

## УДК 621.3.049.77

*Музика Д.С., студент гр. ПГ-71, к.т.н., доцент Павловський О.М.*  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

### ОГЛЯД МЕТОДІВ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ МОДУЛЯ MPU-6050

**Анотація.** В даній роботі, описуються основні характеристики модуля MPU-6050 та можливості щодо його налаштування. Розглядаються найбільш поширені методи обробки вихідної інформації, серед яких використання вбудованого процесора руху, та використання компліментарних фільтрів, а також їх основні недоліки та переваги в залежності від умов роботи модуля. Проведено дослідження якості вихідного сигналу в статистиці для кожного з розглянутих методів.

**Ключові слова:** модуль, MEMS, гіроскоп, акселерометр, компліментарний фільтр, інтерфейс, DMP, процесор, мікроконтролер.

### ВСТУП

Перспективи сучасного приладобудування пов'язані з розробкою пристроїв, що поєднують в собі малу масу, габаритні розміри, енергоспоживання та собівартість при безвідмовному виконанні заданої функції з необхідною точністю. Одними із найбільш розповсюджених сучасних інерціальних вимірювальних перетворювачів, є мікроелектромеханічні системи (MEMS) які складають одну суцільну систему мініатюрних конструкцій на одному кристалі, об'єднуючим чутливі, перетворюючі та електричні елементи. [1]

Невисока вартість та малі розміри призвели до великого поширення MEMS та збільшення сфер їх використання. Однак, незважаючи на кількість переваг, в порівнянні з класичними гіроскопами та акселерометрами, мікромеханічні пристрої мають ряд недоліків, серед яких відносно невелика точність. Для часткового вирішення таких недоліків було розроблено ряд методів обробки вихідної інформації. Отже, метою даної роботи є порівняння методів обробки інформації для мікромеханічного чутливого елемента, на прикладі модуля MPU-6050 як найбільш поширеного, та дослідження ефективності їх роботи.

### МОДУЛЬ MPU-6050

Модуль MPU-6050 найбільш поширеним мікромеханічним інтегрованим 6-осьовим пристроєм відстеження руху, що поєднує в собі 3-осьовий гіроскоп, 3-осьовий акселерометр і цифровий процесор руху (DMP). Завдяки наявності I2C шини, модуль має можливість приймати вхідний сигнал від зовнішнього 3-осьового компаса, що дозволяє збільшити максимальну кількість вимірюваних параметрів до 9. MPU-6050 також містить інтегрований датчик температури і при необхідності може оснащуватися датчиком тиску.

Так як інформація, що надходить від чутливих елементів подається в аналоговому вигляді, то в структурі модуля присутні шість 16-розрядних аналого-цифрових перетворювача для гіроскопа та акселерометра відповідно[2].

В залежності від умов роботи, користувач має можливість встановлювати, діапазон вимірювання величин. Для гіроскопів даний діапазон можж бути обраний в межах від  $\pm 250$  до  $\pm 2000$   $^{\circ}/\text{с}$ , для акселерометрів від  $\pm 2g$  до  $\pm 16g$ .

Для зв'язку регістрів модуля з зовнішніми датчиками MPU-6050 містить високошвидкісну I2C шину, що працює на частоті в 400 кГц [3]. Як працює в основному режимі, та режимі прямого проходження.

В основному режимі роботи I2C, модуль MPU-6050 працює в якості

ведучого пристрою він виконує опитування чутливих елементів із підключених зовні, або вбудованих у модуль датчиків (напр. датчик температури). При цьому, може виконуватися зчитування до 24 байт даних з 4 додаткових датчиків.

В режимі прямого проходження, ведучим пристроєм є підключений до модуля, зовнішній ПК, або мікроконтролер. В даному режимі роботи, логіка управління шиною на модулі є відключеною і повністю задається зовнішнім керуючим ядром.

