

# Применимость инерциальных систем навигации в мобильных устройствах

Бутаков Н.А.

**Аннотация** - В данной работе изучается возможность использования инерциальных систем навигации для решения вопроса взаимного позиционирования мобильных устройств. Рассматриваются существующие подходы к инерциальным системам навигации и способы борьбы с погрешностью позиционирования мобильных устройств при применении инерциальной системы навигации.

**Ключевые слова** – акселерометр, гироскоп, инерциальная система, навигация, мобильное устройство.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем мобильных технологий является проблема навигации. Существует множество способов навигации мобильных устройств – GPS-навигация, отслеживание при помощи задержки в получении сигнала до нескольких передатчиков, системы контрольных точек – и многие другие. Помимо позиционирования на местности, мобильным устройствам также нередко бывает необходима информация об их взаимном расположении относительно друг друга.

Перечисленные выше способы отслеживания мобильных устройств имеют своё применение в различных областях, однако они не являются автономными. GPS-навигация не всегда обладает высокой точностью, а также не всегда доступна. Измерение задержки сигнала до точек доступа требует развития и поддержки специальной инфраструктуры на местности, где планируется проводить навигацию. Системы контрольных точек не дают достаточного количества информации. Всё это приводит к идее о реализации системы, которая позволила бы проводить отслеживание мобильных устройств автономно. Именно этого и можно достичь при помощи инерциальной системы навигации.

Основная идея такой системы заключается в том, чтобы, основываясь на некоторой начальной информации о местонахождении объекта, отслеживать его перемещение на основании показаний датчиков мобильного устройства - акселерометра и гироскопа. Подобные системы уже реализованы в авиационной навигации самолётов и в некоторых других областях. Но возможно ли применение инерциальной системы навигации в мобильных устройствах? Достаточно ли точными данными она будет обеспечивать пользователя? Этим вопросам и посвящена данная работа.

## II. ОБЗОР ПОДХОДОВ К ИНЕРЦИАЛЬНЫМ СИСТЕМАМ НАВИГАЦИИ

Прежде чем перейти к рассмотрению возможности применения инерциальных систем навигации (ИНС) в мобильных устройствах, следует сначала разобраться подробнее, как они работают, какими преимуществами и недостатками обладают, и какие подходы к их реализации уже существуют.

ИНС в последнее время получают всё большее распространение для решения задач управления пространственным движением объектов, поскольку позволяют получить информацию об угловом и поступательном движении рассматриваемого объекта. Эти системы при условии введения в них некоторого объёма начальной информации об окружающих полях, о системах координат и т.п., позволяют автономно определять требуемые для управления навигационные параметры с нужной точностью во время движения объекта. Первичная информация ИНС измеряется с помощью датчиков параметров поступательного движения (акселерометров (А) или, гироинтеграторов (ГИ) линейных ускорений) и датчиков параметров углового движения объекта, обычно гироскопических. Эта информация (как правило, измеренные вектор кажущегося ускорения и вектор абсолютной угловой скорости) обрабатывается в бортовом вычислителе с целью получения интересующей навигационной информации об ориентации, скоростях движения и местоположении объекта.

Инерциальные навигационные системы обладают рядом преимуществ, таких, как автономность, помехозащищённость, достаточная точность, приемлемые габаритно-весовые характеристики и т.п. – перспективы развития и совершенствования этих систем, несомненно, велики. Это связано не в последнюю очередь с возможностью применения при их разработке современных чувствительных элементов (динамически настраиваемых, лазерных, роторных вибрационных гироскопов (РВГ), микромеханических гироскопов (ММГ), волновых твердотельных гироскопов и т.п.) и достижений в области создания бортовых вычислительных машин.

Инерциальный метод счисления пути основывается на двукратном интегрировании по времени абсолютных ускорений, измеряемых акселерометрами с целью получения информации о скоростях и координатах местоположения объекта. Однако, показания акселерометра при произвольной ориентации его оси чувствительности определяются вектором кажущегося ускорения (векторной суммой абсолютного ускорения и напряженности поля тяготения Земли):

$$\vec{a}^k = \frac{d^2 \vec{R}}{dt^2} - \vec{g}(\vec{R}) \quad (1.1)$$

или

$$\vec{a}^k = \vec{a} - \vec{g}(\vec{R}), \quad (1.2)$$

где  $\vec{a}^k$  – вектор кажущегося ускорения;  $\vec{a}$  – вектор абсолютного ускорения;  $\vec{g}(\vec{R})$  – вектор напряженности поля тяготения Земли.[1]

Показания пространственного акселерометра можно представить в виде:

$$\vec{n} = k \vec{a}^k = k[\vec{a} - \vec{g}(\vec{R})] \quad (1.3)$$

при  $k=1$  (условно) показания его:

$$\vec{n} = \vec{a} - \vec{g}(\vec{R}) \quad (1.4)$$

В связи с тем, что решение задачи навигации требует интегрирования ускорений, вызванных действием лишь активных сил (сил, приводящих объект в движение), то содержащаяся в показаниях акселерометра информация о  $\vec{g}(\vec{R})$  необходимо (из подлежащего обработке сигнала) исключить. Этого можно добиться двумя способами: во-первых, удерживая в процессе движения оси чувствительности акселерометров в плоскости местного горизонта (перпендикулярно вектору  $\vec{g}(\vec{R})$ ), и, во-вторых, (при произвольной ориентации осей чувствительности акселерометров) исключать проекции вектора  $\vec{g}(\vec{R})$  на направления осей чувствительности акселерометров аналитически, обрабатывая их выходные сигналы, для чего необходимо для любого движения измерительных осей определять их ориентацию в базовых осях и вычислять проекции вектора  $\vec{g}(\vec{R})$  на измеренные или вычисленные направления.

