

УДК 629.7.05

*Черняк М. Г., к. т. н., доцент;
Колесник В. О., аспірант
КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

АВТОНОМНА КОРЕКЦІЯ ПОХИБОК ІНЕРЦІАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЧІВ БЕЗПЛАТФОРМНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Вступ. Інерціальні навігаційні системи, в тому числі безплатформні (БІНС), залишаються незамінним джерелом навігаційної інформації в умовах відсутності (непрацездатності) широко застосовуваних супутникових навігаційних систем (СНС). Однак, похибкам БІНС властиве накопичення з часом квадратично з похибками акселерометра та кубічно з похибками гіроскопа [1]. Це суттєво обмежує тривалість автономної роботи, особливо якщо первинні вимірювачі виготовлені за МЕМС технологією, бо характеризуються значними похибками зсуву нуля і низькочастотними шумами, що призводять до дрейфу сигналу в датчиках з часом. У той час як компенсація зміщення нуля є відносно простим завданням, що вирішується під час калібрування ІВМ, зменшення шумів у діапазоні частот, що збігається з діапазоном вимірюваного сигналу, є доволі неоднозначним. Одним із потенційних способів вирішення цієї проблеми базується на модуляції обертанням.

Модуляція обертанням полягає у введенні додаткового обертального руху для датчиків ІВМ за певним законом, тим самим модулюючи ці похибки в періодичні сигнали, що потім усуваються з вихідного сигналу шляхом їх усереднення за період повного оберту. Метод було вперше описано в [2] та реалізована при побудові морської навігаційної системи [3]. Модуляція обертанням виявилася ефективним рішенням для прецизійних датчиків, тому неминуче постало питання, чи може вона покращити якість додатків на основі МЕМС-датчиків. Одне з перших таких досліджень [4] показало, що обертання ІВМ в статичному випробуванні забезпечила зменшення похибка визначення

координат більш ніж удвічі, але оберտальна платформа значно збільшила розмір і складність всієї навігаційної системи. Тим не менш, дослідження продемонструвало перспективність такого підходу в навігації наземної колісної техніки, що потребує ретельного вивчення.

Метод. Припустимо, що ІВМ обертається з постійною швидкістю Ω навколо осі Z . Таким чином, орієнтація ІВМ в зв'язаній системі координат (СК) в момент часу t виражається як:

$$\mathbf{C}_B^S(t) = \begin{pmatrix} \cos \Omega t & \sin \Omega t & 0 \\ -\sin \Omega t & \cos \Omega t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Таким чином, оцінка прискорення тіла $\hat{\mathbf{a}}_{IB}^B$ і кутової швидкості $\hat{\boldsymbol{\omega}}_{IB}^B$ відносно інерціальної системи координат дорівнює:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{a}}_{IB}^B &= \mathbf{C}_S^B \hat{\mathbf{a}}_{IS}^S - \mathbf{a}_{BS}^B = \mathbf{a}_{IB}^B + \mathbf{C}_S^B \Delta \mathbf{a}^S - \mathbf{a}_{BS}^B \\ \hat{\boldsymbol{\omega}}_{IB}^B &= \mathbf{C}_S^B \hat{\boldsymbol{\omega}}_{IS}^S - \boldsymbol{\omega}_{BS}^B = \boldsymbol{\omega}_{IB}^B + \mathbf{C}_S^B \Delta \boldsymbol{\omega}^S - \boldsymbol{\omega}_{BS}^B \end{aligned} \quad (2)$$

де $\mathbf{a}_{IS}^S$ та $\boldsymbol{\omega}_{IS}^S$ – вихідні дані акселерометрів та гіроскопів; $\mathbf{a}_{BS}^S = (0; 0; 0)^T$ та $\boldsymbol{\omega}_{BS}^S = (0; 0; \Omega)^T$ – прискорення та кутова швидкість ІВМ відносно зв'язаної СК в проекціях на осі власної СК; $\Delta \mathbf{a}^S$ і $\Delta \boldsymbol{\omega}^S$ – похибки вимірювачів ІВМ.

Інтеграли гармонійно модульованих квазістатичних похибок $\Delta \mathbf{a}^S$ і $\Delta \boldsymbol{\omega}^S$ усуваються інтегруванням (2) протягом повного циклу обертання з періодом T . В результаті оцінки для прискорення і кутової швидкості для одного циклу обертання дорівнюють:

$$\bar{\mathbf{a}}_{IB}^B \approx \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{a}_{IB}^B d\tau + \begin{pmatrix} 0 & 0 & \Delta a_z \end{pmatrix}^T; \quad \bar{\boldsymbol{\omega}}_{IB}^B \approx \frac{1}{T} \int_0^T \boldsymbol{\omega}_{IB}^B d\tau + \begin{pmatrix} 0 & 0 & \Delta \omega_z - \Omega \end{pmatrix}^T \quad (3)$$

