ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)

УДК 621.396.963:621.391.8 **doi: 10.32620/aktt.2022.6.06**

**С. К. АБРАМОВ, В. В. АБРАМОВА, К. Д. АБРАМОВ,
В. В. ЛУКІН, В. В. БОНДАР, І. В. КАЛУЖИНОВ**

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ДКП-ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ІНЕРЦІЙНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО МОДУЛЮ

Статтю присвячено аналізу та обробці сигналів інерційних вимірювальних модулів, що застосовуються у складі інерційних навігаційних систем або у дослідницьких вимірювальних комплексах для проведення ударних випробувань. Модулі мають набір датчиків для вимірювання швидкості руху об'єкту, його орієнтації у просторі, гравітаційних сил, з якими він рухається, а також магнітного поля, що його оточує. На прикладі типового інерційного вимірювального модулю WT901SDCL показано, що сигнали прискорення, кутової швидкості та кутового положення, що сформовані модулем, мають певну флуктуаційну складову, що призводить до погіршення точності визначення оцінюваних параметрів, а також до появи накопичуваної похибки у визначенні координат інерційною навігаційною системою. У таких умовах доцільним є застосування вторинних методів обробки, а саме методів фільтрації. Оскільки для інформаційної складової сигналів інерційного вимірювального модулю притаманна суттєва динаміка однією з ключових вимого до методу фільтрації висувається її збереження. З іншого боку від фільтра вимагається й ефективне придушення флуктуаційної складової, Серед існуючих на сучасний момент фільтрів найкращій компроміс за цими вимогами має фільтр на основі дискретного косинусного перетворення (ДКП-фільтр). Показано, що застосування цього фільтра дозволяє зменшити інтенсивність завадової складової у інформаційному сигналі у середньому в 1,2 рази за величиною середньоквадратичного відхилення та, відповідно, зменшити похибки вимірювань фізичних параметрів. При цьому форма сигналів після застосування ДКП-фільтру залишається майже незмінною, усі різкі динамічні зміни сигналу збережено, абсолютні рівні сигналів також залишилися такими самими. Таким чином, застосування ДКП-фільтрації для вторинної обробки сигналів інерційних вимірювальних модулів можна вважати цілком доцільним.

Ключові слова: *інерційна вимірювальна система; фільтрація; дискретне косинус не перетворення; вторинна обробка сигналів; одновимірний сигнал.*

Вступ

Більшість сучасних літаків, космічних апаратів, безпілотних літальних або надводних плавучих апаратів, безпілотних автомобільних транспортних засобів та інших рухомих платформ мають автономну систему керування, що базується на використанні інерційної навігаційної системи [1, 2]. Такі системи дозволяють визначати координати й параметри руху об'єктів керування на основі властивостей інерції тіл. Основною перевагою такої системи є автономність, тобто відсутність потреби у зовнішніх орієнтирах або сигналах [3].

Вимірювання у таких системах реалізуються за допомогою інерційних вимірювальних пристроїв (модулів), які здійснюють визначення швидкості руху об'єкту, його орієнтації у просторі, гравітаційних сил, з якими він рухається, а також магнітного поля, що його оточує.

Інерційні навігаційні системи складаються, як правило, з декількох інерційних вимірювальних модулів, кожен з яких має цілий набір датчиків: лінійні і кутові акселерометри (для реєстрації змін позиції), гіроскопи (для встановлення абсолютного кутового напрямку) та магнітометри (для калібрування дрейфу орієнтації) [4].

Інерційні вимірювальні модулі знаходять також застосування у різноманітних вимірювальних комплексах, за допомогою яких досліджуються властивості об'єктів при ударних випробуваннях, наприклад, при проведенні краш-тестів автомобілів чи посадкових модулів [5].

Основним недоліком використання інерційних вимірювальних модулів в навігації є те, що вони мають накопичувану похибку. Оскільки навігаційна система постійно сумує зафіксовані зміни до попередньо розрахованої позиції, будь-які помилки вимірювань, навіть малі, акумулюються від точки до точки. Це призводить до дрейфу або до постійного зростання різниці між розрахунковими й фактичними координатами місця, де знаходиться система [3].

