

ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ В СИСТЕМАХ ЭКСТРЕННОГО РЕАГИРОВАНИЯ ПРИ АВАРИЯХ

А.С. Воронов, А.В. Иванов, Н.Н. Калигин

ОАО «МКБ Компас»

г. Москва

Статья посвящена разработке и тестированию модуля инерциальной навигации для абонентского терминала систем экстренного реагирования при авариях «ЭРА-ГЛОНАСС» и eCall.

Ключевые слова: инерциальная навигация, гироскоп, акселерометр, кватернион, «ЭРА-ГЛОНАСС», eCall, система экстренного реагирования при авариях, MEMS-датчик, AHRS, профиль ускорения.

В ближайшем будущем будет запущена государственная система экстренного реагирования при авариях «ЭРА-ГЛОНАСС». Эта система гармонизирована с системой eCall, разрабатываемой и внедряемой в Европейском Союзе. Основной задачей системы является уменьшение времени реагирования экстренных служб при наступлении ДТП, и тем самым уменьшение тяжести последствий аварии. Дополнительной задачей является обеспечение страховых компаний объективной информацией о ДТП: кто, где, когда и почему попал в аварию. Время и место аварии, достоверно определяются терминалом системы по спутниковой навигационной системе ГЛОНАСС. Сам факт аварии сообщается автоматически в службу экстренного реагирования с помощью сетей сотовой связи в режиме in-band. Но все это не помогает выявить причины, и, следовательно, виновника аварии. Разрешения по координатам, получаемым со спутниковых навигационных систем (~5м), недостаточно для восстановления трека движения автомобиля в процессе аварии. Время получения навигационного решения в лучших приемниках составляет не менее 100 мс, в то время как вся авария происходит за время порядка 150 мс. В ходе обсуждения национального стандарта [1] было предложено в качестве дополнительной информации использовать профиль ускорения, получаемый с абонентского терминала системы «ЭРА-ГЛОНАСС». Однако, сам по себе профиль ускорения не идентичен перемещению автомобиля. Кроме самого факта ДТП из него сложно получить какую-либо информацию. Профиль, измеренный недорогими акселерометрами, характеризуется низкой точностью, что не позволяет использовать его для восстановления движения автомобиля. Акселерометры, используемые в авиации и спо-

собные решить задачу определения перемещения, стоят не менее 1000\$, в то время как заявленная цена всего абонентского терминала системы «ЭРА-ГЛОНАСС» должна быть не более 100\$. Поэтому разработка недорогих модулей инерциальной навигации, на базе доступных компонент является актуальной задачей.

Модули инерциальной навигации как отдельные изделия изготавливаются редко. Чаще всего они входят в состав готовых изделий, таких как смартфоны и планшетные компьютеры. До недавнего времени считалось, что для целей инерциальной навигации недорогие малогабаритные MEMS-датчики не подходят. Однако на текущий момент характеристики этих изделий у большинства производителей дошли до приемлемого состояния [2, 3]. Компания ОАО «МКБ Компас» разработала абонентский терминал систем экстренного реагирования «ЭРА-ГЛОНАСС» и eCall со встраиваемым модулем инерциальной навигации [4]. Этот модуль позволяет определять координаты транспортного средства в условиях отсутствия сигналов спутниковых навигационных систем с разрешением по времени 1 мс. В качестве опорной точки для инерциальной навигации используется последние полученные со спутниковой навигационной системы координаты. Точность инерциальной навигации зависит от времени отсутствия опорного сигнала. У инерциальной системы, построенной на бюджетной элементной базе точность существенно ниже, чем у дорогих специализированных устройств. Например, инерциальная навигационная система самолета дает отклонение в 1-2 километра на час пути. Однако, на промежутке времени в несколько секунд погрешность разработанной нами системы составляет доли сантиметра, что вполне достаточ-

но для выявления виновника аварии при помощи сопоставления треков движения транспортных средств. Также этого достаточно для осуществления бесшовной навигации при пересечении автомобилем туннелей, развязок и закрытых парковок.

