

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

УДК 629.05

**ВИКОРИСТАННЯ ВЕЙВЛЕТ ПЕРЕТВОРЕННЯ
ПРИ АВТОНОМНОМУ ВИЗНАЧЕННІ ШИРОТИ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ**¹⁾Аврутов В. В., ¹⁾Бурау Н. І., ¹⁾Гегельський О. В., ²⁾Давиденко С. О.,²⁾Матвієнко О. В., ¹⁾Паздрій О. Я.¹⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²⁾Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля,
Дніпро, УкраїнаE-mail: olgapazdri@gmail.com

Автономне визначення широти місцеположення рухомих та нерухомих об'єктів являє собою або самостійну задачу, або частину задачі визначення початкового значення широти для роботи як платформних, так і безплатформних інерціальних навігаційних систем. Для вирішення цих задач необхідно мати інерціальний вимірювальний модуль (ІВМ) із принаймні трьома гіроскопами і трьома акселерометрами. При використанні ІВМ, виконаних за МЕМС технологією, вихідні сигнали мікромеханічних гіроскопів та акселерометрів мають значні шумові складові. Для фільтрації таких сигналів зазвичай використовують фільтри Калмана. Однак для цього необхідно знати, окрім точної математичної моделі чутливих елементів, ще багато їх апріорних випадкових характеристик.

У статті були проведені дослідження з метою вивчення можливості використання вейвлет-перетворення для фільтрації вихідних сигналів мікромеханічних гіроскопів і акселерометрів ІВМ при автономному визначенні широти місцеположення. Особливістю використання вейвлет-перетворення для зашумлених неоднорідних сигналів є те, що в зв'язку зі зміною масштабу, вейвлети здатні виявити відмінність у характеристиках процесу на різних шкалах, а за допомогою зсуву можна проаналізувати властивості процесу в різних точках у всьому досліджуваному інтервалі. Саме завдяки властивості повноти цієї системи, можна здійснити відновлення процесу за допомогою зворотного вейвлет-перетворення. Експериментально підтверджено працездатність розробленого методу підвищення точності автономного визначення широти з ІВМ на основі мікромеханічних гіроскопів та акселерометрів. Проекції кутової швидкості обертання Землі та гравітаційного прискорення були отримані з ІВМ, виконаного за МЕМС технологією. Після цього сигнали гіроскопів та акселерометрів ІВМ були відфільтровані, використовуючи вейвлети сімейства Добеші 10-го рівня, й усереднені. Ці сигнали було використано в обчислювальному алгоритмі для визначення широти місцеположення. Результати показали, що, на відміну від відомого фільтра Калмана, який майже не підвищував точність визначення широти, завдяки вейвлет-перетворенню й подальшому усередненню його результатів вдалося зменшити похибки визначення широти місцеположення майже вдвічі.

Ключові слова: гіроскопи; акселерометри; інерціальний вимірювальний модуль; широта; вейвлет-перетворення.

Вступ

Фільтрація шумових складових у вихідних сигналах гіроскопів та акселерометрів широко використовується на етапі калібрування інерціальновимірювальних модулів (ІВМ) та в процесі їх роботи у складі інерціально-навігаційних систем. При цьому в якості фільтра зазвичай використовують оптимальний фільтр Калмана [1-4].

Але використання фільтра Калмана передбачає знання статистичних параметрів чутливих елементів [5] та їх точної математичної моделі. Крім фільтра Калмана, ще відомо про використан-

ня алгоритмів нечіткої логіки [6] і штучних нейронних мереж [7, 8].

З кінця минулого століття розвивається новий напрямок в теорії і техніці обробки сигналів, який отримав назву вейвлет-перетворення (ВП). В середині 80-х років ХХ століття Гроссманн (Grossmann) і Морлі (Morlet), проводячи аналіз сейсмічних і акустичних сигналів, вперше використали термін вейвлет (wavelet - з англ. «коротка хвиля») [9]. У наступне десятиліття почалося інтенсивне дослідження вейвлетів такими вченими, як Мейер (Meyer), Малл (Mallat), Фарж (Farge), Чуї (Chui) [9] та Добеші (Dobechies) [10].

