

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КУЦЕНКО ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ



УДК 527.8: 629.7.051.83:629.783(043.3)

**МЕТОДИ ДИФЕРЕНЦІЙНОЇ НАВІГАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ЗА
СИГНАЛАМИ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ
СИСТЕМ**

Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі Аеронавігаційних систем Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Конін Валерій Вікторович,
Національний авіаційний університет, м. Київ,
професор кафедри Аеронавігаційних систем
Факультету аеронавігації, електроніки та
телекомунікацій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий
співробітник,
Чепіженко Валерій Іванович,
Міжрегіональна Академія управління персоналом,
м. Київ, професор кафедри Комп'ютерних
інформаційних систем та технологій Інституту
комп'ютерно-інформаційних технологій та дизайну.

кандидат технічних наук,
Товкач Ігор Олегович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», м. Київ, асистент кафедри
Радіотехнічних систем Радіотехнічного факультету.

Захист відбудеться «23» вересня 2021 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.062.03 при Національному авіаційному університеті, за адресою: 03680, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1, корп. 1, ауд. 334

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03680, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий «19» серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Н.С. Кузьменко

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження Межу XX/XXI століть на повній підставі можна вважати початком епохи впровадження застосування технологій супутникової радіонавігації в усе більшу кількість сфер людської діяльності. Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) отримали безпрецедентне розповсюдження в усіх областях господарства де вимагається визначення позиції, лінійної швидкості і часу.

Особлива роль приділяється GNSS в навігації, управлінні і диспетчерському контролі повітряних, морських і наземних транспортних засобів, оскільки в даних сферах GNSS перетворилися в найбільші системи масового обслуговування, що значною мірою стосуються забезпечення безпеки екіпажів і пасажирів.

В Міжнародній організації цивільної авіації (ICAO) питання використання, розповсюдження і впровадження технологій супутникової радіонавігації обговорюються і документуються більше трьох десятиліть. В документах і стратегії ICAO системи супутникової радіонавігації в перспективі розглядаються, як основний засіб радіонавігації на всіх стадіях польоту, зокрема для здійснення заходів на посадку і посадок повітряних суден.

В «Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року» підкреслюються пріоритетні напрями:

- використання високотехнологічних та ергономічних транспортних засобів, принципів мультимодальності, супутникової навігації, інтелектуальних транспортних систем, інформаційних технологій, електронного документообігу;
- створення сучасної інфраструктури зв'язку, навігації та спостереження України для організації повітряного руху з урахуванням завдань України як члена Євроконтролю;

В провідному авіаційному підприємстві України «Украерорух» зазначається, що розвиток навігаційної інфраструктури для забезпечення навігації, заснованої на характеристиках (PBN), в Україні базується на таких принципах:

- визнання глобальних навігаційних супутникових систем GNSS як основного засобу навігації на рівні авіаційної влади та створення системи моніторингу сигналів GNSS для цілей, описаних в ICAO Doc 9849;
- використання кількох супутникових сузір'їв GNSS;
- використання наземної навігаційної інфраструктури в якості резерву на випадок відмови систем GNSS;
- використання функціональних доповнень глобальних навігаційних супутникових систем GNSS, зокрема, розширення офіційного покриття системи EGNOS на територію України.

Супутникова радіонавігація без застосування системи наземного і космічного доповнень використовується на маршруті з використанням наразі навігаційних супутників GPS і ГЛОНАСС і їх комбінацій. Практично всі повітряні судна оснащені сертифікованими приймачами супутникової навігації. Перспективним застосуванням GNSS також являється їх застосування при маневруванні в зоні аеродрому, автоматичному заході на посадку і посадці.

В глобальному аеронавігаційному плані ICAO зазначено, що впровадження супутникових систем посадки GLS дозволить отримати наступні потенційні вигоди:

- збільшення доступності аеропортів за рахунок підвищення їх категорійності;
- збільшення місткості аеропортів, оскільки GLS не потребує визначення і контролю чутливих і критичних зон, на відміну від ILS;
- економія коштів за рахунок зменшення кількості відходів на наступне коло;
- зменшення негативного впливу на середовище в наслідок зменшення кількості використаного пального;
- збільшення безпеки польоту за рахунок більш стійких шляхів заходу на посадку.

Проте, в наслідок спотворень радіосигналів при проходженні через атмосферу, неточності годинників навігаційних супутників і приймача, похибок ефемерид навігаційних супутників, багатопроменевості, та ін. точність, що вимагається користувачами не забезпечується. Окрім того, держави які застосовують супутникову навігацію на власній території несуть відповідальність за якість сигналів супутникової навігації. Вирішення задачі забезпечення посадки повітряного судна за сигналами GNSS досягається з використанням диференційного режиму в зоні аеродрому (область радіусом 30-40 км). Для реалізації диференційного режиму в зоні аеродрому встановлюється станція, котра приймає сигнали навігаційних супутників, продукує диференційні корекції, оцінює точність, цілісність, доступність супутникової навігаційної системи і отримані дані по радіоканалу передає в бортовий навігаційний приймач повітряного судна. В приймачі повітряного судна, з урахуванням отриманих даних, обраховуються необхідні характеристики і оцінюється можливість виконання необхідної процедури заходу на посадку чи посадки.

В рекомендаціях ICAO і Радіотехнічної комісії для авіації (RTCA) увага сконцентрована на системах посадки що відповідають концепції GBAS, і працюють по сигналам супутникових навігаційних систем GPS і ГЛОНАСС, оскільки наразі вони введені в експлуатацію в повній мірі. При передбачається як окреме так і сумісне використання даних систем. Варто підкреслити, що при сумісному використанні двох систем має місце ефект синергії. Доступний математичний апарат і моделі для опису процесів відповідно до концепції GBAS передбачають використання двох систем.

