

УДК 621.38

ГУЛА В. С., ГРИГА В. М.

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
Івано-Франківськ, Україна

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СЕНСОРІВ ДЛЯ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Мета. Дослідити сучасний стан інерціальних сенсорів для навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА), проаналізувати їхні переваги, недоліки, методи корекції похибок та інтеграції з іншими навігаційними системами, а також визначити перспективи розвитку та сучасні тенденції в цій галузі.

Методика. Проведено систематичний огляд наукової літератури, технічних документів та досліджень, що стосуються різних типів інерціальних сенсорів, їхнього застосування в навігації БПЛА, та методів злиття даних. Використано порівняльний аналіз сучасних технологій та методів до інтеграції сенсорів.

Результати. Систематизовано основні види інерціальних сенсорів, їхні переваги та недоліки, а також виявлено найбільш ефективні методи корекції похибок та інтеграції з іншими системами. Досліджено сучасні тенденції, такі як використання штучного інтелекту, розвиток мікроелектромеханічних систем та появу нових типів сенсорів, що сприяють підвищенню точності і надійності навігації БПЛА. Особливу увагу приділено інтеграції інерціальних вимірювальних блоків з іншими навігаційними сенсорами, такими як глобальна навігаційна супутникова система та візуальні сенсори, для забезпечення більш надійної та точної навігації. Систематизовано методи корекції похибок, такі як фільтр Калмана та адаптивні фільтри, які використовуються для підвищення точності навігаційних систем.

Наукова новизна. Вперше систематизовано та проаналізовано типи інерціальних сенсорів та визначено дані щодо їх переваг та недоліків у контексті вимог до навігації в сучасних навігаційних системах БПЛА.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для удосконалення навігаційних систем БПЛА, підвищення їхньої надійності та точності. Рекомендації щодо вибору та інтеграції сенсорів сприятимуть розвитку нових технологій у сфері безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: БПЛА; навігація; сенсор; гіроскоп; акселерометр; інерціальний вимірювальний блок; глобальна навігаційна супутникова система; сенсорне злиття.

Вступ. Безпілотні літальні апарати набувають дедалі більшої популярності в різних галузях, включаючи сільське господарство, логістику, оборону і наукові дослідження. Однією з ключових вимог для ефективної роботи БПЛА є точна і надійна навігація. Сучасні сенсори для навігації забезпечують можливість визначення місцезнаходження, уникнення перешкод та виконання складних маневрів у реальному часі [1–6].

Інерціальні вимірювальні блоки (IMU), що складаються з акселерометрів і гіроскопів, є основними компонентами навігаційних систем. Однак ці сенсори мають свої обмеження, зокрема, схильність до накопичення похибок із часом, що вимагає застосування методів корекції та інтеграції з іншими сенсорами для підвищення точності. З розвитком мікроелектромеханічних систем (MEMS) стали можливими більш компактні, легкі та дешеві IMU, що відкриває нові перспективи для широкого використання БПЛА [1–3, 7–12].

З розвитком технологій, таких як штучний інтелект і машинне навчання, з'являються нові підходи до обробки даних сенсорів та оптимізації навігаційних алгоритмів. Це дозволяє підвищити точність і надійність інерціальних навігаційних систем. Дослідження та інновації в цій області є актуальними і необхідними для забезпечення безпечної та ефективної роботи БПЛА в різноманітних умовах [2, 7–9, 13].

Метою цієї статті є огляд сучасних сенсорів для інерціальної навігації БПЛА, їхніх переваг, недоліків, методів корекції похибок та інтеграції з іншими системами. Особлива увага приділяється сучасним тенденціям та інноваціям, таким як використання штучного інтелекту та нових типів сенсорів. Це дослідження допоможе зрозуміти поточні досягнення та виклики, а також визначити напрями для подальших досліджень і вдосконалення технологій інерціальної навігації БПЛА.

Постановка завдання. Огляд основних видів інерціальних сенсорів для навігації БПЛА; аналіз їхніх переваг, недоліків і методів корекції похибок; огляд сучасних технологій; дослідження методів інтеграції з іншими навігаційними системами; прогнозування перспектив розвитку.

Результати дослідження. В результаті проведеного дослідження систематизовано основні типи інерціальних сенсорів, визначено їхні переваги та недоліки, а також описано ефективні методи корекції похибок та інтеграції з іншими навігаційними системами. Досліджено сучасні тенденції, такі як використання штучного інтелекту, розвиток MEMS, і поява нових сенсорних технологій. Інтеграція IMU з глобальною навігаційною супутниковою системою (GNSS) та візуальними сенсорами дозволяє значно підвищити точність і надійність навігації БПЛА.

Визначення та класифікація безпілотних літальних апаратів. Безпілотний літальний апарат – це дистанційно пілотований або само пілотований літальний апарат, який може нести корисне навантаження, таке як камера, радар, давач і комунікаційне обладнання [3, 5, 6].

БПЛА бувають двох основних типів: з фіксованим крилом і пропелерами. Апарати з фіксованим крилом, працюють аналогічно до легких безпілотних літаків. Гвинтокрилі БПЛА, які також називають мультироторними, гвинтокрилами або мультикоптерами залежно від їхньої конструкції, схожі на легкі безпілотні вертольоти [14]. На ринку доступні БПЛА з різною кількістю роторів або пропелерів [5].

Існують апарати з різними двигунами та конструкціями крила. БПЛА можуть зв'язуватися за допомогою бездротових технологій як короткого, так і довгого радіусу дії, а їхні розміри можна класифікувати як нано-, мікро- або великі. Дрони оснащені окулярами з видом від першої особи (FPV), системою глобального позиціонування (GPS), давачами, стабілізаторами та камерами, що дозволяє забезпечувати мобільний зв'язок [5].

Гвинтокрилі БПЛА (VTOL) можуть злітати і приземлятися вертикально, що робить їх зручними для використання в обмежених просторах без злітно-посадкової смуги. Натомість БПЛА (HTOL) з фіксованим крилом потребують злітно-посадкової смуги, але вони енергоефективніші та мають довшу тривалість польоту. Головною перевагою VTOL є здатність створювати підйомну силу в нерухомому стані, що забезпечує більшу маневреність і контрольованість порівняно з HTOL, які потребують руху для створення підйомної сили [14]. Деякі приклади БПЛА з фіксованим і роторним крилом показані на рис. 1, 2 і 3.

Крім того, виділяють БПЛА із гібридним крилом, що об'єднує в собі переваги фіксованого та роторного крил [18, 19]. Приклад такого БПЛА наведено на рис. 4.

На додаток до класифікації за конфігурацією, існує безліч інших схем класифікації. Міністерство оборони США використовує 5 класів, заснованих на вазі, швидкості та висоті польоту (табл. 1) [14, 20].

БПЛА також іноді класифікують за витривалістю та висотою польоту: MAV (мікро- або мініатюрні літальні апарати), NAV (нано-літальні апарати), VTOL (вертикальний зліт і посадка), LASE (низька висота, коротка витривалість), LALE (низька висота, довга витривалість), MALE (середня висота, довга витривалість) і HALE (висока висота, довга витривалість) [14].



Джерело: [15].

Рис. 1. БПЛА із фіксованим крилом – RQ-4 Global Hawk



Джерело: [16].

Рис. 2. БПЛА із фіксованим крилом – SHARK UAS



Джерело: [17].

Рис. 3. БПЛА з роторним крилом – DJI Matrice 350 RTK



Джерело: [19].

Рис. 4. БПЛА із гібридним крилом – FDG50F

Таблиця 1

Класи БПЛА, що використовуються Міністерством оборони США

Категорія	Розмір	Максимальна підйомна маса, кг	Висота роботи, м	Швидкість, м/с
Клас 1	Small	0–9	<366	<51,4
Клас 2	Medium	9–25	<1067	<128,6
Клас 3	Large	<600	<5486	<128,6
Клас 4	Very-Large	>600	<5486	Будь-яка
Клас 5	Very-Large	>1320	>5486	Будь-яка

Інерціальна навігація. Навігаційна система БПЛА – це система, яка визначає положення літального апарату відносно деякої системи відліку (тобто ситуаційна обізнаність). Тимчасова втрата або відсутність ситуаційної обізнаності є причиною багатьох авіаційних аварій [3]. Така система побудована відповідно до другого закону Ньютона [13]. Інерціальна навігація була розроблена кілька десятиліть тому для військових застосувань, таких як ракети, літаки і кораблі, за допомогою інерціальних давачів, включаючи акселерометри і гіроскопи [2].

