

УДК 531.768

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771452023293127>

В. О. Колесник¹, PhD студент, М. Г. Черняк², к.т.н., доцент

АВТОНОМНА КОРЕКЦІЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ПОХИБОК ІНЕРЦІАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЧІВ БЕЗПЛАТФОРМНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Ua

Безплатформні навігаційні системи на основі мікроелектромеханічних вимірювачів (МЕМС) мають ряд переваг, як-от малий розмір, низька вартість і мінімальне енергоспоживання. Проте таким вимірювачам властиві значні низькочастотні шуми та погана повторюваність зміщення нуля, що призводить до значних навігаційних похибок. Ці недоліки роблять МЕМС вимірювачі непридатними для автономних навігаційних систем, навіть за умов регулярного повторного калібрування. Один із найбільш перспективних способів усунення випадкових похибок інерціальних вимірювачів базується на модуляції їх вихідних даних обертанням. Проте, цей підхід успішно застосовувався лише до прецизійних лазерних та волоконно-оптичних гіроскопів, обладнаних точними поворотними платформами. Дана стаття присвячена адаптації методу модуляції обертанням для недорогих МЕМС вимірювачів для покращення їх навігаційних характеристик зі збереженням при цьому переваг мікроелектромеханічних технологій. Були обговорені можливі питання реалізації та запропонована оптимальна модель розрахунку, що була перевірена під час статичних та натурних випробувань розробленого інерціального вимірювального модуля.

En

Microelectromechanical systems – based strapdown navigation systems offer advantages such as small size, low cost, and minimal power consumption. However, MEMS sensors are prone to significant low-frequency noise and poor bias repeatability, which can lead to navigational errors over time. These errors make them unsuitable for autonomous navigation applications, even with frequent recal-

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

ibration. One way to solve this problem is the rotation modulation method. This approach is widely recognized but has only been successful with precise laser and fiber optic gyroscopes equipped with precise rotating platforms.

This article focuses on the potential of adapting the rotation modulation method for the case of inexpensive MEMS sensors that can significantly improve navigation performance while maintaining the benefits of microelectromechanical technologies. Potential issues of implementation were discussed, and corresponding requirements were formulated. The proposed optimal computation scheme was verified during static tests of the developed inertial measurement unit (IMU).

The rotation of the IMU is capable of harmonically modulating the quasi-static errors of inertial sensors, which are practically eliminated during the navigational algorithm processing estimation, which paves the way for a significant reduction of its navigation errors and increases its autonomous operation time.

The static tests conducted in laboratory conditions confirmed the research method's high technical potential. It has been shown that the proposed method is effective for various spatial orientations of the rotational modulation axis.

Installing an IMU on a non-steering car wheel allows for abandoning an artificial rotational motion source while preserving the proposed method's advantages.

The proposed implementation's main limitation is that the IMU's output data update frequency becomes a multiple of the frequency of the modulating rotation. Accordingly, this frequency should be at least twice the maximum frequency of body manoeuvres to ensure their observability. Additionally, a critical issue is the compensation of the angular velocity of modulation from gyroscope readings. However, despite the mentioned considerations, such an implementation of IMU modulation by rotation still has enormous potential for application in terrestrial navigation.

Вступ

Інерціальні навігаційні системи (ІНС), у тому числі безплатформні (БІНС), залишаються незамінним джерелом навігаційної інформації за умов відсутності (непрацездатності) широко застосовуваних супутникових систем навігації *GPS*. Точність її визначається точністю первинних вимірювачів: гіроскопічних датчиків кутової швидкості (гіроскопів) та акселерометрів.

Відомо, що похибка БІНС зростає із часом квадратично із похибками акселерометра та кубічно із похибками гіроскопа [1, 2]. Це суттєво обмежує тривалість їх автономної роботи, особливо якщо первинні вимірювачі виготовлені за технологією мікромеханіки (MEMS). Беззаперечні переваги таких датчиків, а саме: малий розмір, низьке енергоспоживання та вартість, знецінюються суттєвими похибками зміщення нуля та низькочастотними флікер-шумами, що призводить до дрейфу їх вихідних сигналів з часом. У той час як перша проблема (зміщення нуля) є відносно просто вирішується шляхом повторного калібрування інерціального вимірювального модуля (ІВМ) перед використанням, то питання придушення шумів, діапазон частот яких збігається із діапазоном вимірюваного сигналу, є доволі неоднозначним і зараз активно досліджується.

