

Навігація та геоінформаційні системи

УДК: 629.5-052.001.5; 004.896; 681.518.3

doi: 10.26906/SUNZ.2026.3.005

С. О. Бойчун, С. М. Левицький

Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна

АВТОНОМНА ПАСИВНА НАВІГАЦІЯ БЕЗПІЛОТНОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ЗА ВТРАТИ СУПУТНИКОВОГО СИГНАЛУ: ПОРІВНЯННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ГІРОСКОПІВ

Анотація. Актуальність. Безпілотний наземний транспортний засіб (далі – наземний робот) за втрати глобальної навігаційної супутникової системи (Global Navigation Satellite System, GNSS) потребує автономного визначення курсу та сприйняття перешкод. **Предмет дослідження:** навігація наземного робота за поєднання колісної одометрії, мікроелектромеханічного гіроскопа (МЕМС-гіроскоп), волоконно-оптичного гіроскопа (ВОГ), камери, пасивних маркерів і далекоміра. **Мета дослідження:** кількісно оцінити точність базового ВОГ та порівняти пасивні й гібридні конфігурації за різної видимості. **Завдання дослідження.** Реалізувати параметричну модель ВОГ; відокремити її від зорового каналу; перевірити статичні, рухомі й нові перешкоди; сформувати відтворювану матрицю запусків. **Методи.** Виконано 1440 проходжень полігона у 48 конфігураціях і 180 додаткових 300-секундних випробувань курсу. Базовий ВОГ задано стабільністю зміщення $1^\circ/\text{год}$, випадковим блуканням кута $0,04^\circ/\sqrt{\text{год}}$ і похибкою масштабного коефіцієнта $250 \cdot 10^{-6}$. **Результати.** ВОГ забезпечив середню середньоквадратичну похибку курсу $0,0568^\circ$ і кінцеву похибку $0,0995^\circ$ проти $9,8981^\circ$ та $17,1355^\circ$ для МЕМС-сценарію. За ясної видимості волоконно-оптична конфігурація з маркерами досягла цілі у 46,7% запусків, із них 23,3% – без зіткнень; з далекоміром отримано 76,7 та 40,0% відповідно. **Висновки.** ВОГ є найточнішим пасивним засобом курсової орієнтації у випробуваній моделі й не залежить від видимості. Проте блокування камери позбавляє систему сприйняття перешкод, тому практична архітектура має поєднувати ВОГ із зоровими засобами за сприятливих умов та з окремим резервом сприйняття за туману, снігу або диму.

Ключові слова: безпілотний наземний транспортний засіб; пасивна навігація; волоконно-оптичний гіроскоп; МЕМС-гіроскоп; супутникова навігація; оптичні маркери; злиття вимірювань; далекомір; відтворюване моделювання.

1. Вступ

1.1 Актуальність тематики

Навігаційна стійкість наземного робота визначається не лише точністю координат, а й здатністю безпечно продовжити рух після втрати зовнішнього абсолютного орієнтира. У міській забудові, приміщеннях, під навісами та за навислих або природних завад супутникова навігація може стати недоступною. Тоді одометрія та інерціальні вимірювання підтримують безперервність, але їх похибки накопичуються; стохастичні складові гіроскопа доцільно характеризувати дисперсією Аллана [1]. ВОГ вимірює кутову швидкість за ефектом Саньяка і не потребує видимості зовнішньої сцени. Його слід відрізнити від зорової одометрії, яка оцінює рух за послідовністю кадрів. Зорово-інерціальні системи та штучні оптичні орієнтири корисні для корекції положення [2, 3], але дощ, туман, сніг і дим погіршують саме зовнішній зоровий канал [4, 5]. Практична архітектура повинна окремо контролювати точність орієнтації та доступність сприйняття перешкод.

1.2 Аналіз літератури і постановка проблеми

Сучасні дослідження навігації за відсутності GNSS групують доступні підходи у відносно інерціально-одометричне оцінювання, зорову та зорово-інерціальну локалізацію, LiDAR-інерціальну

одометрію, прив'язку до карт і мультимодальне злиття [6]. Для наземних роботів вибір методу визначається не лише середньою точністю, а й стійкістю до слабкої текстури, змін освітлення, динамічної рослинності та інших ознак неструктурованого середовища [7].