Сучасні інерційні вимірювальні модулі завдяки високоефективній апаратній базі мають досить високі показники забезпечуваної точності первинних

© С. К. Абрамов, В. В. Абрамова, К. Д. Абрамов, В. В. Лукін, В. В. Бондар, І. В. Калужинов, 2022

вимірювань [4]. Однак для деяких особливо важливих застосувань накопичувана похибка виявляться все одно досить суттєвою, тому виникає потреба у застосуванні додаткової вторинної обробки [3].

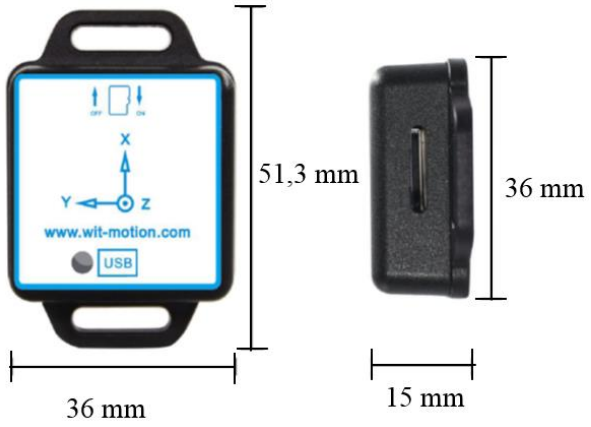


Рис. 1. Зовнішній вигляд інерційного вимірювального модулю WT901SDCL

Для здійснення такої обробки можна застосувати один з сучасних нелінійних фільтрів на основі дискретного косинусного перетворення (ДКП-фільтр) [6].

Метою даної роботи є перевірка можливості підвищення точності первинних оцінок параметрів, що отримуються інерційним вимірювальним модулем, за допомогою застосування вторинної ДКП-фільтрації.

Постановка задачі

На першому етапі досліджень потрібно визначитися, з якими саме завадами потрібно боротися. Для цього слід проаналізувати властивості сигналів датчиків інерційного вимірювального модулю. У якості такого модулю використаємо типовий інерційний вимірювальний модуль WT901SDCL виробництва фірми WitMotion Shenzhen Co. [4].

На другому етапі потрібно проаналізувати вихідний сигнал ДКП-фільтру з точки зменшення інтенсивності флуктуаційних завад та внесення спотворень у форму інформаційного сигналу.

Аналіз властивостей первинних сигналів інерційного вимірювального модулю

Проаналізуємо властивості сигналів інерційного вимірювального модулю WT901SDCL [4]. Цей модуль (рис. 1) містить у собі набір датчиків, що вимірюють прискорення, кутову швидкість, кутове положення, а також орієнтацію магнітного поля за трьома осями у декартовій системі координат. Основні характеристики точності вимірювань модулю WT901SDCL наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Діапазон та показники точності вимірювань модулем WT901SDCL

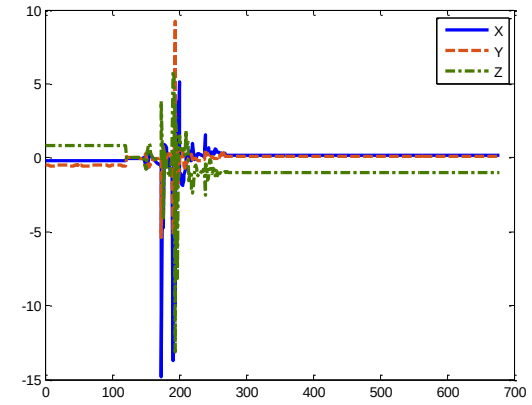
Параметр	**Значення**
Акселерометр	
Діапазон вимірювань	±16 g
Точність вимірювань	0,01 g
Роздільна здатність	16 бітів
Гіроскоп	
Діапазон вимірювань	±2000 °/c
Роздільна здатність	16 бітів
Точність вимірювань	0,05 °/c
Магнітометр	
Діапазон вимірювань	±4900 мкТ
Роздільна здатність	16 бітів
Точність вимірювань	0,15 мкТ
Кутомір	
Діапазон вимірювань - за осями X, Y - за віссю Z	 ±180 ° ±90 °
Точність вимірювань - за осями X, Y - за віссю Z	 ±0,05 ° ±1,00 °

Модуль дозволяє реєструвати усі показники одночасно та записує їх на вбудовану карту пам’яті, з якої вони потім можуть бути зчитані за допомогою спеціального додатку й збережені у файлі у звичайному текстовому форматі. Частота реєстрації вимірювань може встановлюватися від 10 до 200 Гц.