Інерціальні сенсори вимірюють інерціальні прискорення та обертання, які є векторними величинами [1]. Сенсор – це пристрій, який перетворює фізичне явище на електричний сигнал [4].

Принцип роботи інерціальних навігаційних систем (INS).

Інерціальна навігація – це автономний метод навігації, в якому вимірювання використовуються для відстеження положення та орієнтації об'єкта відносно відомої початкової точки, орієнтації та швидкості. Два пристрої, що застосовуються для інерціальної навігації: *акселерометри* і *гіроскопи* [3]. Прилад, що використовує ці пристрої має назву *інерціальний вимірювальний блок (IMU)* [21]. Обробляючи сигнали від IMU, можна обчислити положення та орієнтацію об'єкта автономно [3].

Пристрої для вимірювання обертання або швидкості обертання в сукупності називаються *гіроскопами* [1]. *Гіроскоп* – це механічний давач, який підтримує кутовий момент і використовується для вимірювання зміни положення і/або швидкості руху БПЛА [3].

Акселерометр – це вимірювальний пристрій для вимірювання лінійного прискорення руху. Кінцевою змінною польоту, яка виводиться з вихідного сигналу акселерометра, є лінійна швидкість [3].

Класифікація IMU. IMU поділяються на два типи: зі стабільною платформою і безплатформні (жорстко закріплені), структуру яких схематично зображено на рис. 5. У системах зі стабільною платформою INS ізольована від зовнішніх рухів і вимірює в глобальній системі координат. У безплатформних системах INS кріпиться на БПЛА, вимірюючи в каркасі корпусу. Безплатформні системи менш складні механічно, менші за розміром, але мають вищу обчислювальну складність, яка стала прийнятною завдяки зниженню вартості обчислень. Вони стали домінуючим типом IMU, хоча стабільні платформні INS все ще використовуються [3, 9].

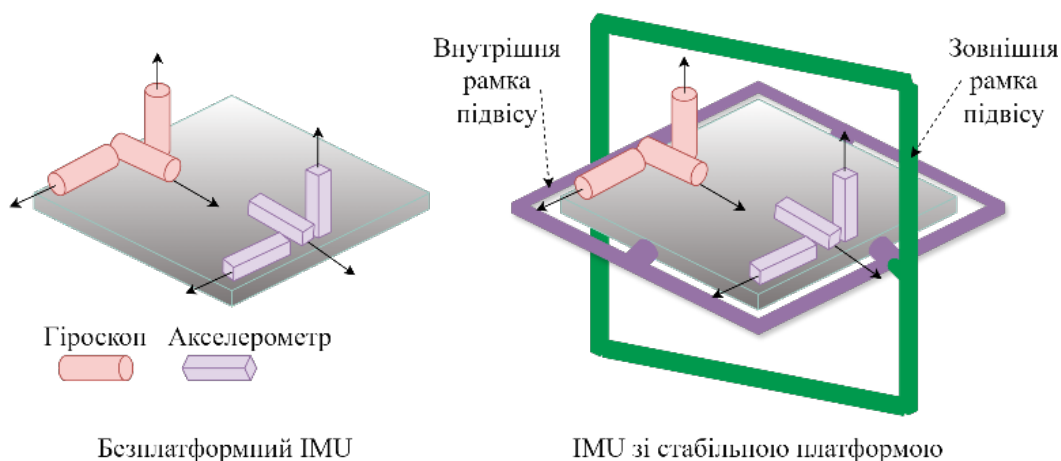


Рис. 5. Структура інерціальних вимірювальних блоків

IMU включають в себе вищезгадані інерціальні сенсори і пов'язану з ними допоміжну електроніку та пристрої для калібрування сенсорів і керування ними [1]. На рис. 6 зображено схематично роботу інерціальної системи навігації [22].

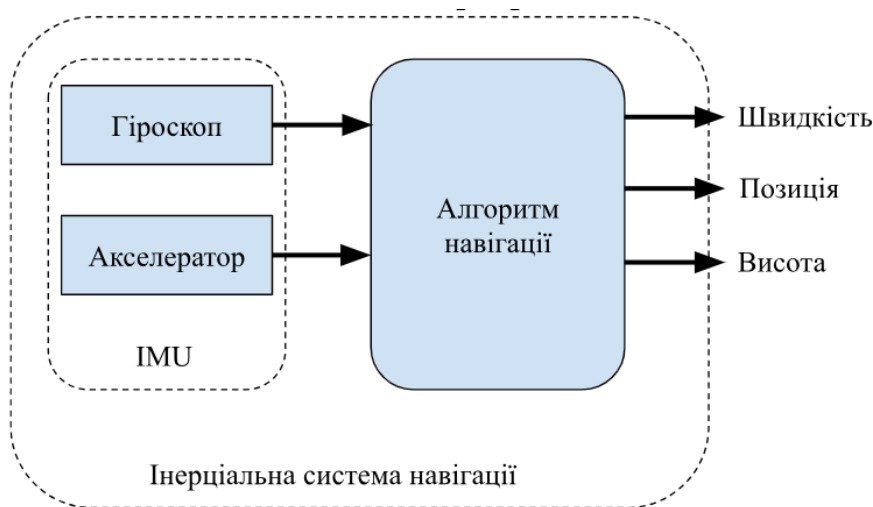


Рис. 6. Схема інерціальної системи навігації

Традиційні *гіроскопи* виготовляються з обертових коліс, але прогрес у мікроелектромеханічних системах призвів до появи нових мікрогіроскопів, які не мають обертових коліс. Гіроскопи MEMS вимірюють зміни сил, що діють на дві однакові маси, які коливаються і рухаються в протилежних напрямках. Іншим вдосконаленим типом гіроскопів є оптичний гіроскоп на кристалі без рухомих частин і з більшим ступенем точності, що використовує явище, яке називається ефектом Sagnac [3].

Сучасні *акселерометри* включають в себе величезну кількість різноманітних сенсорів, які використовують різні принципи роботи і технології. Вони включають механічні давачі, які використовують класичний принцип маятника, до сучасних твердотільних сенсорів. Отже, акселерометри існують в широкому діапазоні точності [9].

Останні досягнення в галузі конструювання MEMS дозволили виготовляти малогабаритні та легкі інерціальні навігаційні системи [3].

Сенсорні технології та гіроскопи. Моментні колісні гіроскопи (рис. 7) в основному працюють за допомогою маси, що швидко обертається [9].

Сучасні давачі кутової швидкості відрізняються за технологіями та принципами роботи, що, в свою чергу, відображається на їх точності. До давачів кутової швидкості належать гіроскопи на механічній основі, модернізовані для використання в безплатформних INS, такі як гіроскопи з динамічним налаштуванням (DTG – Dynamically tuned gyroscopes), а також гнучкі гіроскопи [9].

