

УДК 531.7

DOI: <http://doi.org/10.20535/2219-3804202019171836>

Л. М. Рижков¹, професор, д.т.н., А. М. Примушко², бакалавр

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕМЕНТАРНОГО ФІЛЬТРА НА МЕМС-ВИМІРЮВАЧАХ

En

The paper discusses the effectiveness of the use of a complementary filter to improve the accuracy of determining orientation angles. The main attention is paid to the study of the effect of gyro drifts on the accuracy of the filter. The efficiency of introducing a magnetometer into the composition of a complementary filter is investigated. The results are compared in the absence and in the presence of a magnetometer in the structure of the complementary filter. It is shown that in the presence of a magnetometer, the error in azimuth will also be limited. An experimental study of a complementary filter was carried out on MEMS-meters (gyro-

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

scope and accelerometer). It is shown that the use of a complementary filter is an effective method for increasing the accuracy of determining orientation angles.

Ru

Приведено аналітичне і експериментальне дослідження комплементарних фільтрів на МЭМС-вимірниках. Аналізується ефективність їх застосування для визначення просторової орієнтації рухомих об'єктів.

Вступ

Ефективним засобом визначення орієнтації рухомого об'єкта [1 – 3] є використання комплементарних фільтрів (КФ). Ідея КФ полягає у тому, щоб поєднати вимірювач із малою похибкою у низькочастотній області із вимірювачем цих же сигналів із малою похибкою у високочастотній області. Такий Q підхід є особливо ефективним у разі використання МЭМС-вимірювачів із малою точністю.

Постановка задачі

Виконаємо теоретичний аналіз та експериментальне дослідження ефективності використання КФ для підвищення точності визначення кутів орієнтації.

Вирішення задачі

Блок-схема КФ, призначеного для визначення кутів орієнтації ψ , θ , φ , наведена на рис. 1.

Запишемо рівняння руху

$$\begin{aligned} \hat{q} &= \frac{1}{2} \hat{q} \cdot \hat{\omega}; \\ e_{acc} &= \hat{g}^b \times g^b; \quad e_{mag} = \hat{m}^b \times m^b; \\ u_{acc} &= W_1(s) e_{acc}; \quad u_{mag} = W_2(s) e_{mag}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\hat{\omega} = \tilde{\omega} + u$; $\tilde{\omega} = \omega + \delta_{\omega}$; ω – реальна кутова швидкість;

δ_{ω} – дрейф гіроскопа; $\hat{g}^b = g^b + \delta_{acc}$; g^b – вектор гравітаційного прискорення g ; δ_{acc} – похибка акселерометра;

m_{in} – початковий вектор із вихідних сигналів магнітометра;

$\hat{m}^b = m^b + \delta_{mag}$; m^b – ідеальний вихідний сигнал магнітометра;

δ_{mag} – похибка магнітометра; q_{in} , R_{in} – початкові значення кватерніону орієнтації та матриці напрямних косинусів.

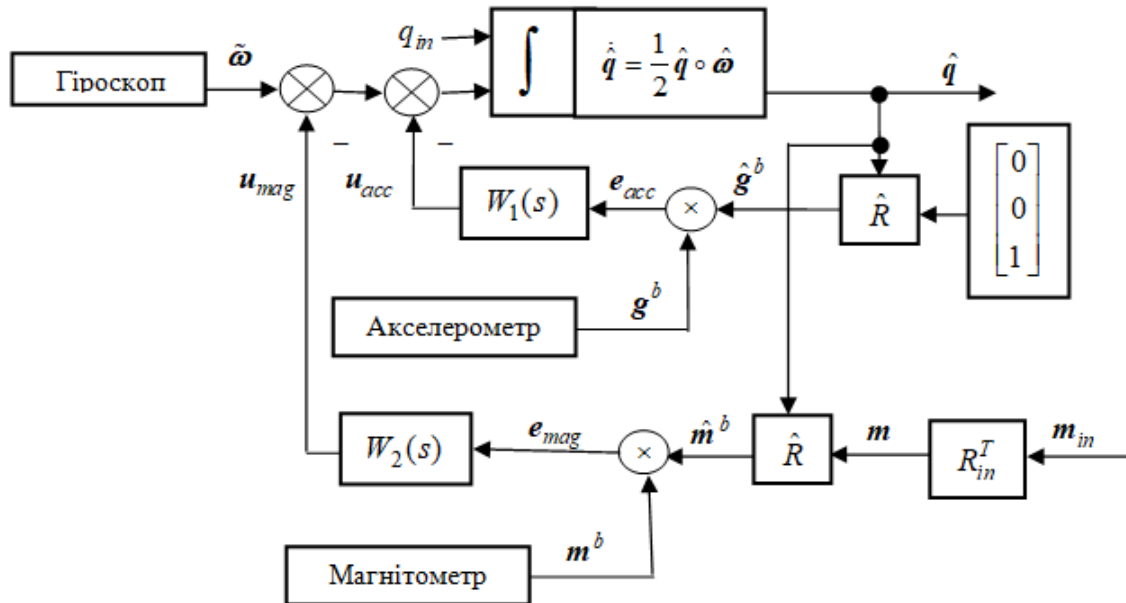


Рис. 1. Блок-схема КФ

Для малих похибок КФ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ можна ввести до розгляду вектор похибок $\sigma = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z]^T$ та аналізувати рівняння