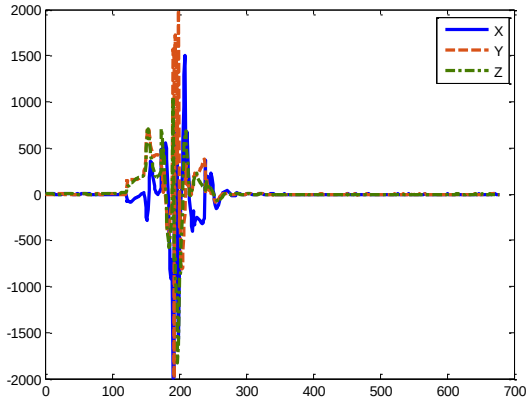
Проаналізуємо типовий вигляд графіків $S^p(i)$ вимірювань параметрів (індекс p позначає відповідний вимірюваний параметр) за допомогою модулю WT901SDCL при проведенні тестових вимірювань у реальних умовах для одиночного падіння досліджуваного об’єкту із зафіксованим на ньому модулем. Графіки наведено на рис. 2.

По горизонтальній осі сигнали $S^p(i)$ мають 678 відліків ($i = \{1...678\}$), що при використовуваній частоті реєстрації у 195 Гц (відліків за секунду) відповідає проміжку часу приблизно у 3,5 с. По вертикальних осях відкладено фізичні показники у відповідних розмірностях: прискорення у долях g (див. рис. 2, а); кутова швидкість у град/с (див. рис. 2, б) та кутове положення у град (див. рис. 2, в). На графіках одночасно представлено результати вимірювань за трьома осями модуля: X (синій колір суцільна лінія), Y (червоний колір пунктирна лінія) та Z (зелений колір штрих-пунктирна лінія).

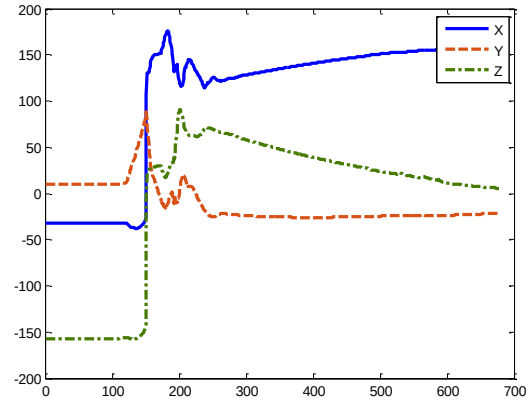
ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)



а



б



в

Рис. 2. Графіки вимірювання прискорення (а), кутової швидкості (б) та кутового положення (в)

З фізичної точки зору, сигнали, наведені на рис. 2, відповідають наступному експерименту. На початку досліджуваний об'єкт знаходився на жорсткому підвісі над поверхнею, потім підвіс дуже швидко від'єднувався й об'єкт з прискоренням вільного падіння прямував до твердої поверхні від якої декілька разів відскакував до повної зупинки. Таким чином, на графіках можна чітко бачити три характерні зони. Перша зона (відліки від 1 до 110) відповідає стану нерухомості досліджуваного об'єкту, далі йде зона активного руху (відліки від 110 до 275) від моменту першого контакту об'єкта з поверхнею до моменту завершення його підскакувань, завершальною йде зона заспокоєння (відліки від 275 до 678).

Таким чином, реальні інформаційні сигнали, вимірювані модулем WT901SDCL, можуть мати як ділянки з майже статичними значеннями (перша зона), так й ділянки з дуже швидкими (друга зона) або досить повільними змінами (третя зона).

