

¹О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.
²Ю.О. Подчашинський, д.т.н., проф.

ВИСТАВЛЕННЯ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ЦИФРОВИХ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, професор кафедри приладобудування,
E-mail: o.bezvesilna@gmail.com

²Житомирський державний технологічний університет, м. Житомир, Україна,
завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки,
E-mail: jup@ztu.edu.ua

Розроблено новий чутливий елемент навігаційної системи, що забезпечує вимірювання повного вектору прискорень, що діють на навігаційну систему. На цифрових відеозображеннях шляхом лінійної апроксимації визначається кут нахилу мітки, що нанесена на корпус чутливого елемента та співпадає з напрямком його осі чутливості. Ці дані використовуються для просторового виставлення осей чутливості та підвищення точності навігаційної системи. Цифрові відеозображення також можуть бути використані для визначення параметрів руху чутливого елемента, що характеризують діючі на нього лінійні та кутові прискорення.

Ключові слова: навігаційна система, чутливий елемент, виставлення просторового положення осі чутливості, цифрове відеозображення, лінійна апроксимація

1. Вступ

Робота чутливого елемента, що вимірює діючі в навігаційній системі прискорення, характеризується складними умовами. На точність вимірювання прискорень суттєво впливають неточності просторової орієнтації осі чутливості цього елемента відносно напрямку повного вектору прискорення. Похибки просторової орієнтації осі чутливості компенсуються шляхом її попередньої виставки на етапі калібрування чутливого елемента та його підготовки до вимірювань в робочому режимі.

Більш сучасним підходом, що пропонується, є використання трикоординатного чутливого елемента (акселерометра). Такий чутливий елемент забезпечує вимірювання модулю повного вектору діючого в навігаційній системі прискорення за рахунок визначення проєкцій цього вектору на три координатні осі, вздовж яких здійснюються вимірювання.

В загальному випадку попередня високоточна виставка осей чутливості для трикоординатного чутливого елемента не є обов'язковою, так як він визначає модуль повного вектору прискорення за рахунок наявності трьох каналів вимірювань вздовж трьох координатних осей. Однак, для розрахунку навігаційних параметрів в навігаційній системі, для стабілізації просторового положення платформи з встановленим озброєнням у військовій техніці необхідно визначити точний напрямок у просторі діючих прискорень.

Останнім часом з'являються розробки нових більш точних гравіметрів, що засновані на сучасних технологіях МЕМС-акселерометрів (мікроелектромеханічних акселерометрів), п'єзоелектричних та атомних сенсорах та магнітній левітації з надпровідними матеріалами [1 - 6]. Однак, чутливий елемент таких акселерометрів та гравіметрів вимірює лише прискорення сили тяжіння a_z вздовж вертикальної осі Oz , а складові прискорення сили тяжіння a_x та a_y вздовж осей Ox і Oy вважаються рівними нулю через їх невелике абсолютне значення. Однак, для досягнення точності вимірювання діючих прискорень вищої за $1 \times 10^{-3} \text{ см/с}^2$, вищезгадані складові необхідно обов'язково враховувати. Наприклад, якщо $a_x = a_y = 0,9 \times 10^{-3} \text{ см/с}^2$ [9], тоді модуль цих прискорень буде рівним: $|a_{xy}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{0,9^2 + 0,9^2} = 1,27 \times 10^{-3} \text{ см/с}^2$; а їх неврахування призведе до відповідної похибки вимірювання повного вектору прискорення, що є неприпустимим.

Тому необхідною умовою суттєвого підвищення точності таких вимірювань є визначення модулю повного вектора прискорення, що діє в навігаційній системі. Ця задача може бути

вирішена шляхом побудови трикоординатного чутливого елемента, що працює в складі навігаційної системи.

Відомі рішення в галузі трикоординатних акселерометрів та гравіметрів, наприклад [7, 8], не пристосовані до роботи в складних умовах на рухомій основі.

Тому метою проведених досліджень є підвищення точності вимірювань повного вектору прискорення сили тяжіння трикоординатним чутливим елементом (акселерометром) за рахунок високоточного виставлення його осей чутливості в просторі на основі лінійної апроксимації цифрового відеозображення мітки, що нанесена на корпус акселерометра та співпадає з напрямком його осі чутливості.