$$\sigma + \Omega\sigma = \delta_\omega + u, \quad (2)$$

де

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}.$$

Запишемо рівняння (2) таким чином

$$(sI + D)\sigma = \delta_\omega - W_1(s)H_{acc}\delta_{acc} - W_2(s)H_{mag}\delta_{mag}, \quad (3)$$

де $D = W_1(s)M_{acc} + W_2(s)M_{mag} + \Omega$;

$W_1(s); W_2(s)$ – передатні функції каналів керування.

Прийmemo

$$W_1(s) = W_2(s) = k_p + \frac{k_I}{s}. \quad (4)$$

Тоді

$$(s^2I + D_I)\sigma = s\delta_\omega - (k_p s + k_I)(H_{acc}\delta_{acc} + H_{mag}\delta_{mag}), \quad (5)$$

де

$$D_I = (k_p s + k_I)(M_{acc} + M_{mag}) + s\Omega.$$

Бачимо, що статична похибка від дрейфу гіроскопа відсутня. Більш точний аналіз показує, що це має місце навколо осей OX, OY . Вплив дрейфу навколо осі OZ залишається. Для його усунення треба використовувати магнітометр [4].

Для моделювання прийmemo $\delta_{\omega_x} = 3 \cdot 10^{-4} s^{-1}$; $\delta_{\omega_y} = 2 \cdot 10^{-4} s^{-1}$; $\delta_{\omega_z} = 1 \cdot 10^{-4} s^{-1}$; $\psi_{in} = 0^\circ$; $\varphi_{in} = 15^\circ$. Магнітне поле задано довільним вектором $[0,3780 \ 0,5345 \ -0,7560]^T$.

На рис. 2 наведено похибки визначення кутів $\Delta_\psi, \Delta_\theta, \Delta_\varphi$ у разі використання тільки акселерометра ($k_{Pacc} = 0,03 s^{-1}$; $k_{Iacc} = 0,001 s^{-2}$). На рис. 3 наведено похибки при використанні також магнітометра ($k_{Pmag} = 0,01 s^{-1}$; $k_{Imag} = 1 \cdot 10^{-4} s^{-2}$). Задано також похибку магнітометра поворотом вектора магнітного поля на 1° навколо кожної осі. Бачимо, що за наявності магнітометра похибка КФ навколо вертикальної осі є обмеженою.

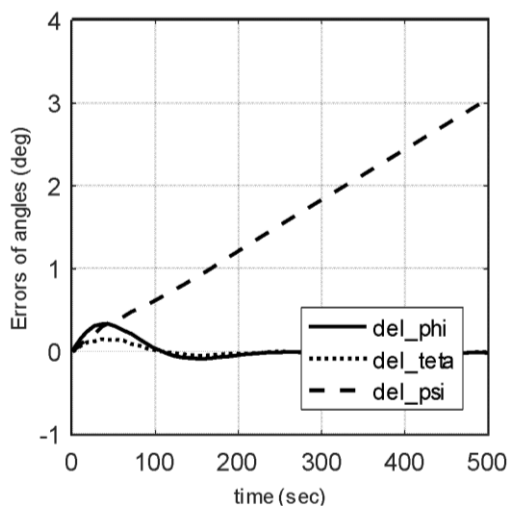


Рис. 2. Похибки визначення кутів

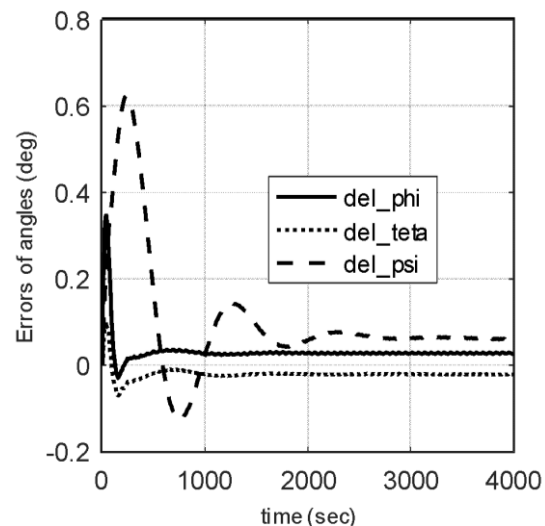


Рис. 3. Похибки визначення кутів

Експериментальне дослідження

Було виконано експериментальне дослідження КФ у складі гіроскопа та акселерометра. На першому етапі були визначені параметри вимірювачів: коефіцієнти передачі та зміщення нулів. Відповідне робоче місце наведено на рис. 4.