Зорово-інерціальні системи VINS-Mono та ORB-SLAM3 показують можливість обмежувати дрейф за рахунок камери та інерціального модуля, але залежать від калібрування, якості ознак і доступності зображення [8, 9]. Набір EuRoC демонструє значення синхронізованих сенсорів і незалежної еталонної траєкторії для перевірки таких систем [3]. Порівняння LIO-, VIO- та резервованих IMU-конфігурацій підтверджує, що зовнішні геометричні оновлення можуть істотно стримувати накопичення інерціальної похибки під час тривалого блокування GNSS, однак їх результат залежить від властивостей сцени та якості калібрування [10].

Для наземних транспортних засобів сучасні адаптивні моделі низьковартісних IMU використовують обмеження руху, псевдовимірювання та оцінювання шуму, щоб продовжити автономну ділянку маршруту [11, 12]. Волоконно-оптичні гіроскопи формують інший клас рішення: вони забезпечують пасивне вимірювання кутової швидкості за ефектом Саньяка й не потребують зовнішньої сцени. Експериментальні роботи 2025 року підтверджують навігаційний клас інтерферометричних ВОГ та прогрес їх термічної

стабільності [13], а огляд 2026 року систематизує архітектури, джерела похибок і застосування ВОГ у сучасних інерціальних системах [14]. Інтеграція оптичного передавача і приймача на кремнієвій фотонній платформі додатково показує напрям мініатюризації навігаційних ВОГ [15].

У відібраному корпусі праць точність курсового інерціального каналу, доступність зовнішнього сприйняття та безпечне завершення маршруту переважно оцінюються окремо. Це залишає відкритим питання, як точний пасивний ВОГ впливає на результат наземного робота, коли камера деградує, а планувальник отримує лише фактично доступні сліди перешкод. Тому в цій роботі ВОГ відокремлено від зорового каналу, а модифікований планувальник за принципом VFH використовує тільки локальні спостереження, а не істинний список об'єктів [16].

1.3 Мета і завдання дослідження

Мета роботи – кількісно оцінити точність ВОГ та порівняти автономні конфігурації наземного робота за повної втрати супутникової навігації, різної видимості й різної якості програмного злиття.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- реалізувати взаємозамінні модулі оцінювача стану та локального планувальника;
- порівняти одометрію, МЕМС-гіроскоп, ВОГ та їх злиття з пасивними маркерними корекціями;
- відокремити похибки ВОГ від деградації камери за ясної, обмеженої та заблокованої видимості;
- оцінити реакцію на статичні, рухомі та нові перешкоди з далекоміром і без нього;
- зберегти первинні журнали, сесії, цифровий відбиток моделі й перевірити детерміноване відтворення.

2. Матеріали і методи дослідження

2.1 Архітектура симулятора

Розроблено двовимірний (2D) браузерний симулятор без зовнішніх програмних залежностей. Істинний стан містить положення $\mathbf{p} = [x, y]^T$, курс ψ і швидкість v . Оцінювач стану отримує одометрію та вибрані спостереження; планувальник – оцінений стан і локальні сліди перешкод. Такий інтерфейс дає змогу замінити оцінювач або планувальник без зміни моделі світу та журналювання.

2.2 Моделі сенсорів і корекції

Дискретний прогноз положення задається як

$$\hat{\mathbf{p}}_{k+1} = \hat{\mathbf{p}}_k + \hat{v}_k [\cos \hat{\psi}_k, \sin \hat{\psi}_k]^T \Delta t + \boldsymbol{\varepsilon}_p.$$

МЕМС-модель містить масштабну похибку, повільне зміщення та шумові складові. Їх значення є сценарними й не подаються як калібрування конкретного виробу [1]. Для ВОГ кутовий приріст:

$$\Delta \hat{\psi} = \Delta \psi (1 + k_s) + b \Delta t / 3600 + N \sqrt{\Delta t / 3600} \xi,$$

де k_s – масштабна похибка, b – зміщення у градусах за годину, N – коефіцієнт випадкового блукання кута, ξ – детерміновано відтворювана нормальна випадкова величина.

Схема обміну даними між середовищем, каналами спостереження, оцінювачем, планувальником і моделлю руху (архітектура навігації наземного робота) наведена на рис. 1.