При роботі з вихідними даними, необхідно враховувати різноманітні фактори які суттєво впливають на якість та точність вихідного сигналу. Конструктивні особливості приладів, різноманітні зовнішні чинники спотворюють вихідні сигнали модуля, в результаті чого використання отриманих даних в первісному вигляді не є можливим. З метою вирішення даної проблеми використовують різноманітні методи обробки вихідної інформації.

### **МЕТОДИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ**

При довгостроковій роботі з модулем MPU-6050, користувач, за рахунок дрейфу нуля, отримує вихідні дані з гіроскопів з доволі великою похибкою. Для зменшення впливу похибки на результуючий вихідний сигнал, виробник розробив власний, внутрішній цифровий процесор руху (DMP) із вбудованими алгоритмами, що розроблені фірмою Invensense.

Вбудований цифровий процесор руху є однією з головних переваг використання модуля MPU-6050, головною метою якого зчитування даних акселерометрів, гіроскопів та додаткових зовнішніх датчиків з вбудованих регістрів або буферу, з подальшою їх обробкою [4]. В процесі обробки, DMP об'єднує отримані дані з акселерометра та гіроскопа з метою мінімізації впливу похибок властивих кожному датчику. Для спрощення роботи з DMP, користувачу надається ряд спеціально розроблених бібліотек, що дозволяють виконувати різноманітні операції розрахунку та перетворень, використовуючи готові функції. Однією з найбільш поширених бібліотек для роботи з DMP є "MPU6050\_6Axis\_MotionApps20.h".

В процесі обробки даних, DMP подає отримані з ЧЕ дані у вигляді кватерніонів і при необхідності, здатний виконати їх перетворення в кути Ейлера. Кватерніоном називають гіперкомплексне число вигляду:

$$q = w + x \cdot i + y \cdot j + z \cdot k \quad (1)$$

де  $w, x, y, z$  - дійсні числа, які в сукупності називають параметрами Родріга-Гамільтона;  $i, j, k$  - уявні одиниці.

Окрім цього, існує також ряд інших операцій, дізнатися про які можливо при більш детальному розгляді бібліотеки. Однак, для отримання необхідного результату достатньо використати лише декілька основних функцій. Функція *dmpGetQuaternion* виконує зчитування пакетів даних, що містять в собі значення дійсних чисел кватерніона з вбудованого буферу. Як приклад, на рисунку 1 зображено формат внутрішнього буфера з якого виконується зчитування даних.

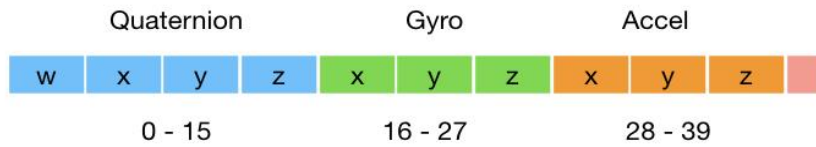


Рисунок 1. Формат внутрішнього буфера

Другою, не менш важливою особливістю використання бібліотеки, є функція розрахунку окремих елементів ортогональної матриці отриманої при переході від кватерніона, *dmpGetGravity*. Результуюча ортогональна матриця матиме вигляд:

$$R = \begin{pmatrix} w^2 + x^2 - y^2 - z^2 & 2xy - 2wz & 2xz + 2wy \\ 2xy + 2wz & w^2 - x^2 + y^2 - z^2 & 2yz - 2wx \\ 2xz - 2wy & 2yz + 2wx & w^2 - x^2 - y^2 + z^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Використовуючи елементи ортогональної матриці та кватерніон можливо знайти необхідні кути орієнтації. В програмі дане рішення виконується шляхом використання функції *dmpGetYawPitchRoll*, в якій закладений алгоритм розрахунку всіх трьох кутів орієнтації:

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \psi \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left( \frac{2(wx + yz)}{\sqrt{(2(xz - wy))^2 + (w^2 - x^2 - y^2 + z^2)^2}} \right) \\ \operatorname{atan} 2(2xy - 2wz, 2w^2 + 2x^2 - 1) \\ \arctan \left( \frac{2(xz - wy)}{\sqrt{(2(wx + yz))^2 + (w^2 - x^2 - y^2 + z^2)^2}} \right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Таким чином, показано, що використовуючи лише основні функції бібліотеки “MPU6050\_6Axis\_MotionApps20.h” для DMP, можливо розробити програмне забезпечення для опитування датчиків модуля MPU-6050 та мінімізувати вплив зовнішніх збурень та дрейфу нуля гіроскопів.