Отримані коефіцієнти були закладені до моделі у середовищі *MATLAB* та *Simulink*. Дані для моделювання були отримані, використовуючи стенд (рис. 4), що складається із: куба, блока *IMU*, спеціальної платформи для блока *IMU*, плати, поворотного стола, фундаменту, ноутбука.

Розділ 2. Механіка

Експеримент полягав у наступному: блок *IMU* було закріплено на спеціальній основі, яка була закріплена у кубі для подальшої роботи із ним. Куб було встановлено на обертовому столі горизонтально так, щоб похибка відхилення від горизонтальної площини становила не більше $0,01^\circ$. Поверхню, на якій було встановлено куб, відхилили на 45° для імітації зміни кута по курсу - тангаж. Отримані дані із блоку *IMU* було оброблено у середовищі *MATLAB* і *Simulink* спочатку без комплементарного фільтра, а потім із ним. Відповідні результати наведені на рис. 5 та рис. 6.

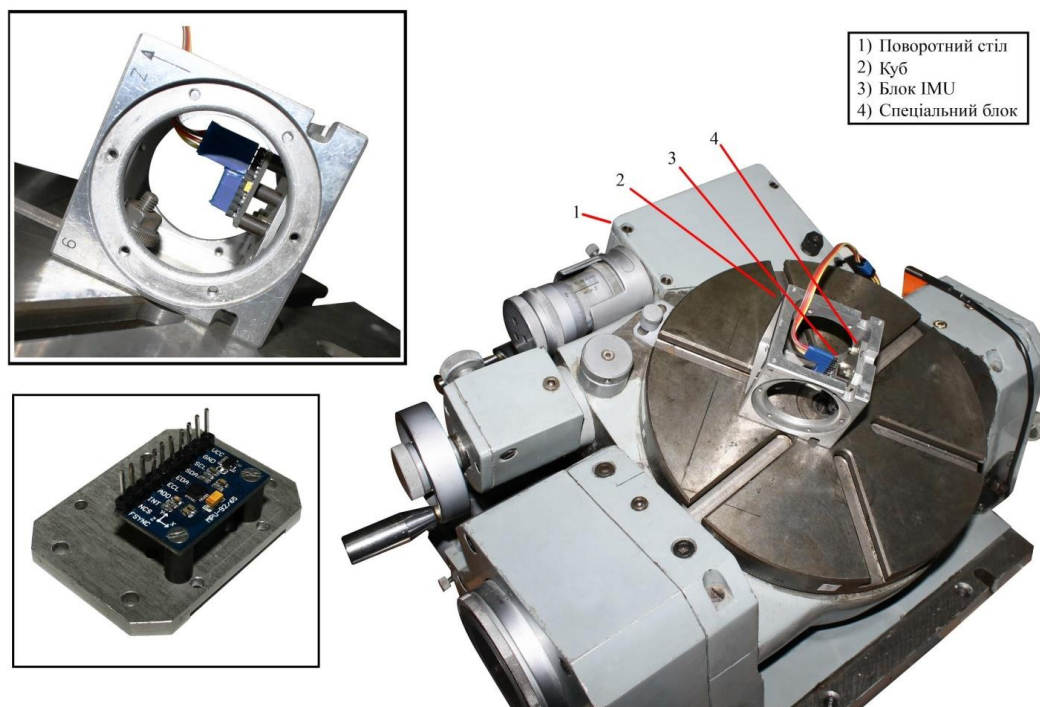


Рис. 4. Робоче місце у процесі експериментального дослідження

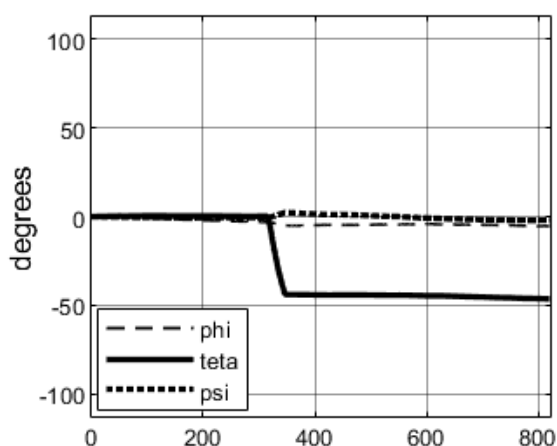


Рис. 5. Результати моделювання без КФ

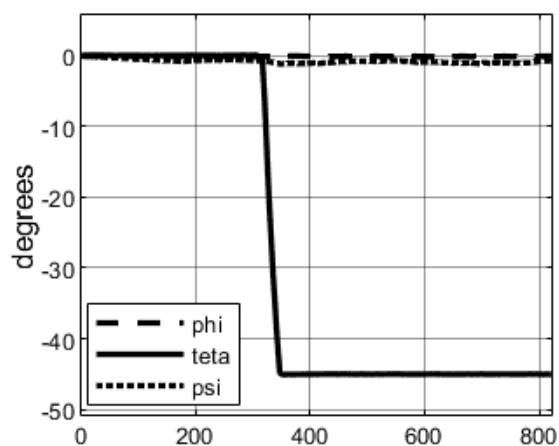


Рис. 6. Результати моделювання із КФ

Отримані значення похибок для моделі із КФ та для моделі без КФ. Результати наведені на рис. 7 та рис. 8.

Бачимо (рис. 5) як на проміжку 400-800 секунд накопичується дрейф гіроскопа, а завдяки застосуванню КФ (рис. 6) було ефективно усунуто вплив дрейфів гіроскопа на точність визначення орієнтації. Цікавим є також результат (рис. 7) на проміжку 400-600 секунд де дрейф гіроскопа проявляється найменше, що доводить ефективність КФ від супротивного, чим менше зміщення нулів, тим менша початкова похибка. Проте