Рис. 1. Обмін даними між середовищем, каналами спостереження, оцінювачем, планувальником і моделлю руху

За основу взято цифрову версію ВОГ класу EMCORE EG-120 при 25 °C [17]. Термін «частин на мільйон» (parts per million, ppm) у технічному описі переведено в безрозмірну величину.

Досліджені конфігурації навігаційних засобів наведені у табл. 1, а параметри базового волоконно-оптичного гіроскопа – у табл. 2.

Таблиця 1 – Досліджені конфігурації навігаційних засобів

Конфігурація	Орієнтація	Корекція або сприйняття
Одометрична	колісна одометрія	немає
МЕМС	МЕМС + одометрія	немає
Волоконно-оптична	ВОГ + одометрія	5 пасивних маркерів
Злита	МЕМС + ВОГ + одометрія	5 пасивних маркерів
Злита з далекоміром	як у злитій	маркери + далекомір 1 Гц

Технічний опис указує смугу цифрового ВОГ 250 Гц, тоді як модель використовує 20 Гц через крок інтегрування. Передбачається початкове нульове калібрування; температурний дрейф, вібраційна чутливість, похибка встановлення та час прогріву не моделюються. Отже, параметри відтворюють

сприятливий базовий режим, а не повний температурний паспорт виробу.

Таблиця 2 – Параметри базового волоконно-оптичного гіроскопа

Параметр	Значення	Одиниця	Використання в моделі
Стабільність зміщення	1	°/год	нормальна стала похибка запуску
Випадкове блукання кута	0,04	°/√год	білий шум приросту
Масштабна похибка	$250 \cdot 10^{-6}$	безрозмірна	похибка кутowego приросту
Частота моделі	20	Гц	крок 0,05 с

Видимий маркер у полі зору створює корекцію

$$x_c = x_p + K[z - h(x_p)],$$

де x_c – скоригований стан, x_p – прогноз стану, а K – коефіцієнт корекції, заданий профілем програмного забезпечення. Маркерна корекція впливає на курс і положення, але не змінює фізичні параметри ВОГ.

2.3 Видимість та якість програмного забезпечення

За ясної видимості камера має дальність 28 м і поле зору 70°. Обмежена видимість моделює дощ або легкий туман: дальність камери зменшено до 62%, імовірність виявлення маркера – до 0,72, а шум спостереження збільшено. Повне блокування моделює густий туман, сніг або дим: камера і маркери вимкнені, а далекомір має меншу дальність і надійність [4, 5]. ВОГ і МЕМС-гіроскоп у всіх трьох профілях залишаються доступними.

Профілі програмного забезпечення названо базовим, типовим і стійким до похибок. Останній відповідає англійському поняттю robust software. У роботі не використовується калька «робастний»: українське формулювання означає здатність алгоритму зберігати прийнятну роботу за шуму, пропусків і хибних спостережень. Профілі одночасно змінюють пам'ять сліду, силу корекції, відбраковування вимірювань і вагу ВОГ у злитті, але не є оцінкою конкретного комерційного виробу.

2.4 Локальне уникнення і нові перешкоди

На кожному кроці сліди перетворюються на полярну гістограму $H(\theta)$. Позначивши похибки відносно цільового та попереднього курсів як e_g і e_s , серед вільних секторів обирається

$$\theta_{opt} = \operatorname{argmin}_{\theta} [w_1|e_g| + w_2|e_s| + w_3H(\theta)].$$

Критерій підтримує рух до цілі, обмежує різкі зміни керування й відхиляє напрями з великою густиною перешкод [16]. Якщо далекомір тривалий час підтверджує фронтальне блокування, контролер виконує відступ і повторний вибір сектора.

Сценарій містить чотири статичні та дві рухомі перешкоди. Ще дві рухомі перешкоди з'являються на 9-й та 25-й секундах. Реєструються перше зорове або далекомірне виявлення та затримка після появи.

2.5 План експерименту і показники

Полігон становив 100×100 м, швидкість – 8 км/год, крок – 0,05 с, граничний час – 300 с. Основна матриця охопила 5 наборів $\times$ 3 профілі видимості $\times$ 3 профілі ПЗ = 45 конфігурацій із втратою супутникової навігації. Додано три контрольні конфігурації з доступною супутниковою навігацією. Кожну конфігурацію виконано на 30 однакових сесіях, усього 1 440 запусків. Окремий стенд курсу містив 180 запусків: МЕМС, ВОГ і їх злиття, по 30 зерен за ясного та блокованого зорового каналу. Протягом 300 с кут швидкість дорівнювала $\omega(t) = 1,5 + 6\sin(2\pi t/35)$ °/с; супутникові й маркерні корекції були вимкнені. Основні показники: досягнення цілі; безпечне досягнення без зіткнень; середньоквадратична похибка (СКП) положення і курсу; мінімальна відстань до перешкоди; час і довжина шляху; затримка виявлення. Для часток обчислено 95% інтервали Вілсона [18].