Одним із найбільш перспективних способів усунення низькочастотних випадкових похибок є введення додаткового оберտального руху для датчиків ІВМ за певним законом, тим самим модулюючи ці похибки у періодичні сигнали, які можна легко видалити із вихідного сигналу шляхом їх усереднення протягом обертання. Цей підхід був вперше реалізований у [3], під час побудови морської навігаційної системи [4]. базуючись на цій розробці створений високоточний морський лазерний інерціальний навігатор [5]. Цей підхід було адаптовано для застосування у ІНС та системах відліку курсу на основі волоконно-оптичних гіроскопів [6].

У [7] показало здатність модуляції ІВМ обертанням зменшити похибки як гіроскопів, так і акселерометрів. Можливості застосування способу в реальних динамічних умовах були продемонстровані у [8, 9]. Похибка визначення координати була зменшена удвічі, однак обертальна платформа значно збільшила розмір та складність БІНС. Відоме автомобільне застосування інерціального одометра на основі МЕМС ІВМ [10]. Модуляція показів ІВМ обертанням колеса підвищила точність визначення пройденої дистанції, але максимальна допустима кутова швидкість обертання колеса суттєво обмежувалась діапазоном вимірювання гіроскопів. Однак, вона показала себе як перспективний підхід у навігації наземної колісної техніки, що потребує ретельного вивчення.

Постановка задачі

Метою даної статті є дослідження можливостей корекції випадкових інструментальних похибок МЕМС ІВМ шляхом його модуляції обертанням для забезпечення автономності БІНС наземного транспортного засобу та обґрунтування критичних аспектів технічної реалізації такого підходу.

Тривалість автономної роботи БІНС вимірюється із моменту вимкнення супутникової навігаційної системи (СНС) через аварійну ситуацію до моменту, коли похибки у кутах орієнтації $\varepsilon(t)$, проекціях швидкості $\Delta V(t)$ та координатах об'єкта $\Delta S(t)$ досягнуть максимально допустимих значень. Оскільки фактичні значення похибки БІНС залежать від конкретних умов експерименту та траєкторії руху, для оцінки величини та характеру їх зростання доцільніше замість повної моделі похибок БІНС [1, 2] використовувати асимптотичні оцінки виду:

$$\varepsilon(t) = \Delta\omega(t)t; \quad \Delta V(t) = \Delta a(t)t + \Delta\omega(t)\frac{gt^2}{2}; \quad \Delta S(t) = \int_0^t \Delta V(\tau)d\tau,$$

де $\Delta\omega(t)$, $\Delta a(t)$ – похибки блоку гіроскопів та акселерометрів відповідно;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – величина прискорення вільного падіння.

Відповідно, збільшення тривалості автономної роботи БІНС полягає у мінімізації цих оцінок.

Математична модель автономної корекції

Розглянемо ІВМ, встановлений на поворотну платформу, яка здійснює рівномірне обертання зі швидкістю Ω вздовж осі Z_B системи координат (СК) об'єкта (рис. 1). При цьому ІВМ встановлено так, що його вісь Z_S збігається із віссю модулюючого обертання. Поворотна платформа жорстко закріплена відносно об'єкта. На початковий момент часу осі СК ІВМ X_S та Y_S збігаються з осями X_B та Y_B об'єкта відповідно.

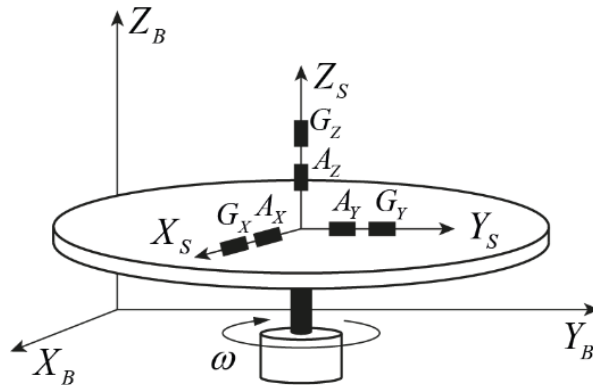


Рис. 1. Схема ІВМ на поворотній платформі

Із метою спрощення теоретичних викладок, обмежимо модель похибок вимірювачів ІВМ лише адитивними компонентами. Таким чином, у результаті вимірювання уявного прискорення та кутової швидкості ІВМ у проекціях на осі інструментального базису S дорівнюють:

$$\begin{aligned} a_{IS}^S &= C_B^S a_{IB}^B + a_{BS}^S + \Delta a^S \\ \omega_{IS}^S &= C_B^S \omega_{IB}^B + \omega_{BS}^S + \Delta \omega^S \end{aligned}$$

де a_{IS}^S і ω_{IS}^S – вихідні сигнали блоків акселерометрів і гіроскопів; C_B^S – матриця орієнтації ІВМ відносно зв'язаної СК); a_{IB}^B і ω_{IB}^B – прискорення та кутова швидкість рухомого об'єкта відносно інерціальної СК I ; a_{BS}^S і ω_{BS}^S – прискорення та кутова швидкість ІВМ відносно транспортного базису у проекціях на осі СК ІВМ S ; Δa^S і $\Delta \omega^S$ – похибки вимірювачів ІВМ.

