

УДК 681.586.2

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕМЕНТАРНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ГИРОСКОПА И АКСЕЛЕРОМЕТРА****Шишка Владислав Евгеньевич,**

магистрант, Кубанский Государственный Университет, г. Краснодар

Пузановский Кирилл Вячеславович,

старший преподаватель, Кубанский Государственный Университет, г. Краснодар

Кутепов Владимир Михайлович,

студент, Кубанский Государственный Университет, г. Краснодар

Аннотация

В работе исследуется проблема точного определения угловой ориентации робототехнических систем различной среды базирования наземных, воздушных и подводных. Проведен детальный анализ физических причин возникновения погрешностей в MEMS-акселерометрах и гироскопах. Описан процесс разработки программно-аппаратного комплекса на базе Arduino Uno и MPU-6050 для проведения сравнительного эксперимента. На основе написанного алгоритма комплементарной фильтрации показано преимущество комплексирования данных перед использованием одиночных датчиков. Статья содержит математическое обоснование выбора коэффициентов фильтрации и анализ результатов натурных испытаний.

Ключевые слова: инерциальная навигация, MPU-6050, комплементарный фильтр, акселерометр, гироскоп, беспилотные системы, MEMS-датчики.

**USING COMPLEMENTARY FILTER TO USE GYROSCOPE AND
ACCELEROMETER DATA****Shishka Vladislav Evgenevich,**

student, Kuban State University, Krasnodar

e-mail: shishkavlad20@mail.ru

Puzanovsky Kirill Vyacheslavovich,

Senior Lecturer, Kuban State University, Krasnodar

e-mail: puzanovsky.kv@yandex.ru

Kutepov Vladimir Mikhailovich,

student, Kuban State University, Krasnodar

e-mail: vladimir.kutepov.08@mail.ru

ABSTRACT

The paper explores the problem of accurately determining the angular orientation of robotic systems of various environments based on land, air and underwater. A detailed analysis of the physical causes of errors in MEMS accelerometers and gyroscopes has been carried out. The process of developing a hardware and software complex based on Arduino Uno and MPU-6050 for conducting a comparative experiment is described. Based on the written complementary filtering algorithm, the advantage of data aggregation over the use of single sensors is shown. The article contains a mathematical justification for the selection of filtration coefficients and an analysis of the results of field tests.

Keywords: inertial navigation, MPU-6050, complementary filter, accelerometer, gyroscope, unmanned systems, MEMS sensors.

Введение

Развитие автономных интеллектуальных систем на сегодняшний день является одним из приоритетных направлений научно-технического прогресса [5]. Любые типы беспилотных аппаратов, будь то малоразмерные воздушные суда, наземные колесные роботы или подводные аппараты нуждаются в прецизионной системе ориентации в пространстве для обеспечения устойчивого функционирования и выполнения заданных траекторий [1].

Основой таких систем являются инерциальные навигационные системы (ИНС), которые строятся на базе микроэлектромеханических систем (MEMS) [5]. Ключевыми компонентами MEMS-модулей являются акселерометры и гироскопы. Однако, несмотря на их компактность и низкую стоимость, они обладают существенными физическими недостатками, которые делают невозможным их прямое использование без специализированной математической обработки [3]. В данной статье рассматривается реализация алгоритма, позволяющего нивелировать ошибки датчиков и получать достоверную информацию об углах крена и тангажа в реальном времени.

Основная часть

Для понимания необходимости фильтрации необходимо рассмотреть природу сигналов, получаемых от акселерометра и гироскопа по отдельности.

Акселерометр измеряет проекции вектора кажущегося ускорения на собственные оси чувствительности. В статическом положении это позволяет вычислить угол наклона аппарата относительно вектора силы тяжести. Однако в условиях реальной эксплуатации аппарат подвержен динамическим нагрузкам: центробежным силам, линейным ускорениям, высокочастотным вибрациям от работы приводов и двигателей [3]. Эти факторы накладываются на полезный сигнал в виде высокочастотного шума большой амплитуды. Таким образом, акселерометр достоверен только в среднем за время, но непригоден для мгновенной оценки угла в динамике.