3. Результати

3.1 Точність волоконно-оптичного гіроскопа

На 300-секундному стенді ВОГ мав середню СКП курсу $0,0568 \pm 0,0349^\circ$ і кінцеву похибку $0,0995 \pm 0,0624^\circ$ (рис. 2). Для МЕМС-сценарію відповідні значення становили $9,8981 \pm 5,7123^\circ$ і $17,1355 \pm 9,8844^\circ$. Отже, середня СКП ВОГ була приблизно у 174 рази меншою. Злиття з фіксованою вагою дало $0,5869 \pm 0,3766^\circ$, тобто поступилося окремому ВОГ через домішування МЕМС-похибки.

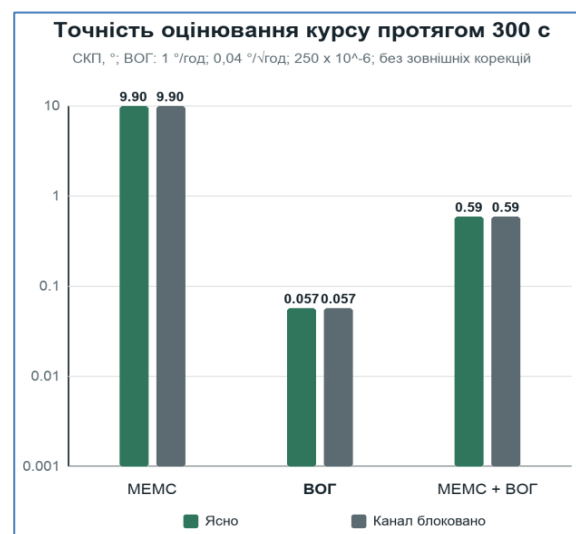


Рис. 2. Середня СКП курсу без зовнішніх корекцій; логарифмічна шкала

Результати ВОГ за ясної та заблокованої видимості збіглися для кожної сесії. Це контрольна ознака правильної моделі: погода впливає на зовнішній зоровий канал, але не на інерціальне вимірювання ВОГ. Водночас така точність не враховує температурний дрейф і похибку встановлення.

3.2 Порівняння на полігоні (рис. 3, табл. 3)

За ясної видимості та стійкого до похибок ПЗ одометрія досягла цілі в 1 із 30 запусків: 3,3% (95% інтервал 0,6–16,7%), МЕМС – у 23,3% (7/30).

Волоконно-оптична конфігурація дала 46,7% (14/30; 95% інтервал 30,2–63,9%) досягнень і 23,3% (7/30) безпечних досягнень; злиття - 43,3% (13/30) і 23,3% (7/30). СКП положення становила 4,02 і 4,13 м відповідно проти 23,44 м для одометрії.

Додавання далекоміра підвищило досягнення до 76,7% (23/30; 95% інтервал 59,1–88,2%), а безпечне досягнення – до 40,0% (12/30). За обмеженої видимості злиття дало 36,7% досягнень і 16,7% безпечних досягнень, а варіант із далекоміром - 56,7% та 30,0%. Прибуття до цілі не можна використовувати як єдиний показник безпеки.

