



УДК 681.518.3

А. Г. Шпекторов, В. Т. Фам

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Анализ применения микромеханических измерительных систем для задач управления морскими подвижными объектами

Исследуется возможность использования микромеханических измерительных систем для обеспечения угловой стабилизации морских подвижных объектов. Рассматривается задача фильтрации для измерительного модуля MPU6050 для повышения точности измерений. Приведена математическая модель измерительного модуля, предложен алгоритм построения фильтра Калмана. Проведены натурные эксперименты для определения точности измерений углов ориентации.

Фильтрация Калмана, MEMS-технологии, обработка навигационных измерений

В настоящее время малогабаритные необитаемые морские подвижные объекты (НМПО) находят широкое применение в различных областях деятельности человека на море. Развитие морской робототехники позволяет ставить разнообразные задачи управления перед НМПО и их соединениями. Эффективность решения задач управления, главным образом, обусловлена качеством измерения параметров движения подвижных объектов. Подобные объекты, вследствие малых масс и габаритов, не предназначены для размещения высокоточных и громоздких навигационно-измерительных систем, характерных также высокой стоимостью.

Для решения задач навигации на НМПО целесообразно применять микромеханические измерительные системы на базе MEMS-технологий. Однако характеристики точности таких систем сравнительно низкие, поэтому резонно поставить следующие вопросы: 1) какую точность могут обеспечить подобные системы; 2) достаточно ли точности измерения для решения задач управления НМПО.

Объектом исследования в данной статье является измерительный модуль MPU5060, в состав которого входят микромеханические гироскоп и акселерометр. Измерение проекций линейного ускорения

по трем осям позволяет вычислять углы крена и дифферента модуля, гироскоп обеспечивает измерение соответствующих угловых скоростей. Для улучшения результатов измерений параметров движения используются алгоритмы фильтрации.

Известный метод получения оценок углов и угловых скоростей основан на построении фильтра Калмана для модели двойного интегратора [1] и предполагает дальнейшее увеличение порядка модели для учета внешних возмущений. Однако при наличии дополнительной информации о погрешностях измерений математическая модель и фильтр Калмана могут быть получены в упрощенном виде.

Анализ измерительного модуля MPU6050. Внешний вид измерительного модуля представлен на рис. 1. В состав модуля интегрирован трехосный акселерометр, трехосный гироскоп и цифровой процессор для первичной обработки измерений. В модуле MPU6050 предусмотрен аналоговый вход для внешнего компаса, что позволит обеспечить измерение ориентации трех углов Эйлера. Обмен данных поддерживается интерфейсной шиной I²C. Встроенные в модуль аналогово-цифровые преобразователи (3 АЦП – для акселерометра и 3 – для гироскопа) обеспечивают измерения на выходе модуля в цифровом виде. Модуль может быть программно настроен на разные диапа-

зоны измерения угловой скорости (± 250 , ± 500 , ± 1000 и ± 2000 °/с) и линейного ускорения (± 2 , ± 4 , ± 8 и ± 16 g). Погрешности измерений приведены в спецификации модуля [2].

Углы крена (θ) и дифферента (ψ) модуля могут быть получены по данным акселерометра:

$$\theta = \arctg \frac{a_y}{a_x}; \quad \psi = \arctg \frac{a_z}{a_x},$$

где a_x , a_y , a_z – проекции ускорения на продольную, вертикальную и поперечную оси в системе координат, связанной с центром масс модуля.

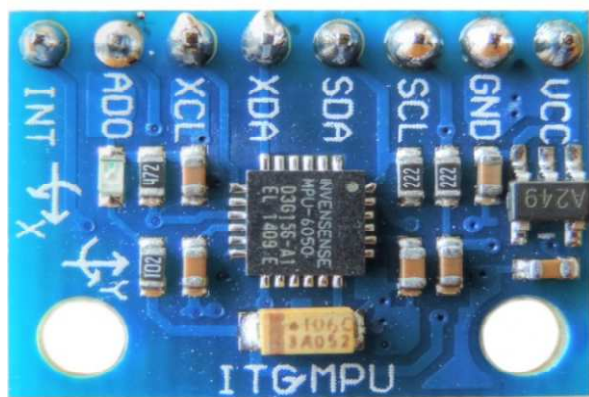


Рис. 1

Измерения акселерометра имеют существенные выбросы и искажения, обусловленные действием боковых ускорений.

Углы крена и дифферента также могут быть получены интегрированием соответствующих проекций угловой скорости, полученных от гироскопа, однако при этом возможно накопление ошибки интегрирования. Кроме того, для микромеханических гироскопов характерно маломеняющееся смещение угловой скорости. Соответственно, требуется провести фильтрацию измерений акселерометра и гироскопа, сочетающую достоинства обоих датчиков.