Гироскоп измеряет угловую скорость вращения вокруг своих осей. Для получения угла необходимо выполнить операцию интегрирования угловой скорости по времени. Главная проблема здесь заключается в наличии дрейфа нуля и случайных стохастических погрешностей [2]. Даже когда аппарат неподвижен, гироскоп выдает небольшое ненулевое значение, которое при интегрировании превращается в постоянно растущую ошибку. Этот

эффект называется низкочастотным дрейфом. В результате за несколько минут работы расчетный угол может измениться на десятки градусов от реального значения.

Математическая модель комплементарной фильтрации

Идея комплементарного фильтра заключается в том, чтобы пропустить сигнал акселерометра через фильтр низких частот (ФНЧ), отсекая вибрации, а сигнал гироскопа через фильтр высоких частот (ФВЧ), отсекая медленный дрейф [4].

Математически это реализуется через взвешенное суммирование двух источников данных:

$$\text{Angle} = \alpha \times (\text{Angle_prev} + \text{Gyro_rate} \times dt) + (1 - \alpha) \times \text{Accel_angle}$$

Angle – итоговое значение угла, Angle_prev – предыдущее состояние системы, Gyro_rate – скорость вращения с гироскопа, Accel_angle – угол относительно горизонта с акселерометра, dt – время между измерениями, α – коэффициент доверия. Если $\alpha = 0.96$, то 96% значения угла берется из прогноза акселерометра и только 4% – для коррекции по гироскопу.

Данный подход позволяет системе быстро реагировать на изменения за счет гироскопа и при этом не накапливать ошибку за счет акселерометра [4].

Описание аппаратного обеспечения эксперимента

Для проведения практических испытаний был разработан экспериментальный стенд, состоящий из следующих компонентов:

Микроконтроллер Arduino Uno. Базируется на процессоре ATmega328P. Данная платформа была выбрана в качестве вычислительного ядра для реализации алгоритма обработки данных в реальном времени [2].

Модуль GY-521 – шестиосевой инерциальный модуль, включающий 3-осевой акселерометр и 3-осевой гироскоп. Модуль имеет встроенный 16-битный АЦП для каждого канала, что обеспечивает высокую дискретность данных [3]. В ходе эксперимента конфигурация модуля была программно ограничена до пяти измерительных каналов: трех осей гироскопа и двух осей акселерометра. Осевое вращение вокруг оси Z было исключено из анализа, так как акселерометр физически не способен фиксировать повороты вокруг вектора гравитации и, следовательно, не может корректировать накапливаемый дрейф гироскопа по этой оси [2, 3].

Взаимодействие между микроконтроллером и модулем осуществлялось по протоколу I2C. Для передачи результатов измерений на ПК и их последующей визуализации использовался последовательный интерфейс со скоростью 38400 бит/с.

Анализ экспериментальных данных

В ходе эксперимента платформа с датчиком подвергалась различным типам воздействий. Результаты представлены в виде сравнительного анализа.