2. Структурна схема трикоординатного чутливого елемента

Розроблений трикоординатний чутливий елемент (рис. 1) забезпечує вимірювання модулю повного вектору прискорення за рахунок визначення проєкцій цього вектору на три координатні осі, вздовж яких здійснюються вимірювання. Також компенсується вплив вертикальних прискорень за рахунок встановлення двох чутливих елементів (наприклад, п'єзопластин з інерційною масою) у напрямку кожної з осей чутливості трикоординатного гравіметра.

У трикоординатному гравіметрі авіаційної гравіметричної системи по кожній осі вимірювання Oz , Ox і Oy встановлено чутливі елементи A_z , A_x , A_y на гіростабілізованій платформі. Кожен з чутливих елементів містить два п'єзоелементи у вигляді пластин, що є ідентичними. Частота власних коливань цих пластин дорівнює частоті перетину графіків спектральних щільностей корисного сигналу прискорення та сигналу вертикального прискорення рухомої основи (на цій частоті вказані спектральні щільності мають рівні чисельні значення). Інерційні маси 7, 8, і 9 прикріплені відповідно до низу п'єзопластин 1, 3 і 5 та одночасно до верху п'єзопластин 2, 4 і 6. Електричні сигнали з виходів п'єзопластин кожного з трьох чутливих елементів подано на входи операційних підсилювачів 10, 11 і 12, що виконують функцію суматорів та підсилювачів цих сигналів. Результат обробки цих сигналів після перетворення в цифрову форму аналого-цифровими перетворювачами (на рисунку не показані) надходить у бортову ЕОМ, що розраховує напрямок та модуль повного вектору прискорення.

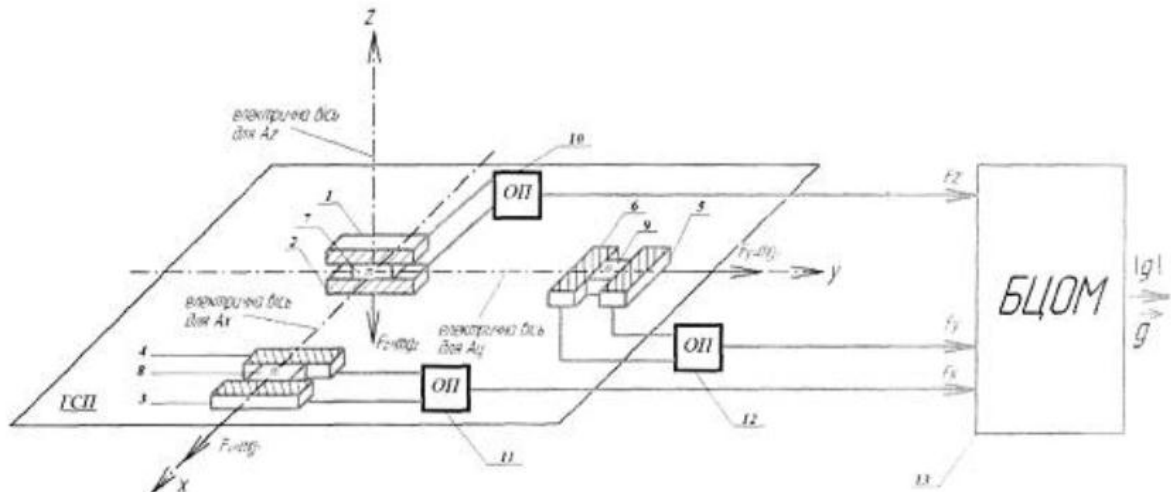


Рис. 1. Трикоординатний чутливий елемент (акселерометр) навігаційної системи:

1...6 – п'єзоелементи у вигляді пластин, що попарно встановлені вздовж кожної осі чутливості; 7...9 – інерційні маси, що прикріплені до п'єзопластин; 10...12 – операційні підсилювачі; 13 – бортова ЕОМ; ГСП – гіростабілізована платформа

У цифровій ЕОМ проводяться розрахунки для визначення значення повного вектору $\vec{a} = \vec{a}_x + \vec{a}_y + \vec{a}_z$ та модуля $|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$ діючого прискорення. Отже, завдяки використанню трьох чутливих елементів забезпечується підвищення точності вимірювання прискорень та навігаційних параметрів.

