках скоростей и позиций, где значения скоростей в последний момент времени различаются на более чем 11 , что значительно, а конечная позиция отличается на более 120 м.

Рис. 19 наложение значений позиций

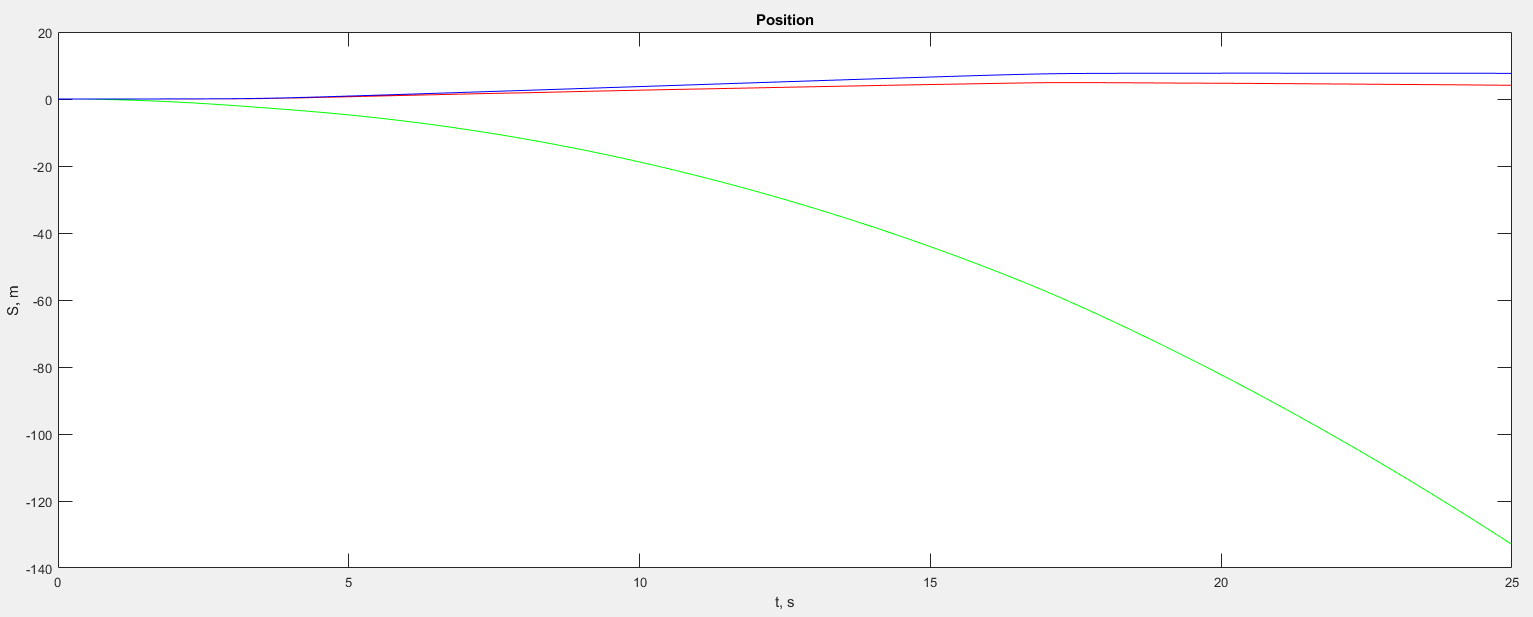
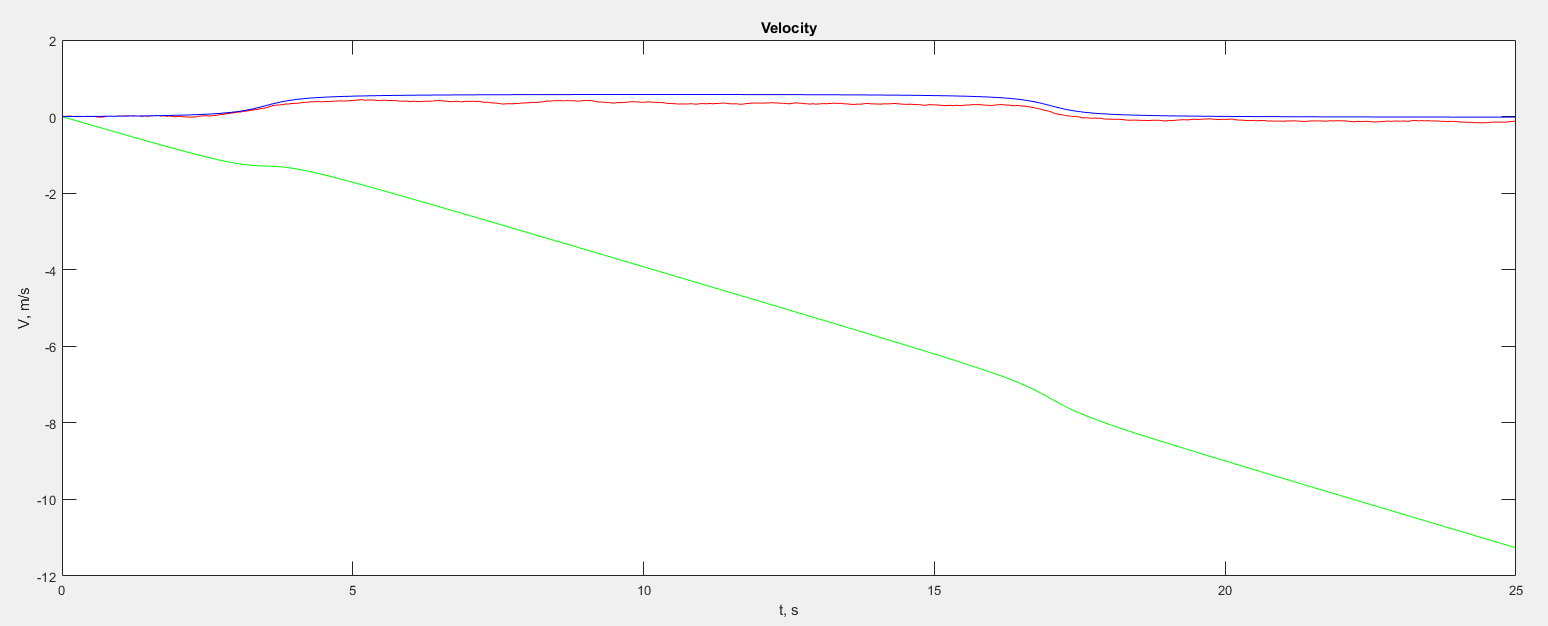