Математическая модель измерительного модуля и фильтра Калмана. Способы измерения угла крена и угла дифферента одинаковы, поэтому можно рассматривать модель измерения любого угла. Далее алгоритм фильтрации будет рассматриваться для измерений угла крена. Поскольку измерение угловой скорости гироскопом на малом интервале времени имеет довольно высокую точность, его можно использовать для коррекции измерения акселерометром. Математическая модель угла крена модуля имеет вид

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \bar{\omega}_x(t) - \omega_{xb}(t), \quad (1)$$

где $\bar{\omega}_x$ – измерение угловой скорости гироскопом; ω_{xb} – угловая скорость дрейфа гироскопа.

Поскольку угловая скорость ухода гироскопа меняется мало, ее можно описать уравнением

$$\frac{d\omega_{xb}(t)}{dt} = \mu(t), \quad (2)$$

где $\mu(t)$ – гауссов белый шум с малой ковариацией.

Модуль MPU6050 обеспечивает измерения в цифровом виде, поэтому уравнения (1) и (2) удобнее представить в дискретной форме

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \omega_{xb} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & -h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_{xb} \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} h \\ 0 \end{bmatrix} \bar{\omega}_{x_k}, \quad (3)$$

где h – период дискретизации.

Уравнение выхода имеет вид

$$\bar{\theta}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_{xb} \end{bmatrix}_k + v_k, \quad (4)$$

где v_k – гауссов белый шум, описывающий погрешность измерений угла крена. Ковариационные матрицы процессов, описывающих погрешность измерений угловой скорости (Q_ω) и угла крена (R_θ), могут быть заданы исходя из характеристик модуля.

Рассмотрим построение дискретного фильтра Калмана для модели (3), (4), работающего по принципу прогноза-коррекции [3]. Априорная оценка вектора состояния модели (3), а также матрица ковариации ошибки имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- &= A_d \hat{\mathbf{x}}_k^- + B_d \mathbf{u}_k, \\ P_{k+1}^- &= A_d P_k A_d^T + Q_k, \end{aligned} \quad (5)$$

где A_d, B_d – дискретные матрицы состояния и управления (3); $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ – априорная оценка вектора состояния (3); $\mathbf{u}_k = \bar{\omega}_{x_k}$; P_k – матрица ковариации ошибки оценивания; Q_k – матрица ковариации, определяемая погрешностью измерения угловой скорости:

$$Q_k = Q_\omega^2 B_d B_d^T = \begin{bmatrix} (Q_\omega h)^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Скорректированная оценка фильтра Калмана имеет вид

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- + K_{k+1}(\mathbf{y}_{k+1} - C_d \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-);$$

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- C_d^T (C_d P_{k+1}^- C_d^T + R)^{-1}, \quad (6)$$

где C_d – матрица наблюдения уравнения (4); K_k – матрица коэффициентов фильтра Калмана; $\mathbf{y}_k = \bar{\theta}_k$; $R = R_\theta$.

Ковариация ошибки фильтра с коррекцией может быть определена по формуле

$$P_{k+1} = (I - K_{k+1} C_d) P_{k+1}^-, \quad (7)$$

где I – единичная матрица.

Выражения для матриц состояния, управления и наблюдения математической модели имеют простую форму, поэтому выражения (5)–(7) можно определить аналитически:

$$P_{11}^- = P_{11} + h(P_{22}h - P_{12} - P_{21} + Q_\theta^2 h);$$

$$P_{12}^- = P_{12} - P_{22}h;$$

$$P_{21}^- = P_{21} - P_{22}h;$$

$$P_{22}^- = P_{22};$$

$$K_1 = \frac{P_{11}^-}{1 + P_{11}^-}; \quad K_2 = \frac{P_{21}^-}{1 + P_{11}^-};$$

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} P_{11}^- (1 - K_1) & P_{12}^- (1 - K_1) \\ P_{21}^- - K_2 P_{11}^- & P_{22}^- - K_2 P_{21}^- \end{bmatrix},$$

где $P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$ – элементы матрицы P_k ; K_1, K_2 – элементы матрицы коэффициентов K_{k+1} . В качестве начальных значений матрицы P_k можно выбрать нулевые значения. Оценка угла крена, восстановленная фильтром Калмана, вычисляется следующим образом:

$$\bar{\theta}_{k+1}^- = \bar{\theta}_k^- + h(\bar{\omega}_{x_k} - \omega_{xb_k});$$

$$\bar{\theta}_{k+1} = \bar{\theta}_{k+1}^- + K_1(\bar{\theta}_{k+1} - \bar{\theta}_{k+1}^-);$$