Для тестирования работы модуля инерциальной навигации в абонентском терминале «ЭРА-ГЛОНАСС» мы воспользовались методом физического моделирования. Так как модуль имеет весьма скромные габариты (12x41x2 мм) для его тестирования была выбрана малогабаритная радиоуправляемая модель спортивного автомобиля. Модуль расположили по центру модели с системой координат, указанной на рисунке 1.



Рисунок 1 – Система координат модели

Структурная схема модуля инерциальной навигации приведена на рисунке 2. Он состоит из двух сдвоенных датчиков от STMicroelectronics LSM330DLC (акселерометр, гироскоп) и LSM303DLH (акселерометр, магнитный компас), которые по интерфейсу SPI передают измеренные данные на микроконтроллер STM32F103V8. Также на микроконтроллер по шине CAN передаются данные с бортовой информационной системы автомобиля (БИС). В использованной модели роль БИС сыграл импульсный оптический датчик количества оборотов, установленный на задней оси модели. Микроконтроллер обрабатывает данные датчиков в соответствии с описанным ниже алгоритмом. Результат работы модуля в виде координат и поворотного кватерниона модели передается по радиоканалу 2,4 ГГц на ПК с помощью пары радиомодулей nRF24L01 (на рисунке не указаны).

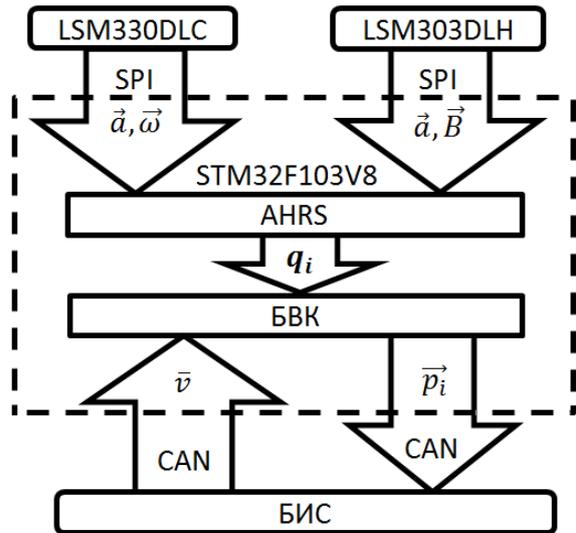


Рисунок 2 – Структурная схема модуля инерциальной навигации

С датчика LSM330DLC мы получаем вектор ускорений \vec{a}_1 и вектор угловых скоростей $\vec{\omega}$. Датчик LSM303DLH выдает также данные акселерометра и вектор магнитной индукции. Показания двух акселерометров при получении усредняем и нормализуем:

$$\vec{a} = \frac{\vec{a}_1 + \vec{a}_2}{|\vec{a}_1 + \vec{a}_2|}$$

В дальнейших выкладках используется кватернионное представление вращения твердого тела [5]. Введем некоторые обозначения: символы, обозначающие кватернион, выделим курсивом, а под символом “*” будем подразумевать гиперкомплексное произведение. Классическое гиперкомплексное представление кватерниона выглядит следующим образом: $\mathbf{q} = [w \ i x \ j y \ k z]$. Далее по тексту комплексные единицы будут опущены и кватернион представляется как массив из 4-х чисел. Первое число – действительная часть кватерниона, остальные три – коэффициенты при комплексной части: $\mathbf{q} = [w \ x \ y \ z]$. Условимся, что преобразование вектора в соответствующий ему кватернион будет осуществляться по следующему правилу:

$$\vec{v} \rightarrow \mathbf{v} = [0 \ v_x v_y v_z]$$

Обратное преобразование происходит аналогично: в качестве компонент вектора берутся числа из комплексной части кватерниона, а действительная часть отбрасывается.

Алгоритм определения местоположения модели в трехмерном пространстве делится на две основные части: АНРС (Attitude and Heading Reference System, или система определения ориентации объекта) и БВК (блок

вычисления координат). Для обозначения первой части алгоритма англоязычная аббревиатура была выбрана не случайно: она используется в обозначении алгоритмов ориентации большинством зарубежных и российских источников.