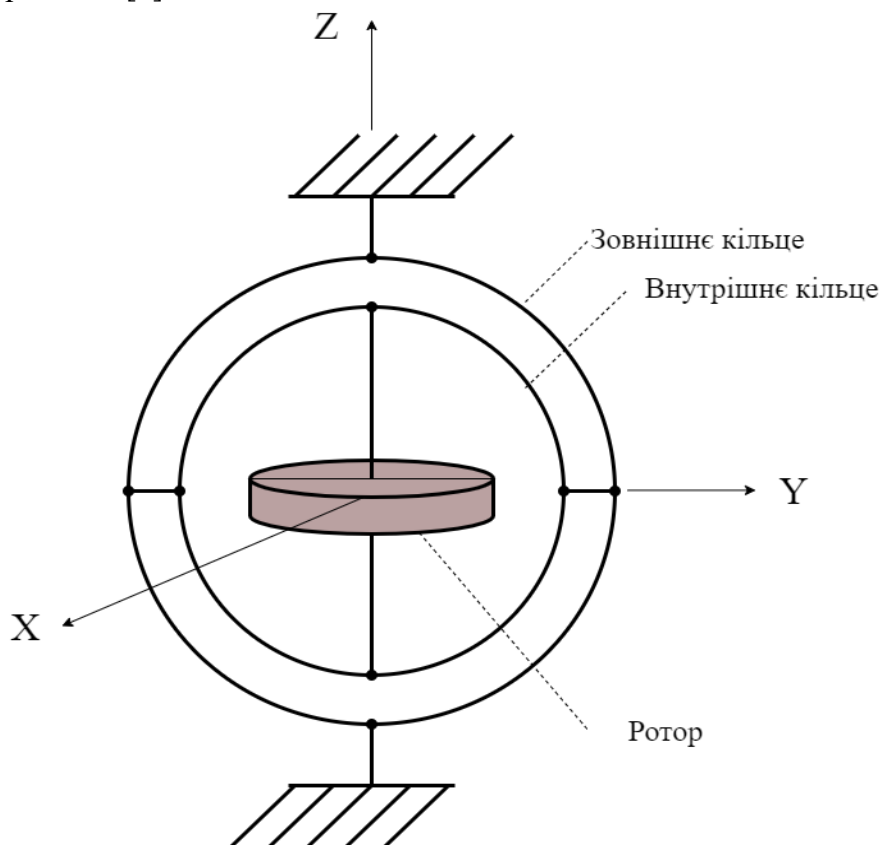


Рис. 7. Схематичне зображення механічного колісного гіроскопу

Інша технологія виготовлення давачів кутової швидкості – *вібраційні гіроскопи*. Принцип дії вібраційних гіроскопів був відкритий Фуко. Вібраційний елемент може мати різні форми, такі як: струна, порожнистий циліндр, стрижень, камертон (рис. 8), балка, напівсферичний купол [9].

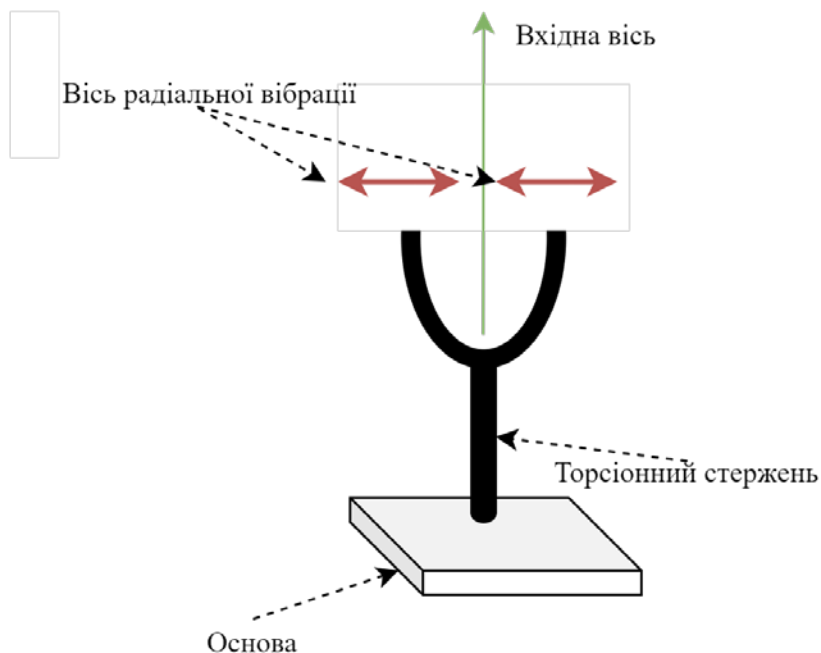


Рис. 8. Схематичне зображення вібраційного гіроскопу камертона

Вібраційні гіроскопи характеризуються можливістю мініатюризації та масового виробництва за відносно низької вартості. Отже, вібраційні гіроскопи можна розглядати як базову технологію, на основі якої виробляються *гіроскопи на основі мікроелектромеханічних систем*. Однак вібраційні гіроскопи можуть характеризуватися високими швидкостями дрейфу, обмеженнями вхідного діапазону гіроскопів через обмеження власної частоти резонатора (тобто вібраційного елемента) і чутливістю до впливу навколишнього середовища, таких як температурні коливання і удари [9].

Однією з найбільш ефективних і точних технологій у виробництві гіроскопів є *оптичні гіроскопи*. Принцип дії оптичних гіроскопів ґрунтується на ефекті Саньяка [3]. Ефект Саньяка [3] полягає в тому, що для інтерферометра із замкнутим контуром фаза світла, що проходить всередині інтерферометра, пропорційна зовнішній кутовій швидкості, якій він піддається. Оптичні гіроскопи можуть бути реалізовані в багатьох формах, найефективнішими з яких є кільцеві лазерні гіроскопи (RLG), які представляють активну архітектуру оптичного гіроскопа, і волоконно-оптичні гіроскопи (FOG), які представляють пасивну архітектуру оптичного гіроскопа [9].

В табл. 2 наведено порівняльний аналіз характеристик основних типів сенсорних технологій, що реалізують гіроскоп.

Таблиця 2

Характеристики основних типів сенсорів гіроскопів

	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Застосування
Моментні колісні гіроскопи	Використовують обертання маховика для контролю моменту інерції	Висока точність, керування рухом великих об'єктів	Велика маса, складність системи, потребує значної енергії	Супутники, космічні апарати
Механічні гіроскопи	Вимірювання обертання за допомогою механічних елементів	Висока точність, стійкість до зовнішніх впливів	Великі розміри, маса, механічні зноси	Аерокосмічна техніка, судноплавство

Продовження табл. 2

	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Застосування
Вібраційні гіроскопи	Використовують вібрації елементів для вимірювання обертання	Висока точність, компактність, відносно низька вартість	Чутливість до механічних збурень, середня точність	Автомобільна техніка, робототехніка, портативні пристрої
MEMS гіроскопи	Використовують ефект Коріоліса для вимірювання обертання	Компактність, низька вартість, низьке енергоспоживання	Нижча точність, чутливість до шумів	Смартфони, БПЛА, автомобільна техніка
Кільцеві лазерні гіроскопи	Застосовує явище інтерференції двох променів лазера	Висока точність, надійність	Висока вартість, складність конструкції	Літаки, ракети, супутники
Волоконно-оптичні гіроскопи	Використовує інтерференцію світлових хвиль у волоконно-оптичному кабелі	Висока точність, відсутність рухомих частин, тривала робота	Висока вартість, чутливість до температурних змін	Високоточні навігаційні системи
Квантові гіроскопи	Використовує квантові ефекти для вимірювання обертання	Надвисока точність, не потребує калібрування	Дуже висока вартість, експериментальний етап	Наукові дослідження, перспективні навігаційні системи

Сенсорні технології та акселерометри. Сучасні акселерометри включають механічні давачі, які використовують класичний принцип маятника, до сучасних твердотільних сенсорів. Механічні акселерометри можна вважати найвищим рівнем точності з точки зору інерціальних давачів. Тим не менш, механічні акселерометри можуть бути реалізовані в різних формах з різною конструкцією. Іншою формою лінійних акселерометрів є акселерометри, які використовують твердотільні технології [9].

Найпопулярнішим класом акселерометрів є *п'єзоелектричний акселерометр*. Цей тип сенсорів здатний вимірювати широкий спектр динамічних подій. Однак існує багато інших класів акселерометрів, які використовуються для вимірювання постійних або дуже низькочастотних прискорень, таких як автомобільне гальмування, якість їзди в ліфті і навіть гравітаційне тяжіння Землі. Такі акселерометри використовують *п'єзорезистивні, ємнісні та сервотехнології* [4].

П'єзоелектричні акселерометри – це пристрої, що характеризуються розширеною ділянкою плоскої АЧХ, великим діапазоном лінійної амплітуди і чудовою довговічністю. Ці властивості обумовлені використанням п'єзоелектричного матеріалу в якості чутливого елемента сенсора. П'єзоелектричні матеріали характеризуються здатністю видавати електричний сигнал, пропорційний напрузі, прикладеному до матеріалу [4].

П'єзоелектричні акселерометри вже давно використовуються для вимірювання вібраційного прискорення і застосовуються в основному як давачі постійного струму в п'єзоелектричних конденсаторах на пучкових акселерометрах MEMS [1].

Дві категорії п'єзоелектричних матеріалів, які переважно використовуються в конструкції акселерометрів, – це кварц і полікристалічна кераміка. Кварц – це природний

кристал, тоді як кераміка – штучний. Кожен матеріал має певні переваги. Вибір матеріалу залежить від конкретних характеристик, яких бажають досягти від акселерометра [4].