За умов жорсткого закріплення обертальної платформи компонент прискорення a_{BS}^B описує лінійні вібрації платформи, що не створюють ніяких поступальних переміщень платформи відносно СК. Орієнтація ІВМ у СК об'єкта C_B^S у момент часу t після початку обертання виражається як:

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

Оцінка прискорення \hat{a}_{IB}^B та кутової швидкості $\hat{\omega}_{IB}^B$ у проекціях на СК B на основі результатів вимірювання \hat{a}_{IS}^S і $\hat{\omega}_{IS}^S$ дорівнює:

$$\begin{aligned} \hat{a}_{IB}^B &= C_S^B \hat{a}_{IS}^S - a_{BS}^B = a_{IB}^B + C_S^B \Delta a^S - a_{BS}^B \\ \hat{\omega}_{IB}^B &= C_S^B \hat{\omega}_{IS}^S - \omega_{BS}^B = \omega_{IB}^B + C_S^B \Delta \omega^S - \omega_{BS}^B. \end{aligned}$$

Відповідно, момент часу t \hat{a}_{IB}^B та $\hat{\omega}_{IB}^B$ дорівнюватимуть:

$$\begin{aligned} \hat{a}_{IB}^B(t) &= a_{IB}^B(t) + \begin{pmatrix} \Delta a_x^S \cos \Omega t - \Delta a_y^S \sin \Omega t \\ \Delta a_x^S \sin \Omega t + \Delta a_y^S \cos \Omega t \\ \Delta a_z^S \end{pmatrix} - a_{BS}^B \\ \hat{\omega}_{IB}^B(t) &= \omega_{IB}^B(t) + \begin{pmatrix} \Delta \omega_x^S \cos \Omega t - \Delta \omega_y^S \sin \Omega t \\ \Delta \omega_x^S \sin \Omega t + \Delta \omega_y^S \cos \Omega t \\ \Delta \omega_z^S \end{pmatrix} - \omega_{BS}^B. \end{aligned}$$

Інтегралі від гармонійних складових у межах періоду обертання $[0; T]$ дорівнюють нулю, таким чином досягається відокремлення та усунення похибок вимірювачів, вектори яких нерухомі в інструментальній СК, від вимірюваного вектору, що нерухомий в інерціальній СК:

$$\bar{a}_{IB}^B \approx \frac{1}{T} \int_0^T a_{IB}^B d\tau + (0 \ 0 \ \Delta a_z)^T; \quad \bar{\omega}_{IB}^B \approx \frac{1}{T} \int_0^T \omega_{IB}^B d\tau + (0 \ 0 \ \Delta \omega_z - \Omega)^T. \quad (6)$$

Покажемо процес усунення інструментальних похибок ІВМ, розглянувши детальніше лише на пару вимірювачів, розташованих в площині обертання вздовж однієї осі. Позначивши вимірювані проекції уявного прискорення та кутової швидкості як f_{\square} та ω_{\square} , а проекції по перпендикулярній осі в площині модуляції як f_{\perp} та ω_{\perp} , отримаємо наступні вирази вихідних сигналів акселерометра і гіроскопа:

$$\begin{aligned} a(t) &= a_{\square} \cos \Omega t + a_{\perp} \sin \Omega t + \Delta a(t) \\ \omega(t) &= \omega_{\square} \cos \Omega t + \omega_{\perp} \sin \Omega t + \Delta \omega(t), \end{aligned}$$

де Δa та $\Delta \omega$ –похибки вимірювачів. Під час інтегрування (7) у межах періоду повного оберту, ми усуваємо із вихідних сигналів вимірювачів корисні складові, залишаючи натомість лише інтегралі інструментальних похибок вимірювачів:

$$\int_0^T a(t)dt \approx \int_0^T \Delta a(t)dt; \quad \int_0^T \omega(t)dt \approx \int_0^T \Delta \omega(t)dt.$$

Інтегрування некорельованого білого шуму без сумнівів сприяє його придушенню, проте механізм цього придушення не відрізняється від класичного випадку із нерухомим ІВМ. Щодо нестабільності зміщення нуля між запусками, тут модуляція обертанням демонструє свої переваги у повній мірі, адже дозволяє ізолювати адитивну похибку вимірювачів, забезпечуючи таким чином їх компенсацію (у першому варіанті із приведенням виходу ІВМ до СК B) або ж однозначне обчислення (у другому варіанті, коли ми залишаємось у СК ІВМ).

