

Девятиосевая система ориентации в пространстве для повышения стабильности позиционирования

Маркова Дана Константиновна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
dmarkova@sfedu.ru

Басан Елена Сергеевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
ebasan@sfedu.ru

Вахрушев Дмитрий Евгеньевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
vakhrushev@sfedu.ru

Аннотация. В данной статье обсуждается девятиосевая система ориентации, основанная на данных, поступающих с акселерометра, гироскопа и магнитометра, используемых в беспилотных авиационных системах. Основное внимание уделено применению комплементарных фильтров для объединения показаний различных сенсоров с целью минимизации ошибок, таких как шум, дрейф гироскопа и магнитные возмущения. Приведены математические модели обработки данных для каждого сенсора и алгоритмы их слияния, направленные на повышение точности определения ориентации.

Abstract. This paper discusses a nine-axis orientation system based on data from an accelerometer, gyroscope, and magnetometer used in unmanned aircraft systems. The focus is on the use of complementary filters to combine the readings of different sensors in order to minimize errors such as noise, gyroscope drift, and magnetic disturbances. Mathematical models of data processing for each sensor and algorithms of their fusion aimed at improving the accuracy of orientation determination are presented.

Ключевые слова: девятиосевая система ориентации, инерциальные датчики, акселерометр, гироскоп, магнитометр, беспилотные авиационные системы (БАС).

Keyword: nine-axis orientation system, Euler angles, quaternions, inertial sensors, accelerometer, gyroscope, magnetometer, unmanned aircraft systems (UAS).

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные беспилотные авиационные системы (БАС) предъявляют высокие требования к точности управления и ориентации в пространстве для успешного выполнения различных задач. Одной из важнейших задач является корректное определение положения аппарата в трехмерном пространстве, что достигается с помощью инерциальных датчиков, таких как акселерометры, гироскопы и магнитометры [5]. Эти сенсоры позволяют определить положение объекта по угловым скоростям и смещениям, часто применяя модели ориентации на основе углов Эйлера. В данной статье рассматривается девятиосевая система ориентации, использующая данные с трехосевого акселерометра, гироскопа и магнитометра для повышения точности определения ориентации БАС.

II. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

ИМУ (инерциальный измерительный блок) представляет собой электронное устройство, измеряющее ускорение, угловое перемещение и индукцию магнитного поля в пространстве (рис. 1). Это устройство состоит из комбинации акселерометра, гироскопа и магнитометра, каждый из которых измеряет по трем взаимно перпендикулярным осям [1]. С их помощью можно определить ориентацию объекта относительно поверхности Земли, что играет ключевую роль в инерциальных системах позиционирования.

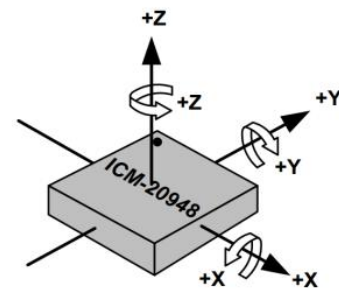


Рис. 1. Схема устройства ИМУ

Акселерометр является инерциальным датчиком, измеряющим кажущееся линейное ускорение (КЛУ), определяемое как изменение скорости движения объекта. Измерение ведется в единицах g ($1g = 9,81 \text{ м/с}^2$). В зависимости от конструкции акселерометр может измерять ускорение по одной, двум или трём осям [4]. КЛУ представляет собой разницу между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением. Применение акселерометров включает системы определения угла наклона, где ускорение свободного падения используется для вычисления угла отклонения. Однако, точность акселерометров ограничивается такими факторами, как температурные изменения, вибрации, внутренние шумы, что снижает надёжность использования акселерометра как единственного источника данных о движении [2].

Гироскоп в составе ИМУ измеряет угловую скорость с использованием эффекта Кориолиса [6]. Данные гироскопа позволяют вычислить изменение угла ориентации путем интегрирования угловой скорости. Гироскопы более точны для кратковременных измерений, однако склонны к накоплению ошибок из-за дрейфа, вызванного смещением ну-

левой точки. Для минимизации этих ошибок применяется калибровка, позволяющая скорректировать показания за счет учета систематических смещений.

Магнитометр измеряет проекцию индукции магнитного поля на оси чувствительности. Как и другие датчики, магнитометр подвержен погрешностям, которые могут возникать вследствие искажений магнитного поля. Основные виды искажений включают эффект "твердого железа", вызванный присутствием постоянного магнита, и эффект "мягкого железа", возникающий при воздействии внешних объектов, искажающих магнитное поле [3].