На даний час космічний сегмент GNSS складається з навігаційних супутників систем GPS, ГЛОНАСС, GALILEO і BeiDou, та супутників космічних функціональних доповнень розташованих в різних регіонах світу WAAS, EGNOS, СДКМ, QZSS, IRNSS, що разом складають більше 120 одиниць і об'єднаний терміном multi-GNSS.

Використання для посадки повітряних суден сигналів кількох супутникових систем має суттєві переваги при виникненні непрогнозованих ситуацій, а саме: відмова будь-якої супутникової системи частково, чи повністю, навмисне втручання в супутникові сигнали, багатопроменевість. При використанні сигналів чотирьох супутникових систем (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO і BeiDou) можливі наступні комбінації: 4 варіанти при використанні однієї системи, 6 комбінацій при використанні двох систем, 4 варіанти при використанні трьох систем, 1 варіант при використанні чотирьох систем, разом 15 можливих комбінацій. При виборі будь-якого варіанту в режимі реального часу конфігурується лише програмне забезпечення.

Питаннями методів, моделей, процедур, правил і алгоритмів математичного і програмного забезпечення займаються наукові школи Stanford University (США), University of Calgary (Канада) University of Nottingham (Великобританія) Delft University of Technology (Нідерланди), Royal Melbourne Institute of Technology University (Австралія), Московского авиационный университет (Росія), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» (Росія), Харківський Національний університет радіоелектроніки (Україна) та багато інших.

Таким чином, існує **актуальна науково-технічна задача** розробки методів диференційної навігації повітряних суден за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем, що має важливе значення для підвищення безпеки польотів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Робота виконана в науково-навчальному центрі «Аерокосмічний центр» та кафедрі аеронавігаційних систем факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету.

Дослідження, що представлено в дисертаційній роботі пов'язано з виконанням науково-дослідних робіт і міжнародних грантів в яких здобувач був виконавцем за напрямом: «Дослідження шляхів сертифікації системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України (СКНЗУ) щодо якості надання послуг та забезпечення безпеки їх використання споживачами сигналів глобальних навігаційних супутникових систем», шифр «Безпека» (№ держреєстрації 0107U006891); «Навігація» Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем. («Навігація-Сертифікат». Сертифікація системи). шифр «Навігація-Сертифікат» (№ держреєстрації 0108U008542); «Розробка та дослідження апаратно-програмних засобів споживача для обміну даними з центром обробки спостережень» (№ держреєстрації 0107U000153); «Розроблення апаратно-програмних засобів інтегрованої інерційно-супутникової навігаційної системи для безпілотних літальних апаратів (БПЛА)» (№ держреєстрації 0111U000173); «Мультизадачний комплекс автоматичного управління на базі інтегрованої інерційно-супутникової системи для БПЛА» (№ держреєстрації 0115U002467); Грантова угода № 641517 Горизонт 2020 UKRAINE «Відтворення обізнаності та інновацій в Україні на основі ЄГНСС» (“UKraine Replication, Awareness and INnovation based on EGNSS”); Система моніторингу доступності радіонавігаційного поля при заходах на посадку літальних апаратів за сигналами GNSS (№ держреєстрації 0117U002371); «Розроблення інтегрованої системи наведення, навігації та управління польотом дрона» (№ держреєстрації 0119U100629).

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка і експериментальне дослідження нових і удосконалених методів диференційної навігації повітряних суден за сигналами multi-GNSS, при виконанні операцій: маневру в зоні аеродрому, здійснення за-ходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Виконати аналітичний огляд науково-технічних публікацій і обґрунтувати критично важливі проблемні питання, що стосуються розвитку методів, процедур і правил диференційної навігації при виконанні операцій: маневру в

зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії.

2. Розробити нові і узагальнити існуючі математичні моделі компонентів для виконання операцій: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії, що враховують спотворення сигналів кількох супутникових навігаційних систем в наслідок вкладу середовища розповсюдження сигналу, наземної і бортової підсистем системи посадки повітряних суден з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, ГЛОНАСС, GALILEO і BeiDou.
3. Розробити критично важливі методи для оцінки точності і цілісності, що дозволять характеризувати якість диференційного режиму з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, ГЛОНАСС, GALILEO і BeiDou при проведенні кінематичних вимірювань.
4. Розробити і реалізувати прототип апаратно-програмного комплексу для дослідження методів, що використовуються для виконання операцій: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, ГЛОНАСС, GALILEO і BeiDou.
5. Провести напівнатурні експериментальні дослідження і оцінити якість методів і моделей які використовуються для виконання операцій: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, ГЛОНАСС, GALILEO і BeiDou.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дисертації задач, а саме для розробки методів диференційної навігації повітряних суден за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем, що має важливе значення для підвищення безпеки польотів, методи математичного аналізу, теорії супутникових радіонавігаційних систем, стати-стичної теорії оцінювання параметрів, векторної алгебри і матричних обчислень. Також використовувались методи математичного моделювання. Функціональність розроблених методів перевірялась в умовах напівнатурних експериментальних досліджень в кінематичному режимі.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення навігації повітряного судна при здійсненні операцій: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії.

Предметом дослідження точність та цілісність супутникової системи диференційної навігації що використовує сигнали GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, при здійсненні операцій: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії.

Наукова новизна отриманих результатів. Здобувачем отримані наступні результати:

1. Вперше для multi-GNSS, розроблено метод оцінювання точності визначення координат повітряного судна з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, що дозволяє оцінити в кінематичному режимі точність навігаційної системи при виконанні запланованої операції: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії.