Реалізація автономної корекції

Із наведених вище виразів очевидно, що ключовою операцією у реалізації даного способу корекції є розрахунок матриці орієнтації C_S^B , тобто відлік кута повороту із подальшим перерахунком результатів вимірювання від СК ІВМ до зв'язаної на кожному такті оновлення вихідних даних датчиків, що накладає суворі вимоги до кутомірного пристрою. Тому доречніше буде оцінювати похибок Δa^S і $\Delta \omega^S$ у ході безпосереднього інтегрування показів ІВМ (2) за повний оберт. Оновлення a_{IB}^B і ω_{IB}^B достатньо виконувати лише у точці завершення повного циклу, таким чином потреба у наявності кутомірного пристрою зникає. Таке рішення має свої наслідки – частота оновлення вимірюваної інформації із ІВМ f буде дорівнювати частоті модулюючого обертання $f_{\text{мод.}} = 2\pi / \Omega$. Очевидно, за аналогією із теоремою Найквіста, ця частота повинна бути принаймні вдвічі більше максимальної частоти маневрів об'єкта $f_{\text{ман.}}$ для забезпечення їхньої спостережуваності.

Як бачимо із (6), модуляція має ефект лише для вимірювачів, осі чутливості яких розташовані в площині перпендикулярній до осі модулюючого обертання. Для задіяння в процесі корекції всіх вимірювачів ІВМ необхідно увести операцію переорієнтації його осей шляхом повороту на кут 90 градусів навколо осі у площині модулюючого обертання із підстановкою результатів вимірювань від іншого (допоміжного) блоку вимірювачів на час здійснення перевороту.

Враховуючи зазначені вище зауваження, кінцевий варіант алгоритму (рис. 2) 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.

Відповідний дослідний зразок ІВМ (рис. 3, *a*) побудовано на основі кінематичної схеми із двопозиційним поворотним механізмом методом 3D-друку. У якості основного ІВМ обрано модуль *Xsens MTI-1* (рис. 3, *б*). У якості головного обчислювача використовується контролер *Arduino Nano 33 BLE*, що має оснащений *Bluetooth* модулем для забезпечення бездротової передачі даних та модуль *LSM9DS1*, котрий виступає в якості допоміжного ІВМ. Прототип має акумулятор для тривалої роботи в умовах постійного обертання. Частота оновлення даних ІВМ становила 100 Гц.

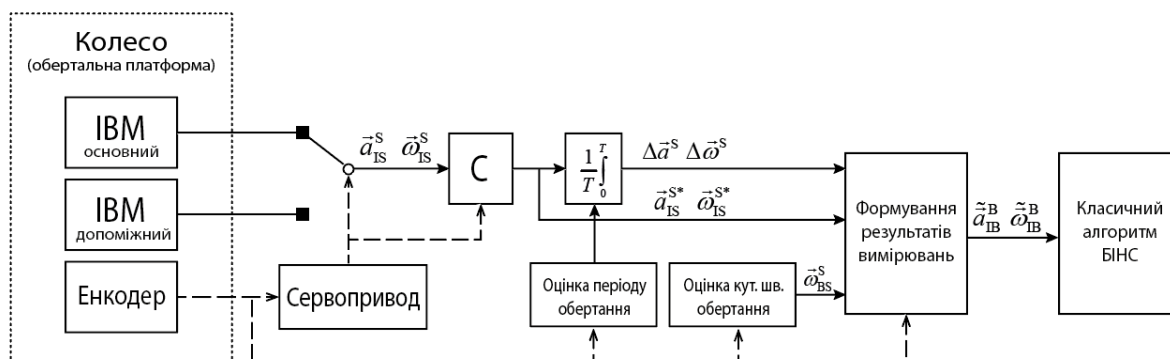
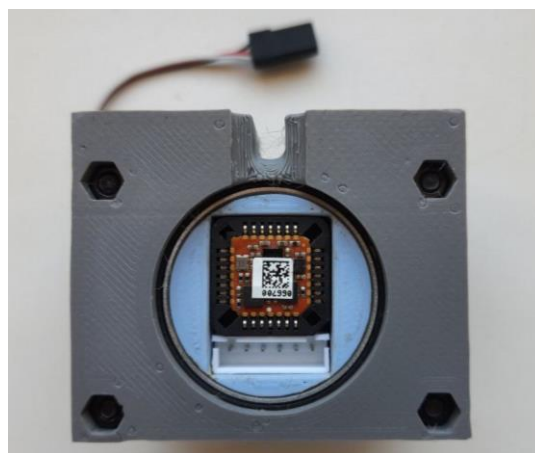