Этим двум способам компенсации ускорения поля тяготения Земли в показаниях акселерометров соответствуют и способы построения инерциальных систем, исключая вектор  $\vec{g}(\vec{R})$ : физически (удерживая акселерометры в плоскости местного горизонта) и аналитически (вычисляя его проекции на направления осей чувствительности акселерометров) или проектируя показания ньютометров на оси горизонтальной системы координат – иногда говорят в «ноль плоскость вектора  $\vec{g}$ »)

Для расчёта навигационных данных могут быть использованы релятивистский и нерелятивистский подходы к построению уравнений. Отличие заключается в сопоставлении «бортового» времени в навигационной системе с глобальным временем в неподвижной системе отсчёта. В нерелятивистских уравнениях «бортовое» время совпадает с координатным, в то время как в релятивистских используют понятие параметра скорости  $\psi$ , связанного с вектором скорости. Сами по себе релятивистские уравнения представляют предельный переход от нерелятивистских при ( $\psi \rightarrow 0$ ).[2]

В зависимости от способа построения цепи обратной связи и, в частности, от способа реализации на подвижном объекте горизонтальной системы координат различают несколько схем построения ИНС. Традиционными схемами построения ИНС являются *аналитическая*, *геометрическая* и *полуаналитическая*. Общим для упомянутых схем является использование гироскопических стабилизированных платформ, управляемых и неуправляемых. Однако, в последнее время все большее внимание уделяется созданию ИНС, формально подпадающих под определение

аналитической схемы, но отличающихся отсутствием гиросtabilизированной платформы (для стабилизации акселерометров, тогда как для решения задачи определения ориентации, например, могут быть использованы одноосные гиросtabilизаторы) и называемых бесплатформенными инерциальными навигационными системами (БИНС).

В ИНС аналитического типа акселерометры располагаются на гиropлатформе, стабилизированной относительно заданной инерциальной системы отсчета. Горизонтальная система координат на движущемся объекте при этом физически не материализуется, кроме, может быть, начального момента работы системы, что может упростить проблемы начальной выставки системы, а необходимые преобразования сигналов и их интегрирование осуществляются с помощью вычислительного устройства (ВУ) цифрового типа (бортовая цифровая вычислительная машина – БЦВМ).

ИНС аналитического типа является замкнутой динамической системой. Основные источники погрешностей – ошибки начальной выставки, погрешности акселерометров, дрейф гироскопов (неопределенность которого обусловлена поворотом осей гироскопов в поле тяготения Земли в функции от координат места в процессе движения объекта), нестабильность параметров элементов системы и др. ИНС аналитического типа целесообразно использовать для высокоскоростных объектов с малым временем работы системы (чтобы не ужесточать требований к датчикам моментов гироскопов ИНС иных типов, построенных на использовании управляемых гиросtabilизированных платформ). К ИНС аналитического типа также могут быть отнесены и бесплатформенные или бескарданные инерциальные системы (БИНС), чувствительные элементы которых (гироскопы и акселерометры) устанавливают непосредственно на корпусе подвижного объекта. Гироскопы (датчики угловой скорости, поплавковые интегрирующие, свободные и одноосные гиросtabilизаторы.) служат для определения параметров углового движения (ориентации – в конечном счете) объекта, а акселерометры (или гиросинтезаторы линейных ускорений) – для определения параметров поступательного движения (скоростей и координат местоположения).[1]

Бесплатформенная система может быть построена, например, на трех гироскопических датчиках угловой скорости (ДУС) и трех акселерометрах – измерителях проекций кажущегося ускорения на оси связанной с корпусом объекта системы координат.

Требования к диапазонам и точностным характеристикам приборов – чувствительных элементов БИНС весьма жесткие и высокие, что обусловлено условиями их работы при жестком закреплении на корпусе движущегося объекта. Аналитическая схема построения ИНС и бесплатформенные системы компенсируют вектор  $\vec{g}(\vec{R})$  аналитически (в вычислителе). Не меньшее распространение имеют для подвижных объектов и системы инерциальной навигации, физически устраняющие составляющие вектора  $\vec{g}(\vec{R})$  в показаниях акселерометров (удерживающие в процессе движения объекта оси

чувствительности акселерометров в плоскости местного горизонта). К таким схемам ИНС относятся *геометрическая* и *полуаналитическая*.

В ИНС геометрического типа акселерометры со взаимно перпендикулярными осями чувствительности при движении объекта разворачиваются относительно свободной гиросtabilизированной платформы (ГСП), неизменно ориентированной в инерциальном пространстве и геометрически воспроизводящей базовую СК в собственном кардановом подвесе. Эти повороты осуществляются с помощью исполнительных двигателей (ИД) на углы поворота вертикали места (равно плоскости местного горизонта) в инерциальном пространстве вследствие движения объекта вокруг Земли таким образом, что оси чувствительности двух (горизонтальных) акселерометров остаются перпендикулярными вектору  $\vec{g}(\vec{R})$ , чем и достигается физическое устранение информации об этом векторе из показаний горизонтальных акселерометров.[1]

В геометрической ИНС вторые интеграторы горизонтальных каналов охвачены отрицательными обратными связями, что несколько снижает влияние их инструментальных погрешностей на точность работы ИНС. Вместе с тем, из-за дополнительного карданова подвеса акселерометров кинематика и конструкция такой системы сложнее ИНС других типов. По совокупности упомянутых моментов ИНС геометрического типа целесообразно применять для маломаневренных, движущихся с малыми ускорениями, объектов, таких как корабль или подводная лодка.