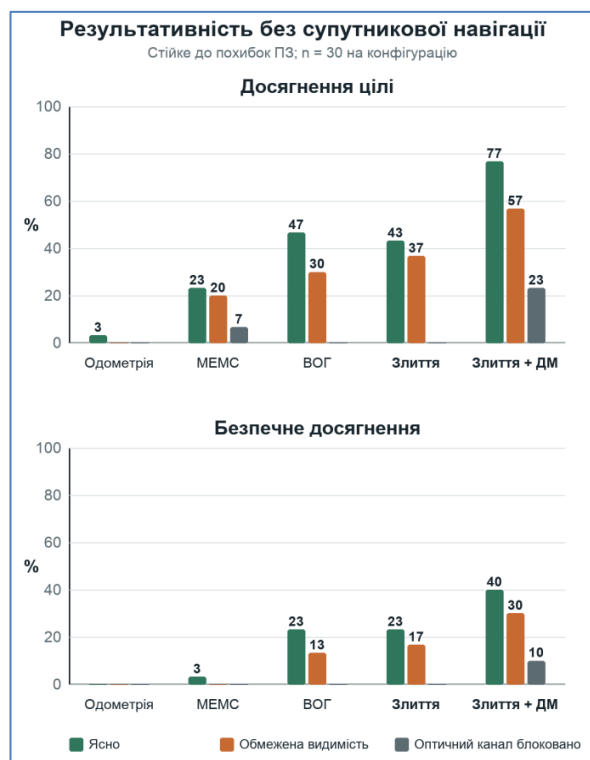


Рис. 3. Досягнення цілі та безпечне досягнення за стійкого до похибок ПЗ; ДМ - далекомір

Таблиця 3 – Злиття та варіант із далекоміром за стійкого до похибок ПЗ

Видимість	Злиття: ціль / безпечно; СКП	З далекоміром: ціль / безпечно; СКП
Ясна	43,3 / 23,3%; 4,13 м	76,7 / 40,0%; 3,12 м
Обмежена	36,7 / 16,7%; 4,37 м	56,7 / 30,0%; 3,76 м
Блокована	0 / 0%; 5,11 м	23,3 / 10,0%; 4,34 м

3.3 Видимість і якість програмного забезпечення (рис. 4)

За блокованої видимості окремий ВОГ зберіг СКП курсу 0,1046° у полігонному сценарії, але не досяг цілі в жодному запуску. Причина полягає не у втраті курсу, а у відсутності зорових слідів перешкод і маркерних корекцій положення. Далекомір підвищив досягнення до 23,3%, а безпечне - до 10,0%.

За ясної видимості стійке до похибок ПЗ підвищило пасивне злиття від 20,0% до 43,3% досягнень, а безпечний результат із далекоміром - від 3,3% до 40,0%. Водночас за блокованої видимості

типовий профіль поступився базовому за окремими показниками. Це наслідок взаємодії пам'яті слідів, корекцій і траєкторії; назви профілів не слід трактувати як ранжування готових програмних продуктів.

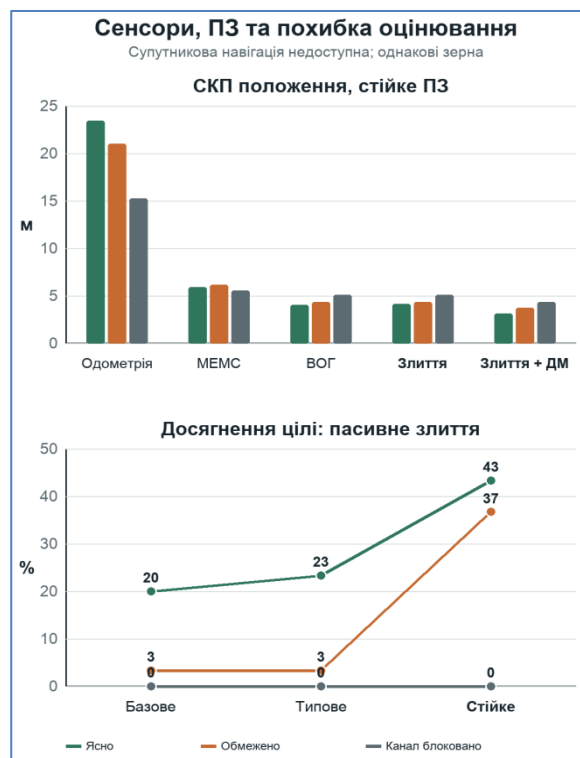


Рис. 4. СКП положення та досягнення цілі залежно від конфігурації й профілю ПЗ

3.4 Виявлення нових перешкод

Стійке пасивне злиття виявляло обидві нові перешкоди у всіх запусках за ясної та обмеженої видимості із середньою затримкою 2,02 і 2,18 с. Далекомір зменшив її до 1,61 і 1,93 с. За заблокованої камери лише далекомір зберіг канал виявлення: у середньому 1,67 із двох об'єктів із затримкою 12,75 с. Вузький промінь 1 Гц не забезпечує суцільного огляду.