Вейвлети представляють собою особливі функції у вигляді коротких хвиль (сплесків) з нульовим інтегральним значенням і з локалізацією за віссю незалежної змінної (t або x), здатних до зсуву за цією віссю і масштабування (розтягування/стиснення). Будь-який з найбільш часто використовуваних типів вейвлетів породжує повну ортогональну систему функцій.

У разі вейвлет-аналізу, декомпозиції процесу (сигналу) в зв'язку зі зміною масштабу вейвлети здатні виявити відмінність у характеристиках процесу на різних шкалах, а за допомогою зсуву можна проаналізувати властивості процесу в різних точках у всьому досліджуваному інтервалі. Саме завдяки властивості повноти цієї системи, можна здійснити відновлення, реконструкцію або синтез процесу за допомогою зворотного ВП. В якості базисних функцій, що утворюють ортогональний базис, можна використовувати широкий набір вейвлетів. Для практичного застосування початкова функція, щоб стати вейвлетом, повинна відповідати основним ознакам [11].

В інерціальній технології мабуть вперше метод ВП для зменшення шуму був застосований у навігаційному ІВМ LTN90-100 на етапі його виставлення [12]. Також відомо про використання ВП в процесі калібрування гіроскопів й акселерометрів, щоб видалити високочастотні складові шуму [13, 14].

Відомо про метод автономного визначення широти місцеположення на нерухомій основі [15]. В цій роботі використовується ВП для підвищення точності автономного визначення широти на нерухомій основі.

Застосування вейвлет-перетворення для фільтрації шуму ІВМ

В якості ІВМ було використано зразок STIM300[®], побудований на мікромеханічних гіроскопах і акселерометрах (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд ІВМ STIM300[®]

Для визначення широти використовувалася відома формула [15]:

$$\varphi = -\arcsin \left[\frac{1}{\Omega \cdot g} (\Omega_x \cdot g_x + \Omega_y \cdot g_y + \Omega_z \cdot g_z) \right], \quad (1)$$

де $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ – проекції кутової швидкості обертання Землі на вісі $Oxyz$, пов'язані з ІВМ; g_x, g_y, g_z – проекції прискорення сили тяжіння на ті самі вісі; $g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}$ – модуль прискорення сили тяжіння, $\Omega = \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2 + \Omega_z^2}$ – модуль кутової швидкості обертання Землі.

На основі аналітичного виразу (1), під час проведення експерименту застосовувався метод автономного визначення широти місцеположення для нерухомих об'єктів [16] при якому:

- Вимірюються та осереднюються проекції кутової швидкості обертання Землі на вісі $Oxyz$, пов'язані з ІВМ;
- Вимірюються та осереднюються проекції прискорення сили тяжіння на ті самі вісі;
- Обчислюються модулі кутової швидкості обертання Землі та прискорення сили тяжіння;
- Обчислюється широта місцеположення за виразом (1).

На рис. 2 показані вихідні сигнали гіроскопів ІВМ STIM300[®].

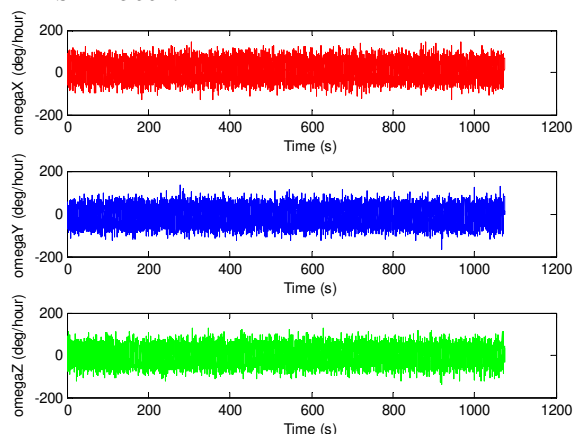


Рис. 2. Вихідні сигнали гіроскопів STIM300[®]

На рис. 3 показані вихідні сигнали акселерометрів ІВМ STIM300[®].