3. Підсистема виставки осей чутливості трикоординатного чутливого елементу (акселерометра) на основі цифрових відеозображень

Підсистема виставки просторового положення осей чутливості (рис. 2) містить чутливий елемент, цифрову ЕОМ, мітку, відеокамеру, процесор лінійної апроксимації мітки, світловідбиваючий елемент, фотоелектричний автоколіматор. На корпус чутливого елементу нанесено мітку у вигляді відрізка прямої лінії, напрямком якої співпадає з напрямком осі чутливості.

Чутливий елемент встановлено на платформі, до входу керування якої підключено цифрову ЕОМ. Мітка оптично пов'язана із входом відеокамери. Вихід відеокамери підключено до входу процесора лінійної апроксимації мітки. Вихід процесора з'єднано з першим входом цифрової ЕОМ, другий вхід якої пов'язаний з виходом фотоелектричного автоколіматора. Вхід фотоелектричного автоколіматора, в свою чергу, оптично пов'язаний зі світловідбиваючим елементом, який закріплено на корпусі чутливого елементу.

За допомогою фотоелектричного автоколіматора оцінюється відхилення площини поверхні світловідбиваючого елемента від положення, коли вона є перпендикулярною до оптичної осі автоколіматора. Сигнал, пропорційний ступеню цього незбігу, надходить на ЕОМ. ЕОМ керує просторовим положенням платформи таким чином, щоб ліквідувати цей незбіг.