Існує безліч механічних конфігурацій для реалізації принципів перетворення п'єзоелектричного акселерометра. Ці конфігурації визначаються характером дії інерціальної сили прискореної маси на п'єзоелектричний матеріал. Сьогодні використовуються три основні конфігурації: зсув, згинання та стиснення [4].

П'єзорезистивні акселерометри використовують зміну опору в напруженому опорному матеріалі. П'єзорезистивні акселерометри MEMS, що використовуються для розкриття автомобільних подушок безпеки, використовують п'єзорезистентність [1]. Часто для виробництва такого типу акселерометрів використовується монокристалічний кремній [4].

До переваг акселерометра, сконструйованого таким чином, належить висока жорсткість, що призводить до високої резонансної частоти, яка оптимізує його частотну характеристику. Ця висока резонансна частота досягається завдяки тому, що квадратний корінь з відношення модуля до густини кремнію, показника динамічних характеристик, є вищим, ніж у сталі. Іншими перевагами є мініатюризація, велика амплітуда сигналу (напівпровідникові тензорезистори мають коефіцієнт вимірювання в 25–50 разів більший, ніж металеві), хороша лінійність і підвищена стабільність. За умови належної температурної компенсації п'єзорезистивні акселерометри можуть працювати в діапазоні температур від -65 до $+250^{\circ}\text{F}$. За сучасних технологій інші типи п'єзорезистивних давачів (тиску) можуть працювати при температурі до 1000°F [4].

Ємнісні акселерометри схожі за принципом дії на п'єзорезистивні акселерометри; однак замість зміни опору вони вимірюють зміну ємності. Чутливий елемент складається з двох паралельних пластинчастих конденсаторів, що працюють в диференціальному режимі. Ці конденсатори працюють у мостовій конфігурації і залежать від схеми демодулятора несучої або її еквівалента, щоб виробляти електричний вихід, пропорційний прискоренню [4].

Ємнісні MEMS-акселерометри наразі працюють з прискореннями до сотень g і частотами до одного кГц. Технологія MEMS також дозволяє зменшити розмір акселерометра [4].

Однією з основних переваг ємнісних акселерометрів є вимірювання низького рівня (менше $2 g$), низькочастотного прискорення зі здатністю витримувати високі рівні ударів, як правило, $5000 g$ або більше. Деякі з недоліків ємнісного акселерометра – обмежений високочастотний діапазон, відносно великий фазовий зсув і вищий рівень шуму, ніж у порівнянних п'єзоелектричних пристроїв [4].

До *твердотільних технологій* належить реалізація оптичних акселерометрів, таких як *вібраційні волоконно-оптичні акселерометри*. Такі оптичні акселерометри передбачають використання волоконної оптики у виготовленні акселерометрів і використовують різні підходи та конструкції для отримання прикладеного прискорення до давача від вимірювання властивостей світла, що проходить через різні конструкції волоконно-оптичних кабелів. Твердотільні технології дозволяють створювати невеликі, надійні та відносно дешеві інерціальні давачі [9].

Для *лінійних акселерометрів на основі рідини* ця підкатегорія включає акселерометри з в'язким поплавком, акселерометри з приводом від тиску і термоакселерометри з мікромеханічним приводом. Загальним обмеженням в'язких поплавкових акселерометрів є теплові коливання, які мають великий вплив на в'язкість рідини, що впливає на вихідний сигнал давача [9]. В табл. 3 систематизовано характеристики сенсорних технологій, що використовуються в сучасних акселерометрах.

Таблиця 3

Характеристики основних типів сенсорів акселерометрів

	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Застосування
П'єзоелектричні акселерометри	П'єзоелектричний ефект, при якому під тиском генерується електричний заряд	Висока точність, широкий динамічний діапазон, стабільність	Неможливість вимірювання постійного прискорення, чутливість до температури	Вібраційний аналіз, вимірювання ударів
П'єзореzystивні акселерометри	Зміна електричного опору п'єзореzystивного матеріалу під дією механічних навантажень	Широкий діапазон вимірювань, стійкість до ударних навантажень	Вища споживана потужність, ніж у ємнісних акселерометрів	Автомобільна техніка, краш-тести
Ємнісні акселерометри	Зміна ємності між рухомими та нерухомими електродами під дією прискорення	Низька вартість, низька споживана потужність, здатність вимірювати статичні прискорення	Низька точність порівняно з іншими типами акселерометрів	Смартфони, системи стабілізації камер
Вібраційні волоконно-оптичні акселерометри	Вимірювання змін у фазі світлових хвиль, що проходять через оптичні волокна	Висока точність, нечутливість до електромагнітних перешкод	Висока вартість, складність інтеграції	Високоточні вимірювання, військові застосування
Лінійні акселерометри на основі рідини	Вимірювання зміщення рідини під дією прискорення	Висока точність, стабільність у часі	Відносно повільний час реакції	Геофізика, буріння свердловин

Нові типи інерціальних сенсорних технологій. Фізичним явищем, що визначає роботу гіроскопів ядерного магнітного резонансу (NMR), є квантовий спіт ядер атомів [9].

NMR-гіроскопи досягли значного розвитку в основних аспектах своєї конструкції та реалізації. Зокрема, наукові досягнення призвели до вдосконалення методів керування атомним спіном, прикладеним магнітним полем, а також до розробки кращих механізмів реєстрації сигналу гіроскопа [9].

Вважається, що NMR-гіроскопи наближаються до навігаційних вимог з точки зору бюджету похибки. Крім того, на NMR-гіроскопи не впливають вібрації, оскільки механізм передачі руху таких давачів не потребує твердої маси. Підсумовуючи, очікується, що технологія NMR-гіроскопів досягне високого рівня точності у високодинамічних додатках протягом десятиліття [9].

Ще одна новітня технологія, яка була впроваджена у виробництві інерціальних давачів – це *технологія холодних атомів* (cold atom inertial sensors). Холодноатомні інерціальні сенсори покладаються на лазерне охолодження атомів, без криогенного охолодження [9].

Інерціальні сенсори на холодних атомах характеризуються високою продуктивністю порівняно з типовими оптичними гіроскопами, оскільки ефективна довжина хвилі атомів менша, ніж у RLG і FOG на десять порядків. Крім того, завдяки низькій температурі

захоплених холодних атомів, вони забезпечують вимірювання з низьким рівнем шуму і високим відношенням сигнал/шум порівняно з оптичними інерціальними сенсорами [9].

На відміну від інерціальних давачів на основі MEMS, які використовують ємнісні – механізми зчитування, з'явився новий метод, відомий як *мікро-оптоелектромеханічні системи (MOEMS)* (рис. 9). IMU на основі MEMS зазвичай включають електронні ємнісні засоби, за допомогою яких рух мікроінерціальної сейсмічної маси виявляється і перетворюється в сигнали. Однак, інерціальні давачі на основі MOEMS використовують оптичні механізми зчитування, які усувають широкий спектр помилок, що виникають у давачах на основі MEMS. Давачі MOEMS оптимізовані для досягнення низької вартості виробництва при досягненні високої точності [9].

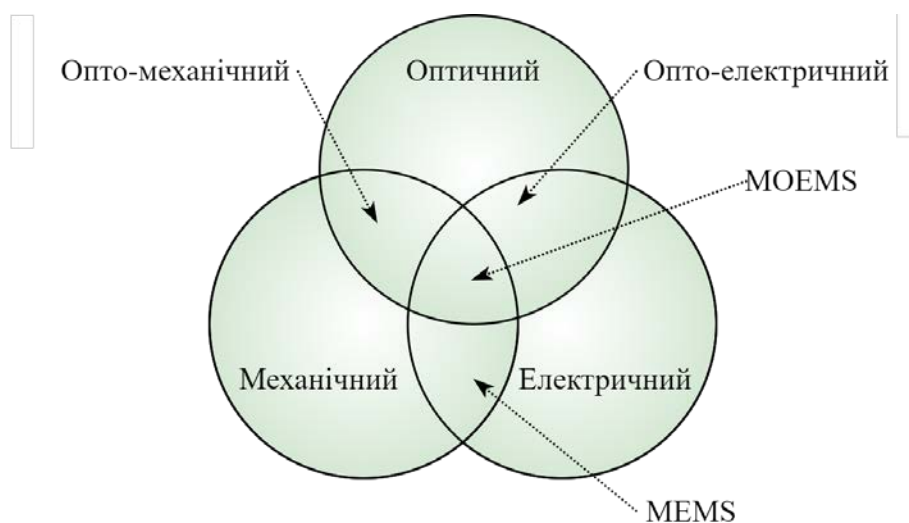


Рис. 9. Типи технологій інерціальних сенсорів

Нещодавно дослідницька група «Мобільні мультисенсорні системи» в Університеті Калгарі розробила технологію інерціальних давачів на основі рідини, що розробляється в рамках проекту «Мобільні мультисенсорні системи» [9]. Дослідження пропонує інерціальну навігаційну систему на основі рідини, яка називається *інерціальною навігаційною системою велосиметрії з візуалізацією частинок (PIVINS)*, що залежить від динаміки рідини для забезпечення інерціальних вимірювань [9]. На рис. 10 зображено схематично гіроскоп на базі даної технології.