Вихідні сигнали гіроскопів і акселерометрів осереднювалися протягом 10-16 хвилин. Потім ці значення підставлялися до виразу (1). Результати обчислень представлені в Табл. 1, з вибіркою сигналів довжиною N точок.

Результати показують, що зі збільшенням кількості точок вибірки N або із зростанням часу усереднення, точність визначення широти підвищується. Однак порівняно з експериментами з ІВМ на лазерних гіроскопах результати на порядок гірше. Причиною цього по-перше, є більші похибки мікромеханічних гіроскопів та акселерометрів порівняно з похибками лазерних гіроскопів та навігаційних акселерометрів, а по-друге, більший

вплив шумових складових вихідних сигналів мікроремеханічних гіроскопів та акселерометрів.

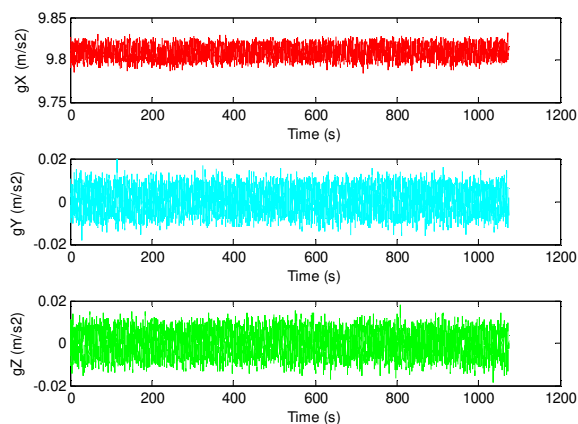


Рис. 3. Вихідні сигнали акселерометрів STIM300®

Таблиця 1. Результати експерименту з IBM STIM300®.

N	$\Omega_x, \text{°/год}$	$\Omega_y, \text{°/год}$	$\Omega_z, \text{°/год}$	$\Omega, \text{°/год}$	$g_x, \text{м/с}^2$	$g_y, \text{м/с}^2$	$g_z, \text{м/с}^2$	$g, \text{м/с}^2$	$\Delta\phi, \text{град}$
26826	11.14713	-9.37963	0.08154	14.56855	9.80938	0.00030	-0.00021	9.80938	1.48486
27469	11.09845	-9.39284	0.06565	14.53979	9.80937	0.00029	-0.00022	9.80937	1.32191
38922	11.65584	-10.15254	0.09721	15.45776	9.80903	0.00051	0.00007	9.80903	0.50524
38281	11.60711	-10.12773	0.13169	15.40498	9.80903	0.00051	0.00006	9.80903	0.45469

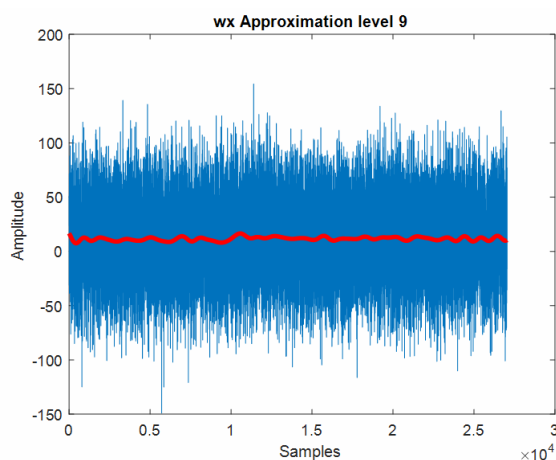


Рис. 4. Графічні залежності вихідного (синій) і очищеного (червоний) сигналів гіроскопу