4. Обговорення результатів

4.1 Переваги й обмеження засобів

Одометрія проста й безперервна, але її позиційний і курсовий дрейф обмежує самостійне використання. MEMS-гіроскоп компактний і не залежить від видимості, однак зміщення накопичується [1, 19]. ВОГ забезпечує значно точніший курс; для класу використаного технічного опису вказано масу до 0,08 кг і типову потужність 1,8 Вт за кімнатної температури [17]. У моделі енергоспоживання та маса не враховувалися.

ВОГ є пасивним щодо зовнішнього середовища: світло циркулює всередині приладу, але навігаційний сигнал назовні не випромінюється. Водночас він не визначає абсолютне положення і не бачить перешкод. Камера та маркери надають ці обмеження без активного опромінення сцени, але залежать від погоди, освітлення й перекриття [2–5].

Далекомір є керованим активним резервом. Він підвищує частоту досягнення, але вузький промінь,

частота 1 Гц і помилки планувальника залишають зіткнення. Тому безпечність залежить від оглядовості, прогнозування рухомих об'єктів, кінематики та правила безпечної зупинки.

4.2 Найкращий сценарій і практична архітектура

Для суворо пасивної роботи за ясної або обмеженої видимості доцільним ядром є ВОГ, одометрія, камери та пасивні маркери зі стійким до похибок оцінюванням. MEMC слід залишити незалежним резервом і використовувати адаптивну, а не сталу вагу: точніший ВОГ у стенді погіршувався після домішування MEMC-вимірювання. За густого туману, снігу або диму ВОГ зберігає курс, але потрібен окремий засіб сприйняття: пасивний тепловізійний канал, якщо це допускають умови, або активний радар чи далекомір. Якщо достовірного сліду перешкоди немає, безпечна зупинка має вважатися штатним результатом, а не невдачею планувальника.

4.3 Достовірність і загрози валідності

Інтерактивний і пакетний режими використовують той самий код. Матриця задана до агрегації, невдалі запуски не вилучено, зерна спільні, первинні журнали збережено, а 11 672 незалежні автоматизовані перевірки не виявили порушень. Така процедура забезпечує внутрішню відтворюваність порівнянь. Зовнішня достовірність обмежена. Модель двовимірна й кінематична; вона не враховує рельєф, ковзання, вібрацію, температурний цикл ВОГ, затримки, електромагнітні завади та енергоспоживання. Параметри ВОГ узяті з технічного опису, але не перевірено на придбаному зразку. Тому робота підтримує вибір архітектури, але не підтверджує готовність до експлуатації.

5. Висновки

1. Параметрична модель базового ВОГ із 1 °/год, 0,04 °/год і масштабною похибкою $250 \cdot 10^{-6}$ дала середню СКП курсу 0,0568° за 300 с, приблизно у 174 рази меншу за MEMC-сценарій.

2. ВОГ не залежав від ясності зовнішньої сцени, однак блокування камери різко знижувало безпечність через втрату сприйняття перешкод і маркерних корекцій положення.

3. За ясної видимості волоконно-оптична конфігурація з маркерами досягла 46,7% цілей і 23,3% безпечних досягнень; злиття дало 43,3% і

23,3%, а далекомір підвищив ці значення до 76,7% і 40,0%. За обмеженої видимості для злиття та далекоміра отримано 36,7%/16,7% і 56,7%/30,0% відповідно.

4. Рекомендоване пасивне ядро складається з ВОГ, одометрії, камери й маркерів, а MEMC використовується як незалежний резерв. За блокованої видимості потрібен додатковий канал сприйняття та правило безпечної зупинки.

5. Наступний етап має включати апаратно-програмне моделювання із залученням реального обладнання (hardware-in-the-loop, HIL), температурні випробування ВОГ, калібрування MEMC дисперсією Аллана та польову перевірку з незалежною еталонною траєкторією.

Конфлікт інтересів

Автори декларують відсутність конфлікту інтересів фінансового, особистого, авторського або іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження та його результати.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Пов'язані дані надано у відтворюваному пакеті: первинні результати CSV/JSON, агрегати, фіксовані зерна, параметри ВОГ, код пакетного запуску, код рисунків і цифровий відбиток моделі. Перед публікацією автори мають розмістити пакет у репозитарії та додати постійне посилання або цифровий ідентифікатор об'єкта (DOI).