2. Вперше для multi-GNSS, розроблено метод оцінювання цілісності супутникової системи посадки повітряного судна з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, що дозволяє отримати відсоток хибної дієздатності та хибної недієздатності супутникової системи посадки для різних комбінацій супутникових систем.
3. Удосконалено модель тропосферної затримки MOPS RTCA DO-229, додана можливість оцінки висоти тропосферної шкали і індексу тропосферної рефракції, що дозволяє використовувати дану модель для оцінювання залишкової тропосферної затримки після здійснення диференційної корекції псевдовідстані в супутниковій системі посадки.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблена методика перетворення координат повітряного судна в локальну топоцентричну систему координат пов'язану з злітно-посадковою смугою XYV яка визначається за параметрами фінального сегменту заходу на посадку які наземна підсистема для здійснення посадки за приладами передає на борт повітряного судна.
2. Удосконалена модель тропосферної затримки MOPS RTCA DO-229 дозволяє оцінювати залишкову тропосферну затримку після здійснення диференційної корекції псевдовідстані за відсутності метеорологічних даних. На відміну від стандартної моделі область застосування удосконаленої моделі розширена до застосування в системі посадки за приладами яка відповідає концепції GBAS.
3. Розроблений апаратно-програмний комплекс що реалізує створені методи і моделі і дозволяє в умовах напівнатурного моделювання досліджувати точність та цілісність навігаційного рішення при здійсненні посадки за приладами з використанням спільної обробки сигналів кількох супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou.
4. Розроблене програмне забезпечення апаратно програмного комплексу частково може бути використано в якості прототипу для створення системи посадки за приладами з використанням спільної обробки сигналів кількох супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou.
5. Експериментально досліджено точність визначення координат повітряного судна при здійсненні посадки за приладами з використанням спільної обробки сигналів кількох супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, для різних комбінацій супутникових систем.
6. Експериментально отримано відсоток хибної дієздатності та хибної недієздатності супутникової системи посадки за приладами з використанням спільної обробки сигналів кількох супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou для різних комбінацій супутникових систем.

Результати досліджень впроваджено в розробках: Державного підприємства «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», Державного підприємства Науково-дослідний інститут «Квант».

Особистий внесок. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором як самостійно так і в співавторстві з іншими науковцями опубліковано в фахових виданнях. Зокрема, у роботі [1] автор досліджений метод отримання еталонних траєкторій при дослідженні систем супутникової радіонавігації. В роботах [2] і [5] автором поставлена задача контролю цілісності системи

супутникової радіонавігації. В роботах [3] [6] [13] автором сформульована задача і проведені дослідження застосування високоточної супутникової навігації для посадки за приладами повітряних суден. В роботах [4] і [12] автором створено і експериментально досліджено метод визначення точності систем супутникової радіонавігації. В роботі [7] автором поставлена і виконана задача створення моделі залишкової тропосферної похибки при диференційному режимі. В роботах [8] і [14] автором проведені дослідження компенсації похибок системи супутникової радіонавігації. В роботах [9] і [10] автором виконане експериментальне дослідження вкладу наземної підсистеми в похибку визначення псевдовідстані. В роботі [11] автором розроблена методика перетворення координат повітряного судна в локальну топоцентричну систему координат пов'язану з злітно-посадковою смугою.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації та основні положення, отримані в роботі, представлялися та пройшли апробацію на 6 вітчизняних та міжнародних НТК: X Міжнародна науково-технічна конференція (АВІА-2011) НАУ, Київ; Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2013) ХДМА, Херсон; IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD 2017) NAU, Kyiv; IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC – 2018) NAU, Kyiv; IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD – 2019) NAU, Kyiv; IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW – 2020) Karazin KNU, Kharkiv.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 27 наукових праць, у тому числі 5 статей у фахових наукових виданнях України (1 з яких включено до міжнародної наукометричної бази Scopus), 2 статі в міжнародних фахових журналах за кордоном, (1 з яких включено до міжнародної наукометричної бази Scopus), 1 розділ монографії, 4 патенти на корисну модель, 1 авторське свідоцтво на твір, 6 робіт у збірниках матеріалів і праць міжнародних конференцій, 7 у звітах з науково-дослідних робіт та 1 звіт за міжнародною грантовою Угодою Горизонт 2020.

Сторінка автора в міжнародній наукометричній реферативній базі Scopus: 56471752200 містить 9 наукових праць (Цитування: 47; Індекс Хірша: 4).

Унікальний ідентифікатор науковця ORCID: 0000-0003-2741-5559.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та 3-х додатків. Загальний обсяг дисертації складає 186 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 148 сторінок. Робота містить 42 рисунки та 20 таблиць. Список використаних літературних джерел складається з 108 найменувань. Додатки розміщені на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета і завдання дослідження, об'єкт, предмет і методи дослідження, вказано наукову новизну результатів та їх практичну значимість, наведені дані про особистий внесок здобувача, впровадження результатів, їх апробацію та публікації.

У **першому розділі** проведений аналіз документів провідних організацій та наукових публікацій в авіаційній і космічній галузях. Ключовим елементом, який

забезпечує ефективність і надійність експлуатації авіаційного транспорту є аеронавігаційне забезпечення, зокрема його радіонавігаційна складова. Особливе значення приділяється розробці супутникових систем посадки. Такі системи першої категорії посадки є в наявності в деяких аеропортах в багатьох країнах. Вимоги до супутникових систем посадки другої і третьої категорій наразі проходять перевірку, а зразки знаходяться в розробці. Впровадження таких систем дозволить отримати наступні потенційні вигоди:

- Збільшення доступності аеропортів за рахунок підвищення їх категорійності.
- Збільшення місткості аеропортів, оскільки супутникова система не потребує визначення і контролю чутливих і критичних зон, на відміну від ILS.
- Економія коштів за рахунок зменшення кількості відходів на наступне коло.
- Зменшення негативного впливу на середовище в наслідок зменшення кількості використаного пального.
- Збільшення безпеки польоту за рахунок більш стійких шляхів заходу на посадку.