При подальших дослідженнях будемо використовувати модель адитивних гаусових завад, яка вважається цілком адекватною для таких вимірювальних модулів [3]. Відповідно до цієї моделі сигнал з вимірювального датчику можна представити як

$$S^p(i) = S^p_{inf}(i) + S^p_{nse}(i),$$

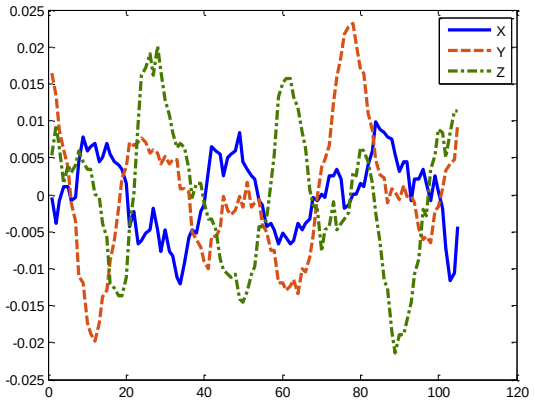
де S^p_{inf} – інформаційна, а $S^p_{nse}(i)$ – флуктуаційна (завадова) складова сигналу вимірювального датчику.

Для дослідження завадової складової розглянемо першу зону (відліки від 1 до 110) у більшому масштабі, оскільки саме в цій зоні інформаційних змін сигналу не повинно бути зовсім ($S^p_{inf} = \text{const}$), оскільки досліджуваний об'єкт не змінює свого положення, тому усі зміни сигналу можна вважати неінформаційними (флуктуаційними) і віднести їх до впливу завад. Для більшої наочності також віднімемо з інформаційного сигналу $S^p(i)$ його постійне значення $S^p_{inf} = \text{const}$, залишивши, таким чином лише флуктуаційні змінення $S^p(i) = S^p_{nse}(i)$. Отримані таким чином графіки флуктуаційної складової сигналів $S^p_{nse}(i)$ представлено на рис. 3.

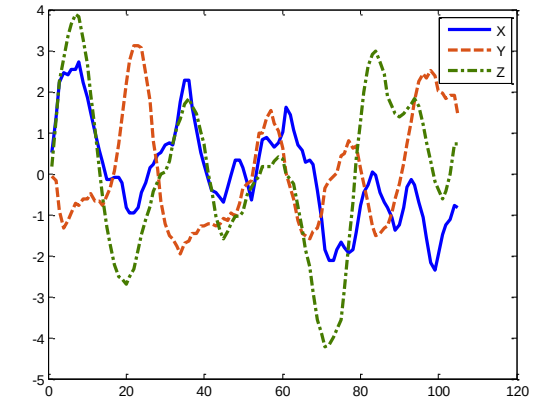
Як можна бачити з рис. 3, усі вимірювані модулем WT901SDCL сигнали мають флуктуаційну складову. У якості числової характеристики інтенсивності завадової складової будемо використовувати середньоквадратичне відхилення (СКВ)

$$\sigma^p_B = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(S^p(i) - \overline{S^p}\right)^2}, \text{ де } \overline{S^p} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} S^p(i).$$

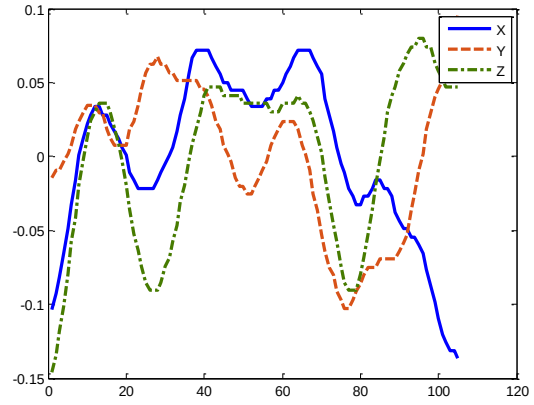
Проведений статистичний аналіз показує, що для сигналу прискорення СКВ флуктуаційної складової σ^p_B становить: 0,0051, 0,0095 і 0,0097, відповідно для осей X, Y та Z. Для сигналу кутової швидкості значення СКВ є наступними: 1,2276, 1,3417 і 1,8997 (для осей X, Y та Z). СКВ для сигналу кутового положення мають значення: 0,0585, 0,0517 і 0,0560 (для осей X, Y та Z).