Тривають дослідження, спрямовані на створення повнофункціональної інерціальної навігаційної системи. PIVINS є майже бездрейфовою інерціальною навігаційною системою з незначною нестабільністю зсуву. Таким чином, PIVINS має лише методичні похибки, які можна змоделювати, або аналітично, або експериментально. Отже, PIVINS на кожному рівні можна порівняти з висококласними тактичними системами, але при цьому вона є надзвичайно ефективною з точки зору нестабільності зсуву. Очікується, що PIVINS досягне такого рівня продуктивності завдяки простій і недорогій конструкції [9].

Технологія напівсферичного резонаторного гіроскопа (HRG) ґрунтується на тих самих наукових принципах, що й у вібраційних гіроскопах, про які йшлося раніше. HRG залежить від сили Коріоліса при визначенні вхідної кутової швидкості. Отже, технологія HRG лежить в межах більш специфічної таксономії гіроскопів, яка називається «вібраційні гіроскопи Коріоліса». Основний науковий принцип полягає в тому, що об'єкт, який резонує на заданій частоті, залишається резонуючим у тій самій площині, навіть якщо його опори обертаються [9]. В табл. 4 наведено порівняльний аналіз досліджених сенсорних технологій.

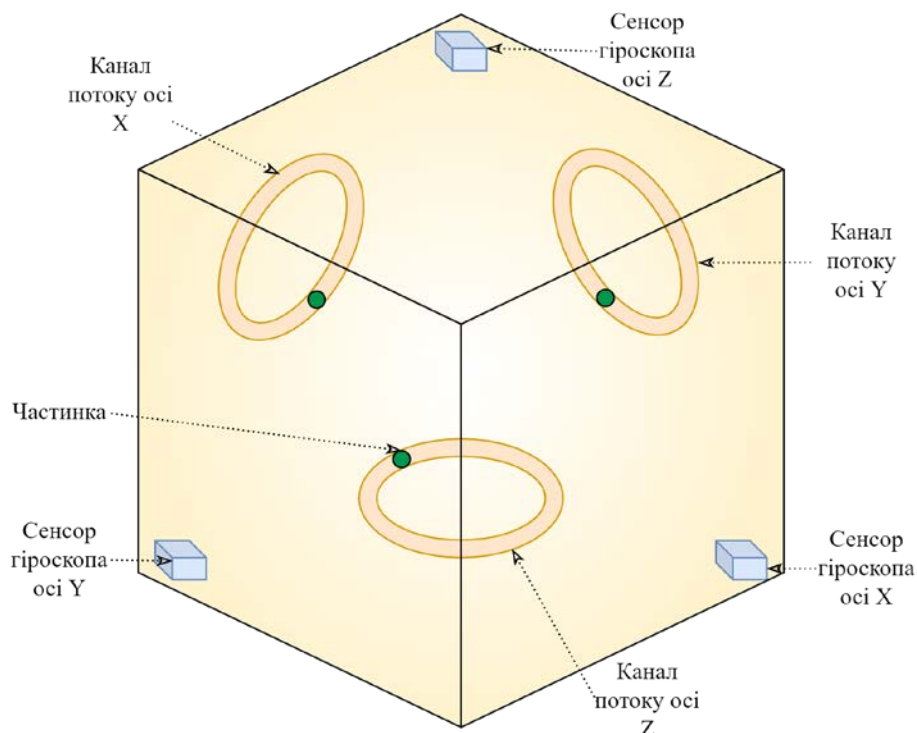


Рис. 10. Схема будови гіроскопа велосиметрії з візуалізацією частинок

Таблиця 4

Характеристики новітніх сенсорних технологій

	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Застосування
Гіроскопи ядерного магнітного резонансу	Використовує ядерний магнітний резонанс для вимірювання обертання	Надзвичайно висока точність, низька чутливість до шуму	Висока вартість, вимагає спеціальних умов	Аерокосмічна галузь, дослідження космосу
Мікро-опто-електромеханічні системи (МОEMS)	Інтегрує оптичні, електронні та механічні компоненти для вимірювання прискорення та обертання	Компактний розмір, відносно низька вартість	Нижча точність порівняно з деякими іншими технологіями	Портативні пристрої, автомобільна навігація
Технологія холодних атомів	Використовує холодні атоми для досягнення надзвичайно високої точності вимірювання прискорення та обертання	Виняткова точність, мінімальний шумовий вплив	Надзвичайно висока вартість, складна в експлуатації	Наукові дослідження, високоточна навігація
Інерціальні давачі для велосиметрії з візуалізацією частинок	Вимірює швидкість частинок у рідинах для визначення прискорення та обертання	Висока точність у специфічних сферах застосування	Висока вартість, обмежена рідкими середовищами	Дослідження гідродинаміки, аеродинаміка
Технологія напівсферичного резонаторного гіроскопа (HRG)	Використовує напівсферичні резонатори для вимірювання обертання	Висока точність, стійкість до механічних впливів	Висока вартість, складна конструкція	Космічні апарати, авіація

Переваги та недоліки інерціальних систем. Інерціальні давачі поділяються за своїми характеристиками на різні класи, які відрізняються відповідною вартістю та сферою застосування. Основою, на якій будується класифікація IMU, є похибки, що виникають у їхніх вихідних вимірюваннях. Такі похибки різняться між інерціальними давачами з точки зору їхньої природи – методичні чи випадкові похибки [9].

Інерціальна навігаційна система дозволяє вимірювати рух БПЛА пасивно, тобто без використання зовнішніх елементів управління. Перевагами INS систем є автономність, не залежить від будь-якого зовнішнього пристрою і не потребує умов видимості [23].

Значним недоліком є помилки в обчисленнях, що зростають з часом. Це зумовлено тим, що такі системи дуже чутливі до помилок у вимірюваннях. Ці помилки накопичуються в часі, що призводить до неправильного визначення позиції та орієнтації об'єкта [2, 4, 14].

Високоякісні IMU є дуже дорогими, а недорогі IMU на основі MEMS страждають від значного дрейфу в часі [1]. Однак для зменшення впливу помилок на навігаційну систему можна використовувати комбіновані методи навігації, що інтегрують інші методи з INS [2, 7, 8].

Комбіновані методи навігації. Один сенсор не може впоратися з усіма викликами, такими як накопичення помилок INS, уразливість GNSS до перешкод та обмеження візуальної одометрії. Впровадження обчислювальних можливостей БПЛА дозволяє об'єднувати дані з різних сенсорів, що підвищує надійність і адаптивність навігаційної системи завдяки комплементарному підходу [2, 8]. Інерціальні сенсори для навігації можливо інтегрувати з іншими технологіями для навігації за допомогою злиття даних. Зокрема, GNSS, WiFi, Bluetooth, RFID, UWB, Ultrasonic, Magnetic, Vision, LiDAR [2].

Після більш ніж 30 років розвитку структура навігаційної системи злиття даних стає все більш зрілою, яку можна розділити на фільтрову (Filter-Based Framework), нелінійну оптимізацію (Optimization-Based Framework) та машинне навчання (Deep AI-Based Algorithmic Framework) [2, 7, 8]. На рис. 11 зображено класифікацію аналітичних методів до яких належать фільтрові та нелінійні оптимізації.