Для начала необходимо вычислить углы поворота в инерциальной системе. Данные гироскопа используются для расчёта угла поворота интегрированием угловой скорости. Вектор угловой скорости на каждом временном шаге даёт изменения угла, которые суммируются для получения текущего угла ориентации объекта. Однако из-за накопления ошибок, вызванных смещением гироскопа и неточностью измерений, происходит дрейф угла. Этот недостаток требует использования дополнительных данных для коррекции. С помощью данных гироскопа рассчитывается разница угла по каждой оси.

$$\delta_x = \omega_x * \Delta t, \quad (1)$$

$$\delta_y = \omega_y * \Delta t, \quad (2)$$

$$\delta_z = \omega_z * \Delta t, \quad (3)$$

где $\delta_{x,y,z}$ – разница углов, рассчитанная по показаниям гироскопа в интервале времени между текущим и предыдущим измерениями, $\omega_{x,y,z}$ – угловая скорость, рассчитанная по гироскопу.

На основе показаний акселерометра можно рассчитать угол наклона. Однако показания акселерометра чувствительны к кратковременным ускорениям, вызванным движениями устройства, что приводит к шумам в измерениях. Для начала вычисляется угол по тангажу и крену.

$$\beta_x = \arctan(a_y, \sqrt{a_x^2 + a_z^2}), \quad (4)$$

$$\beta_y = \arctan(-a_x, a_z), \quad (5)$$

где $\beta_{x,y}$ – угол, рассчитанный по показаниям акселерометра, $a_{x,y}$ – значения, полученные с акселерометра.

Для получения более точной оценки угла ориентации используют комплементарный фильтр, который комбинирует показания гироскопа и акселерометра. Принцип комплементарного фильтра заключается в том, чтобы медленные изменения угла брать из показаний акселерометра, а быстрые – из гироскопа. Для корректных вычислений используется динамический коэффициент фильтрации. Таким образом, данные гироскопа корректируются, что позволяет минимизировать дрейф, а данные акселерометра сглаживаются для уменьшения шума. Благодаря комплементарному фильтру мы узнаем углы поворота вокруг осей X и Y, используя значения, полученные выражениями (1, 2, 3, 4).

$$\varphi_t = \alpha \cdot (\varphi_{t-1} + \delta_x) + (1 - \alpha) \cdot \beta_x, \quad (6)$$

$$\theta_t = \alpha \cdot (\theta_{t-1} + \delta_y) + (1 - \alpha) \cdot \beta_y, \quad (7)$$

где φ_t – угол поворота вокруг оси X, θ_t – угол поворота вокруг оси Y, α – коэффициент фильтрации.

Чтобы вычислить поворот по оси Z (азимут), нужно получить данные о магнитном поле с датчика магнитометра и скорректировать эти данные с учётом наклона устройства (по осям X и Y) на основе показаний акселерометра. Для этого требуется создать матрицу поворота одновременно по осям X и Y. При перемножении матрицы поворота по осям X и Y и матрицы значений магнитометра по трем осям получается матрица скорректированных значений магнитометрических данных, учитываемых тангаж и крен, и получившиеся выражения выглядят так.

$$\mu_x = B_x * \cos(\varphi) + B_z * \sin(\varphi), \quad (8)$$

$$\mu = B_x * \sin(\varphi) * \sin(\theta) + B_y * \cos(\theta) - B_z * \sin(\theta) * \cos(\varphi), \quad (9)$$

где $\mu_{x,y}$ – скорректированные значения магнитометра по оси X, Y с учетом других осей, $B_{x,y,z}$ – значения магнитометра по осям X, Y, Z.

Из полученных значений вычисляем азимут по следующей формуле:

$$\sigma_z = \arctan(\mu_x, \mu_y), \quad (10)$$

где σ_z – угол по оси Z.

Для учёта быстрого изменения углов и коррекции дрейфа гироскопа можно использовать комплементарный фильтр (11), учитывающий азимут, полученный из данных магнитометра и акселерометра.

$$\psi_t = \alpha \cdot (\psi_{t-1} + \delta_z) + (1 - \alpha) \cdot \sigma_z, \quad (11)$$

где ψ_t – угол поворота вокруг оси Z относительно заданной в начале системы координат в текущий момент времени.

В итоге по данным, полученным с инерциального измерительного блока, мы получили углы поворота вокруг всех осей с помощью комплементарных фильтров.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проведения тестирования получившегося алгоритма был взят роторный гироскоп, к которому был приделан инерциальный измерительный блок ICM-20948, содержащий гироскоп, акселерометр и магнитометр (рис. 2).

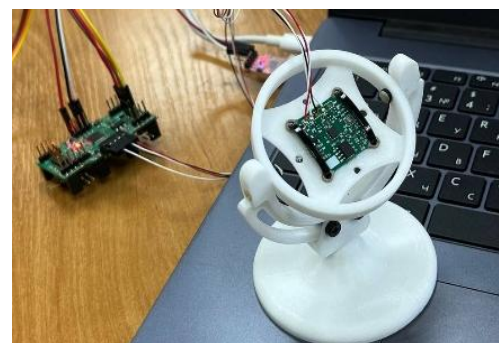


Рис. 2. Устройство для тестирования алгоритма

Сначала были определены оси тангажа, крена и азимута по показаниям датчиков. Затем был произведен расчет углов поворота по осям X и Y с помощью выражений (6, 7). Оставив устройство в состоянии покоя, по показаниям графика можно увидеть дрейф угла, рассчитанного по данным с гироскопа, и колебания угла, полученного из акселерометра (рис. 3).