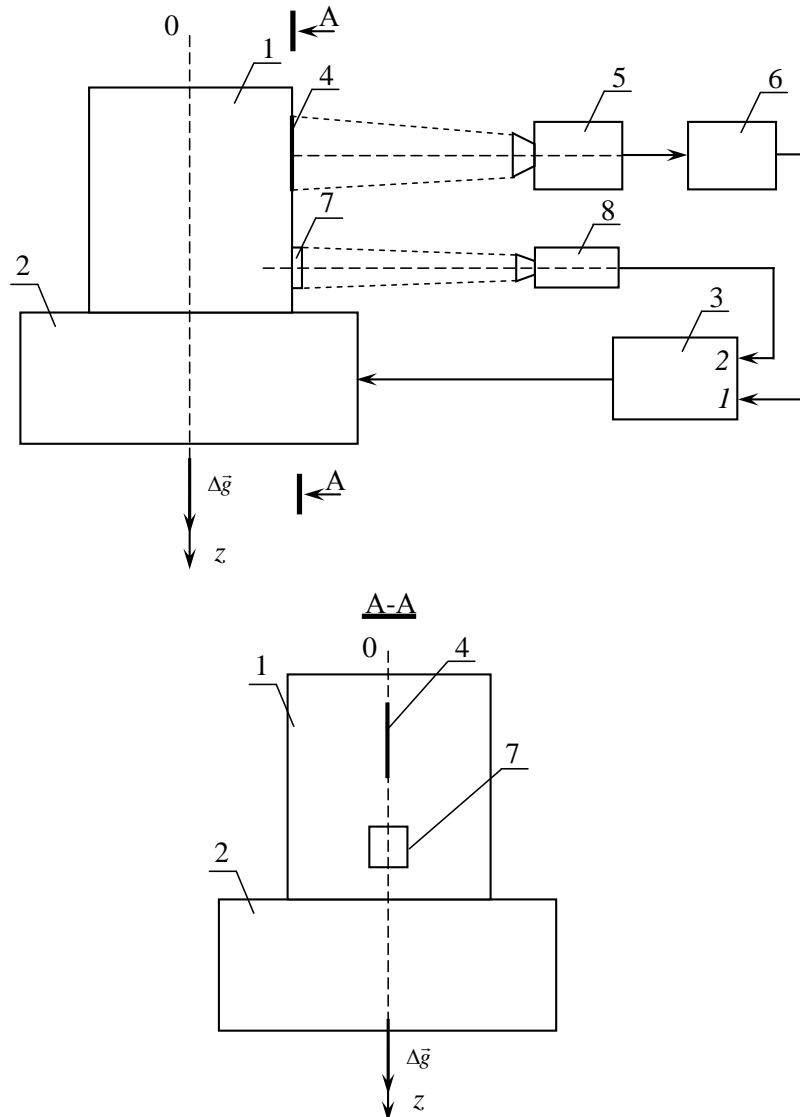


Рис. 2. Структурна схема підсистеми виставлення просторового положення осі чутливості трикоординатного чутливого елементу (акселерометра): 1 – гравіметр, 2 – платформа, 3 – цифрова ЕОМ, 4 – мітка, 5 – відеокамера, 6 – процесор лінійної апроксимації мітки, 7 – світловідбиваючий елемент, 8 – фотоелектричний автоколіматор

В результаті забезпечується розташування осі чутливості у вертикальній площині, яка перпендикулярна оптичній осі фотоелектричного автоколіматора та в якій розташовано напрямком місцевої вертикалі. Однак, вісь чутливості може бути розташована у вказаній вертикальній площині, але відхилитися на деякий кут від напрямку місцевої вертикалі. Це відхилення може бути визначено за допомогою мітки, відеокамери та процесора лінійної апроксимації мітки. За допомогою цифрової ЕОМ, що керує просторовим положенням платформи, це відхилення може бути ліквідоване. В результаті, забезпечується високоточне виставлення осі чутливості трикоординатного гравіметра просторі відносно напрямку місцевої вертикалі на етапі попереднього настроювання гравіметра. В робочому режимі це дозволяє визначати просторову орієнтацію повного вектору прискорення сили тяжіння відносно попередніх настроювань чутливого елемента.

4. Аналітичне дослідження методів визначення просторової орієнтації осі чутливості на основі цифрових відеозображень

Розглянемо задачу лінійної апроксимації контуру мітки на відеозображенні, що відповідає мітці на поверхні корпусу чутливого елемента (акселерометра).

Лінійна апроксимація виконується для множини точок, що належать прямолінійній ділянці контуру мітки на цифровому відеозображенні. Ця ділянка має форму відрізка прямої лінії, що описується аналітичною залежністю [9 – 11]:

$$\begin{aligned} y &= \hat{a}_k + b_k(x - \hat{x}_c), \\ \hat{x}_c &= \delta_x \hat{n}_c, \quad \hat{n}_c = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L n_j^*, \\ \hat{a}_k &= \hat{y}_c = \delta_y \hat{m}_c, \quad \hat{m}_c = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L m_j^*. \end{aligned} \quad (1)$$

де (n_j^*, m_j^*) – вимірні координати j -ї точки контуру мітки на цифровому відеозображенні, L – кількість точок контуру, що використовуються в процедурі лінійної апроксимації. Коефіцієнт b_k визначає кутове положення мітки та, відповідно, осі чутливості: $\alpha = \arctg(b_k)$; а величини $\hat{x}_c, \hat{a}_k = \hat{y}_c$ є координатами середньої точки мітки.

Розглянемо визначення кутового положення мітки на основі методу найменших квадратів. Оцінка коефіцієнта b_k [9]

$$\hat{b}_k = \frac{\sum_{j=1}^L m_j^* (n_j - \hat{n}_c)}{\sum_{j=1}^L (n_j - \hat{n}_c)^2} \quad (2)$$

є незміщеною з дисперсією

$$\sigma_{\hat{b}_k}^2 = \frac{\sigma_{m^*}^2}{\sum_{j=1}^L (n_j - \hat{n}_c)^2}, \quad (3)$$

де n_j – точні значення координат точок мітки, $\sigma_{m^*}^2$ – дисперсія похибки вимірювання координат m_j^* .