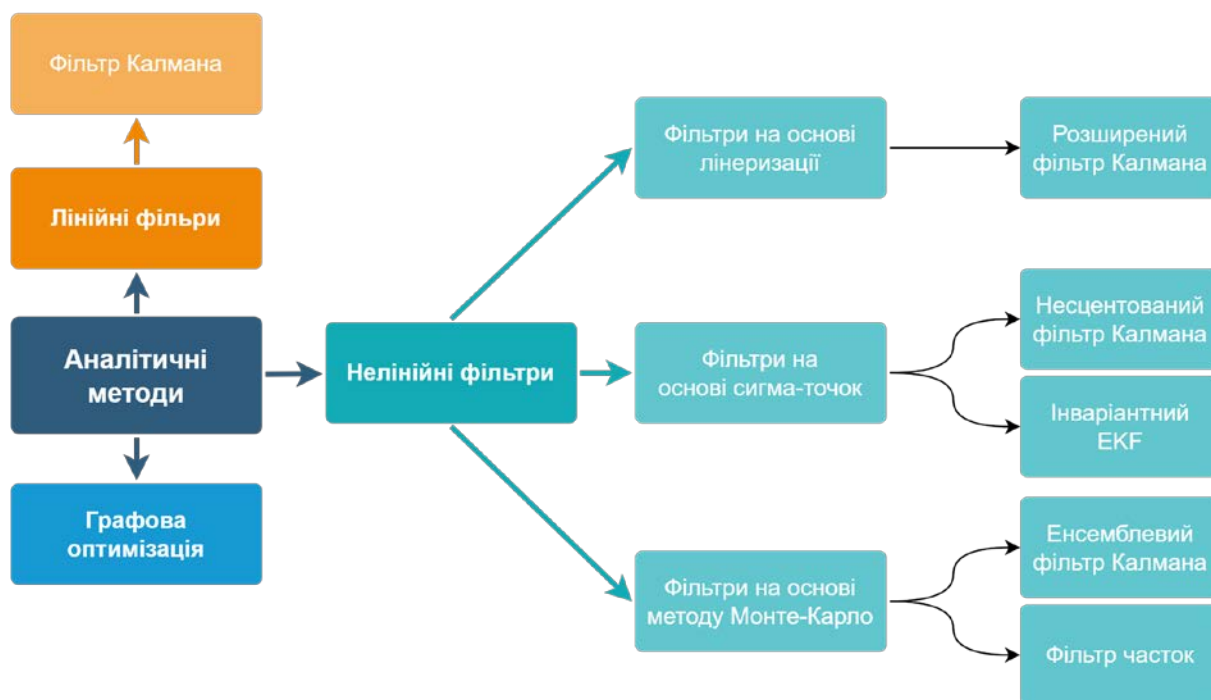


Рис. 11. Класифікація аналітичних методів для інтеграції сенсорних даних

Фільтрове злиття даних сенсорів. Інтеграція GNSS/INS є класичною структурою злиття, яка включає слабко, тісно, і глибоко зв'язані підходи. *Фільтр Калмана* є рекурсивним фільтром для оцінки стану динамічної системи з неповних і зашумлених вимірювань, широко використовується в інтегрованій навігації. Він працює на основі Гаусівського розподілу і лінійності системи. Недолік GNSS/INS полягає у залежності від точності та частоти GNSS; коли видимих супутників менше 4, система деградує до режиму INS [2, 7, 8].

Розширений фільтр Калмана (ЕКФ) адаптує нелінійні системи, лінеаризуючи їх за допомогою розкладу в ряд Тейлора. ЕКФ використовується у багатьох статтях для інтеграції GNSS/INS [2, 7].

Беззапашовий фільтр Калмана (УКФ) пропонує кращу продуктивність за рахунок обчислювального часу, використовує спеціальний набір сигма-точок для оцінки стану системи [7].

Інваріантний ЕКФ (InЕКФ) поєднує теорію збереження симетрії з ЕКФ, забезпечуючи точнішу оцінку стану системи тому, що некоректні стани не впливають на точність лінеаризації, тому порівняно зі стандартним ЕКФ, заснованим на формі похибки, InЕКФ має кращу точність і узгодженість [8].

Фільтр часточок (PF) використовує метод Монте-Карло для моделювання будь-якого стану, на відміну від KF, який працює з лінійними системами і Гаусівськими шумами [2].

Ансамблевий фільтр Калмана (EnKF) використовує стохастичну вибірку на основі методу Монте-Карло для обчислення коваріаційної матриці стану, що зменшує обчислювальну складність і покращує продуктивність для високопорядкових нелінійних систем [2].

Таблиця 5

Характеристики аналітичних методів злиття сенсорних даних

	Точність	Обчислювальна складність	Обробка нелінійності	Стійкість до шуму	Переваги	Недоліки
Фільтр Калмана	Висока	Низька	Слабка	Висока	Оптимальний для лінійних систем, реальний час обробки	Погана продуктивність у нелінійних системах
Розширений фільтр Калмана (ЕКФ)	Помірна до високої	Помірна	Помірна	Помірна	Може обробляти деяку нелінійність, широко використовується	Лінеаризація може вносити помилки, обмежений для гладкої нелінійності
Беззапашовий фільтр Калмана (УКФ)	Висока	Помірна до високої	Добре	Висока	Краще обробляє сильну нелінійність, точні результати	Складніший і обчислювальний витратний, ніж ЕКФ
Інваріантний ЕКФ	Висока	Помірна	Помірна	Висока	Підтримує інваріантність, стійкий до певних перетворень	Складність реалізації та розуміння

Продовження табл. 5

	Точність	Обчислю- вальна складність	Обробка неліній- ності	Стійкість до шуму	Переваги	Недоліки
Фільтр часточок	Висока	Висока	Відмінна	Помірна до високої	Обробляє сильну нелінійність та багатомодальні розподіли	Обчислювально витратний, потребує великої кількості часток
Ансамблевий фільтр Калмана (EnKF)	Висока	Висока	Добре	Висока	Масштабований до високо-розмірних систем, ефективний для великих моделей	Обчислювально вимогливий, розмір ансамблю впливає на продуктивність

Нелінійна оптимізація. Задача об'єднання інформації з декількох джерел у навігаційних системах полягає у визначенні максимального апостеріорного значення стану системи за допомогою Байєсівських графових мереж [2]. Графові оптимізаційні методи використовуються для опису взаємозв'язків у навігаційних системах, особливо в задачах візуально-інерціального SLAM. Вони також застосовуються в LiDAR-INS, GNSS/INS, GNSS/INS/Vision, та Visual/INS системах. Порівняно з фільтраційними алгоритмами, методи оптимізації забезпечують кращу точність за рахунок врахування попередніх станів системи, але потребують більше обчислювальних ресурсів [2, 7, 8, 13, 21, 24, 25].

Методи машинного навчання. Залежать від точності ініціалізації та даних сенсорів. Нелінійна оптимізація краща для складних задач, але методи глибокого навчання отримують все більше уваги за здатність до нелінійного застосування [8].

Artificial neural network (ANN) використовується для прогнозування координат або помилок INS під час збоїв GNSS. Переваги: об'єднання даних без моделі системи, прогнозування в нелінійних системах, ефективність з великими даними. Недоліки: «чорна скринька», потреба у великій кількості даних, складність забезпечення невизначеності результатів [2].

Fuzzy logic є простою системою, що використовує експертні знання та може моделювати шуми процесу та вимірювань без необхідності їх імовірнісних характеристик. Проблеми: не завжди точне обґрунтування, результати на основі припущень, потреба у широких випробуваннях [2].

Support vector machine (SVM) має високу здатність до узагальнення, адаптивність до різних середовищ, робота з даними високої розмірності, уникнення локальних мінімумів. Проблеми: зростання часу обчислень з великими даними, зниження ефективності при високому рівні шуму [2].

Random forest не чутливий до аномальних даних, ефективно обробляє дані з високою розмірністю, уникає надмірної підгонки. Проблеми: потреба у багатьох деревах рішень для складних задач, низька ефективність обчислень, слабка інтерпретованість при великому масштабі [2].

Надійність і стійкість багатоджерельних навігаційних систем є ключовою метою розробки БПЛА. Кожен давач має свої унікальні застосування та обмеження. Наприклад, GNSS працює тільки на відкритих просторах, тоді як камери технічного зору і лазерні

далекоміри мають проблеми в темних або динамічних умовах, а магнітометри чутливі до магнітних перешкод. Об'єднання даних з різних сенсорів підвищує надійність системи [2, 7, 8].