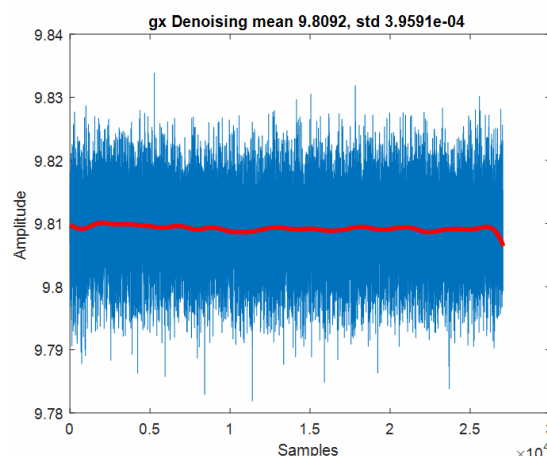


Рис. 5. Графічні залежності вихідного (синій) і очищеного (червоний) сигналів акселерометра

На рис. 7 зображено графіки вихідних (а) і очищених від шуму (б) сигналів акселерометрів.

Відзначимо, що крім ВП на 10 рівнів проводилися роботи з розкладанням на 6 рівнів. Однак, ВП на 10 рівнів показало більшу ефективність з огляду на зменшення похибки визначення широти.

У табл. 2 містяться середні значення проєкцій кутової швидкості обертання Землі та середні значення проєкцій прискорення сили тяжіння, отримані до і після вейвлет-розкладання. Тут $\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_2$ – похибки визначення широти, обчислені до і після ВП порівняно з геоцентричною широтою. Таким

Для зменшення цього впливу скористаємося методами ВП для фільтрації шумових складових та для підвищення точності визначення широти. Для розкладання був використаний вейвлет сімейства Добеши 10-го рівня. На рис. 4 показано графічні залежності вихідного (синій) і очищеного (червоний) від шуму сигналів гіроскопу, після вейвлет-розкладання на 10 рівнів.

Для обробки використано вибірку сигналів кількістю $N=38281$ точок з частотою дискретизації сигналів 25 Гц та часом квантування сигналу 0,04 сек. На рис. 5 показані графічні залежності вихідного (синій) та очищеного (червоний) від шуму сигналів акселерометра, після вейвлет-розкладання на 10 рівнів.

На рис. 6 зображено графіки вихідних (а) і очищених від шуму (б) сигналів блоку гіроскопів. Після вейвлетної фільтрації сигнали гіроскопів і акселерометрів були осереднені, після чого за виразом (1) розраховані значення широти.

чином, внаслідок ВП і фільтрації високочастотних складових шуму гіроскопів вдалося зменшити похибку визначення широти майже в два рази.

Для порівняння отриманих результатів, проводилася фільтрація високочастотних шумових складових сигналів за допомогою усередненого фільтра Калмана. Результати осереднення фільтром Калмана вихідних сигналів гіроскопів і акселерометрів та обчислень широти згідно виразу (1), а також їх похибок порівняно з геоцентричною широтою для першої вибірки наведено в табл. 3.