Розглянута прийнята ІКАО класифікація заходів на посадку, і проведений аналіз існуючих категорійних систем посадки за приладами. Окремо розглянута глобальна навігаційна супутникова система GNSS. Представлений опис вимог які висуваються до супутникової системи посадки. Дані вимоги стосуються зони дії, та граничних показників параметрів точності цілісності та неперервності які має забезпечувати система при здійсненні посадки певної категорії.

Аналіз показав, що актуальною задачею є розробка і експериментальне дослідження нових і удосконалених методів диференційної навігації для здійснення посадки за приладами повітряних суден з використанням сигналів супутникових навігаційних систем як вже існуючих GPS, ГЛОНАСС так і тих, що знаходяться на стадії розробки GALILEO і BeiDou. В розділі представлені задачі дослідження які необхідно вирішити для здійснення поставленої мети.

У **другому розділі** описується фінальний сегмент заходу на посадку (Final Approach Segment (FAS) параметри якого отримує бортова підсистема системи посадки для здійснення операції посадки. Також розглянута локальна Декартова топоцентрична система координат пов'язана з злітно-посадковою смугою XYV в якій здійснюються дані операції. Осі системи координат XYV і деякі параметри FAS показані на рис. 1.

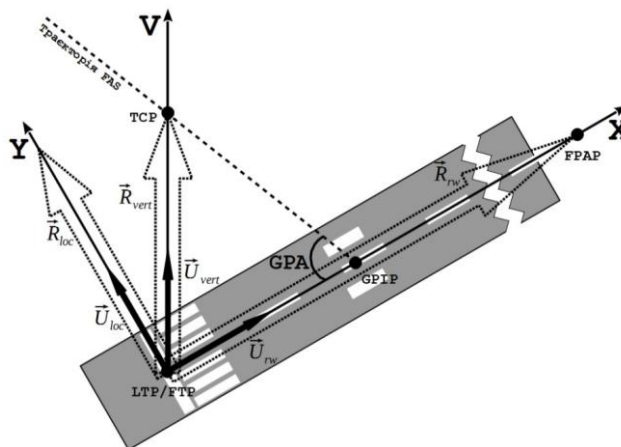


Рис 1 – Визначення локальної системи координат пов'язаної з ЗПС.

Представлена методика перерахунку координат повітряного судна з глобальної геоцентричної системи координат ECEF у дану систему координат.

Основою методики є точка порогу посадки/точка фіктивного порогу злітно посадкової смуги (Landing Threshold Point/Fictitious Threshold Point (LTP/FTP), точка виставлення напрямку траєкторії польоту (Flight Path Alignment Point (FPAP) та точка перетину порогу злітно посадкової смуги (Threshold Crossing Point (TCP), які показані на рис. 1. Маючи координати цих точок в ECEF отримаємо вектори:

$$\vec{R}_{rw} = \begin{bmatrix} FPAP_X^{ECEF} - LTP/FTP_X^{ECEF} \\ FPAP_Y^{ECEF} - LTP/FTP_Y^{ECEF} \\ FPAP_Z^{ECEF} - LTP/FTP_Z^{ECEF} \end{bmatrix}, \vec{R}_{vert} = \begin{bmatrix} TCP_X^{ECEF} - LTP/FTP_X^{ECEF} \\ TCP_Y^{ECEF} - LTP/FTP_Y^{ECEF} \\ TCP_Z^{ECEF} - LTP/FTP_Z^{ECEF} \end{bmatrix} i$$

$$\vec{R}_{loc} = \vec{R}_{vert} \times \vec{R}_{rw}.$$

Після проведення нормування даних векторів

$$\vec{U}_{rw} = \frac{\vec{R}_{rw}}{\|\vec{R}_{rw}\|}, \vec{U}_{vert} = \frac{\vec{R}_{vert}}{\|\vec{R}_{vert}\|} i \vec{U}_{vert} = \frac{\vec{R}_{vert}}{\|\vec{R}_{vert}\|}$$

отримуємо ортонормований базис який можна використати для виразу знаходження координат в системі XYV

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{U}_{rw}^T \\ \vec{U}_{loc}^T \\ \vec{U}_{vert}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X^{ECEF} - LTP/FTP_X^{ECEF} \\ Y^{ECEF} - LTP/FTP_Y^{ECEF} \\ Z^{ECEF} - LTP/FTP_Z^{ECEF} \end{bmatrix},$$

де: $X^{ECEF}, Y^{ECEF}, Z^{ECEF}$ – координати повітряного судна в системі ECEF.

Надається узагальнення похибок які виникають в системі посадки за приладами по сигналам навігаційних супутникових систем і умовно поділяються на: похибки, що вносяться космічним сегментом; похибки, що вносяться середовищем розповсюдження; похибки, що вносяться наземною підсистемою станцією; похибки, що вносяться бортовим обладнанням.

Описано існуючі і розроблені методи і моделі які дозволяють зменшити вплив даних похибок. Зокрема розглянуто метод згладжування кодових вимірів фазою несучої котрий зменшує високочастотні похибки оцінки псевдовідстаней. Представлено моделі залишкової іоносферної затримки та модель вкладу бортової підсистеми в похибку визначення псевдовідстані.

Розроблена нова модель залишкової тропосферної затримки після здійснення диференційної корекції псевдовідстані

$$TC = N_R h_0 \frac{10^{-6}}{\sqrt{0,002 + \sin^2(\Theta)}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta h}{h_0}} \right),$$

де: N_R – індекс тропосферної рефракції;

h_0 – висота тропосферної шкали;

Θ – кут місця навігаційного супутника;

Δh – різниця висот між наземною і бортовою підсистемами системи посадки.