Результат визначення кутового положення мітки

$$\hat{\alpha} = \arctg(\hat{b}_k), \quad \sigma_{\hat{\alpha}}^2 = \left(\frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial \hat{b}_k} \right)^2 \cdot \sigma_{\hat{b}_k}^2 = \frac{\sigma_{\hat{b}_k}^2}{(1 + \hat{b}_k^2)^2}. \quad (4)$$

З математичної точки зору застосування методу найменших квадратів вимагає виконання ряду умов [11], в тому числі значення аргументу лінійної функції (координати n_j) повинні бути відомі точно. При вимірюванні координат точок, що належать мітці, координати n_j^* вимірюються на відеозображенні з похибкою, що має дисперсію $\sigma_{n^*}^2$. Тому необхідно переходити до конфлюєнтних методів апроксимації контуру мітки, що враховують наявність

похибки в n_j^* . Такі методи забезпечують оцінки \hat{b}_k , що сходяться к b_k із збільшенням числа L вимірних координат.

На етапі попереднього настроювання трикоординатного чутливого елемента відомі результати вимірювання координат n_j^* і m_j^* , а відношення дисперсій $k_D = \sigma_{m^*}^2 / \sigma_{n^*}^2 = 1$, так як ці вимірювання виконуються для одного відеозображення однаковими методами. Тоді коефіцієнт b_k визначається на основі узагальненої оцінки ортогональної регресії [9]:

$$\hat{b}_k = \lambda_c \pm \sqrt{\lambda_c^2 + k_D}, \quad (5)$$

де

$$\lambda_c = \frac{\Sigma_y - k_D \Sigma_x}{2 \Sigma_{xy}},$$

$$\Sigma_y = \sum_{j=1}^L (m_j^* - \hat{m}_c)^2, \quad \Sigma_x = \sum_{j=1}^L (n_j^* - \hat{n}_c)^2, \quad (6)$$

$$\Sigma_{xy} = \sum_{j=1}^L (n_j^* - \hat{n}_c)(m_j^* - \hat{m}_c),$$

а знак в формулі (5) визначається з урахуванням квадранта розташування контуру на координатній площині xOy .

Оцінка \hat{b}_k визначається з систематичною похибкою і дисперсією:

$$\Delta_{\hat{b}_k \text{ сист}} = \frac{2\sigma_{m^*}^2 + \hat{b}_k^2 \sigma_{n^*}^2}{\hat{b}_k \Sigma_x},$$

$$\sigma_{\hat{b}_k}^2 = \frac{\sigma_{m^*}^2 + \hat{b}_k^2 \sigma_{n^*}^2}{\Sigma_x}. \quad (7)$$

Іншим методом лінійної апроксимації контуру мітки, що враховує наявність похибок вимірювання координат n_j^* , є дробово-лінійні оцінки [9]. Для значень n_j , що мають постійний крок $h_x = n_j - n_{(j-1)}$ на цифровому відеозображенні:

$$\hat{b}_k = \frac{\sum_{j=1}^L m_j^* (L+1-2j)}{\sum_{j=1}^L n_j^* (L+1-2j)}. \quad (8)$$

Ця оцінка \hat{b}_k містить похибки

$$\Delta_{\hat{b}_k \text{ сист}} = \frac{12 \hat{b}_k \sigma_{n^*}^2}{h_x^2 L(L^2 - 1)},$$

$$\sigma_{\hat{b}_k}^2 = \frac{12 \sigma_0^2}{h_x^2 L(L^2 - 1)}, \quad (9)$$

де $\sigma_0^2 = \sigma_{m^*}^2 + \hat{b}_k^2 \sigma_{n^*}^2$ – приведена дисперсія похибок координат.

Далі було виконано чисельне моделювання та експериментальні дослідження похибок вимірювань кутового положення мітки з використанням формул (1) – (9). Розмір відеозображень складав 2048x2048 дискретних точок (д.т.) із співвідношенням сигнал/шум 55 дБ при чисельному моделюванні та 768x576 д.т. при експериментальних дослідженнях із співвідношенням сигнал/шум 40 дБ. Використовувалося значення довірчої ймовірності при визначенні похибок вимірювань 0,95. Дослідження проводилися для 3 діапазонів вимірювання кутів: (3...20)°; (0,3...3)°; (3...30)° (рис. 3). В кожному діапазоні використовувалося 50 цифрових відеозображень, які усереднювалися з метою фільтрації випадкових похибок (шумів відеозображення). Також виконувалася оцінка та компенсація систематичної складової похибок

визначення кутового положення мітки. Використовувався метод узагальненої оцінки на основі ортогональної регресії.