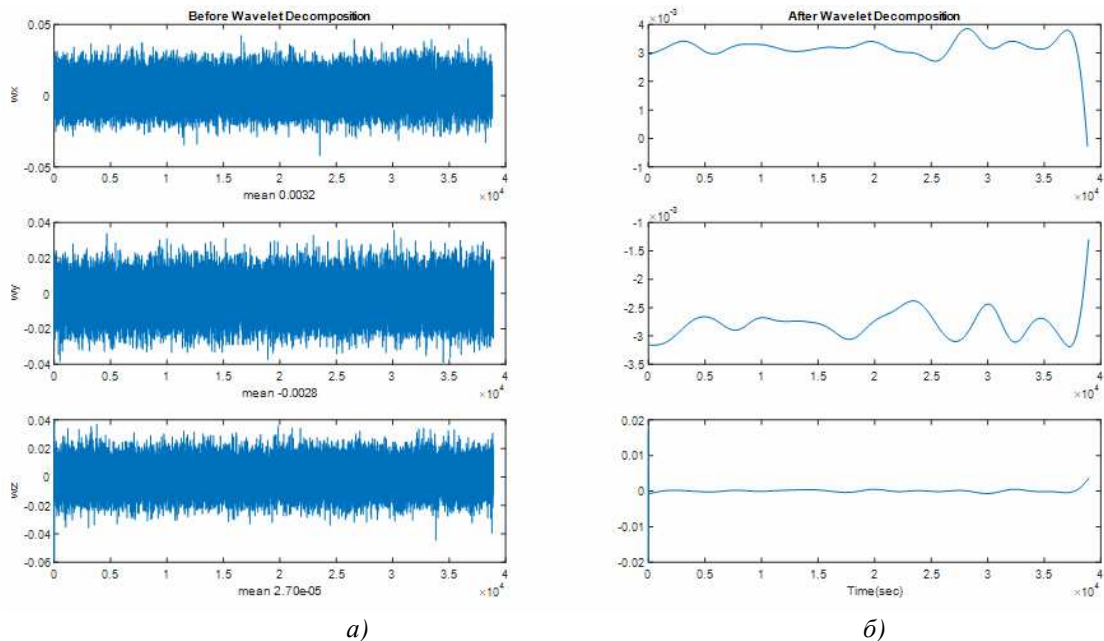


Рис. 6. Графічні залежності вихідних (а) і очищених (б) сигналів блоку гіроскопу

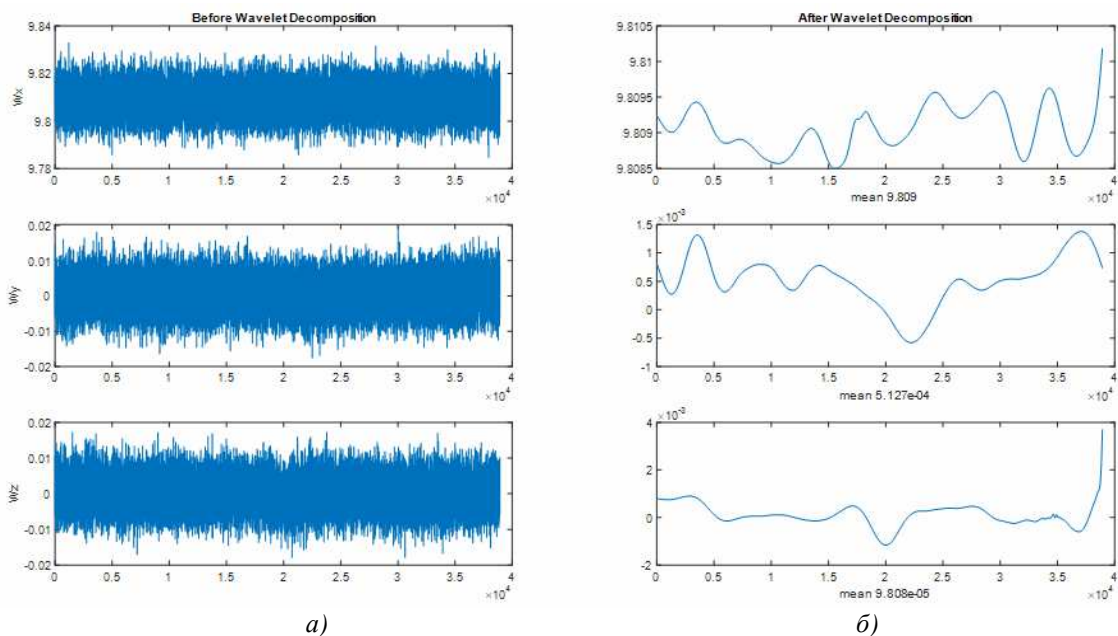


Рис. 7. Графічні залежності вихідних (а) і очищених (б) сигналів блоку акселерометрів

Таблиця 2. Результати вейвлетної фільтрації вихідних сигналів ІВМ

	Середнє до ВП	Середнє після ВП	СКВ до ВП	СКВ після ВП	Одиниці виміру
Q_x	11.60712	11.53242	34.45722	1.49473	%/год
Q_y	-10.12774	-10.12005	33.49136	1.28840	%/год
Q_z	0.13169	0.14469	33.47769	1.53319	%/год
a_x	9.80903	9.80904	0.005927	0.00039	м/с ²
a_y	0.00051	0.00051	0.004418	0.00048	м/с ²
a_z	6.98988e-5	9.97693e-5	0.004391	0.00051	м/с ²
$\Delta\varphi_1$, град	-0.45469				
$\Delta\varphi_2$, град	-0.29242				