Варто зауважити, що для уникнення необхідності безперервного розрахунку матриці орієнтації $\mathbf{C}_B^S(t)$ доречніше буде оцінювати похибки $\Delta \mathbf{a}^S$ і $\Delta \boldsymbol{\omega}^S$ в ході безпосереднього інтегрування показів ІВМ за повний оберт, а оновлення значень $\mathbf{a}_{IB}^B$ і $\boldsymbol{\omega}_{IB}^B$ виконувати лише в точці повного оберту, таким

чином потреба в наявності кутомірного пристрою зникає. Таке рішення має свої наслідки – частота оновлення вимірюваної інформації з ІВМ f буде дорівнювати частоті модулюючого обертання $f_{\text{мод.}} = 2\pi / \Omega$. Відповідно, частота обертання, за аналогією з теоремою Найквіста, має бути принаймні вдвічі більше максимальної частоти маневрів об'єкта $f_{\text{ман.}}$ для забезпечення їхньої спостережуваності. Крім того, ефект модуляції не поширюється на вимірювачі, осі чутливості яких розташовані вздовж осі обертання. Тому для задіяння в процесі корекції всіх вимірювачів ІВМ необхідно увести операцію переорієнтації його осей шляхом повороту на кут 90 градусів навколо осі в площині модулюючого обертання з підстановкою результатів вимірювань від іншого (допоміжного) блоку вимірювачів на час здійснення перевороту.

Враховуючи зазначені вище зауваження, кінцевий варіант алгоритму передбачає наявність основного та допоміжного ІВМ, об'єднаних в єдиний вимірювальний модуль, енкодер, що забезпечує принаймні відлік повних обертів та двопозиційний поворотний механізм для переорієнтації осей основного ІВМ. Визначення кутової швидкості модулюючого обертання здійснюється опосередковано за оцінкою періоду обертання на основі сигналу енкодера.

Експеримент. Перші статичні випробування, що були проведені в лабораторних умовах [6], показали спроможність зменшити швидкість зростання похибок на порядок, за винятком датчиків, осі яких розташовані вздовж осі модулюючого обертання. Наступним етапом в дослідженні ефективності запропонованого методу стала серія натурних випробувань БІНС в складі наземного транспортного засобу. Кількісна оцінка ефективності в даному випадку здійснювалась на основі повноцінного вирішення навігаційної задачі в автономному режимі роботи БІНС, що порівнювалась з результатом оцінки координат за СНС. В якості джерела модулюючого обертання виступали обертальна платформа двома варіантами орієнтації осі модулюючого обертання відносно зв'язаної СК (вздовж повздовжньої та

вертикальної осі), а також праве заднє (нерульове) колесо автомобіля (рис. 1).

В якості тестового маршруту було обрано відрізок автомобільної дороги помірної кривизни довжиною близько 1 км. Максимальна швидкість руху за маршрутом не перевищувала 50 км/год, щоб величина кутової швидкості обертання коліс автомобіля гарантовано потрапляла в діапазон вимірювань гіроскопів дослідного зразка ІВМ. Частота обертання поворотної платформи була обрана за тими ж міркуваннями і становила близько 4 Гц.

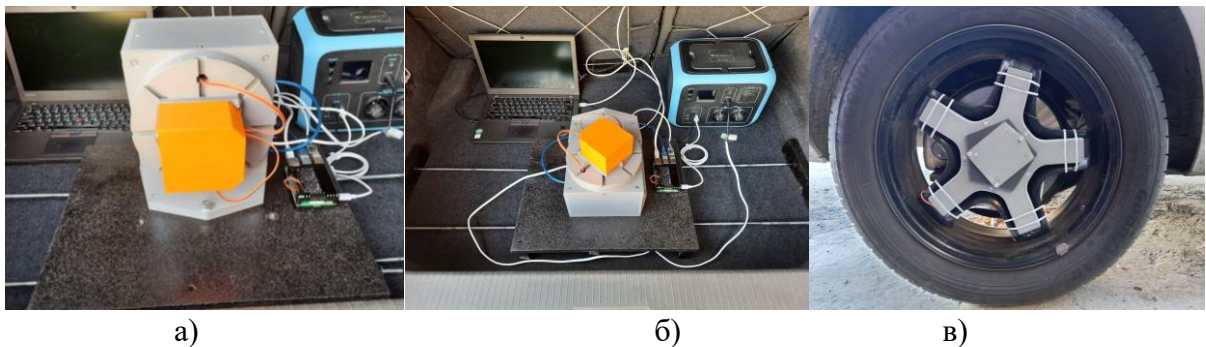


Рис. 1. Натурне випробування з керованим обертанням ІВМ вздовж горизонтальної (а), вертикальної (б) осі та з некерованим обертанням (в) на колесі автомобіля

При модуляції по повздовжньої осі оцінка траєкторії зазнавала менших спотворень (рис. 2(а)), проте мало місце її значне бокове відхилення. Зумовлено це тим, що недосконалістю компенсації модулюючого обертання спричинили спотворення оцінки кута крену, і як наслідок, появу паразитної проекції прискорення вільного падіння на бокову вісь зв'язаної СК.