Однак, використання DMP має деякі недоліки, одним з яких є доволі великий об'єм займаної при розгортанні бібліотеки “MPU6050\_6Axis\_MotionApps20.h” пам'яті, що накладає ряд обмежень для його фізичного використання, відтак, можемо сформулювати рекомендацію, про використання мікроконтролерів з об'ємом Flash-пам'яті більше ніж 32 кБ.

За відсутності необхідності отримання максимально можливої точності вихідних даних при роботі з MPU-6050, або по причині невеликого об'єму пам'яті мікроконтролера, для обробки сигналів модуля, як один із розповсюджених варіантів, можливо використовувати комплементарний фільтр.

Призначення комплементарного фільтра полягає у ліквідації помилки інтегрування при визначенні кутової координати з використанням мікромеханічних гіроскопів [5].

При побудові приладів для вимірювання куту нахилу різних об'єктів відносно гравітаційного поля Землі в якості чутливого елементу можливо використовувати акселерометр, або гіроскоп. У випадку використання

мікромеханічного гіроскопа, визначення кута нахилу основи приладу, можливо виконати за допомогою дискретного інтегрування визначеної гіроскопом швидкості обертання. У отриманому сигналі, як описано вище, однією із складових, що суттєво впливають на точність вихідного сигналу є дрейф нуля, який полягає у невідповідності величини вихідного сигналу значенню нуля ММГ при зупинці процесу його обертання. Окрім цього, застосування процедури дискретного інтегрування, в залежності від методу, також накладає свої спотворення.

У випадку застосування акселерометра для визначення кута нахилу об'єкту, достатньо виконати нескладні геометричні перетворення до його показів, що досить точно дозволяє визначити кути нахилу приладу, однак лише в стані спокою. При впливі зовнішніх прискорень (вібрації, рухи, удари) виникають похибки, що суттєво впливають на точність. Для очистки вихідного сигналу акселерометра, у найпростішому випадку, можливо застосувати фільтр низьких частот (ФНЧ), проте використання ФНЧ для показів гіроскопа не ефективне.

Так виникає ідея об'єднати дані акселерометра та гіроскопа для усунення їх недоліків. Дане об'єднання можливо виконати, якщо використати комплеметарний фільтр наступного вигляду:

$$angle = (1 - K) \cdot gyrData + K \cdot accData \quad (4)$$

де *angle* - відфільтрований кут нахилу; *gyrData* - вимірювана кутова швидкість; *accData* - значення кута нахилу за показами акселерометра; *K* - коефіцієнт фільтра.

Враховуючи величини накопичення похибок та дрейфу нуля, виконується підбір значення коефіцієнту фільтрації. В результаті, відфільтрована величина кута нахилу є сумою значень інтегрування гіроскопа та акселерометра.

Для порівняння ефективності розглянутих методів обробки інформації було проведено практичне дослідження з використанням плати Arduino Uno, модуля MPU-6050, програмного середовища Arduino IDE, та MATLAB.

При дослідженні методу обробки інформації з використанням цифрового процесору руху, для його налаштування був розроблений програмний код на основі розглянутої бібліотеки "MPU6050\_6Axis\_MotionApps20.h" розмір якого склав 13 кілобайт або 40% від загального об'єму Flash-пам'яті мікроконтролера. Зчитування даних з MPU-6050 виконувалося протягом однієї години в сттичному режимі. Отримані дані були оброблені в програмному середовищі MATLAB та виведені у вигляді графіка коливань нуля на рисунку 2, а.

