

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ДОЛІНЦЕ Богдан Ігорович



УДК 004.051:623.746-519(043.5)

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ  
ІНФОРМАЦІЇ В БОРТОВИХ ПІДСИСТЕМАХ БПЛА**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**КИЇВ – 2024**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**ЖУКОВ Ігор Анатолійович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ОПАНАСЕНКО Володимир Миколайович**,  
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН  
України, завідувач відділу № 205  
мікропроцесорної техніки;

доктор технічних наук, професор  
**ЧЕМЕРИС Олександр Анатолійович**,  
Інституту проблем моделювання в енергетиці ім.  
Г.Є. Пухова НАН України,  
заступник директора з наукової роботи.

Захист відбудеться «5» липня 2024 року об «13:00» годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.07 Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1, ауд. 5-207.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1 та на сайті Національного авіаційного університету: <https://er.nau.edu.ua/>.

Автореферат розісланий «5» червня 2024 року.

**Вчений секретар**  
спеціалізованої вченої ради



**С. О. Кудренко**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасний світ зіткнувся із інтенсивним розвитком безпілотних систем та стрімким зростанням кількості їх експлуатантів. Сьогодні такі системи експлуатуються в комерційних, рекреаційних та безпекових цілях. Насичення повітряного простору безпілотними літальними апаратами (далі – БпЛА) висуває нові вимоги до точності позиціонування та якості їх систем обробки інформації, в тому числі в умовах складної міської забудови та повітряному просторі. Це змушує науковців шукати способи вдосконалення систем позиціонування та покращення технічних характеристик БпЛА для виконання складних завдань.

Зростання кількості джерел та обсягів даних, їх обробка в реальному часі вимагає вдосконалення існуючих систем та компонентів дронів. Сучасна наука зосереджена на розробці нових методів та засобів підвищення точності обробки інформації в бортових підсистемах БпЛА, що забезпечують швидкість, надійність та ефективність обробки інформації щодо позиціонування в просторі.

Вагомий внесок у вирішенні теоретичних і практичних задач обробки інформації про позиціонування внесли українські науковці В. Мелешко, В. Грабчак, О. Нестеренка, американські – Х'ю Елкайм, М. Брайсон, С. Суккаріє, Когуре, Т. Хамфріс, канадські – М. Ельгамраві, М. Караїм та ін.

Відомо, що інтеграція різних систем позиціонування може значно підвищити точність визначення параметрів руху. Проте, несумісність між системами та різна частота оновлення інформації може викликати додаткові похибки в обробці інформації.

Використання інерціально-супутникових методів в сучасних бортових підсистемах БпЛА вимагає глибокого розуміння їх взаємодії та інтеграції. Це стає особливо важливим, коли мова йде про обробку інформації для точного позиціонування безпілотних апаратів. В цьому контексті, виникає актуальне наукове завдання в галузі обробки інформації щодо позиціонування об'єкта в просторі: розробка методів підвищення ефективності бортових підсистем позиціонування БпЛА в умовах різних викликів.

Дана робота спрямована на вивчення та розробку нових підходів підвищення ефективності безпілотних систем, зокрема, на базі інноваційних технологій та компонентів. Основна задача дослідження полягає у створенні оптимальних алгоритмів обробки даних, які б дозволили забезпечити високу продуктивність та надійність роботи комп'ютерних систем.

Однією з ключових задач обробки інформації про позиціонування БпЛА при використанні множинних джерел даних є розробка комплексних підсистем позиціонування. Це досягається за допомогою методів компенсації або оптимальної фільтрації похибок вимірювань, що дозволяє отримувати дані про положення та забезпечувати вищу стабільність роботи бортових підсистем. Фільтр Калмана є механізмом для оптимального злиття даних з кількох джерел.

Дана робота пропонує підхід “багатошарової системи систем”, який обробляє інформацію з різних джерел, включаючи супутники низької земної орбіти (LEO), системи глобального позиціонування (PNT) та автономні

інерціальні підсистеми користувача (INS). Даний комбінований підхід дозволяє побудувати модель робастної інерціальної багатосупутникової підсистеми позиціонування (LeGNSS) для БпЛА. Робастність обробки інформації про позиціонування характеризує здатність підсистеми адаптуватися, бути стійкою та забезпечувати надійну обробку інформації в умовах невизначеності, або впливу зовнішніх перешкод, мінімізувати вплив помилок у вхідних даних і гарантувати її безперебійну роботу.

**Зв'язок роботи з науковими темами, планами та програмами.** Дослідження та розробки, узагальнені у роботі, виконувались у рамках науково-дослідної роботи НДР №54-2022/09.01.04 (протокол Кафедри КСМ НАУ №13 від 07.09.2023 р.) «Технології створення високопродуктивних захищених комп'ютерних систем» (2023 р.). Слід зазначити, що вибраний напрямок досліджень має тісний зв'язок із науковим напрямом 1.2.11.2. «Методи обробки супутникових даних» затвердженим в Постанові Президії НАН України від 10.01.2024 р. № 8 «Про Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2024-2028 роки».

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення точності обробки інформації щодо позиціонування в підсистемах, що використовуються в сучасних БпЛА, що працюють за рахунок більш точної оцінки похибки про позиціонування в отримуваній інформації від супутників. Для реалізації визначеної мети було поставлено такі *завдання*:

- аналіз методів та засобів обробки інформації про позиціонування, що використовуються в підсистемах БпЛА;
- обґрунтування вибору оптимальних методів та засобів підвищення точності обробки інформації про позиціонування в підсистемах БпЛА;
- розроблення методу злиття інформації в багатосупутникових підсистемах обробки інформації про позиціонування з використанням інформації від LEO-супутників;
- удосконалення методів оцінки сигналів похибок в компонентах підсистеми прийому та обробки даних;
- удосконалення методів визначення позиціонування з фільтрацією високочастотних похибок та адаптацією до постійних похибок, а також здійсненням контролю за цілісністю даних, що надходять до підсистем БпЛА;
- удосконалення методики урахування похибок багатосупутникових систем, що виникають у складних умовах функціонування;
- розроблення методів та засобів комп'ютерного моделювання процесу обробки даних про позиціонування із підвищеними характеристиками точності;
- вдосконалення методики моделювання інерціальної та багатосупутникової системи позиціонування з оптимальною фільтрацією;
- аналіз ефективності застосування розроблених методів та засобів шляхом оцінки точності обробки даних про позиціонування БпЛА в складних умовах функціонування.

**Об'єктом дослідження** є процес обробки інформації про позиціонування в бортових підсистемах БпЛА.

**Предметом дослідження** виступають методи та засоби обробки інформації, спрямовані на підвищення точності та покращення якості інформації про позиціонування в бортових підсистемах БпЛА.