Рис. 18 наложение скоростей 3 модуляций



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены основные цифровые инерциальные датчики, за исключением магнитометра, используемые в инерциальной навигации и вообще во всём мире. Были описаны виды базовых инерциальных систем и инерциальных датчиков, которые относятся к этим базовым инерциальным системам при различных конфигурациях.

Подробно были рассмотрены инерциальные датчики, а конкретнее акселерометр и гироскоп. Были выделены основные виды этих датчиков и достаточно подробно описаны виды ошибок возникающих в них, а так же, для некоторых из ошибок, было подробнее описано значение этих ошибок и их источники.

В последней части работы было произведено моделирование акселерометра с различными начальными параметрами, в виде которых выступали значения ошибок. Из моделирования были получены графики зависимостей ускорения от времени. После при помощи двойного интегрирования были получены значения скоростей и координат, которые после были выведены на графики для сравнения. По графикам отчётливо видно изменения в конечных данных при наличии какой-либо ошибки из представленных.

Для избегания таких сильных отклонений в результатах вычислений и измерений часто используются несколько датчиков, как один целый, которые друг друга дополняют, например: 9-осевой акселерометр, который, по сути, состоит из одного 3-осевого акселерометра, 3-осевого гироскопа и 3-осевого магнитометра. Так же производители сами вычисляют значения ошибок, погрешностей для своей модели датчика, чтобы пользователи могли избежать некоторых неожиданностей после измерения необходимых значений.