Дана модель є удосконаленням моделі MOPS RTCA DO-229, ключовою особливістю якої є можливість її застосування за відсутності метеорологічних даних. Удосконалення полягало в знаходженні виразів для індексу тропосферної рефракції і висота тропосферної шкали які в даній моделі відсутні. Спочатку знаходиться індекси тропосферної рефракції для сухої і вологої тропосфери

$$N_d = k_1 \frac{P_0}{T_0} \left(\frac{T_0 - \beta h}{T_0} \right)^{\frac{g}{R_d \beta}} \cdot \frac{T_0 - \beta h}{T_0}, \quad N_w = k_2 \frac{e_0}{T_0^2} \left(1 - \frac{\beta h}{T_0} \right)^{\left(\frac{g(\lambda+1)}{R_d \beta} - 2 \right)},$$

та висоти тропосферної шкали для сухої і вологої тропосфери

$$h_d = \frac{R_d}{g} (T_0 - \beta h), \quad h_w = \frac{R_d}{g(\lambda+1) - R_d\beta} (T_0 - \beta h),$$

де:

$k_1 = 77,64$; $k_2 = 3,718 \cdot 10^5$ – експериментально визначені коефіцієнти;

P_0 – тиск над рівнем моря;

T_0 – абсолютна температура над рівнем моря;

β – коефіцієнт зниження температури з висотою;

h – висота наземної підсистеми системи посадки над рівнем моря;

e_0 – парціальний тиск водяної пари над рівнем моря;

g – прискорення вільного падіння;

$R_d = 287,54$ – газова константа сухого повітря;

λ – коефіцієнт зниження парціального тиску водяної пари з висотою.

Потім власне можна отримати значення індексу тропосферної рефракції і висоти тропосферної шкали

$$N_R = N_d + N_w, \quad h_0 = \frac{N_d h_d + N_w h_w}{N_d + N_w}.$$

Представлена модель корекції псевдовідстані і псевдошвиткості

$$\text{PRC}^n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \text{PRc}_m^n, \quad \text{RRC}^n = \frac{\text{PRC}_j^n - \text{PRC}_{j-1}^n}{t_j - t_{j-1}}$$

які розраховуються за даними отриманими з кількох наземних навігаційних приймачів, з метою передачі в бортову підсистему системи посадки,

де:

$$\text{PRc}_m^n = \text{PRct}_m^n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{PRct}_m^n;$$

$$\text{PRct}_m^n = \text{PR}_m^n - R_m^n;$$

n – індекс навігаційного супутника;

m – індекс навігаційного приймача;

N – кількість навігаційних супутників;

M – кількість навігаційних приймачів;

PR_m^n – псевдовідстань від навігаційного супутника n до опорного навігаційного приймача m ;

R_m^n – відстань від навігаційного супутника n до опорного навігаційного приймача m ;

$\text{PRC}_j^n, \text{PRC}_{j-1}^n$ – Корекції псевдовідстані на поточну та попередню епохи даних;

t_j, t_{j-1} – Час поточної та попередньої епох даних.

У **третьому розділі** представлені існуючі і розроблені методи оцінки точності визначення координат і цілісності супутникової системи посадки.

Описаний метод виявлення збоїв в наземній підсистемі відбувається за допомогою порівняння між собою даних кожного з опорних приймачів наземної підсистеми. Наземна підсистема передає в ефір для кожного з навігаційних супутників в зоні видимості наземної підсистеми так звані Бета числа

$$B_m^n = \text{PRC}^n - \frac{1}{M-1} \sum_{\substack{m=1, \\ m \neq n}}^M \text{PRc}_m^n$$

що являють собою набір параметрів в кількості, що дорівнює кількості опорних навігаційних приймачів.

Розглядається метод визначення вкладу наземної підсистеми в похибку скоректованої псевдовідстані. Також представлені граничні параметри даного

вкладу, по яким наземною підсистемою приймається рішення про можливість передачі коректуючої інформації для певного навігаційного супутника.

Представлено розроблений метод оцінювання точності визначення координат повітряного судна при здійсненні посадки за приладами з використанням спільної обробки сигналів супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і Beidou. Оцінку можна виразити виразом

$$\begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta N \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda_{ref}) & \cos(\lambda_{ref}) & 0 \\ -\sin(\phi_{ref})\cos(\lambda_{ref}) & -\sin(\phi_{ref})\sin(\lambda_{ref}) & \cos(\phi_{ref}) \\ \cos(\phi_{ref})\cos(\lambda_{ref}) & \cos(\phi_{ref})\sin(\lambda_{ref}) & \sin(\phi_{ref}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_{ECEF_{ref}} - X_{ECEF} \\ Y_{ECEF_{ref}} - Y_{ECEF} \\ Z_{ECEF_{ref}} - Z_{ECEF} \end{bmatrix},$$

де:

ϕ_{ref} та λ_{ref} – еталонна широта та довгота.

$X_{ECEF_{ref}}, Y_{ECEF_{ref}}, Z_{ECEF_{ref}}$ – еталонні координати в системі ECEF;

$X_{ECEF}, Y_{ECEF}, Z_{ECEF}$ – визначені координати в системі ECEF.

Ключовою особливістю даного методу є можливість оцінки в кінематичному режимі точності супутникової системи посадки для різних комбінацій супутникових систем.

Представлено розроблений метод оцінювання цілісності визначення координат повітряного судна при здійсненні посадки за приладами з використанням спільної обробки сигналів супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і Beidou. Похибка навігаційної системи отримана в постобробці з використанням еталонної траєкторії NSE (Navigation System Error) проектується на вертикальний і боковий напрями. LNSE і VNSE. Вводяться незалежні один від одного параметри LPL (Lateral Protection Level) VPL (Vertical Protection Level) що називаються відповідно боковим та вертикальним рівнем захисту. Розрахунок LPL і VPL показаний в дисертаційній роботі. Допустимі границі даних параметрів визначені документами і в залежності від виходу чи не виходу того чи іншого параметру за межі границі приймається рішення що до наявності хибної працездатності чи хибної непрацездатності системи. Ключовою особливістю даного методу є можливість оцінки значення ймовірностей хибної дієздатності та хибної недієздатності супутникової системи посадки для різних комбінацій супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і Beidou.