**Методи дослідження.** При проведенні досліджень було використано наступні методи проведення досліджень: при проведенні аналізу моделей підсистем позиціонування, що впливають на ефективність їх функціонування – методи спостереження та порівняння; при постановці наукового завдання та виборі методів його вирішення – методи порівняння, теорії ефективного інструментального забезпечення, математичного моделювання та теорії первинних і вторинних системних перетворень інформації; при розробленні методів підвищення ефективності підсистем позиціонування в умовах невизначеності – методи аналізу і синтезу, теорії організації та вдосконалення систем обробки інформації, математичного моделювання, дискретної оптимізації, теорії статистичних оцінок та теорії статистичного моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що в дисертації розроблено наукові положення та сформульовано практичні рекомендації, що вирішують важливе наукове завдання з підвищення точності обробки інформації про позиціонування в бортових підсистемах БпЛА. У результаті дослідження:

*уперше:*

– розроблено метод злиття інформації для багатосупутникової обробки інформації про позиціонування на базі методів оптимальної обробки інформації та прямої корекції помилок з використанням інформації від LEO-супутників, який дозволяє підвищити стійкість процесу обробки інформації та точність визначення позиціонування;

*удосконалено:*

– методику оцінювання інформації за одним вимірювальним каналом про позиціонування, який, на відміну від відомих підходів, враховує оцінку значення параметрів шляхом злиття інформації від LEO-супутників та відомих бортових підсистем позиціонування БпЛА (GNSS та INS) та дозволяє в реальному часі обробляти надлишкову інформацію, а також отримувати точні дані про позиціонування (похибка позиціонування  $\sim 3,12$  м, похибка визначення швидкості  $\sim 0,2$  м/с);

*набуло подальшого розвитку:*

– застосування методу комплексної обробки інформації з оптимальною та адаптивною фільтрацією похибок позиціонування з використанням програмних алгоритмів відфільтрування високочастотних похибок та адаптації до впливу постійних похибок, який на відміну від існуючих методів відрізняється тим, що враховує пікові відхилення похибок по точності позиціонування (підвищено точність на 9 %);

– застосування методу комплексного оброблення інформації в підсистемах позиціонування БпЛА, який на відміну від відомих відрізняється тим, що враховує оцінку цілісності даних в багатосупутниковій підсистемі позиціонування LeGNSS за допомогою розробленого алгоритму оцінки цілісності отримуваної інформації та дає можливість здійснювати постійний контроль за даними, що обробляються в підсистемі позиціонування БпЛА

(перехід в робочий режим роботи за 2-5с після ініціалізації).

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у наступному:

– Синтезовано математичну модель інтегрованої LeGNSS, яка підвищує стійкість процесу визначення позиціонування БПЛА та дає більш точні їх значення, з часом перехідного процесу менше 5 с;

– Синтезовано математичну модель комплексної обробки інформації в LeGNSS з оптимальною фільтрацією похибок вимірювань, що підвищує робастність визначення параметрів позиціонування за рахунок відфільтрування високочастотних похибок та адаптації до постійних похибок, що дозволило обмежити пікові відхилення точності;

– Запропоновані схеми комплексування, які дозволяють в реальному часі обробляти надлишкову інформацію в БПЛА та отримувати точні дані про позиціонування з похибкою  $\sim 3,12$  м, та про швидкість з похибкою  $\sim 0,1-0,2$  м/с;

– Процес комплексного оброблення інформації в LeGNSS виходить на робочий режим роботи менше ніж за 1 с, що відповідає сучасним вимогам;

– Синтезовані схеми реалізовано у середовищі пакету математичного моделювання Matlab, що дає можливість проводити широкий спектр досліджень властивостей запропонованих схем та алгоритмів;

– Запропоновані схеми комплексного оброблення даних про положення дозволяють застосувати супутники низької земної орбіти, призначених для надання послуг швидкісного Інтернет зв'язку, через використання технологій мобільного супутникового швидкісного обміну даними, що робить їх оптимальними для забезпечення одночасного точного позиціонування та обміну інформацією без обмежень по відстані до пункту управління;

– Результати дисертаційного дослідження впроваджено у діяльності ГС «Бізнес інкубатор груп. Україна», ГС «Українська авіатранспортна асоціація», Всеукраїнському центрі реформ транспортної інфраструктури, Асоціації «КОСМОС».

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні обґрунтування, практичні рекомендації, висновки та надані пропозиції в роботі отримані здобувачем у процесі дослідження самостійно. В роботах підготовлених у співавторстві, автору належить наступне: у роботі [1] було проведено визначення параметрів елементів для корекції комплексної інерціально-супутникової системи позиціонування із корекцією; у роботі [2] виконано синтез схеми комплексної інерціально-супутникової системи позиціонування з корекцією в середовищі Simulink, проведено дослідження похибок системи у динамічному режимі роботи; у роботі [3] описано типові похибки оцінки параметрів інтегрованої системи позиціонування; у роботі [4] проведено дослідження параметрів точності інтегрованої системи позиціонування, а також аналіз похибок системи в статичному та динамічному режимах роботи; у роботі [5] розглянуто схему інтеграції інерціальної та супутникової систем позиціонування з одночасним використанням корекції та оптимальної фільтрації; у роботі [6] виконано аналіз оцінки ризиків обробки недостовірних даних в бортових системах; у роботі [7] виконано аналіз архітектури інтегрованої системи позиціонування на основі GNSS з фільтрацією Калмана та алгоритмом виявлення несправностей; у роботі

[8] розглянуто підхід «багатошарової системи систем», що виконує обробку інформації з різних джерел, включаючи супутники на низькій навколосемній орбіті, наземні системи позиціонування та бортові датчики; у роботі [9] проведено дослідження робастної підсистеми LeGNSS яка інтегрує дані супутників LEO з GNSS та бортовими інерціальними системами; у роботі [10] запропоновано метод комплексної обробки даних позиціонування БпЛА, що включає алгоритм компенсації похибок та оптимальну фільтрацію інформації.

**Апробація результатів дисертації.** Висновки, рекомендації та результати дослідження, отримані в дисертації, оприлюднені на наукових та науково-практичних конференціях, у тому числі міжнародних, всеукраїнських та за міжнародною участю: «Проблеми навігації і управління рухом» (Київ, 2012); «Політ. Сучасні проблеми науки» (Київ, 2012; 2013; 2015); «Сучасні проблеми авіакосмічних технологій та систем» (Житомир, 2013); «Aviation in the XXI Century. Aviation Security and Space Technology» (Київ, 2016; 2022); «Комп'ютерні системи та мережні технології» (Київ, 2023) та «Dependable Systems, Services and Technologies» (Афіни, 2023).

**Публікації.** Основні положення та результати дослідження викладено в 19 наукових працях, із них: 7 статей опубліковано у виданнях, включених до переліку фахових категорії Б ДАК МОН [1-2,4,6-8,10], 3 – в зарубіжних наукових виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus [3,5,9]; 8 тез доповідей – у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій різного рівня [12-19]. Отримано авторське свідоцтво на комп'ютерну програму [20].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація логічно викладена та складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації 215 сторінок, із них 135 сторінок основного тексту. Робота включає 3 таблиці, 40 рисунків, 5 додатків. Список використаних джерел налічує 210 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі надано обґрунтування актуальності теми дисертації, проведено аналіз її наукової розробленості, встановлено предмет і об'єкт вивчення, визначено завдання дослідження, визначено основні методи, а також визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів дослідження, розкрито зв'язок цієї роботи із науковими програмами та планами, наведено інформацію про публікації по темі роботи та апробацію результатів дослідження.

У **першому розділі** виконано аналіз сучасних методів обробки інформації позиціонування, що використовуються в підсистемах БпЛА.

Сформульовано необхідні критерії та вимоги для забезпечення своєчасного та точного позиціонування БпЛА. Визначено основні напрями розвитку сучасних методів обробки інформації про позиціонування і можливості автономного отримання інформації про координати БпЛА. Аналіз сучасних підсистем позиціонування показав доцільність розроблення підходів, котрі дають змогу отримувати та обробляти як відомі, так і нові джерела інформації про позиціонування для побудови та розвитку точних засобів позиціонування.