Рис. 2. Блок-схема алгоритму корекції результатів вимірювань ІВМ



a)



б)

Рис. 3. Зовнішній вигляд дослідного зразка ІВМ (*a*) та модуль *Xsens MTI-1* (*б*), встановлений у поворотному механізмі для переорієнтації осей

Експеримент

Статичні випробування модифікованої ІВМ проходили із двома варіантами орієнтації осі модулюючого обертання (горизонтальною та вертикальною). Кількісна оцінка ефективності у даному випадку здійснювалась шляхом обчислення асимптотичних оцінок (1).

У якості модулятора була застосована одновісна обертальна платформа (рис. 4), що забезпечує обертання з частотою в діапазоні від 0,5 – 15 Гц і має у своєму складі оптичний та магнітний енкодери.

Частота обертання ІВМ становила близько 0,5 Гц, тобто номінальне значення кутової швидкості модуляції лежало в межах діапазону вимірювань осьового гіроскопа, що дозволяло оцінити проекцію кутової швидкості на відповідну вісь. Тривалість кожного експерименту становила близько 5 хвилин. Поправка на прискорення вільного падіння виконувалась на основі оцінки, отриманої при початковій виставці ІВМ. Характерні графіки вихідних даних вимірювачів ІВМ наведено на рис. 5 – рис. 6.

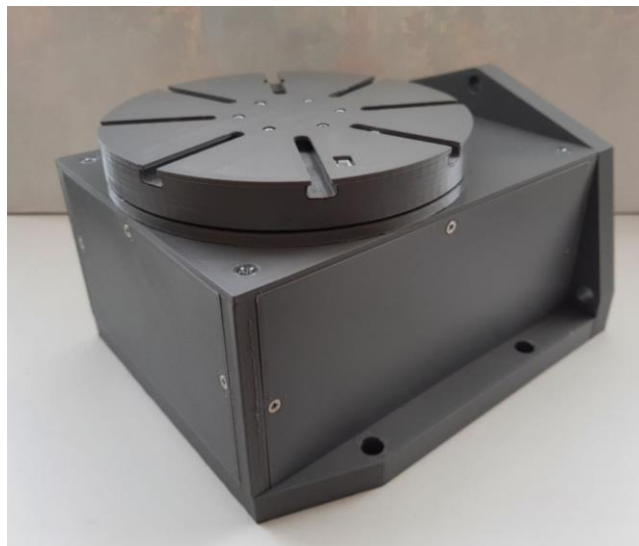


Рис. 4. Одновісна обертальна платформа

Як бачимо із результатів (табл. 3), метод дозволяє зменшити швидкість зростання похибок на порядок, за винятком датчиків, осі яких розташовані вздовж осі модулюючого обертання. У той же час постійне зміщення інерційних датчиків орієнтованих вздовж осі обертання не може бути промодульоване, а похибки позиції та швидкості, викликані такими похибками, поширюються відповідно так само, як і у класичній БІНС. Компенсація модулюючої кутової швидкості вздовж осьового каналу на основі опосередкованих даних на інтервалах проходження контрольних точок загалом показала прийнятну якість.