Основные инструментальные погрешности ИНС обусловлены дрейфом гироскопов, меняющих при движении объекта ориентацию в поле тяготения Земли; погрешностями акселерометров; нестабильностью параметров системы; ошибками начального ориентирования и др.

В ИНС полуаналитического типа акселерометры располагаются на управляемой гиropлатформе (с интегральной коррекцией по схеме, предложенной в 1932 г. В.Б. Левенталем). Цепь обратной связи в каждом из двух горизонтальных каналов системы образуется формированием сигнала с выхода первого интегратора на датчик момента соответствующего гироскопа: сигналы пропорциональны угловым скоростям разворота плоскости местного горизонта при движении объекта вокруг Земли  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ . Гироскопы, управляемые по скорости разворота вертикали места (плоскости местного горизонта), вызывают прецессию площадки с акселерометрами в инерциальном пространстве таким образом, что оси чувствительности их остаются в горизонтальной плоскости. Применение интегральной коррекций устраняет скоростные девиации и позволяют осуществить невозмещаемую ускорениями движениями объекта инерциальную вертикаль. В азимуте стабилизированная платформа ориентируется в соответствии с выбранной системой отсчета и может корректироваться в полете.[1]

Трехосная ГСП может быть реализована по любой схеме построения (например, на трех двухступенных гироскопах), а площадка с гироскопами и акселерометрами должна быть точно выставлена в горизонт в момент начала работы системы. Вычислительное устройство (ВУ) для двойного

интегрирования измеренных ускорений (с целью коррекции инерциальной вертикали и получения значений текущих скоростей и координат) формирует и сигналы компенсации центробежных и кориолисовых ускорений, содержащихся в выходных сигналах акселерометров.

Процесс построения вертикали обеспечивается совместной работой систем стабилизации (разгрузки) и интегральной коррекции. Обе системы трехканальные. Система стабилизации платформы включает в себя гироскопы  $G_x, G_y, G_z$  с датчиками углов, усилители стабилизации (на рисунке не показаны), двигатели стабилизации  $ДС_x, ДС_y, ДС_z$  и преобразователь координат (ПК), исполнительные элементы системы коррекции – датчики моментов гироскопов. По осям карданова подвеса платформы располагаются датчики углов (вращающиеся трансформаторы – ВТ) для измерения угловой ориентации объекта в горизонтальной СК, реализованной стабилизированным элементом. Чаще всего ИНС полуаналитического типа используется на летальных аппаратах (самолетах или некоторых классах крылатых ракет). Вторые интеграторы горизонтальных каналов, служащие для вычисления составляющих пути, не охвачены обратными связями и работают в разомкнутой схеме. Погрешности этих интеграторов непосредственно влияют на выходную точность ИНС.

Основные инструментальные погрешности построения инерциальной вертикали и определения навигационных параметров обусловлены дрейфом гироскопов, погрешностями акселерометров и начальной выставки и другими.

### III. РАССМОТРЕНИЕ ДАТЧИКОВ ДВИЖЕНИЯ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ.

**Одноосевой MEMS-гироскоп с вибрирующим кремниевым кольцом.** Данный кремниевый цифровой гироскоп разработан с учетом требований к низкой стоимости изделия и экономичному энергопотреблению для систем навигации и наведения нового поколения. Он способен измерять угловую скорость до  $\pm 1,0$  е/с и имеет два режима вывода: аналоговый сигнал напряжения, линейно-пропорциональный угловой скорости, и цифровой по протоколу SPI®.

Режим вывода – аналоговый или цифровой – выбирается пользователем при подключении датчика к какой-либо системной плате. Главной отличительной особенностью гироскопа является применение технологии сбалансированного вибрирующего кольца в качестве датчика угловой скорости. Именно она обеспечивает надежную работу и точное измерение скорости вращения даже в условиях сильной вибрации. Датчик состоит из пяти основных компонентов: кремниевый кольцевой МЭМС-сенсор (MEMS-ring), основание из кремния, интегральная микросхема гироскопа, корпус, крышка.

Гироскопы в мобильных устройствах являются, как правило, твердотельными элементами без подвижных частей, исключая лишь сенсорное кольцо – возможность отклоняться необходима ему, чтобы показывать величину и направление угловых скоростей за счет использования эффекта от силы Кориолиса.

Кориолисова сила воздействует на кремниевое кольцо во время вращения гироскопа, в результате чего происходит радиальное движение кольца по периметру. По периметру кольца расположены равномерным образом восемь приводов. При этом есть одна пара первичных снимающих преобразователей, которые расположены относительно главных осей приводов первичного движения ( $0^\circ$  и  $90^\circ$ ). Есть также две пары вторичных переключающих преобразователей, которые расположены относительно вторичных осей этих приводов ( $45^\circ$  и  $135^\circ$ ). Первичные переключающие преобразователи действуют совместно с приводами первичного движения в замкнутой системе, возбуждая и контролируя первичную рабочую вибрационную амплитуду и частоты (22 кГц).