Визначено особливості функціонування підсистем позиціонування та їх основні складові. Приведено класифікацію основних тактико-технічних характеристик існуючих засобів позиціонування для БПЛА. Визначено якісні показники під час обробки інформації в інформаційних підсистемах БПЛА та допустимі умови експлуатації.

Розглянуто методи обробки інформації в підсистемах БПЛА, котрі дають змогу підвищувати точність та надійність отримуваної інформації про позиціонування при високих швидкостях переміщення та в умовах впливу зовнішніх чинників. Підходи підвищення точності обробки інформації в бортових підсистемах позиціонування демонструють широкий спектр рішень, які можуть мати засобів протидії до перешкод та завад, такі як метод компенсації, найменших квадратів, фільтрації, оптимальної обробки інформації, метод максимальної правдоподібності та інші.

При поєднанні різних джерел даних про позиціонування та використання декількох підходів обробки інформації про позиціонування при використанні методів компенсації та оптимальної фільтрації, можливо досягнути високої швидкості та надійності отриманої інформації. Висока точність забезпечує надійне глобальне позиційне рішення і має глибокі наслідки для секторів економіки, що залежать від точності позиціонування, включаючи авіацію, морські перевезення, наземний транспорт та автономні дрони.

Описано основні недоліки та обмеження розглянутих підходів. Сформовано основні задачі дослідження, визначені оптимальні методи обробки інформації про позиціонування в підсистемах БПЛА. Визначено основні напрями дослідження та сформовані основні його завдання.

У **другому розділі** проведено порівняльний аналіз засобів обробки інформації з кількох джерел в підсистемах позиціонування БПЛА.

Розглянуто існуючі схеми об'єднання GNSS та INS, які широко підтримується, як перспективний та бюджетний підхід до підвищення точності та надійності в розробці рішень щодо позиціонування. Як правило в таких випадках розглядається використання методу фільтра Калмана для об'єднання систем GPS та INS із слабким зв'язком. Існуючі дослідження також розглядають можливість використання геостаціонарних супутників, як джерело інформації для підвищення точності інформації про місцезнаходження об'єкта. Такий підхід дозволяє зменшити вплив завад у мульти-частотних та багатосупутникових системах позиціонування. Процес такої інтеграції часто є складним. Тому було розглянуто використання надлишкової інформації та удосконаленого методу обробки інформації для підвищення завадостійкості.

Складено схему класифікації підходів до побудови інтегрованих систем позиціонування, що показала велику різноманітність існуючих методів та засобів які можуть бути використані в побудові сучасних підсистем позиціонування. Інтеграція INS/GNSS підходить для багатьох застосувань. Найбільш перспективним виглядає підхід використання архітектури багато-супутникових систем позиціонування, що полягає у використанні сильних сторін окремих супутникових систем і компенсації їхніх слабкостей. Крім того, введено метод корекції зворотного зв'язку, щоб протидіяти зниженню точності протягом часу.



На основі аналізу вибрано оптимальні засоби підвищення ефективності комплексної підсистеми позиціонування, через включення компенсуючого зворотнього зв'язку в інтегровану систему та оптимальної фільтрації. Обґрунтовано вибір синтезованої моделі обробки даних, що дозволяє домогтися робастності перехідних процесів під час функціонування системи.

Супутникові служби позиціонування, що покладаються виключно на супутники середньої навколоземної орбіти, є недостатніми для вимог, що обговорюються в цій роботі. Тому нашим завданням є перехід до комплексного підходу "багатопарової системи систем". Такий підхід дозволить посилити сигнали з GNSS сигналами з LEO супутників та інформацією з підсистеми інерціального позиціонування.

Оскільки сигнали GPS слабкі та сприйнятливі до перешкод, вони часто стають ненадійними в певних місцях, наприклад у приміщеннях або в глибоких "міських каньйонах". Крім того, сигнали GNSS можна підробити, що створює серйозні ризики для безпеки в критично важливих для безпеки сферах застосування, таких як авіація та безпілотні системи.

Обґрунтовано доцільність використання схеми LeGNSS в бортових підсистемах БПЛА. Дана система дозволяє інтегрувати, на ряду із вже класичними GNSS, вже відомі нові супутникові угруповання, такі як SpaceX (4487 супутників), OneWeb (720 супутників) і Telesat (117 супутників).

Обраний підхід дозволяє побудувати систему із надзвичайною робастністю та точністю інформації про позиціонування. Велика кількість супутників забезпечує кращу геометрію визначення координат, ніж GPS, і дозволяє використовувати дешевші приймачі отримуючи вищу точність інформації про позиціонування.

У **третьому розділі** проведено синтез схеми комплексування інерціальної та супутникової систем позиціонування з інтеграцією даних від низькоорбітальних супутників та виконано аналітичне і комп'ютерне дослідження запропонованої схеми комплексування.

Були визначені критерії робастності обробки інформації та межі допустимих похибок у розробленій підсистемі БПЛА, а також розроблено методи для їх виявлення та корекції. Вирішення завдань, пов'язаних з виявленням збоїв або зовнішніх перешкод, було реалізовано через діагностику з використанням інструментів машинного навчання, що дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів системи та гарантують виявлення сторонніх даних, що не відповідають набору прогнозованих значень інформації про позиціонування.

Основна ідея пропонованого рішення – подолати відому проблему дрейфу інерціальної системи за допомогою обраного фільтра Калмана, інтелектуального алгоритму виявлення збоїв та набору надлишкових джерел інформації.

Було обрано підхід використання псевдо реальних даних під час моделювання, для того, щоб збалансувати використання наявних даних та керуваність симульованого середовища. Для підвищення реалістичності експериментів було використано пакет математичного моделювання Matlab. Цей інструмент допоміг згенерувати квазіреальні динамічні траєкторії, які точно імітують реальні рухи БПЛА та поведінку супутників, дозволяючи при цьому

контрольоване введення змінних, таких як зовнішні перешкоди і завади.

Сценарії моделювання відтворюють різноманітні аспекти польоту БпЛА, включно з плануванням маршрутів, реагуванням на управлінські сигнали, динамікою польоту та функціонуванням систем позиціонування. Методи оптимальної фільтрації, як фільтра Калмана, застосовуються для оцінки станів системи на основі зашумлених вимірювань. Ці методи базуються на теорії ймовірностей та статистичних моделях для корекції похибок вимірювань та прогнозування майбутніх станів системи.

Використання методу оптимальної обробки інформації сприяє підвищенню точності позиціонування шляхом ефективного усунення високочастотних похибок в отримуваній від супутникових джерел інформації.

При об'єднанні даних з декількох систем, таких як GPS, LEO та INS, залежності та взаємодії між цими системами можуть бути представлені за допомогою математичних формул. Інформація щодо позиціонування, отримане від кожної із систем, можна визначити як  $P_{GPS}$ ,  $P_{LEO}$  та  $P_{INS}$ .

Об'єднана позиція  $P_{LeGNSS}$  (1) може бути середньозваженим значенням позиціонування від кожної системи:

$$P_{LeGNSS} = w_{GPS} \cdot P_{GPS} + w_{LEO} \cdot P_{LEO} + w_{INS} \cdot P_{INS}, \quad (1)$$

де  $w$  – ваговий коефіцієнт (рівень достовірності) оцінки позиції для системи.

Для контролю роботи системи складено дерево моніторингу ризиків цілісності інформації в підсистемі позиціонування БпЛА. Таким чином, динамічно коригується підмножина несправностей, яку необхідно контролювати, відповідно до фактичної ситуації з використанням багатьох джерел інформації. Для реалізації такого контролю запропоновано алгоритм внутрішнього контролю цілісності підсистеми позиціонування.