Таблиця 6

Характеристики методів машинного навчання

	Точність	Обчислювальна складність	Обробка нелінійності	Стійкість до шуму	Переваги	Недоліки
Artificial Neural Network	Висока	Висока	Відмінна	Висока	Добре справляється з нелінійними даними, висока точність	Потребує великих обсягів даних для навчання
Fuzzy Logic	Середня до високої	Низька	Добре	Середня	Може працювати з нечіткими даними, легкість в інтерпретації	Може бути менш точною, особливо у складних системах
Support Vector Machine	Висока	Помірна	Добре	Висока	Висока точність у невеликих обсягах даних, стійкість до перенавчання	Погано масштабується на великі набори даних, чутливість до вибору ядра
Random Forest	Висока	Помірна	Добре	Висока	Висока стійкість до перенавчання, добре справляється з пропущеними даними	Обчислювально витратний для великих наборів даних

IMU не залежить від зовнішніх сигналів, але вразливий до шумів і з часом втрачає точність. Комбінація GPS та IMU покращує позиціонування, а фільтр Калмана часто використовується для злиття даних. Інтеграція GNSS/INS є поширеною, забезпечуючи стабільність і точність навіть при короткочасних відключеннях сигналу GNSS. Проте, тривалі відключення сигналу знижують точність системи через дрейф IMU. Інтеграція GNSS/INS/LiDAR SLAM також досліджується для підвищення точності та надійності [2, 21].

Детальний огляд різноманітних методів інтеграції та комбінацій джерел даних є предметом подальших досліджень.

Перспективи подальших досліджень. У відносно ідеальному середовищі методи на основі фільтрів і оптимізації можуть забезпечити високу точність результатів, однак у складних умовах надійність є великим викликом для алгоритму злиття. У майбутньому розробка повинна зосередитися на наступних аспектах [8]:

- покращення якості даних: підвищення точності MEMS IMU, зменшення помилок калібрування, покращення даних у динамічних умовах, зменшення розмиття візуальних камер;
- використання гетерогенних сенсорів: різні сенсори для різних середовищ, такі як камери глибини та камери подій для вирішення специфічних проблем;

- розробка відмовостійких архітектур: забезпечення надійності системи через виявлення помилок і зменшення складності;

- підходи на основі даних: використання DNN для вирішення проблем моделювання та динаміки середовища, забезпечення безпеки та надійності автономних систем.

Висновки. У цій статті проведено комплексний огляд сучасного стану сенсорів для інерціальної навігації безпілотних літальних апаратів. Систематизовано основні типи інерціальних вимірювальних блоків, визначено їхні переваги та недоліки, а також методи корекції похибок та інтеграції з іншими навігаційними системами.

Проаналізовано традиційні механічні сенсори та мікроелектромеханічні системи. MEMS-сенсори мають переваги у вигляді компактності, низької вартості та зменшеного енергоспоживання, проте вони потребують вдосконалення точності.

Обґрунтовано, що фільтр Калмана та адаптивні фільтри ефективно зменшують похибки навігаційних систем. Однак, їхня ефективність залежить від умов використання та налаштувань.

Інтеграція IMU з GNSS та візуальними сенсорами значно підвищує точність навігації. Комбінація даних з різних сенсорів дозволяє компенсувати недоліки кожної окремої системи.

Важливим є удосконалення точності та зменшення розмірів і вартості MEMS-сенсорів. Алгоритми машинного навчання все частіше використовуються для обробки даних сенсорів, що дозволяє підвищити точність навігації. Розробляються інноваційні сенсори, такі як квантові сенсори, які мають потенціал значно покращити інерціальні навігаційні системи.

Подальші дослідження повинні зосередитись на підвищенні точності та надійності MEMS-сенсорів. Необхідно розробляти нові алгоритми, що зможуть ефективно коригувати похибки в різних умовах експлуатації. Дослідження з інтеграції квантових та інших нових типів сенсорів з існуючими навігаційними системами можуть відкрити нові можливості для БПЛА.

Подальший розвиток інерціальних навігаційних сенсорів для БПЛА забезпечує їхню більшу автономність, точність та надійність, що сприятиме розширенню сфер застосування цих апаратів.

References

Література

1. Andrews, A. P., Bartone, C. G., Grewal, M. S. (2019). Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc. 608 p.
2. Zhuang, Y. et al. (2023). Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: from analytics-based to learning-based approaches. *Information fusion*, 2023. DOI: 10.1016/j.inffus.2023.01.025.
3. Sadraey, M. H. (2020). Design of unmanned aerial systems. John Wiley & Sons, Inc. 664 p.
4. Aszkler, C. (2005). Acceleration, shock and vibration sensors. *Sensor technology handbook*, 2005, P. 137–159. DOI: 10.1016/b978-075067729-5/50045-8.
5. Mohsan, S. A. H. et al. (2022). Towards the unmanned aerial vehicles (uavs): a comprehensive review. *Drones*, Vol. 6, No. 6, P. 147. DOI: 10.3390/drones6060147.

1. Andrews A. P., Bartone C. G., Grewal M. S. Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2019. 608 p.
2. Zhuang Y. et al. Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: from analytics-based to learning-based approaches. *Information fusion*. 2023. DOI: 10.1016/j.inffus.2023.01.025.
3. Sadraey M. H. Design of unmanned aerial systems. John Wiley & Sons, Inc., 2020. 664 p.
4. Aszkler C. Acceleration, shock and vibration sensors. *Sensor technology handbook*. 2005. P. 137–159. DOI: 10.1016/b978-075067729-5/50045-8.
5. Mohsan S. A. H. et al. Towards the unmanned aerial vehicles (uavs): a comprehensive review. *Drones*. 2022. Vol. 6, No. 6. P. 147. DOI: 10.3390/drones6060147.

6. Laghari, A. A. et al. (2022). Unmanned aerial vehicles: a review. *Cognitive robotics*, Vol. 3, P. 8–22. DOI: 10.1016/j.cogr.2022.12.004.

7. Cahyadi, M. N. et al. (2023). Analysis of GNSS/IMU sensor fusion at UAV quadrotor for navigation. *IOP conference series: earth and environmental science*, Vol. 1276, No. 1, P. 012021. DOI: 10.1088/1755-1315/1276/1/012021.

8. Ye, X. et al. (2023). A review of small UAV navigation system based on multisource sensor fusion. *IEEE sensors journal*, Vol. 23, No. 17, P. 18926–18948. DOI: 10.1109/jsen.2023.3292427.

9. El-Sheimy, N., Youssef, A. (2020). Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends. *Satellite navigation*, Vol. 1, No. 1. DOI: 10.1186/s43020-019-0001-5.

10. Ru, X. et al. (2022). MEMS inertial sensor calibration technology: current status and future trends. *Micromachines*, Vol. 13, No. 6, P. 879. DOI: 10.3390/mi13060879.

11. Rogne, R. H. et al. (2020). On the usage of low-cost MEMS sensors, strapdown inertial navigation, and nonlinear estimation techniques in dynamic positioning. *IEEE journal of oceanic engineering*, Vol. 46, No. 1, P. 24–39. DOI: 10.1109/joe.2020.2967094.

12. Blocher, L. et al. (2021). Purely inertial navigation with a low-cost MEMS sensor array. *2021 IEEE international symposium on inertial sensors and systems (INERTIAL)*, Kailua-Kona, HI, USA, 22–25 March 2021, P. 1–4. DOI: 10.1109/inertial51137.2021.9430468.

13. Shao, W. et al. (2020). A visual/inertial relative navigation method for UAV formation. *2020 chinese control and decision conference (CCDC)*, Hefei, China, 22–24 August 2020, P. 1831–1836. DOI: 10.1109/ccdc49329.2020.9164765.

14. Stewart, M., Martin, S. (2020). Unmanned aerial vehicles: fundamentals, components, mechanics, and regulations. *Unmanned aerial vehicles*. Ed. by N. Barrera. P. 1–70.

15. Global hawk | northrop grumman. *Northrop Grumman*. URL: <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/global-hawk>.

16. SHARK UAS – ukrspcsystems. *UKRSPECSYSTEMS*. URL: <https://ukrspcsystems.com/drones/shark-uas>.

6. Laghari A. A. et al. Unmanned aerial vehicles: a review. *Cognitive robotics*. 2022. Vol. 3. P. 8–22. DOI: 10.1016/j.cogr.2022.12.004.