а



б



в

Рис. 3. Графіки флуктуаційної складової сигналів прискорення (а), кутової швидкості (б) та кутового положення (в) на ділянці зі сталою сигнальною складовою у збільшеному масштабі

Хоча отримані значення СКВ за абсолютною величиною є не дуже великими, але все одно можна спробувати видалити завади з сигналу за допомогою фільтрації. Оскільки сам інформаційний сигнал може мати ділянки з досить швидкими змінами (див. ділянку 2 на рис. 2), то для фільтрації потрібно використовувати методи, які забезпечують добре збереження динамічних змін у сигналі й водночас забезпечують ефективне придушення завад на ділянках зі статичним або повільно зміненим сигналом. Одним з найкращих фільтрів, що мають потрібні характеристики, є фільтр на основі дискретного косинусного перетворення (ДКП-фільтр) [6].

Результати застосування ДКП-фільтру до сигналів інерційного вимірювального модулю

Для застосування фільтру потрібно визначитися з розміром блоків та встановити значення порогу. Зазвичай, для сигналів, подібних до розгляданого, рекомендується обирати розмір блоків у діапазоні від 16 до 64 (для ДКП-фільтру розмір блоку повинен дорівнювати ступеню двійки) [6]. Оскільки для нашого випадку важливим є придушення саме завадової складової, розмір блоку потрібно брати якомога більшим, тому будемо застосовувати розмір у 64 відліки. Значення порога рекомендується встановлювати, як $2{,}7\,\sigma_B^p$, тобто для кожного сигналу поріг будемо встановлювати відповідно до отриманих раніше оцінок СКВ σ_B^p. Результати застосування ДКП-фільтру до сигналів модуля WT901SDCL наведено на рис. 4.

Як можна бачити з рис. 4, форма сигналів після застосування ДКП-фільтру $S_{flt}^p(i)$ візуально майже не змінилась, усі різкі динамічні змінення сигналу збережено, абсолютні рівні сигналів також залишилися такими самими. Тобто можна констатувати, що застосування ДКП-фільтру візуально не вносить спотворень у інформаційну складову сигналів модулю WT901SDCL.

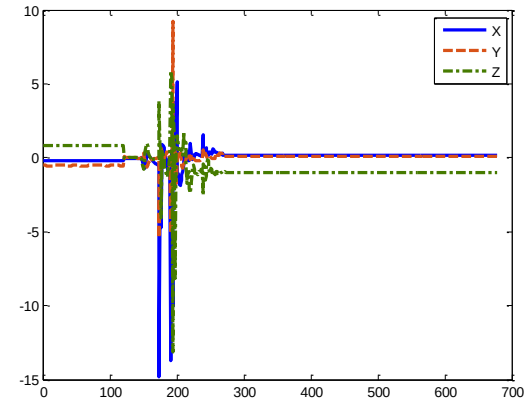
Розглянемо тепер вплив ДКП-фільтру на завадову складову сигналів. Для цього проаналізуємо різницевий сигнал, тобто сигнал отриманий відніманням відфільтрованого сигналу від вихідного

$$\Delta S^p(i) = S^p(i) - S_{flt}^p(i).$$

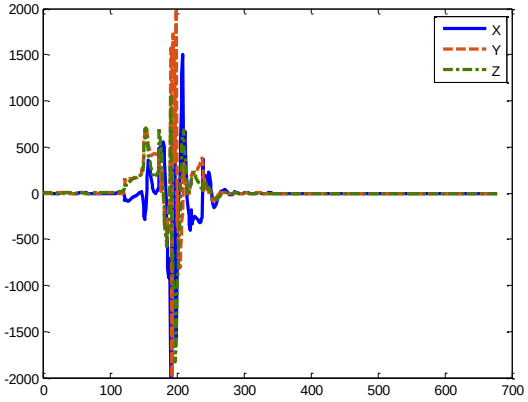
Відповідні графіки $\Delta S^p(i)$ наведено на рис. 5.