Задачей AHRS является определение поворота объекта в любой момент времени относительно некоторого начального положения. Имея вектор ускорения свободного падения, измеренный акселерометром и вектор магнитной индукции, измеренный магнитным компасом, казалось бы, легко можно определить текущую ориентацию. Однако, задача не является тривиальной, поскольку двигающийся по сложной траектории объект в своей системе координат испытывает одновременно несколько воздействий: сила притяжения земли, центробежная сила и сила Кориолиса. Все эти воздействия могут быть измерены с некоторой точностью и скоростью, а магнитное поле дополнительно может искажаться рядом факторов, таких как работающее электрооборудование, массивные железные конструкции и т.п. В результате имеем измеренное ускорение объекта, которое коррелирует с вектором притяжения земли в состоянии покоя, измеренный вектор магнитной индукции, коррелирующей с вектором магнитной индукции земли, и вектор угловых скоростей. Основной задачей является корректировка погрешности измерения угловых скоростей объекта, используя данные с акселерометра и магнитного компаса. Эта задача решается множеством путей, например, с помощью адаптивного фильтра Калмана. Одним из самых распространенных на сегодняшний день алгоритмов этого класса является алгоритм Мадвика [6]. Однако у алгоритмов адаптивной фильтрации могут быть проблемы с устойчивостью получаемого решения. В частности, распространяемый компанией STMicroelectronics комплект ПО iNemo для MEMS-датчиков собственного производства, характеризуется получением с некоторой периодичностью вырожденной матрицы в ходе вычислений, что делает его неприменимым для реального использования. Мы применили несколько модифицированный алгоритм Махоуни [7], поскольку он хорошо адаптирован для машинной реализации и полностью устойчив.

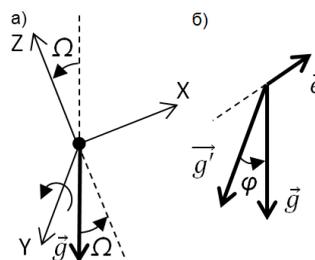


Рисунок 3 – Вращение объекта

Примем, что $\vec{g}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$. В соответствии с рисунка 3 (а) при повороте объекта вокруг оси Y на некоторый угол Ω в системе координат объекта вектор притяжения земли сместится в обратном направлении на тот же угол. Сформируем оценку полученного вектора. Так как нас интересует только направление, будем оперировать единичными векторами. Введем вектор начального направления силы притяжения в системе координат объекта и сразу запишем его в виде кватерниона:

$$\vec{g}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T.$$

Повернем полученный вектор с помощью кватерниона поворота на i -м шаге (при $i=0$, $\vec{q}_0=[0 \ 0 \ 0 \ 0]$) в обратном направлении:

$$\vec{g} = \tilde{q}_{i-1} * \vec{g}_0 * q_{i-1}.$$

Так как в ходе вычисления мы работаем только с нормализованными кватернионами, то операцию инверсии кватерниона можно заменить на менее затратную операцию сопряжения [5]. Полученный вектор предсказанного направления силы притяжения будет отличаться от истинного направления силы притяжения (рисунок 3 (б)). Так как мы условились, что $\vec{a} \sim \vec{g}$, сформируем ошибку предсказания как векторное произведение измеренного нормализованного ускорения и предсказанного направления:

$$\vec{e} = \vec{a} \times \vec{g}.$$

Смысл полученной величины заключается в том, что вокруг оси, задаваемой вектором необходимо вращать вектор \vec{g} , чтобы получить вектор \vec{a} . Модуль вектора \vec{e} определяет угол вращения.

Учтем, что между измерениями существует известный временной интервал Δt . Скорректируем измеренные значения угловых скоростей на полученный вектор ошибки, используя в качестве обратной связи пропорционально-интегральный регулятор. Для этого сформируем вектор интегральной суммы:

$$\vec{I}_i = \vec{I}_{i-1} + \vec{e} \Delta t;$$

и определим вектор скорректированных угловых скоростей:

$$\vec{\omega}' = \vec{\omega} + K_p \vec{e} + K_{int} \vec{I},$$

где K_p – коэффициент пропорциональной составляющей,

K_{int} – коэффициент интегральной составляющей.

Этот вектор определяет оценку угловой скорости объекта, скорректированную на показания двух акселерометров.