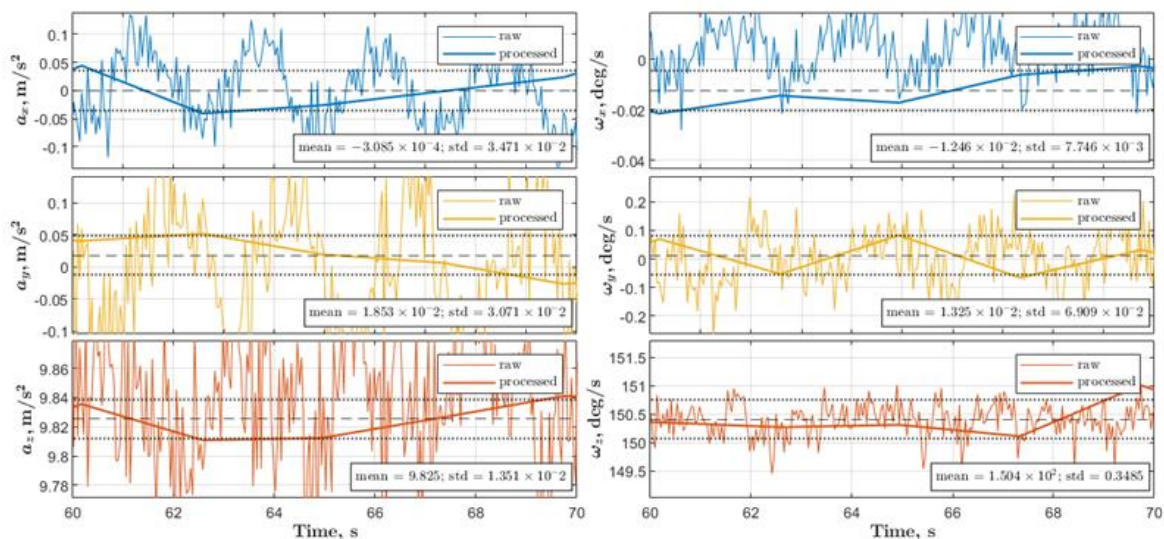


Рис. 5. Графіки типових вихідних даних ІВМ із модулюючим обертанням вздовж вертикальної осі

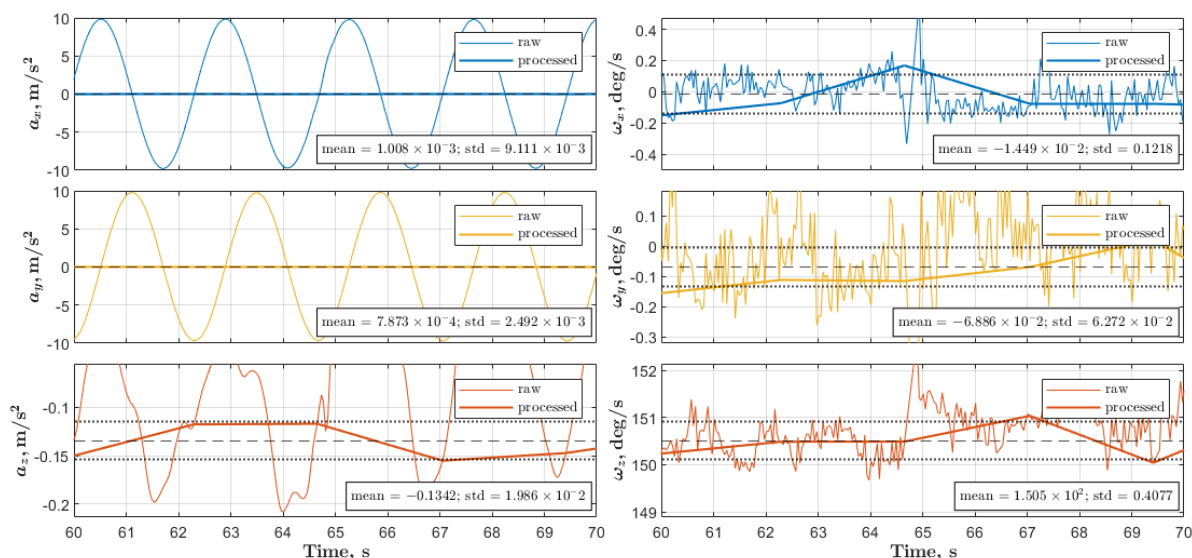


Рис. 6. Графіки типових вихідних даних ІВМ із модулюючим обертанням вздовж вертикальної осі

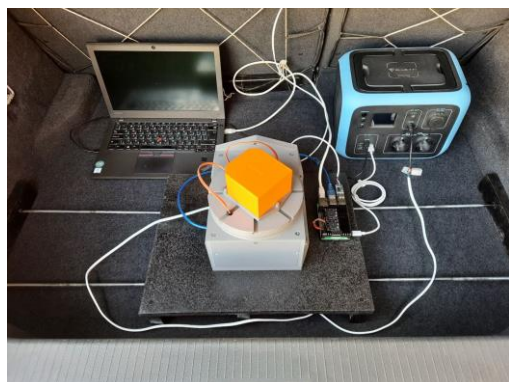
Таблиця 3.