Аналізуючи графіки на рис. 5, можна зробити наступні висновки. По-перше, різницевий сигнал не дорівнює нулю, а його характер є подібним до флуктуаційного шуму, тобто фільтрація працює й шум з сигналів видаляється. По-друге, середня інтенсивність різницевого сигналу не перевищує величини оціненого СКВ, тобто з вихідного сигналу видаляється саме шум, а викривлення інформаційної складової хоча й є (локальні збільшення різницевого сигналу на графіках), але вони незначні.

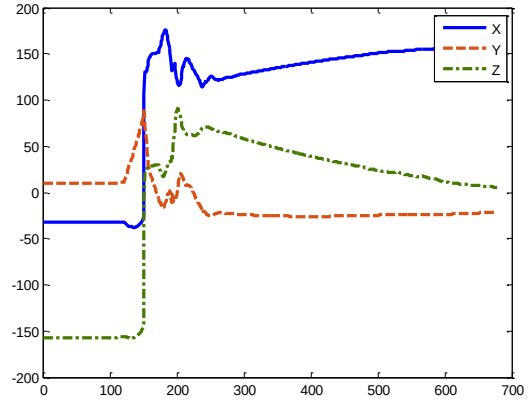
ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)



а



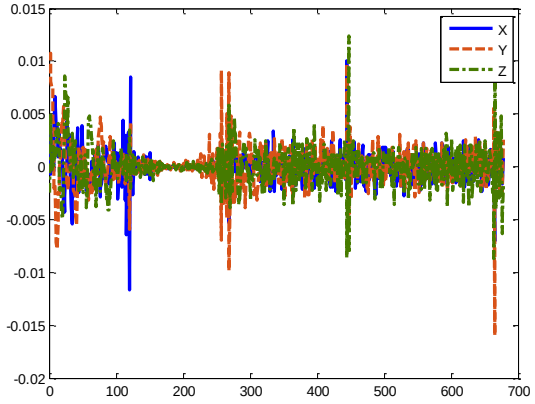
б



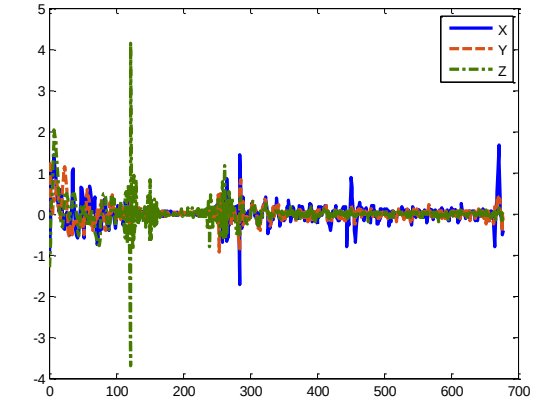
в

Рис. 4. Графіки сигналів прискорення (а), кутової швидкості (б) та кутового положення (в) після застосування ДКП-фільтру

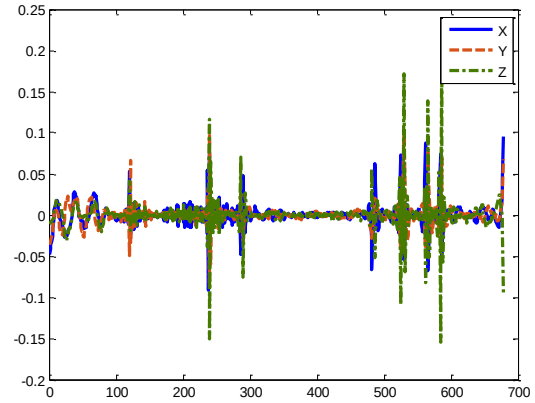
Насамкінець проаналізуємо, як змінилися значення СКВ у першій зоні (відліки від 1 до 110) після застосування ДКП-фільтру. В результаті вимірювань було виявлено, що після фільтрації оцінки СКВ σ_{flt}^{p} для сигналу прискорення знизилися до: 0,0041, 0,0074 і 0,0079 (відповідно для осей X, Y та Z), для сигналу кутової швидкості – до: 0,9507, 1,1653 і 1,6232 (для осей X, Y та Z) та для сигналу кутового положення – до: 0,0478, 0,0448 і 0,0488 (для осей X, Y та Z).