Використання засобів штучного інтелекту

Автори повідомляють про використання системи штучного інтелекту (ШІ) OpenAI Codex для допомоги у програмуванні симулятора, підготовці відтворюваного пакетного експерименту, агрегації результатів, побудові рисунків, мовному редагуванні та форматуванні рукопису. Усі числові дані отримано виконанням локального детермінованого коду, перевірено авторами й надано разом із первинними журналами та параметрами. Засіб ШІ не створював фізичних вимірювань і не використовувався як джерело наукових фактів. Автори відповідають за постановку дослідження, перевірку результатів, посилання та висновки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. El-Sheimy, N., Hou, H., and Niu, X. (2008), "Analysis and Modeling of Inertial Sensors Using Allan Variance", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 1, pp. 140–149, doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.908635>
2. Olson, E. (2011), "AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3400–3407, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979561>
3. Burri, M., Nikolic, J., Gohl, P., Schneider, T., Rehder, J., Omari, S., Achtelik, M. W., and Siegwart, R. (2016), "The EuRoC micro aerial vehicle datasets", *IJRR*, vol. 35, no. 10, pp. 1157–1163, doi: <https://doi.org/10.1177/0278364915620033>
4. Bijelic, M., Gruber, T., Mannan, F., Kraus, F., Ritter, W., Dietmayer, K., and Heide, F. (2020), "Seeing Through Fog Without Seeing Fog: Deep Multimodal Sensor Fusion in Unseen Adverse Weather", *Proceedings of CVPR*, pp. 11682–11692, URL: <https://www.cs.princeton.edu/~fheide/AdverseWeatherFusion/figures/AdverseWeatherFusion.pdf>
5. Hahner, M., Sakaridis, C., Dai, D., and Van Gool, L. (2021), "Fog Simulation on Real LiDAR Point Clouds for 3D Object Detection in Adverse Weather", *Proceedings of ICCV*, pp. 15283–15292, URL: <https://arxiv.org/pdf/2108.05249>
6. Jarraya, I., Al-Batati, A., Kadri, M. B., Abdelkader, M., Ammar, A., Boulila, W., and Koubaa, A. (2025), "Gnss-denied unmanned aerial vehicle navigation: analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies", *Satellite Navigation*, vol. 6, article 9, doi: <https://doi.org/10.1186/s43020-025-00162-z>