Таблиця 3. Результати усереднення фільтром Калмана

	Середнє до ФК	Середнє після ФК	СКВ до ФК	СКВ після ФК	Одиниці виміру
Ω_x	11.605018	11.548486	34.727640	2.657449	°/год
Ω_y	-9.347096	-9.296547	33.540819	2.499930	°/год
Ω_z	-0.163199	-0.179877	33.582626	2.466037	°/год
a_x	9.809256	9.752288	0.006002	0.593745	м/с ²
a_y	0.000158	0.000163	0.004477	0.000563	м/с ²
a_z	-0.000339	0.056631	0.004390	0.593806	м/с ²
$\Delta\varphi_1$, град	-2.711893				
$\Delta\varphi_3$, град	-2.699649				

Аналіз результатів обчислень показав, що використання усередненого фільтра Калмана практично не покращує точність визначення широти порівняно зі звичайним усередненням вихідних сигналів ІВМ.

Висновки

Результати досліджень використання вейвлет-фільтрації зашумлених сигналів ІВМ для автономного визначення широти місцеположення експериментально підтвердили працездатність розробленого методу підвищення точності автономного визначення широти інерціально-вимірювальним модулем на основі мікромеханічних гіроскопів та акселерометрів. Проекції кутової швидкості обертання Землі і гравітаційного прискорення були отримані з ІВМ. Після цього сигнали гіроскопів і акселерометрів ІВМ були відфільтровані, з використанням вейвлетів сімейства Добеші 10-го рівня, і усереднені. Ці сигнали було використано в обчислювальному алгоритмі для визначення широти місцеположення. Результати показали, що, на відміну від відомого фільтра Калмана, який майже не підвищував точність визначення широти, завдяки вейвлет-перетворенню і подальшому усередненню його результатів вдалося зменшити похибки визначення широти майже вдвічі. Успішне застосування Вейвлет перетворення показало, що його можна використовувати для інших інерційно-вимірювальних модулів і вирішення завдань інерційної навігації.

Література

- [1] M. S. Grewal, V. D. Henderson, R. S. Miysako, "Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems", in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 36, pp. 3-13, 1991.
- [2] C. Hide, T. Moore, M. Smith, "Adaptive Kalman filtering for low-cost INS/GPS", *The Journal of Navigation*, vol. 56, pp. 143-152, 2003.
- [3] N. Nikbakht, M. Mazlom, and A. Khayatian, "Evaluation of solid-state accelerometer for positioning of vehicle", in *Proceeding of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, Hong Kong, 2005, pp. 729-733.
- [4] G. Pang, H. Liu, "Evaluation of a low-cost MEMS accelerometer for distance measurement", *The Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 30, pp. 249-265, 2001.
- [5] О. А. Степанов, И. Б. Челпанов, А. В. Моторин, "О точности оценивания постоянной составляющей погрешности датчиков и ее связи с вариацией Алана", на *XXII Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам*. ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор». СПб., 2015, с. 485-491.
- [6] Gaysse, J. A low cost absolute position calculation system. *Proceeding of SICE-ICASE International Joint Conference*, Busan, Korea, 2006, pp. 5658-5661.
- [7] A. El-Rabbany, M. El-Diasty, "An efficient neural modal for denoising of MEMS-based inertial data", *The Journal of Navigation*, vol. 57, pp. 407-415, 2004.
- [8] H. Wang, W. Tian, "Modeling the random drift of micro-machined gyroscope with neural network", *Neural Processing Letters*, vol. 22, pp. 235-247, 2005.
- [9] А. Н. Яковлев, *Введение в вейвлет-преобразования: Учебное пособие*. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2003.
- [10] И. Добеша, *Десять лекций по вейвлетам*. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
- [11] Н. І. Бурау та інші, *Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики авіаційних двигунів*. Київ: НАУ, 2012.
- [12] N. El-Sheimy, S. Nassar and A. Noureldin, "Wavelet De-noising for IMU Alignment," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, October 2004, pp. 32-39.
- [13] Sheng-Chih Shen, Chia-Jung Chen, Hsin-Jung Huang, "A new calibration method for low cost MEMS inertial sensor module", *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 18, no. 6, pp. 819-824, 2010.
- [14] С. В. Головач, "Экспериментальное исследование характеристик лазерного гироскопа", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*, вип. 40, с. 33-38, 2014.