вже із 600 секунди похибка починає помітно збільшуватись, тому застосування КФ є ефективним рішенням для збільшення точності визначення орієнтації, що показано на рис. 8, де похибка визначення кута Θ не перевищує $0,05^\circ$ або 3 кутові хвилини.

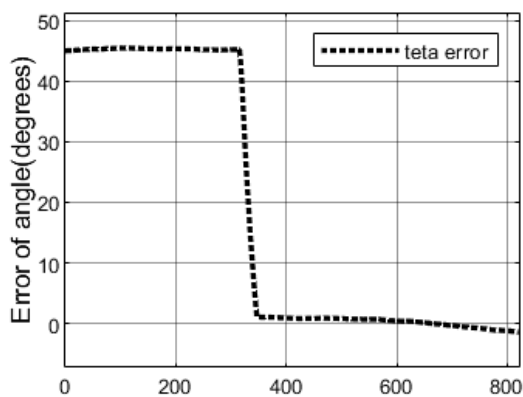


Рис. 7. Похибка визначення кута Θ без КФ

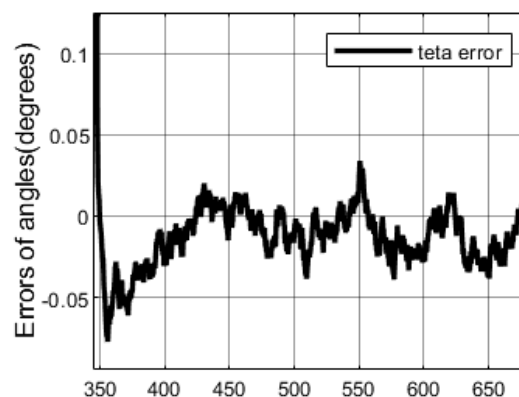


Рис. 8. Похибка визначення кута Θ із КФ

Висновки

Використання КФ є ефективним засобом усунення впливу дрейфів гіроскопа на точність визначення орієнтації. Під час використання тільки акселерометра вплив дрейфу навколо вертикальної осі залишається. Для усунення його впливу треба додатково використовувати магнітометр.

Список використаної літератури

1. *Mark Euston, Paul Coote, Robert Mahony, Jonghyuk Kim and Tarek Hamel. A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV // 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 22-26 Sept., 2008, pp. 340-345.*
2. *R. Mahony, T. Hamel, and Jean-Michel Pflimlin. Complementary filter design on the special orthogonal group SO(3) // In Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, CDC05, Seville, Spain, December 2005. Institute of Electrical and Electronic Engineers.*

3. *Fakhri Alam, Zhou ZhaiHe, Hu JiaJia.* A Comparative Analysis of Orientation Estimation Filters using MEMS based IMU//2 nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014), March 21-22, 2014 Dubai (UAE), pp. 86-91.
4. *Suthanthira Vanitha N., M. Mahi, V. Patanisamy.* Magnetic and Inertial Orientation Tracking Human into Networked Synthesis Environment // International Journal of Soft Computing 1 (4). pp. 271-278, 2006.