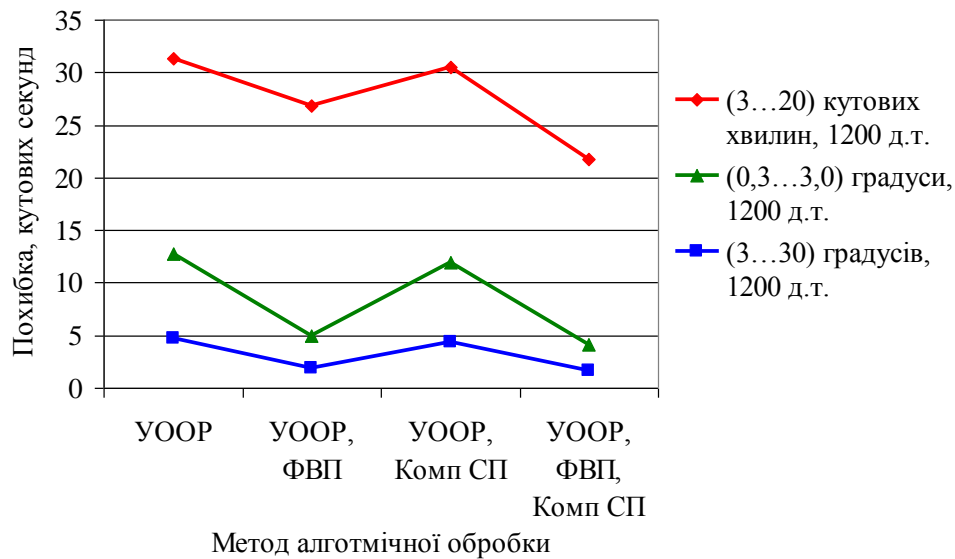


Рис. 3. Точність визначення кутового положення осі чутливості на основі відеозображень: УООР – узагальнена оцінка ортогональної регресії; ФВП – фільтрація випадкових похибок; Комп СП – компенсація систематичної складової похибки

При оцінці результатів досліджень враховано, що похибка виставлення просторового положення осі чутливості повинна бути $\leq 5'$ для забезпечення похибки вихідного сигналу чутливого елементу $1 \times 10^{-3} \text{ см/с}^2$ та $\leq 1,6'$ для похибки $1 \times 10^{-4} \text{ см/с}^2$ [12]. Похибка вимірювання кутового положення мітки на основі узагальненої оцінки ортогональної регресії становить $(4,7...31,3)''$ в залежності від діапазону вимірювань. При застосуванні фільтрації випадкових викривлень похибка становить $(1,9...26,8)''$, при застосуванні фільтрації випадкових викривлень та алгоритмічної компенсації систематичної складової похибки – $(1,7...21,7)''$. Така похибка вимірювання кутового положення мітки є прийнятною для забезпечення похибки вихідного сигналу чутливого елементу $\leq 1 \times 10^{-4} \text{ см/с}^2$.

5. Висновки

1. Розроблено новий трикоординатний чутливий елемент для роботи в несприятливих умовах, що характерні для навігаційних систем. Підвищення точності вимірювань прискорень чутливим елементом забезпечується за рахунок вимірювання трьох проєкцій повного вектору діючих прискорень та обчислення модулю цих прискорень в умовах, коли напрямок вектору прискорення не співпадає з напрямком вертикальної осі чутливості.

2. Виставлення осей чутливості трикоординатного чутливого елементу забезпечує окремо розроблена підсистема на основі цифрової відеокамери, що формує відеозображення мітки, яка нанесена на корпус чутливого елементу та вказує напрямок його вертикальної осі чутливості. За цифровими відеозображеннями шляхом лінійної апроксимації визначається кут нахилу мітки та просторове положення осей чутливості. Ці дані використовуються для попереднього високоточного виставлення осей чутливості та підвищення точності вимірювання прискорень в робочому режимі. На основі часової послідовності цифрових відеозображень також можуть бути визначені параметри руху чутливих елементів та діючі на них прискорення.