В то же время, радиальное движение на вторичных осях распознаётся вторичными снимающими преобразователями. Величина этого движения пропорциональна угловой скорости вращения, из-за которой гироскопу придаётся угловая скорость. Преобразователи генерируют двухполосный сжатый сигнал, который демодулируется обратно в полосы, ширину которых пользователь может легко изменить при помощи внешнего конденсатора. Благодаря этому, пользователь может полностью контролировать производительность системы, а преобразование становится абсолютно независимым от постоянного напряжения или низкочастотных параметрических условий электроники.

Когда датчик выключен, вдоль основных осей кольца возбуждается движение благодаря приводам первичного движения и первичным снимающим преобразователям, что вызывает воздействие в замкнутом контуре на систему контроля. Кольцо, круглое в нормальном состоянии, принимает эллиптическую форму и вибрирует с частотой 22 кГц. Когда гироскоп подвергается воздействию угловой скорости, на кольцо (по касательной к его периметру и относительно главных осей) начинают действовать силы Кориолиса. Вторичные снимающие преобразователи определяют данное движение, которое пропорционально прилагаемой угловой скорости. При этом двухполосный сжатый передающий сигнал демодулируется с учётом основного движения. В результате мы получаем низкочастотный компонент, который пропорционален угловой скорости.

Подобные гироскопы обладают очень маленькими габаритами и весом, а также низким потреблением энергии, предоставляя при этом высокую точность и надёжность измерений. Такие устройства используются в автомобилестроении, промышленной аппаратуре, робототехнике и многих других областях. Применяются они также и в персональных мобильных устройствах, где находят своё применение благодаря выгодному сочетанию стоимости, качества и малых размеров.[3][4]

**Ёмкостной трехосевой MEMS-акселерометр с цифровым выходом.** Называемая «3D-MEMS», эта разработка представляет собой сочетание нескольких технологий для формирования трехмерных структур из кремния, его инкапсуляции и контактирования для облегчения монтажа и сборки. Результатом является устройство, способное измерять ускорение в трёх ортогональных направлениях, и отличающееся высокой

точностью сенсора, малым размером и низким потреблением энергии.

Данная технология позволяет производить оптимизированные структуры для точных датчиков угла наклона, что полезно при решении таких задач, как обеспечение механического затухания в акселерометрах с целью использования сенсоров в условиях сильной вибрации. Низкое энергопотребление является несомненным плюсом при использовании в устройствах с питанием от батареи, сохраняя при этом хорошую точность измерения.

Принцип определения ускорения в таком акселерометре достаточно простой и надёжный. Основными элементами акселерометра являются тело, пружина и инерционная масса (ИМ), которая позволяет ощущать ускорение во время перемещения. При изменении скорости тела сенсора, ИМ посредством пружины так же побуждается последовать этим изменениям. Воздействующая на ИМ сила является причиной изменения её движения, поэтому происходит сжатие или разжимание пружины, что приводит к изменению расстояния между телом и ИМ пропорционально ускорению тела. Рабочие принципы сенсоров различаются в зависимости от того, каким образом определяется движение между телом и ИМ. В ёмкостном сенсоре тело и ИМ изолированы друг от друга и измеряются их ёмкость или ёмкостной заряд. При уменьшении дистанции между ними, происходит увеличение ёмкости, что приводит к движению электрического тока по направлению к сенсору. Если же расстояние увеличивается, то происходит обратный эффект: сенсор преобразует ускорение тела в электрический ток, заряд или напряжение.

Хорошие характеристики таких датчиков основываются на технологии ёмкостного измерения, поэтому они хорошо подходят для измерения малых изменений в движении. Чувствительный элемент, определяющий ускорение, в таких акселерометрах делается из стекла и монокристалльного кремния, что обеспечивает сенсору высокую надёжность и точность показаний, а также их достаточно хорошую устойчивость перед воздействием температуры. Одной из причин уменьшения зависимости от температуры является симметричное строение чувствительного элемента, который изготавливается по технологиям объёмной микромеханики и обладает двумя чувствительными конденсаторами. Из-за этого, также, улучшается и линейность элемента.[3][4]

#### IV. ПОДХОД К АНАЛИТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ О МЕСТНОСТИ.

Для мобильных устройств использование инерциальных систем навигации предоставляет хорошую альтернативу иным существующим методам. Главным плюсом, безусловно, является автономность данного подхода, поскольку для большинства других методов необходимо развивать инфраструктуру, что порой оказывается весьма затратным. Инерциальная же система навигации позволяет, установив стартовое положение мобильного устройства тем или иным

способом, в дальнейшем полагаться на показания гироскопов и акселерометров.

Однако на данный момент данный способ позиционирования мобильных устройств всё ещё не получил распространения. Причиной этого служит недостаточная точность измерительных приборов современных мобильных устройств, в результате чего появляется погрешность, которая накапливается со временем и требует устранения. Периодическое выравнивание координат может помочь справиться с этой проблемой, но от мобильных устройств прежде всего требуется удобство в использовании, которое неизбежно пострадает от требования подносить устройство к точке отсчёта раз в какое-то время или необходимости ввода фактических координат вручную.