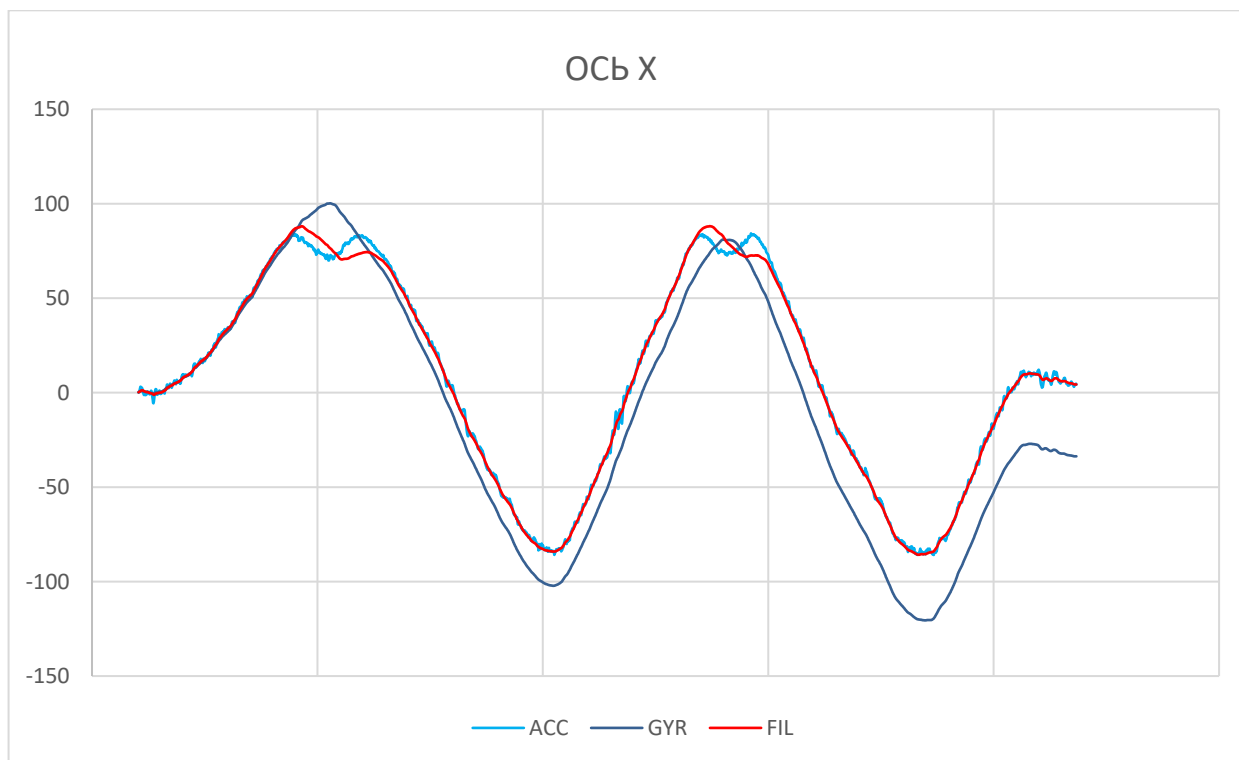


Рисунок 1. Вращение на 90° по оси X

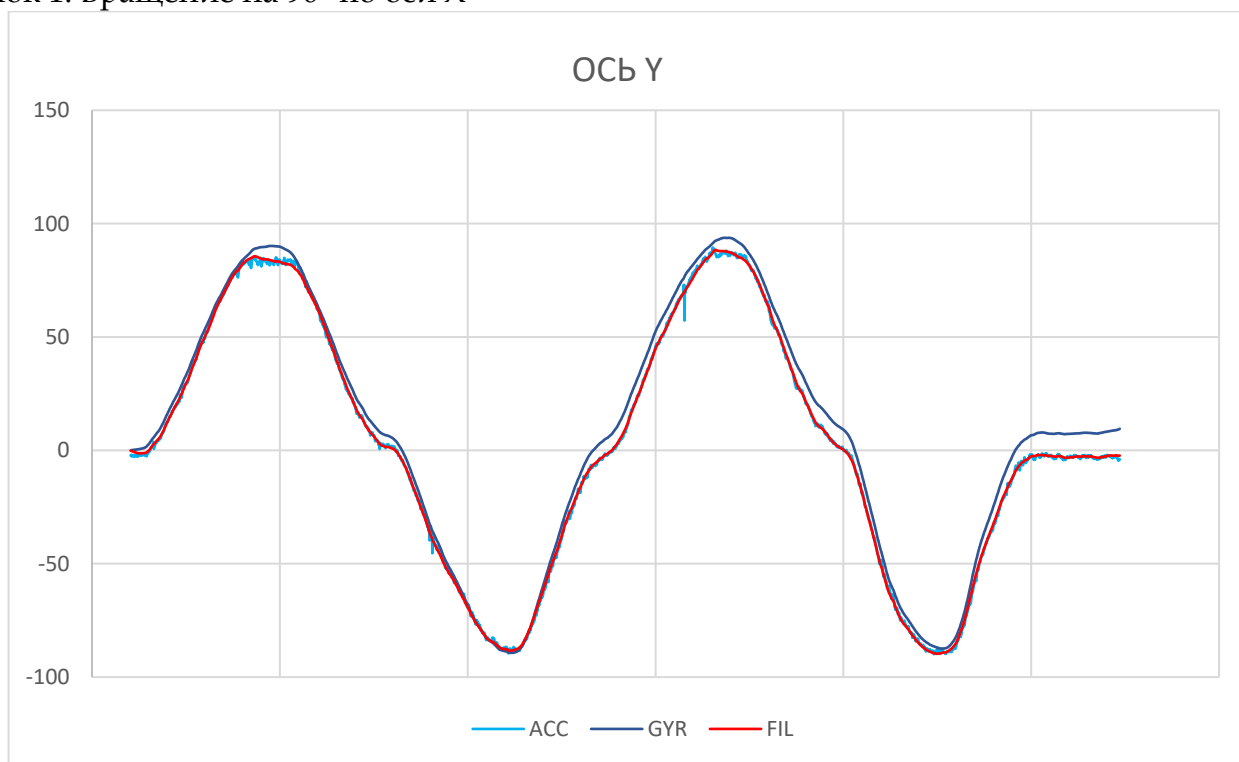


Рисунок 2. Вращение на 90° по оси Y

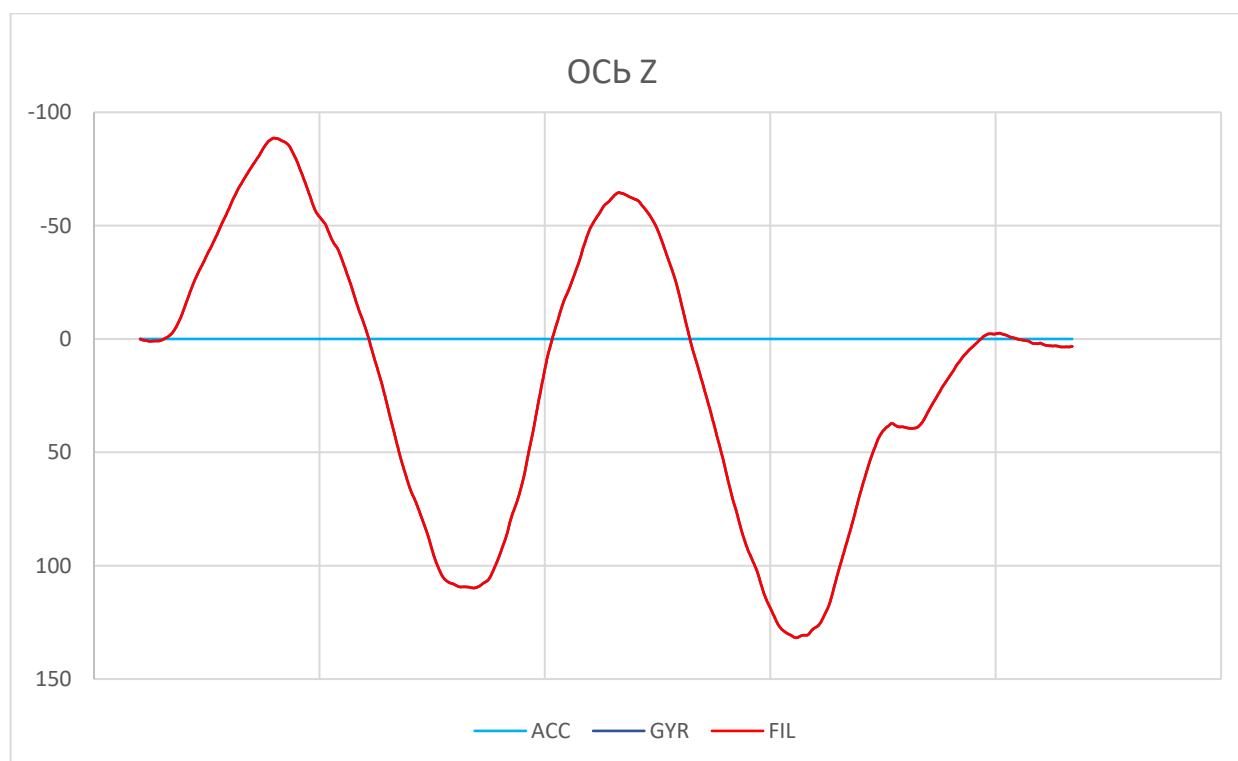


Рисунок 3. Вращение на 90° по оси Z

При включении внешнего источника вибрации данные акселерометра показали зашумленность. Использование только акселерометра привело бы к мгновенной потере ориентации аппарата. Комплементарный фильтр при $\alpha = 0.96$ полностью игнорировал эти помехи, выдавая стабильную прямую.

В течение 10 минут активного перемещения и изменения положения расчетный угол, полученный по гироскопу, отклонился на 7.4 градуса. Угол, полученный через фильтр, сохранил значение 0.0 ± 0.1 градуса, что подтверждает успешную компенсацию низкочастотной ошибки [4, 5].

При поворотах на 90 градусов фильтр продемонстрировал плавное и точное следование за движением без характерного для чистого акселерометра дребезга в конечных точках траектории.

Заключение

Результаты проведенного исследования и практического эксперимента подтверждают, что для надежной работы любых типов беспилотных аппаратов: наземных, воздушных или подводных критически важна обработка данных инерциальных датчиков. Реализованный алгоритм комплементарной фильтрации на платформе Arduino Uno и модуле GY-521 показал оптимальное сочетание точности и вычислительной простоты.