У **четвертому розділі** представлений розроблений апаратно-програмний комплекс що реалізує створені методи і моделі і дозволяє в умовах напівнатурного моделювання досліджувати точність та цілісність навігаційного рішення при здійсненні посадки за приладами з використанням спільної обробки сигналів супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou.

Описане апаратне забезпечення комплексу, що складається з навігаційних приймачів, навігаційних антен персональних комп'ютерів, перетворювачів напруги, з'єднувальних кабелів, та джерел живлення.

Показане програмне забезпечення для отримання довготривалих вимірів навігаційних приймачів. Дане програмне забезпечення відображує стан навігаційного приймача, дозволяє налаштувати навігаційний приймач на видачу різноманітних даних, і записує отримані дані в файл.

Розглянуте програмне забезпечення для визначення еталонних координат і траєкторій GrafNav/GrafNet. Дане програмне забезпечення призначене для

постобробки вимірів навігаційних приймачів за допомогою методу відносної навігації і методу PPP.

Презентоване програмне забезпечення “Multi GBAS” яке розроблене для реалізації розглянутих в дисертаційній роботі методів. Функціональна блок-схема якого представлена на рис. 2.

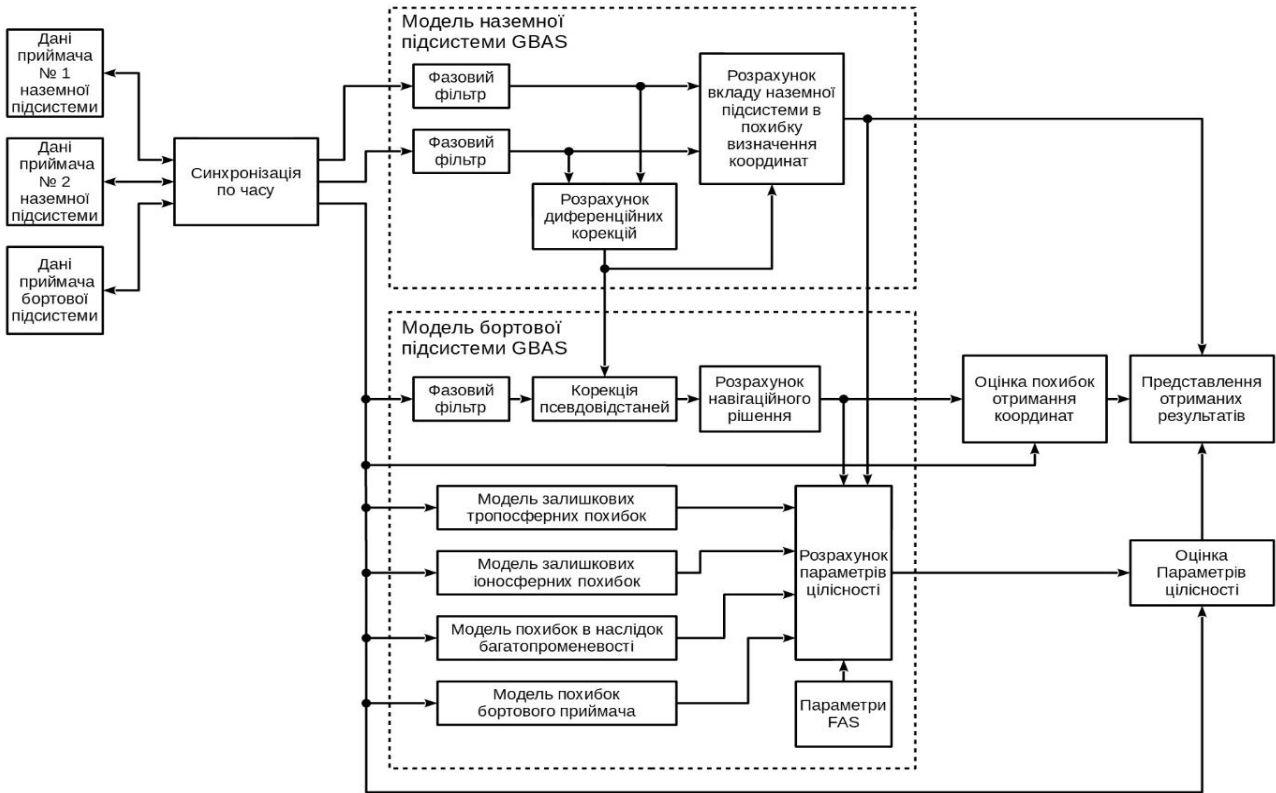


Рис. 2 – функціональна блок-схема програмного забезпечення “Multi GBAS”

Вхідні дані з навігаційних приймачів бортової і наземної підсистем зчитуються з файлів. Синхронізація даних відбувається в блоці синхронізації по часу. Дані кожного з навігаційних приймачів в блоці фазового фільтра підлягають процедурі згладжування кодових псевдовідстаней фазою несучої частоти. В блоці розрахунку диференційних корекцій розраховуються корекції до псевдовідстані і псевдошвидкості кожного видимого навігаційного супутника. В блоці розрахунку вкладу наземної підсистеми в похибку визначення розраховується середньоквадратичне відхилення вкладу наземної підсистеми і бета числа. В моделі бортової підсистеми відбувається диференційна корекція псевдовідстаней. Потім в блоці розрахунку навігаційного рішення відбувається розрахунок координат бортової підсистеми, як в диференційному режимі, так і без нього. Далі в блоці оцінки похибок отриманих координат з урахуванням значень еталонних координат бортової підсистеми визначаються еліпсоїди похибок навігаційної системи як в диференційному режимі, так і без нього. Далі в блоці розрахунку параметрів цілісності знаходяться різні захисту VPL і LPL і з урахуванням значень еталонних координат бортової підсистеми визначених відповідно до підрозділу визначаються фактична похибка визначення координат по вертикалі і по боку. З урахуванням порогів спрацювання сигналізації і допустимої похибки навігаційної системи визначається стан цілісності супутникової системи посадки. Параметри фінальної ділянки заходу на посадку задаються користувачем. В блоках моделей визначаються