3. Визначено, що похибка вимірювань кутового положення мітки на основі узагальненої оцінки ортогональної регресії за умови застосування фільтрації випадкових похибок і алгоритмічної компенсації систематичної складової становить $(4,7...31,3)''$ в залежності від

діапазону вимірювань. Така похибка є прийнятною для забезпечення похибки вихідного сигналу трикоординатного гравіметра $\leq 1 \times 10^{-4}$ см/с².

4. Отримані результати є основою для підвищення точності вимірювання повного вектору прискорення сили тяжіння в навігаційних системах, для стабілізації просторового положення платформи з встановленим озброєнням у військовій техніці.

5. Цифрові відеозображення та їх часові послідовності також можуть бути використані для визначення параметрів руху чутливого елементу, що характеризують діючі на нього лінійні та кутові прискорення.

Список використаної літератури:

1. Rymer, H. Gravity measurements on chips [Text] / H. Rymer // Nature. – 2016. - V. 531. - P. 585–586. - doi: 10.1038/531585a. Режим доступа: URL: https://www.nature.com/articles/531585a?lang=en&WT.ec_id=NATURE-20160331.

2. De Angelis, M. Precision gravimetry with atomic sensors [Text] / M. de Angelis, A. Bertoldi, L. Cacciapuoti, A. Giorgini, G. Lamporesi, M. Prevedelli, G. Saccorotti, F. Sorrentino and G. M. Tino // Measurement Science and Technology, IOP Publishing Ltd. – 2009. – V. 20. – N. 2. – P. 1-16. - <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/2/022001>. Режим доступа: URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/20/2/022001/meta>.

3. Goodkind, John M. The superconducting gravimeter [Text] / John M. Goodkind // Review of Scientific Instruments. – 1999. - V. 70. – P. 4131-4152. - <https://doi.org/10.1063/1.1150092>. Режим доступа: URL: https://www.researchgate.net/publication/258107854_The_superconducting_gravimeter.

4. Middlemiss, Richard P. Field Tests of a Portable MEMS Gravimeter [Text] / Richard P. Middlemiss, Steven G. Bramsiepe, Rebecca Douglas, James Hough, Douglas J. Paul, Sheila Rowan and Giles D. Hammond // Sensors (Basel). – 2017. – N. 17(11).- P. 2571. - doi: 10.3390/s17112571. Режим доступа: URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/11/2571/pdf>.

5. Lainé, J. High-sensitivity MEMS-based accelerometer [Text] / J. Lainé, D. A. Mougenot // Lead. Edge. – 2014. - N. 33. – P. 1234–1242. - doi: 10.1190/tle33111234.1. Режим доступа: URL: http://www.sercel.com/products/Lists/ProductPublication/AHigh-SensitivityMEMS-basedAccelerometer_article_Sercel%20pdf.pdf.

6. Безвесільна, О. М. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи : монографія [Текст] / О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.

7. D'Alessandro, Antonino. Suitability of Low-Cost Three-Axis MEMS Accelerometers in Strong-Motion Seismology: Tests on the LIS331DLH (iPhone) Accelerometer [Text] / Antonino D'Alessandro, Giuseppe D'Anna // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2013. - V.103 (5). – P. 2906-2913. - DOI: <https://doi.org/10.1785/0120120287>. Режим доступа: URL: https://www.researchgate.net/publication/260833647_Suitability_of_Low-Cost_Three-Axis_MEMS_Accelerometers_in_Strong-Motion_Seismology_Tests_on_the_LIS331DLH_iPhone_Accelerometer.

8. D'Emilia, G. Measurement Evaluation of aspects affecting measurement of three-axis accelerometers [Text] / G. D'Emilia, Gaspari E. Natale // Measurement. – 2016. – V. 77. – P. 95-104. - <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.031>. Режим доступа: URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224115004558>.

9. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

10. Яцук, В. О. Методи підвищення точності вимірювань : підручник / [Текст] В. О. Яцук, П. С. Малачівський. – Львів : Бескид Біт, 2008. – 368 с.

11. Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов [Текст] / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. – М. : Наука, 1986. – 230 с.

12. Безвесільна, О. М. Виставка вимірювальних осей акселерометрів [Текст] / О. М. Безвесільна // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. - 2007. - №3 (42). - С. 46-55.