Інтеграція декількох джерел інформації базується на використанні фільтра Калмана, що дозволяє синтезувати модель підсистеми. У цій моделі мінімально можлива одиниця несправності, ідентифікована на рівні підсистеми та її компонентів, визначається як окреме джерело даних.

Похибка оцінки позиціонування обраних систем може бути представлена як  $e_{GPS}$ ,  $e_{LEO}$  та  $e_{INS}$ . Сукупна похибка  $e_{LeGNSS}$  є функцією окремих похибок:

$$e_{LeGNSS} = f(e_{GPS}, e_{LEO}, e_{INS}). \quad (2)$$

Фільтр Калмана забезпечує механізм (3) для оптимального об'єднання інформація з кількох джерел. Рівняння визначення стану системи за наявності декількох джерел інформації має вигляд:

$$\widehat{P}_{k|k} = \widehat{P}_{k|k-1} + K_k \sum_i [z_{k,i} - H_i \widehat{P}_{k|k-1}] \quad (3)$$

де  $z_{k,i}$  – вимірювання з  $i$ -ї системи, а  $H_i$  – модель спостереження для цієї системи. Крім того, інформація про швидкість і прискорення з кожної із систем також можуть бути об'єднані.

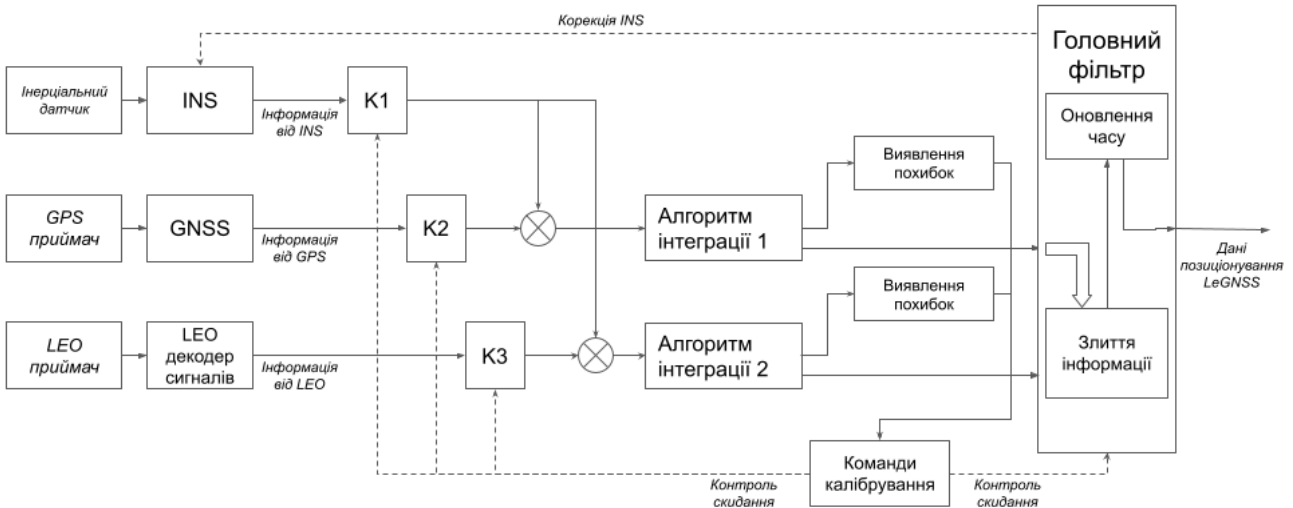
При об'єднанні інформації з декількох систем (4), об'єднана інформація про позиціонування може бути представлено як:

$$D_{LeGNSS} = \alpha \cdot D_{GPS} + \beta \cdot D_{LEO} + \gamma \cdot D_{INS}, \quad (4)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – коефіцієнти злиття, які визначають внесок від кожної системи при об'єднанні інформації. Наведені вище формули відображають залежності та взаємодію при об'єднанні даних GPS, LEO та INS.

У **четвертому розділі** проведено дослідження робастної LeGNSS підсистеми позиціонування з корекцією та оптимальною фільтрацією похибок вимірювань, що забезпечує обробку надлишкової інформації щодо позиціонування БПЛА, виведенню рівняння фільтру для комплексної LeGNSS з корекцією, проведенню комп'ютерного дослідження синтезованої схеми та запропонованого методу комплексування інформації.

Для реалізації даного задуму було запропоновано схему комплексування із використанням підсистеми позиціонування LeGNSS з корекцією та оптимальною фільтрацією похибок вимірювань, що представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема комплексної LeGNSS з оптимальною фільтрацією.

Для аналізу запропонованої моделі підсистеми позиціонування LeGNSS в Matlab було створено масиви даних про позиціонування БПЛА для відпрацювання місій, масиви даних середньоквадратичних значень похибок позиціонування для супутникових джерел інформації, масиви даних середньоквадратичних значень похибок позиціонування для інерціального джерела інформації, тощо. Для наближення умов моделювання до природніх, було створено масиви псевдо реальних даних, які визначають зовнішній динамічний вплив рози вітрів на процес моделювання польоту БПЛА.

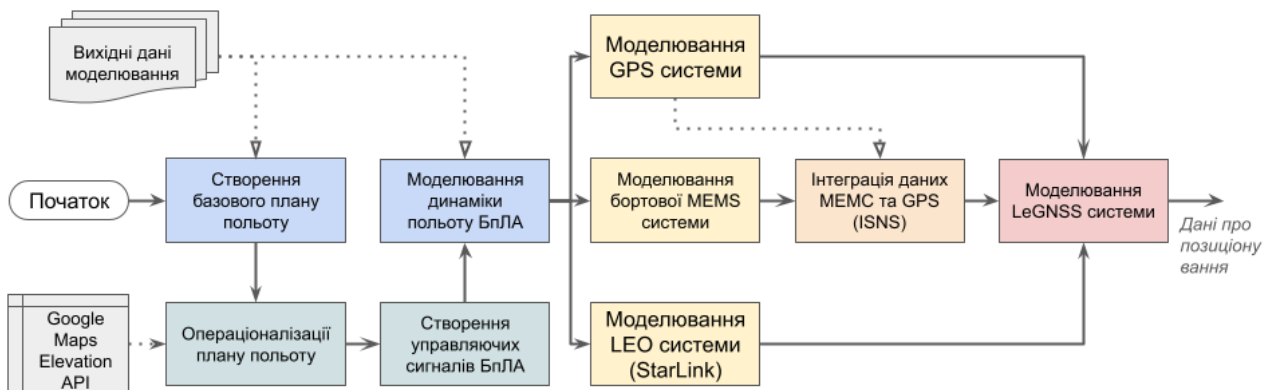
Для аналізу точності сигналів бюджетних приймачів, що приблизно відповідають рівню точності приймачів в смартфонах, було створено масив тестових даних позиціонування та використано середньоквадратичні похибки псевдодальностей для систем MEMS, GPS і LEO, та виконано порівняння їх значення для різних діапазонів прийому сигналів позиціонування. На вхід

головного фільтру подається сума оцінок похибок MEMS системи, GNSS системи та виміряні дані позиціонування від LEO супутникової мережі, що є результатом компенсації істинного сигналу положення.

На виході алгоритму інтеграції першого порядку формується оптимальна оцінка похибок кожної системи  $S'_{MEMS+GPS}$ ,  $S'_{LEO+GPS}$  та  $S'_{LEO+MEMS}$ , яка потім використовується для статистичної оцінки фактичного положення БПЛА, в результаті чого підвищується точність визначення положення. На виході алгоритму інтеграції другого порядку ми отримуємо статистичну оцінку положення БПЛА за вирахуванням раніше оцінених похибок позиціонування.