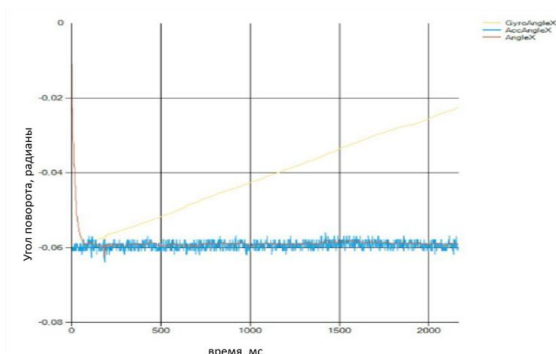


Рис. 3. График показаний углов поворота, когда устройство находится в состоянии покоя

Вращая устройство по всем осям, на графике можно увидеть, что скорректированный угол поворота по оси X сглаживает шум, полученный с акселерометра, и минимизирует дрейф нуля с гироскопа (рис. 4). Аналогичный результат получается с углом поворота по оси Y.

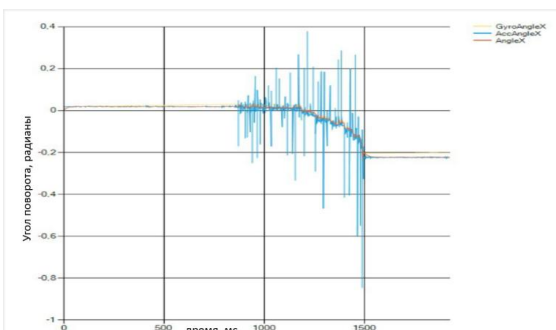


Рис. 4. График показаний углов поворота, когда устройство находится в состоянии покоя

Для получения азимута используются данные со всех трёх датчиков. По описанному алгоритму получается угол в пределах от π до $-\pi$. На графике показан скорректированный угол относительно угла по гироскопу и угла по акселерометру и магнитометру (рис. 5).

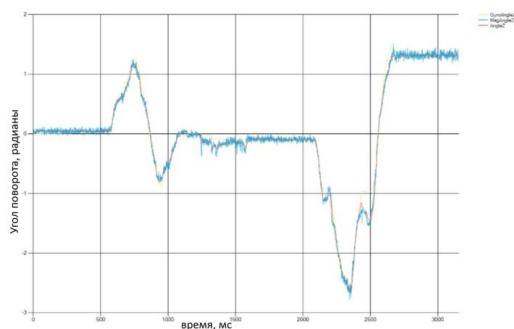


Рис. 5. График показаний угла поворота по азимуту

IV. ВЫВОДЫ

В ходе работы был разработан алгоритм, позволяющий рассчитать углы поворота каждой оси относительно системы координат NED. Для усовершенствования алгоритма надо добавить учет погрешности максимально измеряемой угловой скорости и обработку ситуаций с граничными значениями углов.

Девятиосевые системы ориентации, основанные на инерциальных датчиках, являются ключевым элементом в управлении беспилотными авиационными системами. Таким образом, использование комбинированных данных магнитометра, акселерометра и гироскопа в современных навигационных системах обеспечивает высокую точность определения направления на север даже в условиях магнитных возмущений и подвижности устройства, что делает этот подход перспективным для дальнейшего развития мобильных и портативных систем навигации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Suryanto W. et al.* IMU (inertial measurement unit) device for internet of things based disaster early warning system: applications and innovation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 451, No. 1. – P. 012015.
2. *Максюшин Г.В., Соболева Н.С.* Учет погрешностей МЭМС-акселерометра при его моделировании // Политехнический молодежный журнал. – 2019. – № 02. – С. 1-7.
3. *Русских М.* Магнитометры: принцип действия, компенсация ошибок // Радиолоцман. – 2012. – № 9. – С. 31.
4. *Хао Л.В.* Определение параметров ориентации на основе МЭМС акселерометра и магнетометра // Инженерия для освоения космоса: сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного форума с международным участием, г. Томск, 12-14 апреля 2016 г. – Томск, 2016. – С. 139-143.
5. *Грибин М.А., Евдокимов А.О.* Анализ фильтров для обработки зашумленных данных с гироскопа, акселерометра и магнитометра // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. – 2016. – № 3. – С. 14-18. – EDN XUVNDJ.
6. Патент № 2476823 С2 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Способ измерения при помощи гироскопической системы: № 2010130301/28; заявл. 19.12.2008 : опубл. 27.02.2013 / К. Линьон, А. Карр; заявитель САЖЕМ ДЕФАНС СЕКЮРИТЕ. – EDN WWTGPC.