а



б



в

Рис. 5. Графіки різницевих сигналів прискорення (а), кутової швидкості (б) та кутового положення (в) до та після застосування ДКП-фільтру

Тобто в середньому СКВ після фільтрації для всіх сигналів знизилося у 1,2 рази. Таким чином, застосування фільтрації у цілому можна вважати доцільним.

Висновки

На прикладі типового інерційного вимірювального модулю WT901SDCL показано, що сигнали прискорення, кутової швидкості та кутового положення, формованих модулем, мають певну флуктуаційну складову, що призводить до погіршення точності визначення оцінюваних параметрів.

Застосування до цих сигналів вторинної обробки у вигляді ДКП-фільтру дозволяє зменшити інтенсивність завадової складової у інформаційному сигналі у середньому в 1,2 рази за величиною середньоквадратичного відхилення та, відповідно, зменшити похибки вимірювань фізичних параметрів. При цьому форма сигналів після застосування ДКП-фільтру залишається майже незмінною, усі різкі динамічні змінення сигналу зберігаються, абсолютні рівні сигналів також залишаються такими самими.

В подальшому також планується розглянути можливість застосування ДКП-фільтру з частотно-залежним порогом, що може сприяти ще більшому зниженню інтенсивності завадової складової.

Література

1. Смирнов, А. С. Оценка влияния погрешностей БИНС, построенной на MEMS-компонентах, на точность выведения ракеты-носителя сверхлёгкого класса [Текст] / А. С. Смирнов, А. В. Голубек // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2021. – № 5(175). – С. 60-68. DOI: 10.32620/aktt.2021.5.08.

2. Жежера, І. В. Забезпечення функціонально стійкого руху малого автономного літального апарату [Текст] / І. В. Жежера // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2018. – № 5(149). – С. 4-8. DOI: 10.32620/aktt.2018.5.01.

3. Evaluation of the use of inertial navigation systems to improve the accuracy of object navigation [Text] / M. Iasechko, O. Shelukhin, A. Maranov, S. Lukianenko, O. Basarab, O. Hutchenko // International Journal of Computer Science & Network Security. – 2021. – Vol. 21, No. 3. – P. 71-75. DOI: 10.22937/IJCSNS.2021.21.3.10.

4. WitMotion [Електронний ресурс] : Products, Axial Sensors, 9-Axis. – Режим доступу : https://www.wit-motion.com/9-axis/witmotion-9-axis-16g-card-storage.html. – 07.09.2022.

5. Frej, D. Test Stand for Experimental Crash Tests at Low Speeds [Text] / D. Frej, M Jaśkiewicz // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 55. – P. 1627-1634. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.07.152.

6. Adaptive DCT-based 1-D filtering of Poisson and mixed Poisson and impulsive noise [Text] / V. V. Lukin, D. V. Fevralev, S. K. Abramov, S. Peltonen, and J. Astola // Proceedings of the International Workshop on Local and Non-Local Approximation in Image Processing (LNLA'08), Lausanne, Switzerland. – 2008. – 8 p.

References

1. Smirnov, A. S., Golubek, A. V. Otsenka vliyaniya pogreshnostey BINS, postroyennoy na MEMS-komponentakh, na tochnost' vyvedeniya rakety-nositelya sverkhlogkogo klassa [Estimation of the influence of errors of the SINS constructed on MEMS components on the accuracy of positioning a ultra-light class rocket]. *Aerospace Technic and Technology*, 2021, no. 5(175), pp. 60-68. DOI: 10.32620/aktt.2021.5.08.

2. Zhezhera, I. V. Zabezpechennya funktsional′no stiykoho rukhu maloho avtonomnoho lital′noho aparatu [Functional support of steady motion of SUAV]. *Aerospace Technic and Technology*, 2018, no. 5(149), pp. 4-8. DOI: 10.32620/aktt.2018.5.01.

3. Iasechko, M., Shelukhin, O., Maranov, A., Lukianenko, S., Basarab, O., Hutchenko, O. Evaluation of the use of inertial navigation systems to improve the accuracy of object navigation. *International Journal of Computer Science & Network Security*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 71-75. DOI: 10.22937/IJCSNS.2021.21.3.10.