Допустимо производить комбинирование инерциальной системы навигации с другими системами, к примеру, если на предприятии развита система контрольных точек в наиболее важно расположенных местах, через которые неизбежно будут проходить мобильные устройства, то становится возможным выравнивать координаты устройств каждый раз, когда они попадают на контрольную точку, а в остальное время пользоваться показаниями акселерометров и гироскопов. Можно использовать существующие точки беспроводного доступа для тех же целей, устанавливая расстояние между точкой доступа и мобильным устройством на основании разницы во времени между отправкой и получением сигнала.

Однако всё это полумеры, которые являются отступлением в сторону от первоочередной задачи: обеспечения автономной системы позиционирования. К счастью, существует подход, который позволит решить данную проблему. Речь идёт об использовании известной информации о местности, на которой происходит навигация.

Ввиду доступности GPS-навигации на открытых пространствах, основной интерес для нас представляет навигация внутри зданий. В связи с этим, можно производить выравнивание координат устройства в инерциальной навигационной системе на основании карты здания, которая должна храниться в памяти мобильного устройства. К примеру, человек с мобильным устройством,двигающийся по этажу здания, совершает движение в горизонтальной плоскости, поэтому если устройство внезапно обнаружит, что произошёл вертикальный спуск на несколько метров, это будет означать, что человек спустился на один этаж. На основании этой информации можно сделать вывод не только о том, что человек теперь находится этажом ниже, но и о том, что он прошёл через дверь на лестничной клетке, либо же заходил в лифт – теперь можно совершить выравнивание горизонтальных координат, основываясь на координатах лифта или лестничного пролёта на карте. Аналогичным образом, если существует поворот коридора, и мы вдруг видим, что человек повернул прямо в стену, то мы получаем информацию о том, что на самом деле человек находился дальше приписываемой ему позиции, и вновь выравниваем координаты.

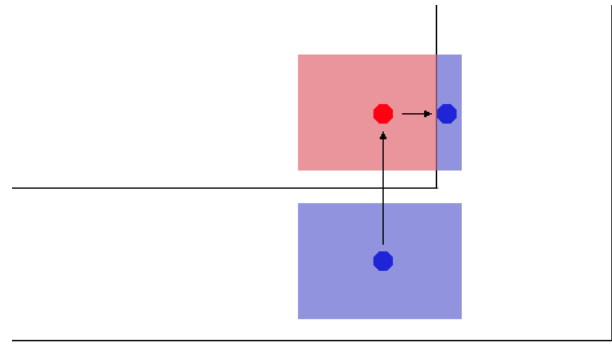


Рис. 1. Переопределение предполагаемой позиции объекта при появлении парадоксальной ситуации.

Реализовать этот подход на практике не так просто. Необходимо продумать метод, которым будет производиться выравнивание на основании имеющихся данных. Далее будет предложен подход, который позволяет получить приемлемую точность отслеживания позиции мобильного устройства при помощи инерциальной системы навигации.

Мобильное устройство способно достаточно точно определять направление, в котором оно движется, однако точное определение расстояния, на которое оно сместилось – более затруднительная задача. Именно здесь появляется основная погрешность: при смещении на 10 метров со стандартной скоростью ходьбы человека, размер ошибки может составить около 1 метра, варьируясь для различных устройств.

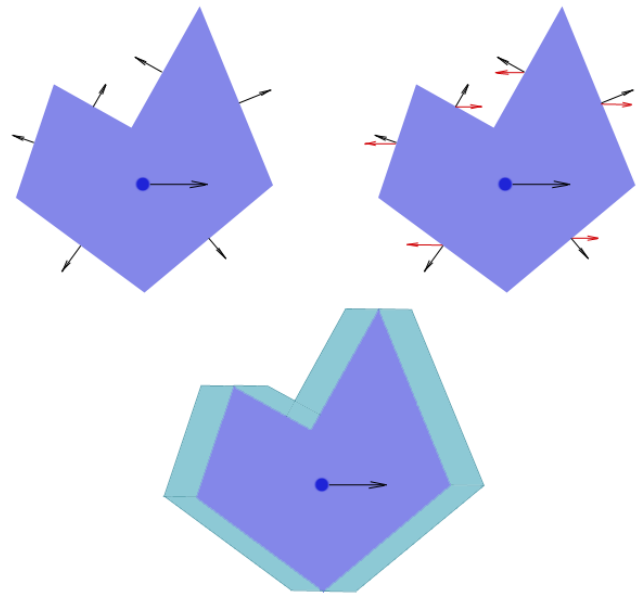


Рис. 2. Построение области возможного разброса координат.

Предлагается в процессе перемещения мобильного устройства изменять его координаты на карте согласно показаниям приборов, но при этом формировать вокруг этой предполагаемой позиции область разброса, в пределах которой находятся истинные координаты устройства. Эта область напрямую зависит от размера погрешности, который мог накопиться за весь пройденный устройством путь – если оно переместилось



на 20 метров по оси X и 10 метров по оси Y, то при максимальной погрешности в 10% область возможного реального местонахождения устройства будет соответствующий прямоугольник.