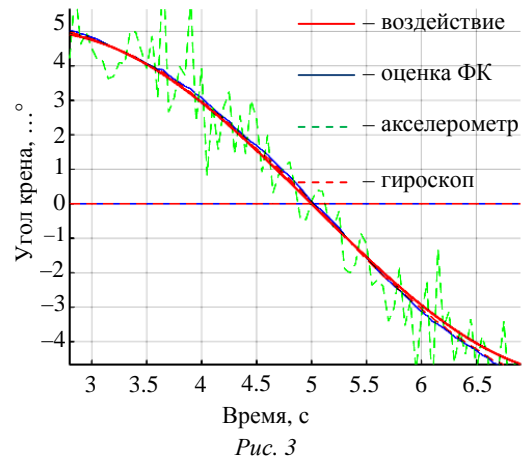
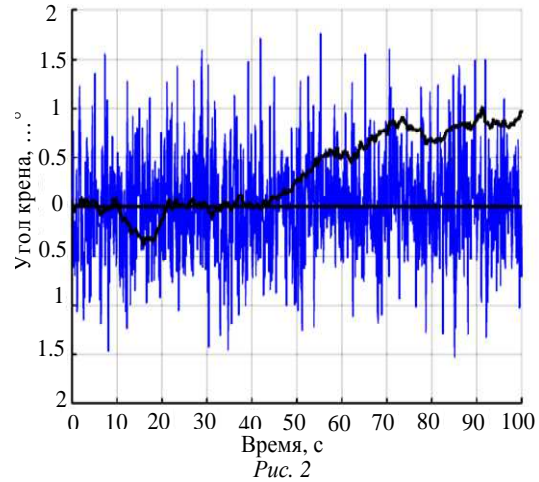
$$\omega_{xb_{k+1}} = \omega_{xb_k} + K_2(\bar{\theta}_{k+1} - \bar{\theta}_{k+1}^-).$$

Упрощенные формулы для расчета коэффициентов фильтра Калмана, матрицы ковариаций и оценок можно легко реализовать с помощью стандартных средств высокоуровневых языков программирования. Фильтр аналогичной структуры может быть реализован независимо для получения оценки угла дифферента, а при наличии внешнего компаса – также оценки угла рыскания.

Результаты испытаний модуля MPU6050 с фильтром Калмана. В качестве исходных параметров для фильтра Калмана, согласно настройкам модуля MPU6050 были выбраны следующие ковариации:

$$Q_\omega = 0.04; \quad R_\theta = 0.05.$$

Результаты испытаний измерительного модуля без обработки фильтром приведены на рис. 2 (для неподвижного состояния модуля). Из рисунка видно, что отдельные выбросы измерения акселерометром достигают 1.5° , а гироскоп имеет дрейф (угловая скорость составляет $\sim 0.005^\circ/\text{с}$).



На рис. 3 приведены результаты работы фильтра Калмана при повороте модуля вдоль оси x . Из рисунка видно, что фильтр обеспечивает сглаженную оценку угла, с точностью до 0.2° . На рис. 4 и 5 приведены результаты измерений параметров модуля при переменном воздействии.

Учитывая, что НМПО подвергается действию морского волнения, была также выявлена зависимость изменения максимальной ошибки от частоты гармонического воздействия. На рис. 6 приведены результаты натурального эксперимента.