Для проведення такого моделювання було розроблено алгоритм (рис. 2), який відображає послідовність кроків для моделювання роботи бортових підсистем БПЛА. Алгоритм включає ініціалізацію даних, планування польоту, генерацію управлінських сигналів, та моделювання різних систем позиціонування. Кожен крок виконується за допомогою алгоритму, що забезпечує деталізоване відтворення процесів управління БПЛА.

Даний алгоритм призначений для моделювання роботи інтегрованої системи позиціонування LeGNSS для БПЛА. Він виконує послідовність кроків для імітації польоту БПЛА, використовуючи різні моделі позиціонування, такі як MEMS, GPS, системи LEO та LeGNSS.



**Рис. 2.** Логічна схема алгоритму моделювання інтегрованої багатошарової системи позиціонування LeGNSS в Matlab.

Під час моделювання динаміки польоту БПЛА, важливо врахувати аеродинамічні сили, зміни в густині повітря, та інші зовнішні фактори, такі як вітер та турбулентність, які впливають на рух апарату. Аеродинамічний опір під час польоту може бути точно змодельованим за допомогою рівняння (5):

$$F_{drag} = -\frac{1}{2}\rho C_d A v^2, \quad (5)$$

де  $\rho$  – густина повітря,  $C_d$  – коефіцієнт опору,  $A$  – площа поперечного перерізу, та  $v$  – швидкість. Дане рівняння дозволяє врахувати аеродинамічний опір повітря, для створення більш точної симуляції в різних умовах польоту. Це допомагає визначити оптимальні команди керування для БПЛА, щоб ефективно досягати заданих точок маршруту.

Використання інструментів Matlab для автоматизованого складання та візуалізації маршрутів польотів дозволяє детально планувати та оцінювати траєкторію БПЛА. Модель симуляції польоту БПЛА включає інтеграцію та обробку даних від декількох систем позиціонування, що забезпечує комплексний аналіз поведінки бортових підсистем в різних умовах. Використання псевдо реальних даних під час моделювання роботи інтегрованої системи позиціонування дозволило створити деталізовану 3D-модель польоту, що відображає реалістичну поведінку БПЛА.

Моделювання динаміки польоту вимагає використання рівнянь руху, зокрема Ньютона та Ейлера (6-7), дозволяє відтворити динаміку руху БПЛА.

$$\underline{r} = \frac{F}{m} - \underline{g}, \quad (6)$$

$$\underline{\omega} = I^{-1}(T - \omega \times (I \omega)), \quad (7)$$

де  $r$  – прискорення центру мас,  $F$  – момент сили,  $m$  – маса,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\omega$  – кутова швидкість,  $T$  – момент сил,  $I$  – тензор інерції.

Для цілей моделювання, дрейф гіроскопа та похибки акселерометра характеризуються експоненціальними функціями з значним періодом кореляції. Відповідно, вони можуть бути представлені за допомогою наступних диференціальних рівнянь:

$$\dot{\omega}_{др} = -\frac{1}{T_{\omega}} \omega_{др} + \frac{1}{T_{\omega}} q_{\omega}; \quad \Delta \dot{a} = -\frac{1}{T_a} \Delta a + \frac{1}{T_a} q_a, \quad (8)$$

де  $q$  – випадкова складова (білий шум),  $T_a, T_{\omega}$  – коефіцієнт часу кореляції.

Моделювання випадкових та систематичних (детермінованих) похибок датчиків, зокрема акселерометрів, гіроскопів і магнітометра, було згенеровано через модель похибки (9), яка враховує похибки що виникають через зміну температури, механічні напруження, електромагнітні перешкоди тощо.

$$\delta_{MEMS} = \delta_{bias}(t) + \delta_{scale} + \delta_{ortho} + \delta_{drift}(t) + \delta_{noise}(t), \quad (9)$$

де,  $bias$  – похибка зсуву з часом,  $scale$  – відхилення в масштабі даних датчика,  $ortho$  – похибка неортогональності осей датчика,  $drift$  – швидкість зміни дрейфу датчика з часом,  $noise$  – випадкові коливання вимірювань що не можуть бути передбачені або виправлені,  $(t)$  – функція часу (швидкість зміни).

Для застосування фільтра Калмана необхідно представити математичну модель оцінюваного процесу і модель вимірювань у стандартній формі.

$$X_t = A_t X_{t-1} + G(t)W(t), \quad (10)$$

Дане рівняння описує, як поточний стан  $X_t$  системи що еволюціонує з попереднього стану  $X_{t-1}$  через матрицю переходу станів  $A_t$ , з додаванням шуму

процесу  $W(t)$ , який моделюється через матрицю контролю  $G(t)$ .

Вектор оцінюваних станів підсистеми описується зв'язком, що встановлюється наступним рівнянням:

$$Z_t = H(t)X_t + V_t, \quad (11)$$

де,  $Z_t$  – вимірювання,  $H(t)$  – матриця спостережень, яка перетворює стан  $X_t$  в вимірювання,  $V_t$  – шум вимірювання, тоді отримаємо матрицю спостережень:

$$H = [1000 \ 0100 \ 0010 \ 0001]. \quad (12)$$

Коефіцієнти корекції фільтра Калмана, які знаходяться у результаті розв'язання рівняння Рикати, що описує оновлення коваріаційної матриці похибки оцінки, де  $Q$  – коваріаційна матриця шуму процесу:

$$P_t = A_t P_{t-1} + P_{t-1} A_t^T - P_{t-1} H_t^T R_t^{-1} H_t P_{t-1} + G Q G^T. \quad (13)$$

Коефіцієнти корекції фільтра Калмана, що використовуються для оновлення оцінки стану на основі нових вимірювань, розраховуються:

$$K_{\Phi t} = P_t H_t^T R_t^{-1}. \quad (14)$$

Дані рівняння дозволяють LeGNSS системі із фільтром Калмана ефективно інтегрувати нові вимірювання, оновлюючи оцінку стану системи та її невизначеність (або коваріацію), щоб мінімізувати загальну похибку. В процесі моделювання, було застосовано алгоритм калібрування датчиків, що призвело до загального зниження рівня похибок.

Моделювання та дослідження комплексної LeGNSS з оптимальною фільтрацією було виконано у дискретній формі в середовищі Matlab (R2024a). Для побудови плану висот польоту по маршруту використано Google Maps API та алгоритм операціоналізації плану польоту над поверхнею. Результати обробки інформації та отриманих оцінок позиціонування показано на рис. 3.

Для кількісної оцінки точності результату моделювання проведено багаторазове статистичне оцінювання з метою отримання дисперсії оцінки похибки комплексної LeGNSS підсистеми та порівняння отриманих даних із іншими підсистемами. На рис. 4 наведено графік зміни середньо-квадратичного значення оцінки похибки позиціонування (RMS), отримані за період випробування, в INS/GNSS (13) отриманий за рішенням рівняння Рикаті (21) фільтра Калмана та в LeGNSS отриманій шляхом оптимальної фільтрації даних з трьох підсистем БПЛА. Обидва графіки практично співпадають, що свідчить про високу якість процесу ідентифікації похибки LeGNSS, та достовірність проведеного статистичного моделювання.

Аналіз результатів роботи синтезованої комплексної LeGNSS представлено на рис. 4-5, які демонструють зміну похибки позиціонування та швидкості БПЛА для підсистеми LeGNSS та бортової INS/GNSS.