4. *WitMotion - Products, Axial Sensors, 9-Axis*. Available at: https://www.wit-motion.com/9-axis/wit-motion-9-axis-16g-card-storage.html (accessed 07.09.2022).

5. Frej, D., Jaśkiewicz, M. Test Stand for Experimental Crash Tests at Low Speeds. *Transportation Research Procedia*, 2021, vol. 55, pp. 1627-1634. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.07.152.

6. Lukin, V. V., Fevralev, D. V., Abramov, S. K., Peltonen, S., Astola, J. Adaptive DCT-based 1-D filtering of Poisson and mixed Poisson and impulsive noise. *Proc. of the International Workshop on Local and Non-Local Approximation in Image Processing (LNLA'08)*, Lausanne, Switzerland, 2008. 8 p.

Надійшла до редакції 05.10.2022, прийнята до опублікування 20.11.2022

APPLICATION OF DCT-FILTERING ON SIGNAL PROCESSING OF THE INERTIAL MEASUREMENT MODULE

Sergiy Abramov, Victoriya Abramova, Klavdiy Abramov, Volodymyr Lukin, Vasyl Bondar, Igor Kaluzhinov

This article is devoted to the analysis and processing of signals of inertial measuring modules used as part of inertial navigation systems or in research measuring complexes for conducting shock tests. The modules have a set of

ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)

sensors for measuring the speed of the object, its orientation in space, the gravitational forces with which it moves, as well as the magnetic field surrounding it. Using the example of a typical inertial measurement module WT901SDCL, it is shown that the signals of acceleration, angular velocity, and angular position generated by the module have a certain fluctuation component, which deteriorates the accuracy of determining the estimated parameters, as well as to the appearance of an accumulated error in the determination of coordinates of the inertial navigation system. In such conditions, it is advisable to use secondary processing methods, namely, filtering methods. Since the information component of the signals of the inertial measurement module has significant dynamics, one of the key requirements for the filtering method is its preservation. However, a filter is also required to effectively suppress the fluctuation component. Among the currently existing filters, the filter based on discrete cosine transform (DCT-filter) has the best trade-off according to these requirements. It is shown that the use of this filter allows reducing the intensity of the noise component in the information signal by the average of 1.4 times the value of the mean square error and, accordingly, to reduce the measurement errors of physical parameters. Simultaneously, the shape of the signals after applying the DCT-filter remains almost unchanged, all sharp dynamic changes in the signal are preserved, and the absolute levels of the signals also remain the same. Thus, the use of DCT-filtering for signal post-processing in inertial measurement modules can be considered quite reasonable.

Keywords: inertial measurement system; filtering; discrete cosine transform; secondary signal processing; one-dimensional signal.

Абрамов Сергій Клавдійович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. інформаційно-комунікаційних технологій ім. О. О. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Абрамова Вікторія Валеріївна – канд. техн. наук, доц. каф. інформаційно-комунікаційних технологій ім. О. О. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Абрамов Клавдій Данилович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. інформаційно-комунікаційних технологій ім. О. О. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Лукін Володимир Васильович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інформаційно-комунікаційних технологій ім. О. О. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Бондар Василь Володимирович – інж. каф. інформаційно-комунікаційних технологій ім. О. О. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Калужинов Ігор Володимирович – канд. техн. наук, пров. наук. співроб. каф. проектування радіоелектронних систем літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Sergiy Abramov – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: s.abramov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-8295-9439.

Victoriya Abramova – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: v.abramova@khai.edu, ORCID: 0000-0001-5802-5858.

Klavdiy Abramov – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: k.abramov@khai.edu.

Volodymyr Lukin – Doctor of Technical Science, Head of Dept. of Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: lukin@ai.kharkov.com, ORCID: 0000-0002-1443-9685.

Vasil Bondar – Assistant of Dept. of Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: v.bondar@khai.edu.

Igor Kaluzhinov – Candidate of Technical Science, Leading Researcher of Dept. of Aerial vehicles radio electronic systems design, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: kaluzhynov@gmail.com.