Результати статичних випробувань

	Статичний	Модуляція (вертикальна вісь)	Модуляція (горизонтальна вісь)
$\varepsilon(t = 300 \text{ c}),$	X	16,35	-0,95
[град.]	Y	-53,11	0,9
	Z	5,62	14,07

		Статичний	Модуляція (вертикальна вісь)	Модуляція (горизонтальна вісь)
$\Delta V(t = 300\text{с}),$ [м/с]	X	415,37	-33,66	30,83
	Y	-332,5	15,62	32,96
	Z	137,26	95,76	117,3
$\Delta S(t = 300\text{с}),$ [км/год]	X	41,46	-3,75	3,3
	Y	-33,29	4,2	6,08
	Z	6,67	8,79	23,16

Наступним етапом дослідження ефективності запропонованого методу стала серія натурних випробувань БІНС у складі наземного транспортного засобу. Кількісна оцінка ефективності у даному випадку здійснювалась вже на основі повноцінного вирішення навігаційної задачі в автономному режимі роботи БІНС, що порівнювалась із результатом роботи *GPS*. У якості джерела модулюючого обертання виступали оберտальна платформа (рис. 7) двома варіантами орієнтації осі модулюючого обертання відносно зв'язаної СК (вертикально та вздовж повздовжньої осі), а також праве задне(нерульове) колесо автомобіля (8).



а)



б)

Рис. 7. Натурне випробування із керованим обертанням вздовж вертикальної (а) та горизонтальної (б) осі

Реєстрація даних від вимірювачів їх синхронізація по часу, вирішення навігаційної задачі виконувалось на обчислювальному модулі БІНС, в якості якого виступав одноплатний комп'ютер *Raspberry Pi*. Координати отримувались із допомогою *GPS*-приймача, встановленого на даху автомобіля.

У якості тестового маршруту було обрано відрізок автомобільної дороги помірної кривизни довжиною близько 2 км. Максимальна швидкість руху за маршрутом не перевищувала 50 км/год. За таких умов кутлова швидкість обертання коліс автомобіля гарантовано не перевищувала діапазон вимірювань гіроскопів дослідного зразка ІВМ. Частота обертання поворо-

тною платформи була обрана за тими ж міркуваннями і становила близько 4 Гц.



Рис. 8. Натурне випробування із некерованим обертанням
(на колесі автомобіля)

Варіант модуляції вздовж вертикальної осі загалом характеризувався значною похибкою по курсу, що можна побачити за спотвореними формами розрахункових траєкторій (рис. 9). Пояснюється це недосконалістю компенсації модулюючого обертання з показів вертикального гіроскопа а також неможливістю алгоритмічної корекції показів вертикальних датчиків взагалі.

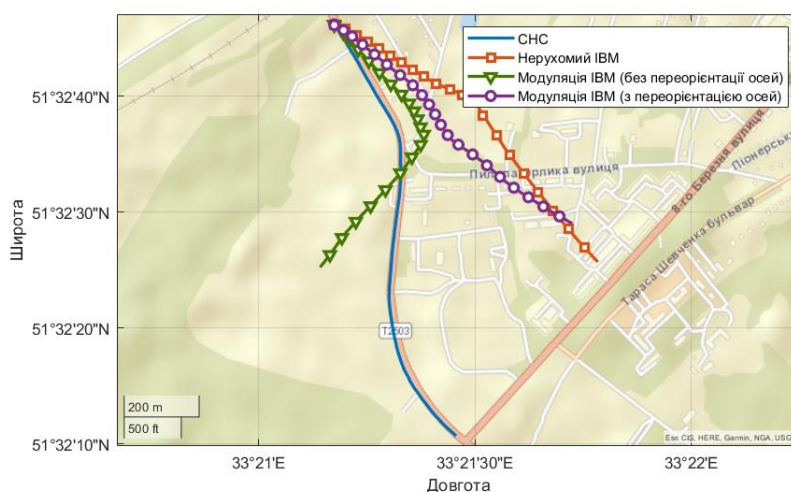


Рис. 9. Результати натурального випробування із керованим обертанням вздовж вертикальної осі зв'язаної СК

Під час модуляції по повздовжньої осі оцінка траєкторії зазнавала менших спотворень (рис. 10), 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.

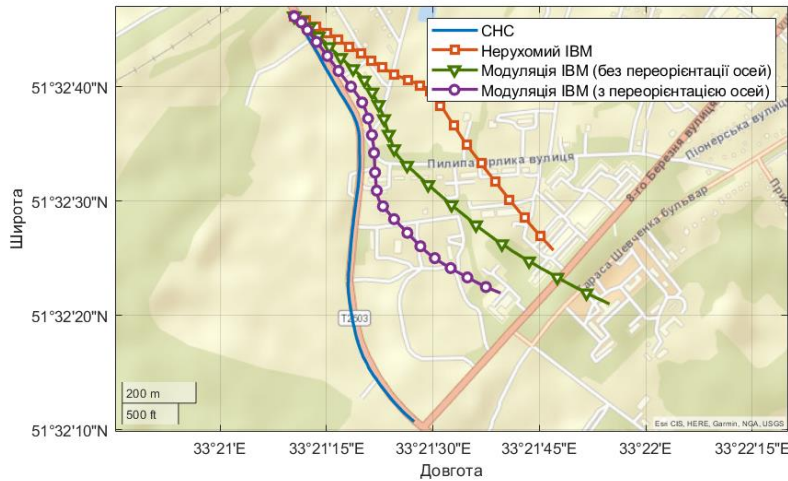


Рис. 20. Результати натурального випробування із керованим обертанням вздовж повздовжньої осі зв'язаної СК

Найбільш близькі до справжньої оцінки траєкторії були отримані у випадку встановлення ІВМ на колесі (рис. 11). Недосконалість компенсації модулюючого обертання за таких умов 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 у довжині траєкторії.