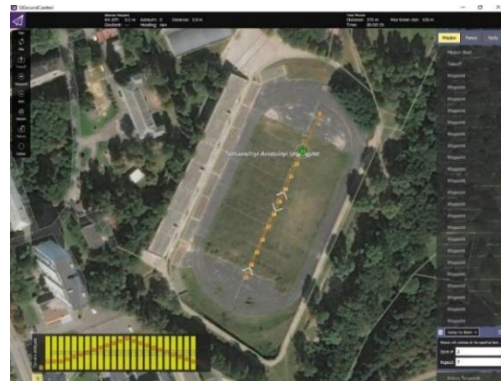
залишкова тропосферна похибка, залишкова іоносферна похибка, вклад в похибку визначення псевдовідстані в наслідок багатопроменевості, та вклад апаратури навігаційного приймача в похибку визначення псевдовідстані.

Дане програмне забезпечення дозволяє за даними з навігаційних приймачів провести моделювання роботи наземного функціонального доповнення GBAS глобальної супутникової навігаційної системи GNSS. При цьому підтримуються такі системи супутникової навігації як GPS, ГЛОНАСС, GALILEO та BeiDou.

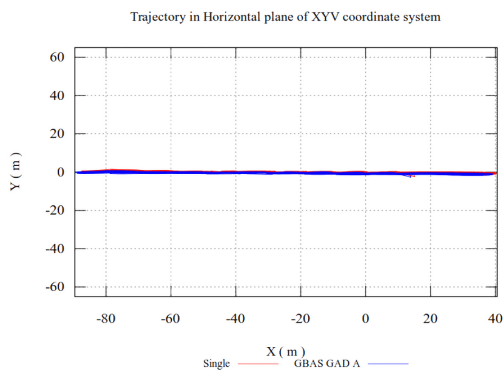
У **п'ятому розділі** описані льотні випробування розробленого апаратно-програмного комплексу які було виконано 17 березня 2021 р. у м. Києві, на території Національного авіаційного університету. Політ відбувався над стадіоном НАУ, а наземна підсистема була розташована в 11 корпусі НАУ. Обладнання (квадрокоптер), яке використовувалось в якості носія бортової підсистеми апаратно-програмного комплексу для експериментальних досліджень представлено на рис. 3 (а). Експериментальний політ являє собою відпрацювання лінійної траєкторії, що імітує фінальну ділянку заходу на посадку і проліт над злітно-посадковою смугою. Зображення заданої траєкторії представленої в програмному забезпеченні QGroundControl представлено на рис. 3 (б). Був проведений політ по прямій лінії довжиною 40 метрів на відносній висоті 10 м, а потім політ по прямій лінії довжиною 90 метрів з одночасним підйомом на висоту 50 м. Потім політ відбувається в зворотному порядку. По заданій просторовій траєкторії ставилась задача пролетіти 8 раз, з чим система управління успішно впоралась. Траєкторія польоту показана на рис. 3 в горизонтальній (в) і вертикальній (г) площинах системи координат XYV.



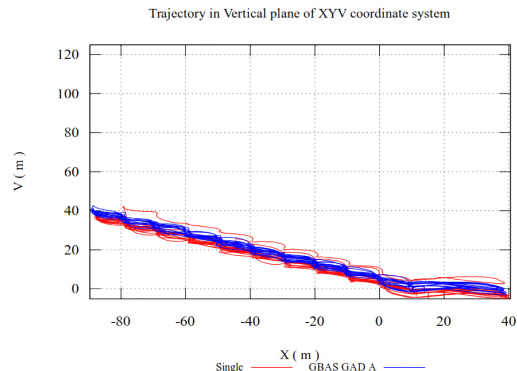
а



б



в



г

Рис. 3 – Проведення льотних випробувань

Представлена оцінка вкладу наземної підсистеми в похибку визначення псевдовідстані протягом проведення експерименту. На рис. 4 (а) показані треки

навігаційних супутників що знаходяться в зоні видимості протягом часу проведення експерименту відносно розташування наземної підсистеми. Колір треку показує можливість застосування даного навігаційного супутника в наземній підсистемі яка відповідає певному показнику точності GAD. На рис. 4 (б) показана залежність RMS_{pr_gnd} кожного з навігаційних супутників що знаходяться в зоні видимості протягом часу проведення експерименту від кута місця. Також на даному рисунку позначені граничні значення RMS_{pr_gnd} які відповідають певному показнику точності GAD:

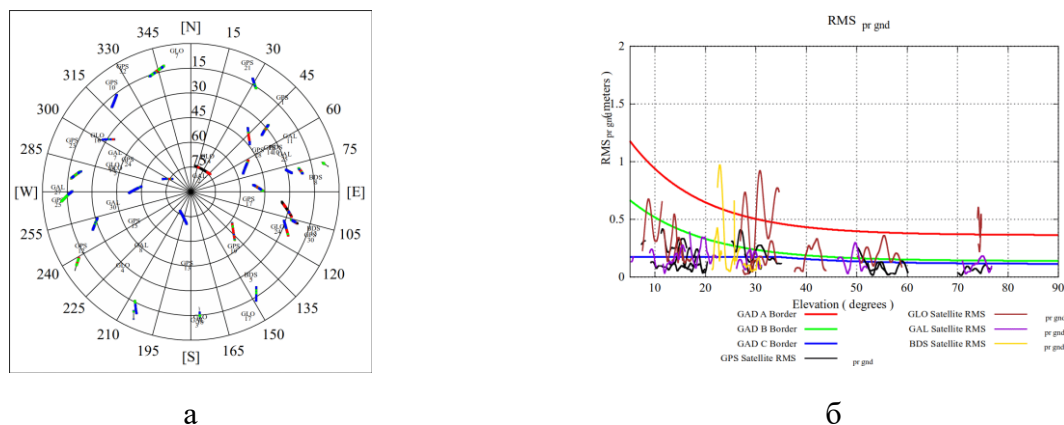


Рис 4 – Оцінка вкладу наземної підсистеми в похибку визначення псевдовідстані.