Воспользуемся кинематическими уравнениями вращательного движения твердого тела Пуассона [5] и определим производную кватерниона вращения:

$$\dot{q} = \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{q_{i-1} * \omega'}{2}.$$

По полученной формуле мы можем вычислить приращение кватерниона за время Δt :

$$q' = q_{i-1} + \dot{q} \Delta t.$$

Нормализуем полученный кватернион:

$$q_i = \frac{q'}{|q'|},$$

Эта величина будет использоваться для текущей итерации алгоритма БВК. Вычислим путь, пройденный объектом:

$$\Delta L = kS = \bar{v} \Delta t,$$

где k – коэффициент ППС (показывающего прибора спидометра), означает количество импульсов, выдаваемых датчиком скорости на 1 км пути;

S – количество импульсов, полученных за время Δt .

Для некоторых автомобилей БИС возвращает среднюю скорость на заданном интервале времени, в этом случае под Δt подразумевается этот интервал. Модель автомобиля движется вдоль своей оси Y , следовательно, на i -м шаге вектор перемещения в виде кватерниона можно записать следующим образом:

$$L = [0 \ 0 \ \Delta L \ 0].$$

Вращая этот вектор с помощью вычисленного ранее поворотного кватерниона, мы получаем вектор перемещения модели в пространстве:

$$\vec{L}' = q_i * L * \tilde{q}_i.$$

Суммируем этот вектор с положением модели, вычисленным на предыдущем шаге:

$$\vec{p}_i = \vec{p}_{i-1} + \vec{L}' \Delta t.$$

Полученный вектор представляет собой положение объекта относительно нулевого, заранее заданного положения в текущий момент времени.

Учет вектора магнитной индукции при вычислении координат модели осуществляется аналогичным образом. Полученные данные при помощи радиоканала передаются на ПК в программное обеспечение, позволяющее в реальном масштабе времени строить трек движения модели (рисунок 4).

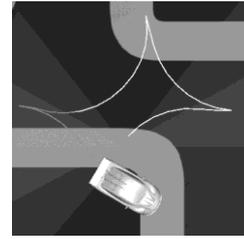


Рисунок 4 – Трек движения модели

При ударе модели о препятствия вычисляется показатель ASI_{15} [1], по которому определяется факт ДТП. При обнаружении ДТП трек прорисовывается красным светом на протяжении последней секунды движения.

Разработанная модель была продемонстрирована в действии на Международной выставке Навитех-2013 в павильоне ОАО «МКБ Компас» и получила положительные отзывы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54620-2011 Система экстренного реагирования при авариях. Общие технические требования.
2. Белокуров В.А., Горкин В.Н., Костиков В.Г. и др. Использование трехосных MEMS гироскопов и акселерометров для задач определения пространственной ориентации подвижных объектов // Вестник РГРТУ. – Рязань, 2012. – №3. – С.26-59.
3. Джафер Меджахед МЭМС-датчики движения от STMicroelectronics: акселерометры и гироскопы // Электронные компоненты. – Москва, 2009. – №12. – С.53-57.
4. Воронов А.С., Иванов А.В., Ковтуненко К.А. Спутниковая система NaviLand и комплексная транспортная безопасность // Транспортная безопасность и технологии. – Москва, 2012. – №4. – С.100-101.
5. Амелькин Н.И. Кинематика и динамика твердого тела (кватернионное изложение): учебник для вузов. – М.: МФТИ, 2000.
6. Madgwick S.O.H., Harrison A.J.L., Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm // IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). – Zurich, 2011. – P.1-7.
7. Mahony R., Hamel T., Pfimlin J.M. Non-linear complimentary filters on the special orthogonal group // IEEE Transactions on Automatic Control.–Notre Dame, 2008. – №53(5). – P.1203 - 1218.

Воронов Александр Сергеевич – к.т.н., ведущий инженер – программист ОРНРА, тел.: (495) 951-40-62, e-mail: asvoronov@bk.ru; **Иванов Александр Владимирович** – начальник отдела разработки навигационной радиоэлектронной аппаратуры; **Калигин Николай Николаевич** – инженер-программист ОРНРА.