Данный подход позволяет минимизировать аппаратные затраты при сохранении высоких навигационных характеристик, что является ключевым фактором при разработке малых роботизированных комплексов. Полученные программные решения и экспериментальные данные лягут в основу будущих разработок в рамках проекта по созданию высокоточных систем стабилизации полезной нагрузки беспилотных аппаратов.

Список литературы:

1. Агеев, М. Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / М. Д. Агеев, Л. В. Киселев, Ю. В. Матвиенко. – Москва: Наука, 2005. – 400 с.
2. Жирабок, А. Н. Диагностирование датчиков подводных роботов / А. Н. Жирабок, А. М. Писарец // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 9. – С. 15–21.

3. Ли, Г. Х. Комплементарный фильтр для оценки угла с использованием микроэлектромеханической системы гироскопа и акселерометра / Г. Х. Ли, В. М. Панкратов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 11. – С. 921-927.
4. Копбаев, М. А. Цифровая фильтрация сигналов в микроконтроллерных устройствах релейной защиты/ М. А. Копбаев // Вестник КазНТУ. – 2005. – № 4. – С. 82-85.
5. Боковой, А. В. Архитектура системы автоматического управления группой малых беспилотных летательных аппаратов / А. В. Боковой // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2018. – № 1. – С. 68-77.

References:

1. Ageev, M. D. Autonomous underwater robots. Systems and technologies / M. D. Ageev, L. V. Kiselyov, Yu. V. Matvienko. Moscow: Nauka Publ., 2005. 400 p.
2. Zhirabok, A. N. Diagnostics of sensors of underwater robots / A. N. Zhirabok, A.M. Pisarets // Mechatronics, automation, control. - 2004. – No. 9. – pp. 15-21.
3. Li, G. H. A complementary filter for angle estimation using a microelectromechanical gyroscope and accelerometer system / G. H. Li, V. M. Pankratov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Instrument engineering. 2016. Vol. 59, No. 11. pp. 921-927.
4. Копбаев, М. А. Digital signal filtering in microcontroller relay protection devices/ М. А. Копбаев // Bulletin of KazNTU. 2005. No. 4. pp. 82-85.
5. Bokov, A.V. Architecture of the automatic control system for a group of small unmanned aerial vehicles / A.V. Bokov // Information technologies and computing systems. - 2018. – No. 1. – pp. 68-77.