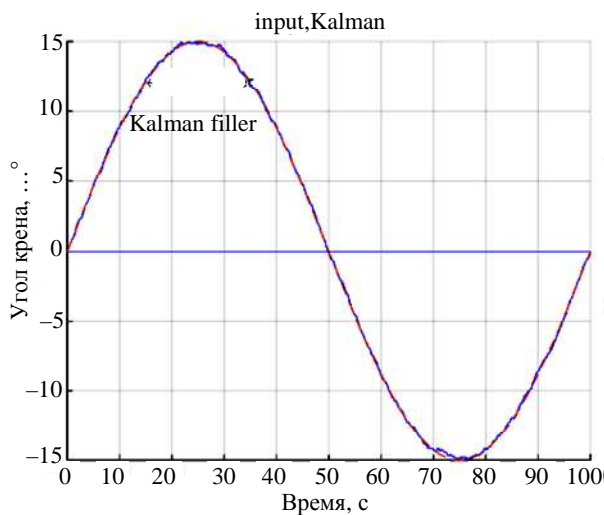


Рис. 4

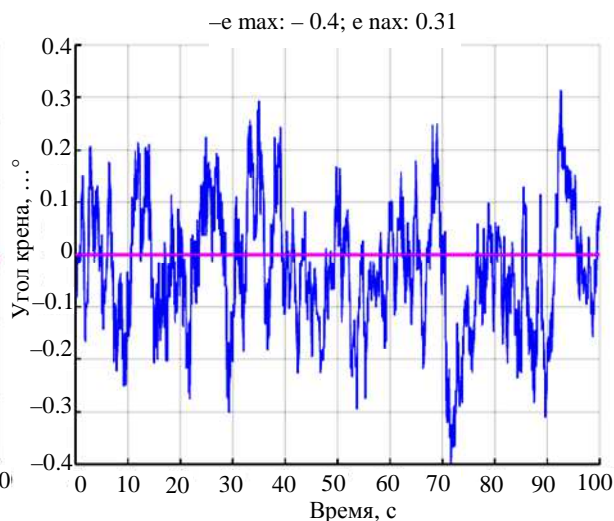


Рис. 5

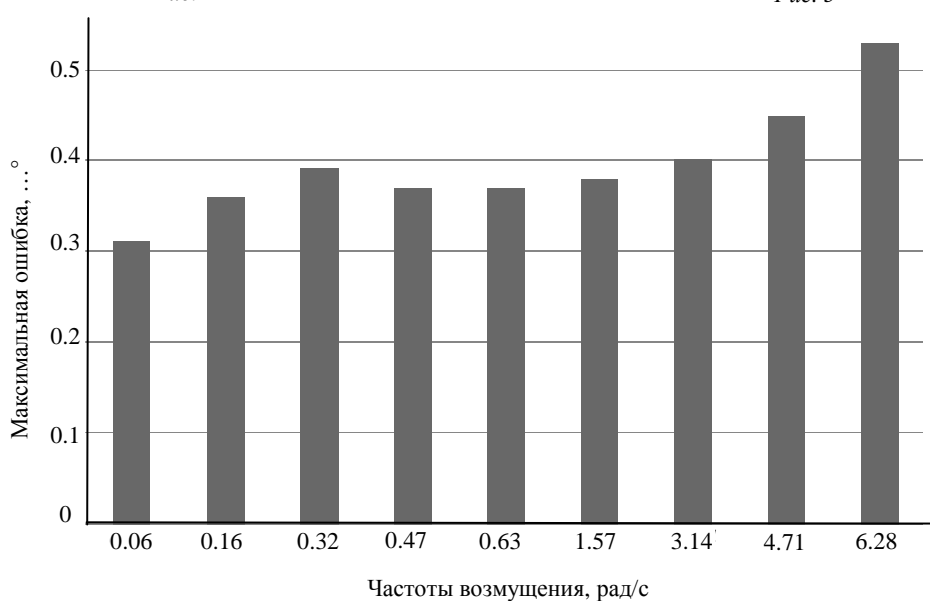


Рис. 6

Из рис. 6. видно, что ошибка фильтрации мало меняется от частоты возмущения, действующей на модуль, и только на больших частотах превышает 0.5° . Сопоставляя результаты экспериментов с требованиями по точности к измерениям параметров для систем управления [4], можно сделать вывод, что модуль MPU6050 обеспечивает приемлемую точность для решения задач управления НМПО.

Таким образом, модуль MPU6050 с алгоритмами калмановской фильтрации может быть использован для измерения угловых параметров движения и решения задач стабилизации крена и дифферента. При наличии внешнего измерителя направления (гироскоп, магнитный компас), сопрягаемого с модулем, можно обеспечить полную пространственную стабилизацию НМПО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабаров С. П., Корнев А. С., Амбросовский В. М. Отказоустойчивый адаптивный к внешним возмущениям фильтр Калмана // Морская радиоэлектроника. 2015. № 3. С. 20–23.

2. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. URL: www.cdiweb.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf.

3. McCarron B. Low-Cost IMU Implementation via Sensor Fusion Algorithms in the Arduino Environment.

URL: <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1114&context=aerosp>.

4. Обоснование требований к системам навигации и ориентации при решении задач управления движением подвижных объектов / А. М. Боронахин, Ю. А. Лукомский, А. Г. Шпекторов, Х. М. Тханг, Ч. Т. Дык // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 2. С. 77–80.

A. G. Shpektorov, V. T. Pham
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ANALYSIS OF MICROMECHANICAL MEASURING SYSTEMS APPLICATION FOR MARINE OCEAN VEHICLES STABILIZATION

The possibility of using micromechanical measuring systems for providing angular stabilization of marine ocean vehicles is explored. The filtering problem for the measuring module MPU6050 is considered to improve measurement accuracy. A mathematical model of the measuring module is given, an algorithm for designing the Kalman filter is proposed. Natural experiments were conducted to determine the accuracy of measurements of the orientation angles.

Kalman filtering, MEMS-technology, navigation measurement data processing