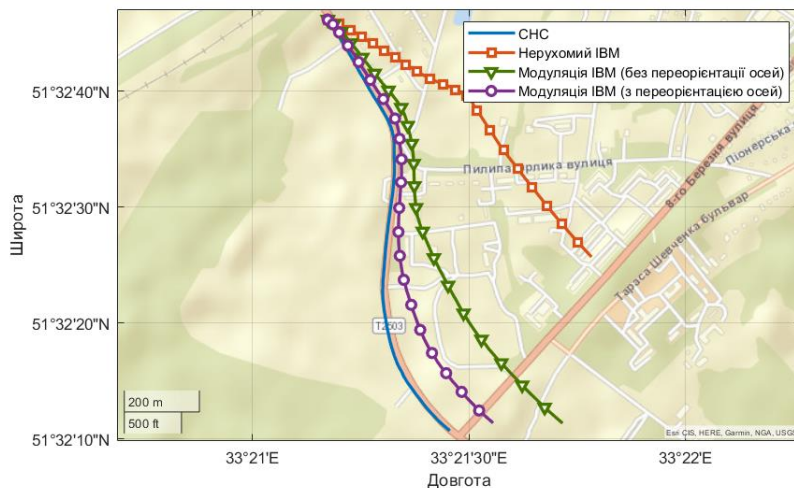


Рис. 31. Результати натурального випробування із некерованим обертанням на колесі автомобіля

Висновки

Аналіз досліджуваного способу модуляції інструментальних похибок ІВМ обертанням підтвердив його здатність усувати квазістатичні похибки інерційних датчиків, що відкриває шлях до значного зменшення похибок БНС та збільшення тривалості її автономної роботи.

Запропоновано реалізацію даного підходу, що не потребує наявності точних поворотного механізму та відліку кута повороту. Її ефективність підтверджено лабораторними дослідженнями та натурними випробуваннями. Встановлення ІВМ 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 ІВМ стає кратною частоті модулюючого обертання. Відповідно, ця частота повинна принаймні вдвічі перевищувати максимальну частоту маневрів тіла, щоб забезпечити їх спостережуваність. Також критичним є питання компенсації кутової швидкості модуляції з показів гіроскопів. Проте, незважаючи на зазначені недоліки, реалізація модуляції ІВМ обертанням має великий потенціал до застосування в наземній навігації.

Список використаної літератури

1. *Savage, P. G.* (1998a) ‘Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 1: Attitude Algorithms’, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 21(1), pp. 19–28.
2. *Savage, P. G.* (1998b) ‘Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 2: Velocity and Position Algorithms’, *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 21, pp. 208–221.
3. *E. S. Geller* (1968) ‘Inertial System Platform Rotation’, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-4(4), pp. 557–568.
4. *Giovanni, C. S. and Levinson, E.* (1981) ‘Performance of a Ring Laser Strapdown Marine Gyrocompass’, *NAVIGATION*, 28(4), pp. 311–341.
5. *Levinson, E. and Majure, R.* (1987) ‘Accuracy Enhancement Techniques Applied to the Marine Ring Laser Inertial Navigator (MARLIN)’, *NAVIGATION*, 34(1), pp. 64–86.
6. *Feng Sun et al.* (2009) ‘Research on the technology of rotational motion for FOG strapdown inertial navigation system’, in *2009 International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 4913–4918.
7. *Sun, W. et al.* (2013) ‘MEMS-based rotary strapdown inertial navigation system’, *Measurement*, 46(8), pp. 2585–2596.
8. *Du, S., Sun, W. and Gao, Y.* (2016) ‘MEMS IMU Error Mitigation Using Rotation Modulation Technique’, *Sensors*, 16(12).
9. *Du, S.* (2017) ‘A micro-electro-mechanical-system-based inertial system with rotating accelerometers and gyroscopes for land vehicle navigation’, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13.
10. *Collin, J.* (2014) ‘MEMS IMU Carouseling for Ground Vehicles’, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64.