[15] Аврутов В. В., “Автономное определение начальной широты с помощью инерциально-измерительного модуля”, *Прикл. Механика*, т. 54, №5, с. 116-122, 2018.

[16] України на корисну модель № 123355, МПК G01C 19/00. Спосіб визначення широти місця; заявник та власник Аврутов В.В.; заявл. 31.08.2017 u2017 08762; опубл. 26.02.2018, бюл. №4.

UDC 629.05

V. Avrutov, N. Bouraou, O. Hehelskyi, S. Davydenko, O. Matviyenko, O. Pazdri

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

WAVELET DE-NOISING FOR AUTONOMOUS LATITUDE DETERMINATION

Autonomous determination of the latitude of the place of movable and immovable objects is used as an independent task, as well as the task of determination of the initial value of latitude for operation of both platform and platform-free navigation systems. To solve these problems, it is necessary to have an inertial measurement unit (IMU) with at least three gyroscopes and three accelerometers. When using the IMU, executed by MEMS technology, the output signals of micromechanical gyroscope and accelerometers have significant noise components. Kalman filter is usually used to filter such signals. However, for this purpose it is necessary to know, besides the exact mathematical model of sensitive elements, many of their initial random characteristics.

In the article, the research was conducted in order to investigate the use of wavelet transformation for the filtering of output signals of micromechanical accelerometers and gyroscopes for autonomous determination of the latitude of the place. The peculiarity of using wavelet transform for noisy signals is that due to changing scale, wavelets can detect differences in process characteristics on different scales, and with help of the shift we can analyze process properties at different points on the whole investigated interval. Due to the properties of this system's fullness that it is possible to restore the process by means of inverse wavelet transform. The efficiency of the developed method of increasing the accuracy of the autonomous determination of the latitude of the IMU on the basis of micromechanical gyroscope and accelerometers has been experimentally confirmed. The projections of the angular velocity of Earth rotation and gravitational acceleration were obtained from the IMU made by MEMS technology. After that, the signals of the gyroscopes and accelerometers of the inertial measuring unit were filtered, using the wavelet 'Daubechies 10' in decomposition, and averaged. These signals were used in a computational algorithm to determine the latitude. The results showed that, unlike the well-known Kalman filter, which almost did not increase the accuracy of the latitude calculation, wavelet denoising and further averaging reduced calculation error by almost twice.

Keywords: gyroscopes; accelerometers; latitude determination; wavelets.

*Надійшла до редакції
22 грудня 2021 року*

*Рецензовано
24 січня 2022 року*

UDC 527.8, 629.7.051

CORRECTION SCHEMES FOR THE GYROMAGNETIC COMPASS

Vladyslav Meleshko, Valery Romanov

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Kyiv, Ukraine*

E-mail: mvv44@ukr.net; v.romanov2516@gmail.com

In connection with the significant progress in the improvement of sensitive elements (gyroscopes, accelerometers, magnetometers), as well as the increased possibilities of information processing by computational means, it became necessary to use modern algorithms for constructing correction systems for the gyromagnetic compass.

The object of research is the correction circuits: with an adaptable proportional-integral-differential (PID) controller, with a Fuzzy controller, with a Kalman filter for correcting the gyroscopic meter according to the magnetic heading sensor. In this case, the well-known scheme of a gyromagnetic compass with a torque proportional-integral (PI) correction is taken as the basis for comparison. Smoothing of the oscillatory error of a magnetic compass, which may be predominant, is considered. The subject of research is the accuracy characteristics in the steady state.