# 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 Oliver J.Woodman, An introduction to inertial navigation, August 2007
3. APN-064 IMU Errors and Their Effects, С. 3-6
4. М.А. Литвин , А.А. Малюгина , А.Б. Миллер, А.Н. Степанов , Д.Е. Чикрин, Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации, С. 326 - 329
5. KTonix, AN 012, Accelerometer Errors
6. С. Сысоева, Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения. С. 40-42

<https://www.mathworks.com/help/nav/index.html?s_tid=CRUX_lftnav>

<https://www.mathworks.com/help/nav/ug/introduction-to-simulating-imu-measurements.html>

<https://www.mathworks.com/help/nav/ref/imusensor-system-object.html#d120e37642>

<https://www.mathworks.com/help/fusion/ref/accelparams-class.html>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_navigation_system>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Sagnac_effect>

<http://sf.ifmo.ru/ru/projects/fog/ru>

# ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Код MATLAB для моделирования

акселерометра (файл main.m)

1. clc
2. close all
3. % класс accelparams
4. paramsC = accelparams('ConstantBias',0.45); % с постоянным смещением
5. paramsF = accelparams('BiasInstability', 0.15); % с заданным нестабильным смещением
6. paramsI = accelparams; % идеальный случай
7. Acc\_1 = myFunc(paramsI); % моделирование с заданными параметрами (идеально)
8. Acc\_2 = myFunc(paramsF); % с нестабильным смещением
9. Acc\_3 = myFunc(paramsF); % с постоянным смещением
10. %Построение графиков и интегрирование
11. figure
12. plot(t, Acc\_2, 'red')
13. hold on
14. % plot(t, Acc\_3, 'green')
15. plot(t, Acc\_1, 'blue')
16. title('Accelerometer')
17. xlabel('t, s')
18. ylabel('m/s^2')
19. figure
20. Xv\_1 = cumtrapz(t, Acc\_1); % Получение скорости из интегрирования ускорения
21. Xv\_2 = cumtrapz(t, Acc\_2);
22. Xv\_3 = cumtrapz(t, Acc\_3);
23. plot(t, Xv\_2, 'red');
24. hold on
25. % plot(t, Xv\_3, 'green')
26. plot(t, Xv\_1, 'blue');
27. title('Velocity')
28. xlabel('t, s')
29. ylabel('V, m/s')
30. figure
31. Xp\_1 = cumtrapz(t, Xv\_1); % Получение позиции из интегрирования скорости
32. Xp\_2 = cumtrapz(t, Xv\_2);
33. Xp\_3 = cumtrapz(t, Xv\_3);
34. plot(t, Xp\_2, 'red');
35. hold on
36. % plot(t, Xp\_3, 'green')
37. plot(t, Xp\_1, 'blue');
38. title('Position')
39. xlabel('t, s')
40. ylabel('S, m')

Приложение Б

Код MATLAB для моделирования

акселерометра (файл MYFUNC.m)

function [ accel ] = myFunc( params )

Fs = 100; % частота дискретизации

numSamples = 2500; % кол-во выборок

t = (0:(1/Fs):((numSamples-1)/Fs)).'; % время t

f = @(x) 0.2\*0.5./((x-3.5).^2 + 0.5^2) - 0.2\*0.5./((x-17).^2 + 0.5^2); % распределение Лоренца

imu = imuSensor('SampleRate', Fs, 'Accelerometer', params);

orient = quaternion.ones(numSamples, 1);

acc = zeros(numSamples, 3);

angvel = zeros(numSamples, 3);

acc(:,1) = f(t); % задание ускорений

[accelData] = imu(acc, angvel, orient); % моделирование ускорения

accelData(:, 1) = accelData(:, 1) \* -1;

accel = accelData(:, 1);

end