При наличии точных координат объекта в начале отсчёта, предлагается реализовывать расчёт области разброса координат следующим образом. Периметр области представляет собой многоугольник, и, при движении объекта в горизонтальной плоскости, для каждого из рёбер вычисляется вектор  $\vec{n}$ :

$$\vec{n} = \vec{r} \cdot \frac{\cos\varphi}{|\cos\varphi|}; \cos\varphi \neq 0, \quad (2.1)$$

Где  $\vec{r}$  – вектор, перпендикулярный к данному ребру многоугольника, а  $\varphi$  – угол между вектором  $\vec{r}$  и вектором направления движения. Вектор  $\vec{r}$  отображает направление, в котором нам следует увеличивать область разброса координат на данном участке её периметра. После чего, при помощи параллельного переноса ребра на  $\theta|\vec{n}$  (где  $\theta$  – максимальная погрешность измерений акселерометра, которая могла накопиться за это передвижение), мы получаем область между старым положением ребра и его новым положением – эта область добавляется к уже существующей области разброса координат. Если для конкретного ребра  $\cos\varphi = 0$ , то оно параллельно направлению движения, и смещать его нет необходимости.

Сама по себе информация о разбросе нам неинтересна, поскольку мы хотим установить как можно более точное местонахождение объекта. Однако образованную «область разброса» можно корректировать, когда она пересекается со стенами и другими неподвижными объектами, о которых нам известно: если накопленная погрешность составляет 3 метра, но теоретические координаты устройства указывают, что оно находится в трёх метрах от стены, значит от области разброса можно отсечь часть, которую отделяет стена, поскольку устройство никаким образом не могло пройти сквозь стену.

То же самое можно сказать о лестничных пролётах, дверных проёмах, лифтах и многих других «узких» местах, в которых неизменно оказываются владельцы мобильных устройств. Все эти точки позволяют устранять излишнюю погрешность, оставляя лишь приемлемую для такого рода задач погрешность в 1-2 метра.

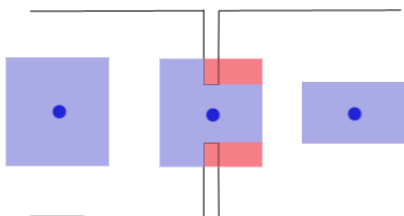


Рис. 3. Отделение части области разброса на основании данных о препятствиях.

В случае, если предполагаемые координаты устройства оказываются на физически недоступной

территории (например, опять же, в стене), из этого делается вывод, что реальная позиция устройства находится в иной части области разброса. В такой ситуации необходимо проанализировать движение устройства, которое привело к парадоксальным координатам, и, сопоставив его с областью разброса, выявить наиболее вероятное местонахождение устройства. В случае если по показаниям приборов был совершён поворот в стену, в то время, как до реального поворота коридора оставалось 2 метра, логично будет расположить новые координаты устройства двумя метрами дальше, где поворот уже становится физически возможен.

Наиболее сложными для анализа ситуациями являются такие, где на основании имеющихся данных можно сделать более, чем один вероятный вывод о перемещении устройства. Рассмотрим пример, когда накопленная погрешность составляет 3 метра, а предполагаемые координаты устройства оказываются в стене; при этом, в стене имеется две двери, каждая из которых попадает в область разброса координат устройства. Каким образом следует действовать в такой ситуации?

Поскольку на данный момент у нас недостаточно информации о том, чтобы сделать вывод, через которую из дверей прошло устройство, необходимо запустить обсчёт обеих вариантов параллельно, до тех пор, пока дальнейшее движение устройства не приведёт к парадоксу одного из вариантов; после этого, неверный вариант отбрасывается, а дальнейшее движение устройства отслеживается согласно истинному варианту. Поскольку даже пока спорная ситуация не разрешена, необходимо отображать для пользователя данные о навигации, следует выбрать для отображения наиболее вероятный вариант – на рисунке ниже это будет правая дверь. В комнате, куда она ведёт, оказалась часть области разброса координат, обладающая наибольшим шансом на то, что именно в ней находится объект: она и больше по площади, и содержит точки, находящиеся ближе к месту предположительного расположения объекта.

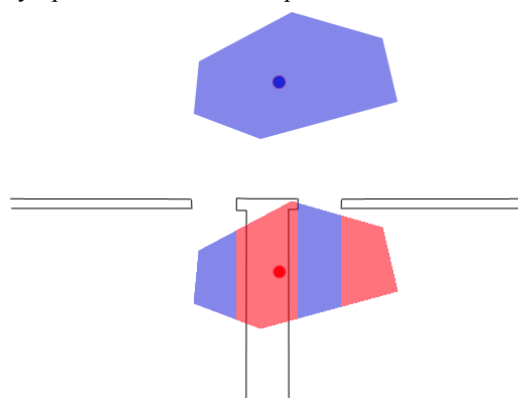


Рис. 4. Ситуация, приводящая к разветвлению версий положения объекта.

Подобную систему было бы выгодно применять на территориях крупных публичных предприятий, таких, как торговые комплексы и аналогичные им сооружения, поскольку посетителям требуется навигация, но нет необходимости в их высокоточном позиционировании. Масштабы таких зданий, как правило, достаточно большие, что является несомненным плюсом, поскольку

уменьшает вероятность появления спорных ситуаций, когда непонятно, в какую из дверей вошёл пользователь. При использовании инерциальной системы навигации в торговом комплексе можно, также, делать выводы на основании характера перемещений объекта. Люди чаще всего двигаются быстрее, когда идут по коридору, но они никуда не спешат, когда находятся на территории магазина.