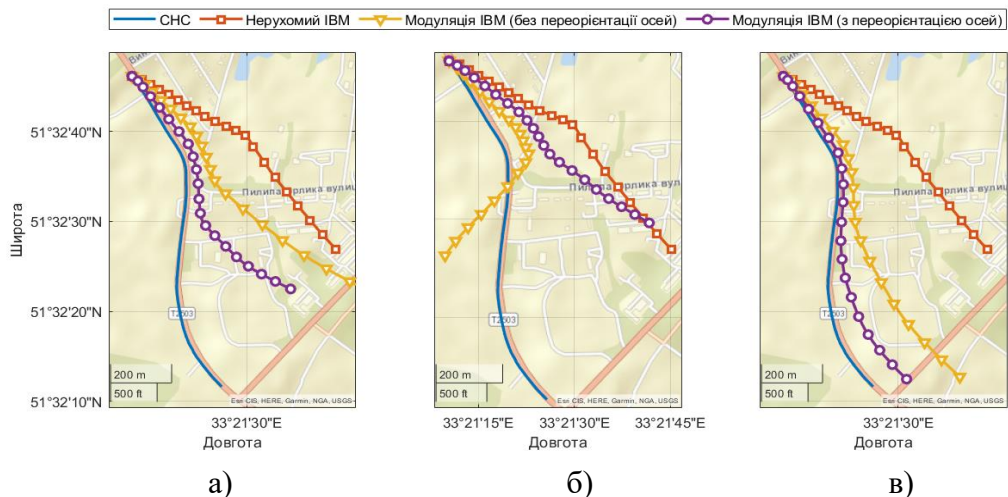


Рис. 2. Результати натурного випробування ІВМ з керованим обертанням вздовж

горизонтальної (а), вертикальної (б) осі та з некерованим
обертанням (в) на колесі автомобіля

Варіант модуляції вздовж вертикальної осі загалом характеризувався значною похибкою по курсу, що можна побачити за спотвореними формами розрахункових траєкторій (рис. 2(б)). Пояснюється це недосконалістю компенсації модулюючого обертання з показів вертикального гіроскопа а також неможливістю алгоритмічної корекції показів вертикальних датчиків взагалі.

Найбільш близькі до справжньої оцінки траєкторії були отримані у випадку встановлення IBM на колесі (рис. 2(в)). Недосконалість компенсації модулюючого обертання в таких умовах проявлялась у спотвореній оцінці кута тангажу. Породжена цим паразитна проекція прискорення вільного падіння на повздовжню вісь зв'язаної СК і зумовлює наявну на графіку похибку в довжині траєкторії.

Висновок. Аналіз досліджуваного способу модуляції інструментальних похибок IBM обертанням підтвердив його здатність усувати квазістатичні похибки інерційних датчиків, що відкриває шлях до значного зменшення похибок БІНС та збільшення тривалості її автономної роботи. Встановлення IBM на нерульовому колесі дало змогу відмовитись від штучного джерела обертального руху, зберігаючи при цьому переваги запропонованого методу.

Головним обмеженням запропонованої реалізації є те, що вихідна частота оновлення вихідних даних IBM стає кратною частоті модулюючого обертання. Також критичним є питання компенсації кутової швидкості модуляції з показів гіроскопів. Проте, незважаючи на зазначені недоліки, реалізація модуляції IBM обертанням має великий потенціал до застосування в наземній навігації.

Джерела

1. P. G. Savage, *Strapdown Analytics*. in *Strapdown Analytics*, no. ч. 1. Strapdown Associates, 2000. [Online]. Available:

<https://books.google.com.ua/books?id=pltgRAAACA AJ>

2. E. S. Geller, "Inertial System Platform Rotation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-4, no. 4, pp. 557–568, Jul. 1968, doi: 10.1109/TAES.1968.5409024.
3. C. S. Giovanni and E. Levinson, "Performance of a Ring Laser Strapdown Marine Gyrocompass," *NAVIGATION*, vol. 28, no. 4, pp. 311–341, Dec. 1981, doi: 10.1002/j.2161-4296.1981.tb00779.x.
4. W. Sun, D. Wang, L. Xu, and L. Xu, "MEMS-based rotary strapdown inertial navigation system," *Measurement*, vol. 46, no. 8, pp. 2585–2596, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.035>.
5. J. Collin, "MEMS IMU Carouseling for Ground Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, Aug. 2014, doi: 10.1109/TVT.2014.2345847.
6. M. Chernyak and V. Kolesnyk, "Improving Strapdown Inertial Navigation System Performance by Self-Compensation of Inertial Sensor Errors," *Transactions on Aerospace Research*, vol. 2023, no. 4, pp. 41–51, 2023, doi: 10.2478/tar-2023-0022.