При дослідженні методу обробки інформації з використанням комплементарного фільтра була розроблена модель даного фільтра у вигляді програмного коду в середовищі Arduino IDE. Розмір програми склав 8 кілобайт, або 23% від загального об'єму Flash-пам'яті мікроконтролера. Зчитування даних з MPU-6050 так само виконувалося протягом однієї години. Отримані дані у вигляді графіка коливань нуля представлені на рис. 2 б.

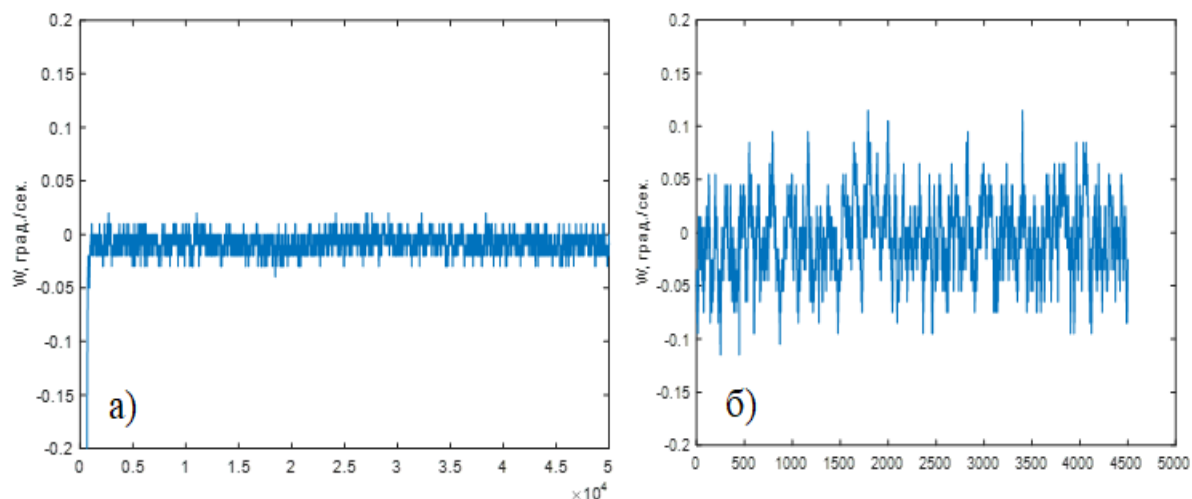


Рисунок 2. Графіки коливань нуля по осі Y для DMP та комплементарного фільтра

## ВИСНОВОК

У роботі приведені порівняння різних алгоритмів обробки вихідного сигналу з ЧЕ модуля MPU-6050, розглянуто алгоритм обробки вбудованим цифровим процесором руху DMP, та обробки за допомогою компліментарного фільтра. Проведені експерименти у статичному режимі показали ефективність використання DMP приблизно у п'ять разів, що приведено на рис. 2. Проте, використання бібліотеки “MPU6050\_6Axis\_MotionApps20.h” для DMP зайняло майже 40% від всієї доступної Flash-пам'яті МК платформи Arduino, що майже у двічі більше у порівнянні із алгоритмом компліментарного фільтру. У подальшому планується порівняти ефективність зазначених алгоритмів при рухомій основі, а також їх ефективність при використанні різних МК.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Растопов В.Я. Микромеханические приборы : [Учебное пособие]. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 ст.
- [2] MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 / InvenSense Inc. Режим доступу: [www.URL:https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf](https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf) – 19.08.2013 p.
- [3] Ziemann, V. A Hands-On Course in Sensors Using the Arduino and Raspberry Pi : tutorial / V. Ziemann – P. : CRC Press, 2018. – 235 p.
- [4] Awang Ahmad, Z. High Efficiency Gyrostabilizer Antenna Platform / Z. Awang Ahmad, S. Daud, M. Asmi Rolmi // Computational Science and Engineering : peer reviewed papers from the Third International Conference. – P. : Trans Tech Publications Ltd, 2018. – p. 42.
- [5] John Garren F. Application of a modified complementary filtering technique for increased aircraft control system / John F. Garren, Frank R. Niessen // Nasa Technical Memorandum. – 1977. - p. 126.