7. Pereira, T., Viegas, C., Soares, S., and Ferreira, N. (2026), “Visual and Visual-Inertial SLAM for UGV Navigation in Unstructured Natural Environments: A Survey of Challenges and Deep Learning Advances”, *Robotics*, vol. 15, no. 2, article 35, doi: <https://doi.org/10.3390/robotics15020035>
8. Qin, T., Li, P., and Shen, S. (2018), “VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 1004–1020, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2018.2853729>
9. Campos, C., Elvira, R., Rodriguez, J. J. G., Montiel, J. M. M., and Tardós, J. D. (2021), “ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial, and Multimap SLAM”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 37, no. 6, pp. 1874–1890, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2021.3075644>
10. Chiang, K.-W., Tsai, S., Huang, C.-H., Lu, Y.-E., Srinara, S., Tsai, M.-L., El-Sheimy, N., and Ai, M. (2026), “Navigation Error Characteristics of LIO-, VIO-, and RIMU-Assisted INS/GNSS Multi-Sensor Fusion Schemes in a GNSS-Denied Environment”, *Sensors*, vol. 26, no. 7, article 2068, doi: <https://doi.org/10.3390/s26072068>
11. Tong, B., Chen, W., and Du, L. (2025), “Adaptive Navigation Strategy for Low-Cost IMU-Assisted Vehicles in GNSS-Denied Traffic Environment”, *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2025, doi: <https://doi.org/10.1155/atr/2762711>
12. Huang, G., Liu, J., Zhao, Y., Gong, X., Hyyppä, J., and Zhang, W. (2025), “Vehicle Inertial Localization With Adaptive Noise Estimation and Pseudo-Measurement Constraints in GNSS Denied Environment”, *IEEE Internet of Things Journal*, early access, doi: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3593605>
13. Li, M., Sun, Y., Gao, S., Zhao, X., Hui, F., Luo, W., Hu, Q., Chen, H., Wu, H., Wang, Y., Yan, M., and Ding, W. (2025), “Navigation-grade interferometric air-core antiresonant fibre optic gyroscope with enhanced thermal stability”, *Nature Communications*, vol. 16, article 3449, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58381-6>
14. Smailov, N., Tashtay, Y., Komada, P., Nussupov, Y., Zhunussov, K., Batyrgaliyev, A., Naubetov, D., Amir, A., Sekenov, B., and Yerezhep, D. (2026), “Fiber-Optic Gyroscopes in Modern Navigation Systems: A Comprehensive Review”, *Network*, vol. 6, no. 2, article 28, doi: <https://doi.org/10.3390/network6020028>
15. Li, T., Chen, H., Fu, H., Zhou, F., Gao, S., Fan, S., Wang, C., Wu, Y., Liu, H., Zhao, H., Song, J., Jin, L., Cui, N., Feng, J., and Lu, Z. (2025), “Integrated optoelectronic transceiver toward navigation grade fiber optic gyroscope using silicon photonics”, *Optics Letters*, vol. 50, no. 22, pp. 7139–7142, doi: <https://doi.org/10.1364/OL.576264>
16. Borenstein, J., and Koren, Y. (1991), “The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278–288, doi: <https://doi.org/10.1109/70.88137>
17. EMCORE Corporation (2023), “EG-120 Lithium-Niobate Fiber Optic Gyroscope (FOG)”, datasheet, revision 12.12.2023, URL: https://www.emcore.com/wp-content/uploads/966798_A1_EG-120-FOG.pdf
18. Wilson, E. B. (1927), “Probable Inference, the Law of Succession, and Statistical Inference”, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 22, no. 158, pp. 209–212, doi: <https://doi.org/10.1080/01621459.1927.10502953>
19. Moore, T., and Stouch, D. (2016), “A Generalized Extended Kalman Filter Implementation for the Robot Operating System”, *Intelligent Autonomous Systems 13*, pp. 335–348, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-08338-4_25

Received (Надійшла) 29.06.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.09.2026

Publication date (Дата публікації) 25.09.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Бойчун Сергій Олегович – кандидат політичних наук, молодший науковий співробітник відділу оптоелектроніки, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна;

Boychun Serhii – Candidate of Political Sciences, Junior Researcher, Optoelectronics Department, V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

e-mail: s@lambit.tech; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0009-7099-1990>.

Левицький Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу оптоелектроніки, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна;

Levytskyi Serhii – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Scientist, Optoelectronics Department, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

e-mail: levytskyism@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-3909-0993>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=25923472700>.

**Autonomous passive navigation of an unmanned ground vehicle during GNSS loss:
MEMS and fiber-optic gyroscope comparison**

Serhii Boychun, Serhii Levytskyi

Abstract. Background. GNSS loss requires an unmanned ground vehicle to maintain orientation and obstacle awareness from onboard sensing. A fiber-optic gyroscope must be distinguished from camera-based visual odometry. **Subject of the study:** navigation using wheel odometry, a MEMS gyroscope, a parameterized fiber-optic gyroscope, passive optical markers, and an optional rangefinder. **Objective:** to quantify baseline fiber-optic gyro precision and compare passive and hybrid configurations under degraded visibility. **Methods.** The study comprised 1,440 obstacle-course runs and 180 separate 300-second heading tests. The baseline fiber-optic gyro used 1 deg/h bias stability, 0.04 deg/sqrt(h) angle random walk, and 250 ppm scale-factor error. **Results.** The fiber-optic gyro achieved 0.0568 deg mean heading RMSE and 0.0995 deg final heading error, versus 9.8981 deg and 17.1355 deg for the MEMS scenario. With clear visibility, the fiber-optic gyro plus markers reached the target in 46.7% of runs with 23.3% safe arrival; adding the rangefinder to the fused stack increased these values to 76.7% and 40.0%. **Conclusions.** The fiber-optic gyro is the most accurate passive heading source in the model and remains available when camera visibility is blocked. However, safe navigation still requires obstacle perception and position correction; blocked visibility therefore needs a separate sensing fallback or a safe-stop policy.

Keywords: unmanned ground vehicle; GNSS-denied navigation; fiber-optic gyroscope; MEMS gyroscope; passive navigation; optical markers; sensor fusion; rangefinder; reproducible simulation.