Допустим, возникла спорная ситуация, когда по данным инерциальной навигации человек мог как повернуть за угол, так и зайти в бутик, дверь в который находится на этом углу. Если его мобильное устройство продолжит в дальнейшем прямолинейное движение, то станет ясно, что человек он всё-таки повернул за угол. Однако, если он остановится, то мы не получим парадокса ни для одного из имеющихся возможных вариантов. Тем не менее, наиболее вероятным будет то, что объект зашёл в бутик, потому что там у него есть причина чтобы остановиться: посмотреть товар, в то время, как остановка в коридоре имеет намного меньше смысла. Если объект, вдобавок к этому, начнёт двигаться на небольшие дистанции в произвольных направлениях, то это ещё больше убеждает нас в том, что он осматривает предлагаемый в магазине выбор, поэтому предпочтительной версией о координатах устройства будет именно эта. Разумеется, не стоит торопиться удалять альтернативный вариант.

Нетрудно заметить, что при таком подходе может сложиться ситуация, когда существует несколько одновременно отслеживаемых возможных положений устройства, которые, в свою очередь, могут порождать новые. Чтобы не допустить переполнения памяти устройства, необходимо каким-то образом контролировать количество одновременно просчитываемых версий. Для этого можно воспользоваться оценкой вероятности того, что та или иная версия окажется реальной. К примеру, если версия порождена на самой границе области разброса координат устройства при максимально возможной погрешности, шанс будет стремиться к нулю, в то время, как версии, порождённые в области разброса при средней погрешности, имеют гораздо большие шансы оказаться истинными.

Возможно также комбинирование данного подхода с иными, описанными ранее. В частности, предлагаемая система не имеет собственного автономного способа определить начальные координаты. Целесообразно будет всё-таки разместить контрольные точки хотя бы на входах в здание, что позволит мобильным устройствам получить некоторую информацию о своём стартовом местонахождении сразу же по их прибытию. В то же время, устройствам, которые появляются на территории здания впервые, необходимо откуда-то получить данные о планировке – логичнее всего передавать им эти данные на входе, одновременно информируя их о том, что они находятся на территории, поддерживающей данную систему. Нелишне также воспользоваться иными источниками информации, например, если в бутике из описанного выше примера имеется доступный для мобильных устройств электронный каталог, то подключившееся устройство может сразу же обновить свои координаты на основании

информации о расстоянии до стационарного устройства, передающего каталог.

Существует ещё одна интересная возможность для данной системы, о которой необходимо сказать. Это реализация взаимного выравнивания мобильных устройств при помощи информации, получаемой друг от друга. На данный момент мобильные устройства способны оценить расстояние, которое их разделяет, но не направление, в котором находится другое устройство. Однако направление мы можем оценить исходя из данных инерциальной навигационной системы обоих устройств – на основании этой информации, у них может быть сокращена погрешность за счёт простого факта, что они оказались поблизости друг от друга. Такое выравнивание может с лёгкостью привести в том числе и к уменьшению количества версий о местонахождении устройства, если в этих версиях расстояние между предполагаемыми координатами устройства сильно различается.

При должной проработке карты, особенно если планировка здания достаточно удачная для данной системы, выравнивание будет происходить регулярно, и инерциальная система навигации будет успешно справляться со своей задачей.

#### V. СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ НА ЭТАПЕ ИЗМЕРЕНИЯ.

Рассматривая вопрос об устранении уже появившейся погрешности, не стоит забывать и о возможности уменьшения погрешности датчиков мобильных устройств на этапе измерения.

Показания мобильных акселерометров подвержены многочисленным шумовым эффектам, особенно если речь идёт о системах персональной навигации для людей. Движение человека отклоняется от прямой траектории, существуют подъёмы и спуски, вибрации – всё это шум, который необходимо каким-то образом подавлять. Существует несколько распространённых подходов к сглаживанию и фильтрации получаемых акселерометром данных.

**Метод средних значений.** Одним из самых простых методов для фильтрации шума является метод средних значений. Он заключается в том, что на каждом шаге  $k$ , значение  $v_k$  вычисляется как среднее из  $n$  предыдущих значений акселерометра.

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^n v_{k-i}}{n} \quad (2.2)$$

При средних значениях  $n$ , данный метод предоставляет хороший уровень сглаживания, но, к сожалению, его недостатком является достаточно большая задержка в значениях.[5]

**Фильтрация данных.** Применение фильтра является распространённым и эффективным способом борьбы с зашумлением. При решении задачи навигации, основным требованием к фильтру является достаточно высокая производительность, чтобы получать положительный эффект в реальном времени и с как можно меньшей задержкой. Далее будут рассмотрены несколько фильтров: фильтр низких частот, его модифицированная версия и фильтр Калмана.

Под фильтрами низких частот понимают группу фильтров, общая характеристика которых – способность

фильтровать сигналы выше определённой указанной частоты, пропуская сигналы более низкой частоты. Это позволяет устранить шумовые помехи сигнала и применимо, в том числе, к акселерометрам. Рассмотрим формулу:

$$O_n = O_{n-1} + \alpha(I_n - O_{n-1}) \quad (2.3)$$

Где  $O$  – отфильтрованное выходное значение сигнала.,  $I_n$  – нефильтрованные входные значения,  $\alpha$  - коэффициент фильтрации,  $0 \leq \alpha \leq 1$ . При этом,  $\alpha = 1$  означает совпадение выходных и входных данных.