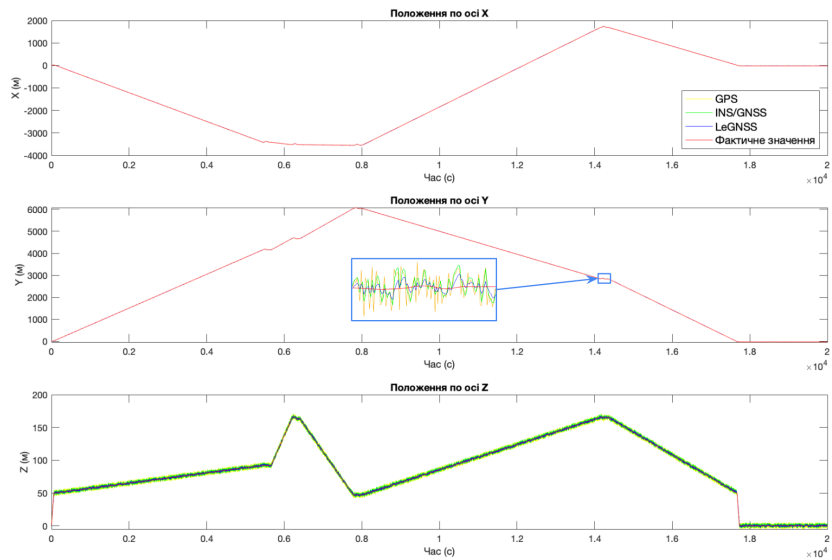


Рис. 3. Оцінка даних про позиціонування БПЛА протягом польоту.

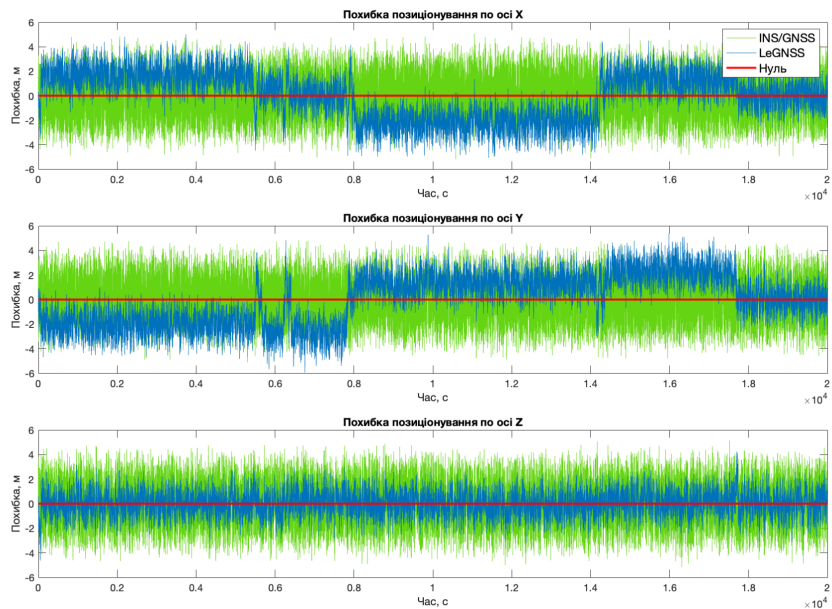


Рис. 4. Порівняння похибок систем по точності позиціонування.

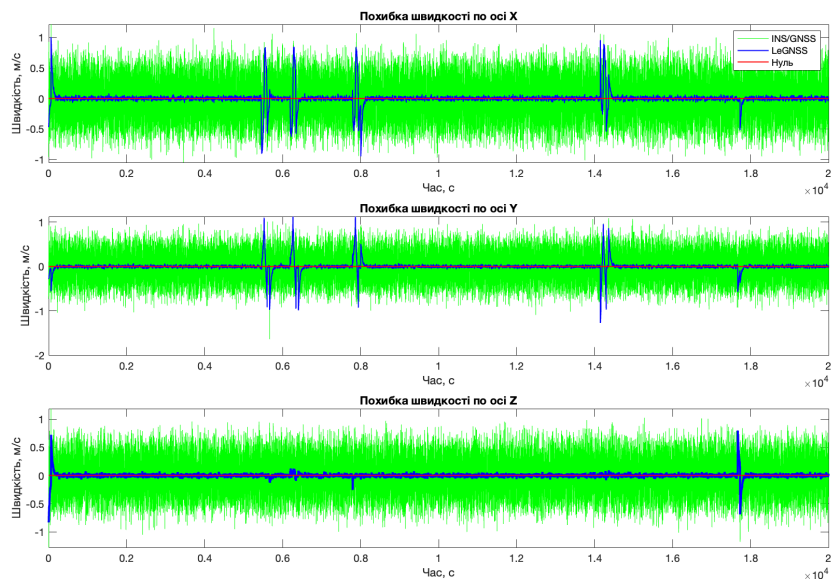


Рис. 5. Порівняння похибок систем по швидкості.

На початку періоду моделювання похибка має незначний сплеск, проте не виходить за допустимі межі та залишається відносно низькою протягом всього періоду моделювання, що свідчить про надійну ініціалізацію системи. Фактичну оцінку ефективності підвищення якості обробки даних про позиціонування в БПЛА було виконано використовуючи розрахунок значень RMS в трьохвимірному просторі, адже більшість супутникових систем позиціонування мають хорошу точність тільки в двовимірному просторі.

Для визначення точності роботи підсистем БПЛА було виконано оцінку якості обробки даних про позиціонування за допомогою розрахунку RMS в трьохвимірному просторі протягом всього часу моделювання польоту.

Рівняння (15) визначає 3D RMS похибку, що дає нам оцінку розсіювання вимірювань відносно істинного значення в трьох вимірах:

$$RMS_{3D} = \sqrt{RMS_x^2 + RMS_y^2 + RMS_z^2}. \quad (15)$$

Рівняння (16) визначає абсолютне значення RMS системи, що дає нам загальну оцінку значення похибки протягом часу моделювання:

$$RMS_{total} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (RMS(t)_{3D}^2)}, \quad (16)$$

Для отримання даних про точність, проведено збір даних протягом часу моделювання польоту та статистичні розрахунки значень. В результаті отримано оцінки RMS кожної із досліджуваних підсистем.

Дані моделювання продемонстрували ефективність обробки інформації про позиціонування в реальному часі. Незважаючи на окремі піки, загальний тренд кривих похибок є стабільним, що свідчить про робастність роботи синтезованої системи LeGNSS. Так, після перехідного процесу тривалістю  $\sim 60$  с значення похибок оцінки координат стабілізувалися і склали  $\sim 3,43$  м для порівнюваної інтегрованої INS/GNSS, а для синтезованої LeGNSS після перехідного процесу  $\sim 5-8$  с значення похибки склали  $\sim 3,12$  м.

Отримані розрахунки абсолютних середньоквадратичних значень оцінки похибок позиціонування для кожної із досліджуваних систем за результатами моделювання демонструють покращену точність LeGNSS підсистеми позиціонування у порівнянні із інтегрованою INS/GNSS підвищеної точності на  $-9,02\%$ , та на  $26,4\%$  у порівнянні з бортовим GPS приймачем.



## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання, яке дає можливість розв'язати важливу наукову проблему, що полягає в підвищенні ефективності оцінки інформації про позиціонування в бортових підсистемах БпЛА за рахунок використання надлишкових джерел інформації від декількох супутникових угруповань у поєднанні з бортовими засобами позиціонування та оптимальною фільтрацією інформації. Наукові та практичні результати отримані в дослідженні дають підстави сформулювати відповідні висновки та рекомендації:

1. Проведено систематизацію основних дослідницьких підходів та виконано всесторонній аналіз сучасних принципів та особливостей функціонування засобів підвищення ефективності оцінки інформації про позиціонування, який дав підстави аргументувати доцільність і можливість створення методу оптимальної обробки інформації в бортових підсистемах БпЛА із використанням даних супутників LEO, GNSS та бортових інерціальних засобів позиціонування.

2. Проведений огляд сучасних засобів позиціонування, який дозволив сформулювати головні завдання проведення дослідження і слабкі сторони існуючих бортових рішень для визначення позиціонування БпЛА. Виявлено і систематизовано ключові недоліки існуючих бортових рішень, що лягло в основу розробки нових методів оптимальної фільтрації інформації. Охарактеризовано сучасні методи обробки інформації в бортових підсистемах БпЛА про позиціонування, котрі дозволяють виконувати надання точної інформації про позиціонування в реальному часі.

3. Обґрунтовано вибір методів обробки інформації для підвищення точності обробки інформації про позиціонування, що включають оптимальну фільтрацію Калмана та засоби контролю цілісності системи, які дозволяють забезпечити робастність і точність визначення положення БпЛА в просторі.

Запропонований метод із новітньою комунікаційною системою LEO-супутників (StarLink) та Калманівського фільтра дозволяє суттєво знизити вплив шуму вимірювань і покращити точність оцінок позиціонування у порівнянні із раніше існуючими системами, що використовують бюджетні приймачі сигналів. Запропонована модель пропонує надійне, безперервне і точне рішення позиціонування.

4. Розроблено вдосконалений метод оптимальної фільтрації в системах позиціонування, який базується на використанні надлишковості джерел інформації про позиціонування, через злиття даних GNSS та LEO супутникових сузір'їв. Розробка цього методу базується на новаторському підході до використання надлишкових джерел інформації, що є значним кроком уперед у технології позиціонування, тим самим підтверджуючи наукову новизну. На основі даного методу запропонована модель інтегрованої робастної LeGNSS підсистеми позиціонування, що здатна в реальному часі обробляти інформацію.

5. Удосконалено методику оцінювання похибок позиціонування підсистеми прийому та обробки даних, яка базується на злитті даних, що виходить за межі існуючих підходів та демонструє зниження впливу випадкових

та детермінованих похибок датчиків супутникових даних та інерціальних приймачів інформації на результати оцінки положення БпЛА в просторі.

6. Запропоновано модель підсистеми для адаптивної обробки інформації в багатосупутниковій системі позиціонування з оптимальною фільтрацією для зниження впливу невизначеностей похибок системи в динамічних режимах роботи, що дозволило досягти рівня точності  $\sim 3,12$  м. Адаптивна обробка інформації в багатосупутниковій системі позиціонування дозволила застосувати механізми контролю цілісності отримуваної інформації та алгоритми компенсації впливу скомпрометованих джерел інформації.

7. Удосконалено методику оцінки та компенсації похибок позиціонування в багатосупутникових системах, за рахунок використання сучасних алгоритмів обробки інформації та зниження впливу похибок на отримувані дані щодо позиціонування, що дозволило скоротити час виходу підсистеми позиціонування на робочий режим до 5-8 с.

8. Проведено експериментальні дослідження та виконано аналіз ефективності роботи синтезованої LeGNSS підсистеми, які підтверджують підвищення ефективності обробки даних в БпЛА та демонструють на 9,02% вищу точність отримуваної інформації про позиціонування, у порівнянні із бортовою інтегрованою INS/GNSS системою, та на 26,4% у порівнянні з бортовою GPS системою.

Кращі результати в динамічних умовах роботи демонструють інтегровані INS/GNSS підсистеми, разом з тим запропонована LeGNSS підсистема перевершує існуючі конфігурації, особливо в складних динамічних умовах виконання автономних місій БпЛА. Таке покращення узгоджується з останніми публікаціями, що підкреслюють переваги підходу використання архітектури багатосупутникових систем позиціонування із сучасними LEO супутниками.

Висновки цього дослідження можуть бути застосовані в різних секторах, включаючи безпілотні авіаційні системи, що дозволяє підвищити безпеку, точність та операційну ефективність існуючих систем.

Дослідження припускає ідеалізовані умови прийому супутникового сигналу, які не завжди можуть відповідати реальним сценаріям використання. Моделювання похибок системи MEMS може не враховувати всі деталі дрейфів та зсуву вимірювання конкретних датчиків. Через воєнний стан в Україні збір даних був ускладнений, включаючи доступ до супутникових сигналів через потенційні обмеження (StarLink, тощо). У подальших дослідженнях можна аналізувати вплив складних факторів середовища на роботу LeGNSS, вивчити можливість розширення переліку супутникових систем або датчиків для підвищення точності інформації про позиціонування.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Праці, які відображають основні наукові результати дисертації:

1. Васильєв В.М., Рогожин В.О., Долінце Б.І. Схема комплексування інерціальної і супутникової навігаційних систем та її дослідження. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць*. Житомир: ЖВІ НАУ, 2013. Вип. 8. С. 20-25.
2. Васильєв В.М., Рогожин В.О., Долінце Б.І. Дослідження похибок інерціально-супутникової навігаційної системи. *Наука і техніка Повітряних сил Збройних сил України*. Харків: ХУПС, 2013. Вип. 3(12). С. 139-143.
3. Vasyliiev V.M., Rogozhyn V.O., Dolintse B.I. Integration of inertial and satellite navigation systems using corrective circuits for UAV. *Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. IEEE Xplore, 2015. P. 193-197. DOI: 10.1109/APUAVD.2015.7346597.
4. Vasyliiev V., Rogozhyn V., Dolintse B. Accuracy analysis of inertial-satellite navigation system Integrated with using corrective circuits. *Electronics and Control Systems*. 2015. Вип. 4(46). P. 46–51. DOI: 10.18372/1990-5548.46.9930.
5. Vasyliiev V., Dolintse B. Integration of Inertial and Satellite Navigation Systems with using Corrective Circuits and Filtering. *Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE Xplore, 2016. P. 275-278. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783160.
6. Dolintse B., Balakin S. Risk assessment in computer networks inherent in critical infrastructures. *Проблеми інформатизації та управління*. 2022. №2(70). P. 4-9. DOI: 10.18372/2073-4751.70.16840.
7. Dolintse B. Architecture of integrated navigation systems with enhanced coordinate accuracy and fault detection. *Проблеми інформатизації та управління*. 2023. Вип. 2(74). P. 31-37. DOI: 10.18372/2073-4751.74.17878.
8. Zhukov I., Dolintse B. Enhancing accuracy of information processing in onboard subsystems of UAVs. *Technology Audit and Production Reserves*. №5/2(73), 2023. P. 6–10. DOI: 10.15587/2706-5448.2023.287700.
9. Zhukov I., Dolintse B., Balakin S. Improving the Accuracy of Air Navigation Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. IEEE Xplore, 2023. P. 1-7. DOI: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416511.
10. Dolintse B. Robust LeGNSS positioning subsystem for UAV with correction and optimal filtering. *Проблеми інформатизації та управління*. 2023. №4(76). P. 10-16. DOI: 10.18372/2073-4751.76.18235.

**Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

11. Васильєв В.М., Рогожин В.О., Долінце Б.І. Моделювання та оптимізація параметрів інтегрованої інерціально-супутникової навігаційної системи з коригувальними ланцюгами. *Молодий вчений*. 2016. Вип. 7(34). С. 184-187.
12. Долінце Б.І. Вплив навігаційних похибок на прийняття рішень в системах попередження зіткнень літаків. *Політ. Сучасні проблеми науки: XII міжнар. науково-практ. конф. студентів та молодих учених, м. Київ, 4-5 квітня 2012 р.:* тези доп. Київ: НАУ, 2012. С. 30.
13. Долінце Б.І. Дослідження характеристик інерціально-супутникової навігаційної системи з коректорами в динамічних режимах роботи. *Політ. Сучасні проблеми науки: XIII міжнар. науково-практ. конф. студентів та молодих учених, м. Київ, 3-4 квітня 2013 р.:* тези доп. Київ: НАУ, 2013. С. 123.
14. Долінце Б.І. Сучасні методи та засоби обробки інформації в інтегрованих навігаційних системах літальних апаратів. *Політ. Сучасні проблеми науки: XV міжнар. науково-практ. конф. студентів та молодих учених, 8-9 квітня 2015 р.:* тези доп. Київ: НАУ, 2015. С. 25.
15. Dolintse B. Modern Trends and Issues of the Development and Improve the Accuracy of Navigation Systems for UAVs. В: *Safety in Aviation and Space Technologies: Proceeding of The Seventh World Congress “Aviation in the XXI-st Century”*, 19-21 вересня 2016, Kyiv. Vol.2. P. 59-62.
16. Zhukov I., Dolintse B., Balakin S. Using corrective circuits and filtering for integration of low-cost inertial and satellite navigation systems. *Safety in Aviation and Space Technologies: Proceeding of The Twenty Two World Congress “Aviation in the XXI-st Century”*, September 28-30, 2022, Kyiv. 2022. Vol.2.2. P. 8-12.
17. Долінце Б.І. Методи зменшення похибок інерціально-супутникової навігаційної системи. *Проблеми навігації і управління рухом: всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів, 28-29 листопада 2012, Київ. Тези доп. НАУ. 2012. С. 45.*
18. Васильєв В.М., Долінце Б.І. Інерціально-супутникові навігаційні системи для безпілотних літальних апаратів. *Сучасні проблеми авіакосмічних технологій та систем: науково-практичний семінар, 17–21 червня 2013, м. Житомир. Тези доп. НАУ. 2013. С. 6.*
19. Журавель Н.В., Долінце Б.І. Підвищення точності навігаційного сигналу за допомогою фільтру Калмана. *Збірник тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції “Комп’ютерні системи та мережні технології” (CSNT-2023)*, Київ, 13–14 квітня 2023. Київ: НАУ. 2023. С. 92–93.
20. А. с. №122052 Україна. Комп’ютерна програма «Система адаптивної обробки інформації в багатосупутниковій системі позиціонування LeGNSS» / Б. І. Долінце. 2023.

## АНОТАЦІЯ

**Долінце Б.І. Методи та засоби підвищення точності обробки інформації в бортових підсистемах БпЛА.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний авіаційний університет, Київ, 2024.

Дисертація зосереджена на розв'язанні важливого методологічного та науково-технічного завдання, що полягає у підвищенні ефективності обробки інформації в підсистемах позиціонування безпілотних літальних апаратів використовуючи методи злиття інформації від бортових та супутникових джерел інформації, а також методи корекції і обробки інформації.

Об'єктом досліджень є процес обробки інформації про позиціонування в комплексних підсистемах БпЛА, включаючи LEO, GNSS та MEMS.

Дослідження пропонує підхід “багатошарової системи систем”, яка інтегрує сигнали з різних джерел, включаючи LEO супутники низької земної орбіти, GNSS системи та бортові датчики користувача. Комбінований підхід синтезу робастної LeGNSS, використовує переваги кожного компонента, забезпечуючи резервування та підвищену точність позиціонування. Аналіз похибок показав, що запропонований метод перевершує традиційні GNSS системи, особливо в динамічних умовах експлуатації.

Покращення точності інтегрованої робастної підсистеми LeGNSS пов'язано з інтеграцією декількох супутникових систем різних типів з бортовою MEMS та застосуванням методів оптимальної обробки інформації. У дослідженні також використовувалося математичне моделювання для представлення залежностей та взаємодії при злитті інформації з різних джерел. Фільтр Калмана відіграє роль засобу для оптимальної обробки даних.

Висновки з цього дослідження можуть бути застосовані у різних секторах, включаючи безпілотні літальні апарати та сектор оборони. Висока точність позиціонування може значно підвищити безпеку, точність керування та оперативну ефективність. Проте дослідження виходить з ідеалізованих умов для прийому сигналів супутника, які не завжди можуть бути точними в реальних умовах. Подальші дослідження можуть дослідити вплив складних умов експлуатації та інтеграцію додаткових супутникових джерел або датчиків для подальшого покращення точності.

Було проведено комп'ютерне моделювання синтезованої робастної LeGNSS, та були отримані її характеристики. Пропонована модель підсистеми позиціонування продемонструвала покращені динамічні характеристики та показники точності позиціонування до існуючих систем.

**Ключові слова:** БпЛА, LeGNSS, INS, LEO супутники, обробка інформації, багатосупутникова система позиціонування, точне позиціонування, безпілотні літальні апарати.

## ABSTRACT

**Dolintse B.I. Methods and ways to improve the accuracy of information processing in the onboard subsystems of UAV.** – Qualification scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.13.05 – computer systems and components. – National Aviation University, Kyiv, 2024.

The dissertation is dedicated to enhancing the efficiency of positioning systems for unmanned aerial vehicles by using data fusion methods from onboard and satellite information sources, correction methods, and optimal information processing.

The object of research is the onboard subsystems of UAVs responsible for positioning, including LEO, GNSS and MEMS.

The research proposes a "multi-layered system of systems" approach, which integrates signals from various sources, including LEO satellites of low Earth orbit, GNSS systems, and onboard user sensors. The combined process of synthesizing a robust LeGNSS utilizes the advantages of each component, ensuring redundancy and enhanced positioning accuracy. Error analysis showed that the proposed method surpasses traditional GNSS systems, particularly in dynamic operating conditions.

The improved accuracy of the integrated robust LeGNSS subsystem is associated with integrating multiple satellite systems of various types with onboard MEMS and applying optimal information filtering methods. The study also used mathematical modeling to represent the dependencies and interactions when fusing information from various sources. The Kalman filter plays the role of a tool for optimal data processing.

The findings of this research have potential applications in several fields, notably in unmanned aerial vehicles and defense sectors. Enhanced positioning accuracy can significantly improve safety, navigation accuracy, and operational effectiveness. The study stands on idealized scenarios for satellite signal reception, which might not always reflect real-world situations. Future studies could analyse the effects of challenging operational environments and consider incorporating more satellite sources or sensors to achieve even greater precision in positioning sources or sensors for further improvements in accuracy.

Computer modeling of the synthesized robust LeGNSS was conducted, and its characteristics were obtained. The proposed positioning subsystem model demonstrated improved dynamic characteristics and positioning accuracy indicators compared to existing systems.

**Key words:** UAV, LeGNSS, INS, LEO satellites, information processing, multi-satellite positioning system, precision positioning, unmanned aerial vehicles.

Підп. до друку 30.05.2024.  
Формат 60x84/16. Обл.-вид. арк. 1,5. Ум.-друк. арк. 1,16.  
Наклад 100 пр. Папір офсетний.