7. Cahyadi M. N. et al. Analysis of GNSS/IMU sensor fusion at UAV quadrotor for navigation. *IOP conference series: earth and environmental science*. 2023. Vol. 1276, No. 1. P. 012021. DOI: 10.1088/1755-1315/1276/1/012021.

8. Ye X. et al. A review of small UAV navigation system based on multisource sensor fusion. *IEEE sensors journal*. 2023. Vol. 23, No. 17. P. 18926–18948. DOI: 10.1109/jsen.2023.3292427.

9. El-Sheimy N., Youssef A. Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends. *Satellite navigation*. 2020. Vol. 1, No. 1. DOI: 10.1186/s43020-019-0001-5.

10. Ru X. et al. MEMS inertial sensor calibration technology: current status and future trends. *Micromachines*. 2022. Vol. 13, No. 6. P. 879. DOI: 10.3390/mi13060879.

11. Rogne R. H. et al. On the usage of low-cost MEMS sensors, strapdown inertial navigation, and nonlinear estimation techniques in dynamic positioning. *IEEE journal of oceanic engineering*. 2020. Vol. 46, No. 1. P. 24–39. DOI: 10.1109/joe.2020.2967094.

12. Blocher L. et al. Purely inertial navigation with a low-cost MEMS sensor array. *2021 IEEE international symposium on inertial sensors and systems (INERTIAL)*, Kailua-Kona, HI, USA, 22–25 March 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/inertial51137.2021.9430468.

13. Shao W. et al. A visual/inertial relative navigation method for UAV formation. *2020 Chinese control and decision conference (CCDC)*, Hefei, China, 22–24 August 2020. P. 1831–1836. DOI: 10.1109/ccdc49329.2020.9164765.

14. Stewart, M., Martin, S. (2020). Unmanned aerial vehicles: fundamentals, components, mechanics, and regulations. *Unmanned aerial vehicles*. Ed. by N. Barrera. 2020. P. 1–70.

15. Global hawk | northrop grumman. *Northrop Grumman*. URL: <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/global-hawk>.

16. SHARK UAS – ukrspcsystems. *UKRSPECSYSTEMS*. URL: <https://ukrspcsystems.com/drones/shark-uas>.

17. Matrice 350 RTK – Download-Center – DJI. *DJI Official*. URL: <https://www.dji.com/global/downloads/products/matrice-350-rtk>.
18. Gu, H. et al. (2017). Development and experimental verification of a hybrid vertical take-off and landing (VTOL) unmanned aerial vehicle(UAV). *2017 International Conference On Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, FL, USA, 13–16 June 2017, P. 160–169. DOI: 10.1109/icuas.2017.7991420.
19. Zong, J. et al. (2021). Evaluation and comparison of hybrid wing VTOL UAV with four different electric propulsion systems. *Aerospace*, Vol. 8, No. 9, P. 256. DOI: 10.3390/aerospace8090256.
20. Puri, V., Nayyar, A., Raja, L. (2017). Agriculture drones: a modern breakthrough in precision agriculture. *Journal of statistics and management systems*, Vol. 20, No. 4, P. 507–518. DOI: 10.1080/09720510.2017.1395171.
21. Elamin, A., Abdelaziz, N., El-Rabbany, A. (2022). A GNSS/INS/LiDAR Integration Scheme for UAV-Based Navigation in GNSS-Challenging Environments. *Sensors*, Vol. 22, No. 24, P. 9908. DOI: 10.3390/s22249908.
22. Mehmet Tuğrul, K. (2023). Drone technologies and applications. *Drones – various applications*, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.1001987.
22. Mehmet Tuğrul, K. (2023). Drone technologies and applications. *Drones – various applications*. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.1001987.
23. Al-Darraji, I. et al. (2021). A technical framework for selection of autonomous UAV navigation technologies and sensors. *Computers, materials & continua*, Vol. 68, No. 2, P. 2771–2790. DOI: 10.32604/cmc.2021.017236.
24. Baldini, F., Anandkumar, A., Murray, R. M. (2020). Learning pose estimation for UAV autonomous navigation and landing using visual-inertial sensor data. *2020 American Control Conference (ACC)*, Denver, CO, USA, 1–3 July 2020, P. 2961–2966. DOI: 10.23919/acc45564.2020.9147400.
25. Wen, W. et al. (2021). Factor graph optimization for GNSS/INS integration: A comparison with the extended Kalman filter. *Navigation*, Vol. 68, No. 2, P. 315–331. DOI: 10.1002/navi.421.
17. Matrice 350 RTK – Download-Center – DJI. *DJI Official*. URL: <https://www.dji.com/global/downloads/products/matrice-350-rtk>.
18. Gu H. et al. Development and experimental verification of a hybrid vertical take-off and landing (VTOL) unmanned aerial vehicle(UAV). *2017 International Conference On Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, FL, USA, 13–16 June 2017, P. 160–169. DOI: 10.1109/icuas.2017.7991420.
19. Zong J. et al. Evaluation and comparison of hybrid wing VTOL UAV with four different electric propulsion systems. *Aerospace*. 2021. Vol. 8, No. 9. P. 256. DOI: 10.3390/aerospace8090256.
20. Puri V., Nayyar A., Raja L. Agriculture drones: a modern breakthrough in precision agriculture. *Journal of statistics and management systems*. 2017. Vol. 20, No. 4. P. 507–518. DOI: 10.1080/09720510.2017.1395171.
21. Elamin A., Abdelaziz N., El-Rabbany A. A GNSS/INS/LiDAR Integration Scheme for UAV-Based Navigation in GNSS-Challenging Environments. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 24. P. 9908. DOI: 10.3390/s22249908.
22. Mehmet Tuğrul K. Drone technologies and applications. *Drones – various applications*. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.1001987.
23. Al-Darraji I. et al. A technical framework for selection of autonomous UAV navigation technologies and sensors. *Computers, materials & continua*. 2021. Vol. 68, No. 2. P. 2771–2790. DOI: 10.32604/cmc.2021.017236.
24. Baldini F., Anandkumar A., Murray R. M. Learning pose estimation for UAV autonomous navigation and landing using visual-inertial sensor data. *2020 American Control Conference (ACC)*, Denver, CO, USA, 1–3 July 2020. P. 2961–2966. DOI: 10.23919/acc45564.2020.9147400.
25. Wen W. et al. Factor graph optimization for GNSS/INS integration: A comparison with the extended Kalman filter. *Navigation*. 2021. Vol. 68, No. 2. P. 315–331. DOI: 10.1002/navi.421.

HULA VADYM

PhD Student,

Department of Computer Engineering and Electronics,
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0007-3336-8644>

E-mail: vadym.hula.22@pnu.edu.ua

HRYHA VOLODYMYR

PhD, Associate Professor,

Department of Computer Engineering and Electronics,
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-5458-525X>

E-mail: volodymyr.gryga@pnu.edu.ua

HULA V. S., HRYHA V. M.

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF THE ART OF SENSORS FOR INERTIAL NAVIGATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Purpose. To investigate the current state of inertial sensors for navigation of unmanned aerial vehicles (UAVs), analyse their advantages, disadvantages, methods of error correction and integration with other navigation systems, as well as identify development prospects and current trends in this area.

Methodology. A systematic review of scientific literature, technical documents and studies related to various types of inertial sensors, their application in UAV navigation, and data fusion methods was conducted. A comparative analysis of modern technologies and methods to sensor integration is used.

Findings. The main types of inertial sensors, their advantages and disadvantages are identified, and the most effective methods of error correction and integration with other systems are revealed. Modern trends, such as the use of artificial intelligence, the development of microelectromechanical systems and the emergence of new types of sensors that contribute to the accuracy and reliability of UAV navigation, are investigated. Particular attention is paid to the integration of inertial measurement units (IMUs) with other navigation sensors, such as the Global Navigation Satellite System and visual sensors, to ensure more reliable and accurate navigation. Error correction methods, such as the Kalman filter and adaptive filters, used to improve the accuracy of navigation systems are systematised.

Originality. For the first time, the types of inertial sensors are systematized and analyzed, and data on their advantages and disadvantages in the context of navigation requirements in modern UAV navigation systems are determined.

Practical value. The results obtained can be used to improve UAV navigation systems, increase their reliability and accuracy. Recommendations for the selection and integration of sensors will contribute to the development of new technologies in the field of unmanned aerial vehicles.

Keywords: UAV; navigation; sensor; gyroscope; accelerometer; inertial measurement unit; global navigation satellite system; sensor fusion.