Стоит учитывать, что чем меньше коэффициент, тем более гладким получается результат – однако при этом растёт и задержка, особенно если появляются резкие колебания значений.

Если ввести зависимость фильтра от приращения значений сигнала с индексами  $n$  и  $n-1$ , то можно добиться эффекта уменьшения задержки сглаживания при резких колебаниях – это и называется модифицированным фильтром низких частот. Пусть  $\epsilon$  – пороговое значение, такое, что если  $|I_n - I_{n-1}| \leq \epsilon$ , то значение фильтруется при помощи фильтра нижних частот, в противном случае возвращается исходное значение  $I_n$ .

Фильтр Калмана – распространённый способ фильтрации значений, встречающийся во многих областях, где необходима обработка показаний датчиков и сигналов. Это рекурсивный фильтр – на каждом шаге работы для вычисления оценки состояния системы ему, помимо информации об измерениях на текущем шаге, необходима информация об оценке предыдущего шага. Итерации фильтра Калмана делятся на две фазы: экстраполяция и коррекция. Во время экстраполяции фильтр получает предварительную оценку состояния системы  $\hat{x}_{k|k-1}$  на текущий шаг по итоговой оценке состояния с предыдущего шага. Эту предварительную оценку также называют априорной оценкой состояния, так как для её получения не используются наблюдения соответствующего шага. В фазе коррекции априорная экстраполяция дополняется соответствующими текущими измерениями для коррекции оценки. Скорректированная оценка также называется апостериорной оценкой состояния, либо оценкой вектора состояния  $\hat{x}_k$ . Обычно эти две фазы чередуются: экстраполяция производится по результатам коррекции до следующего наблюдения, а коррекция производится совместно с доступными на следующем шаге наблюдениями, и т. д. [5][6]

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен подход к позиционированию мобильных устройств при помощи инерциальной системы навигации. Результатом работы является вывод о том, что данный подход может успешно применяться для мобильных устройств, однако требует немалых усилий для борьбы с накапливаемой погрешностью, для чего следует пользоваться шумовыми фильтрами и географическими особенностями местности, где проводится отслеживание устройства. Наиболее перспективной областью применения данного подхода является персональная навигация пользователей на крупных предприятиях, рассчитанных на высокую посещаемость – таких, как торгово-развлекательные

центры. При использовании инерциальной системы навигации для отслеживания взаимного расположения нескольких мобильных устройств её точность можно увеличить при помощи выравнивания координат каждого из устройств на основании дополнительных данных, получаемых друг от друга.

Самым главным плюсом является тот факт, что инерциальные системы навигации будут становиться всё более актуальными в будущем по мере совершенствования акселерометров и гироскопов, применяемых в мобильных устройствах.

## VII. ПРИМЕЧАНИЕ РЕДАКТОРА

Автор работы готовит магистерскую диссертацию на факультете ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова. Эта работа выполнялась совместно с работой [5]. Цель состояла в создании навигационной системы в здании (помещении) [7]. К сожалению, не все получилось в данной работе. Можно сказать, что автор, скорее, только подошел к пониманию объемов задачи и возможному аппарату для реализации. Вместе с тем, мы решили напечатать данную статью, которая может послужить некоторым подспорьем для будущих авторов в плане понимания темы, начального поиска публикаций и т.д. Задача использования акселерометра на мобильных устройствах (телефонах) является всё актуальной. Основная причина – это весьма энерго-эффективный метод определения местоположения (по сравнению, например, с GPS). В рамках исследований, проводимых в лаборатории ОИТ факультета ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова [8] мы планируем продолжить работы в этом направлении.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Коваленко В.В., Лысов А.Н. Малогабаритная инерциальная система. Учебное пособие. 2010.
- [2] Чуб В.Ф. Уравнения инерциальной навигации и кватернионная теория пространства-времени. 1(7), том 4, 2007.
- [3] Федор Крекотень. Современные МЭМС-гироскопы и акселерометры. «Петербургский журнал электроники», Январь 2011.
- [4] Fabio Pasolini. МЭМС-акселерометры, гироскопы и геомагнитные датчики. Журнал «Радиолюцман». Июнь 2012.
- [5] Пестов Е. Распознавание движения мобильного устройства //International Journal of Open Information Technologies. – 2013. – Т. 1. – №. 3. – С. 5-10.
- [6] Gabor Paller. "Motion Recognition with Android devices", Sfonge Ltd., <http://www.slideshare.net/paller/motion-recognition-with-android-devices>
- [7] Гурьев Д. Е., Намиот Д. Е., Шнепс М. А. О телекоммуникационных сервисах //International Journal of Open Information Technologies. – 2014. – Т. 2. – №. 4. – С. 13-17.
- [8] Намиот Д., Сухомлин В. О проектах лаборатории ОИТ //International Journal of Open Information Technologies. – 2013. – Т. 1. – №. 5. – С. 18-21.



# Applicability of inertial navigation systems in mobile devices

Butakov N.A.

***Abstract***-In this paper we study the possibility of using inertial navigation systems to address the issue of mutual positioning of mobile devices. We discuss the existing approaches to inertial navigation systems and ways of dealing with mobile positioning error in the application of an inertial navigation system.

***Key words*** – accelerometer, gyroscope, inertial system, navigation, mobile device.