Представлені результати експериментальних досліджень точності визначення координат повітряного судна. На рис. 5 показані еліпсоїди похибок (а) та проекції еліпсоїдів похибок на площини топоцентричної системи координат ENU, а саме: Північ-Схід, Схід-Зеніт, Північ-Зеніт (б) для супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou. Також показані проекції на дані площини різниці між координатами еталонної траєкторії і фактично визначними координатами. Червоним кольором позначене рішення отримане без використання диференційного режиму, а синім рішення з використанням методів представлених в даній роботі.

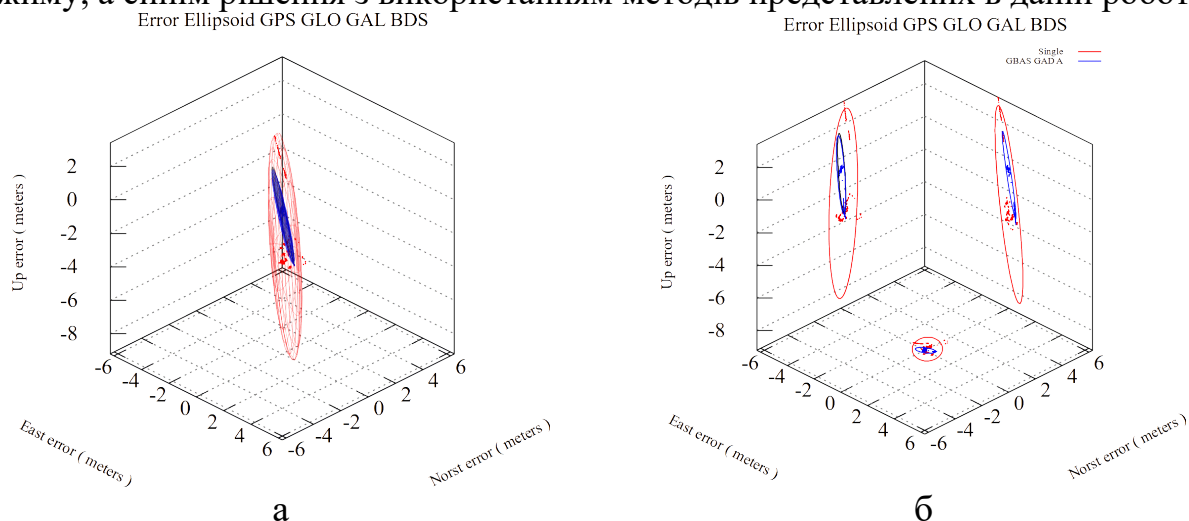


Рис. 5 – Еліпсоїди точності (а) та їх проекції (б) в різних режимах для супутників чотирьох навігаційних систем.

Отримані еліпсоїди похибок навігаційної системи при здійсненні посадки за приладами з використанням спільної обробки сигналів супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, для різних комбінацій супутникових систем

представлені в дисертаційній роботі. Параметри даних еліпсоїдів приведені в таблицях 1 і 2

Таблиця 1

Систематична похибка навігаційної системи протягом експерименту

№	Супутникові сузір'я які приймають участь в навігаційному рішенні	Кількість епох	Середнє значення похибки за напрямом схід-захід (м)		Середнє значення похибки за напрямом північ-південь (м)		Середнє значення похибки за напрямом зеніт-надир (м)	
			Без використання диференційного режиму	Диференційний режим	Без використання диференційного режиму	Диференційний режим	Без використання диференційного режиму	Диференційний режим
1	GPS GLO GAL BDS	5151	0.0143	0.0302	0.1837	0.0257	-2.8377	-1.0182
2	GPS GLO GAL	5151	0.0143	0.0302	0.1837	0.0257	-2.8377	-1.0182
3	GLO GAL BDS	4451	-0.2483	-0.0597	-1.4347	-0.1007	-2.7986	-0.6898
4	GPS GLO	5151	-0.0411	0.0484	0.0821	0.0564	-3.0708	-0.9248
5	GLO BDS	3842	-1.0547	-0.0529	-2.8526	0.0974	-4.6410	-0.0972
6	GPS	5151	0.1833	0.0638	1.2529	0.0765	-3.8275	-1.0963
7	GLO	3842	-1.0547	-0.0529	-2.8526	0.0974	-4.6410	-0.0972

Таблиця 2

Напівосі еліпсоїду похибок навігаційної системи протягом експерименту

№	Супутникові сузір'я які приймають участь в навігаційному рішенні	Кількість епох	Перша напіввісь еліпсоїда (м)		Друга напіввісь еліпсоїда (м)		Третя напіввісь еліпсоїда (м)	
			Без використання диференційного режиму	Диференційний режим	Без використання диференційного режиму	Диференційний режим	Без використання диференційного режиму	Диференційний режим
1	GPS GLO GAL BDS	5151	6.4424	2.8081	1.2410	0.2984	0.6682	0.1875
2	GPS GLO GAL	5151	6.4424	2.8081	1.2410	0.2984	0.6682	0.1875
3	GLO GAL BDS	4451	2.5812	2.0294	1.6097	0.4369	1.3511	0.2055
4	GPS GLO	5151	6.8817	2.8875	1.2959	0.3009	0.9535	0.2716
5	GLO BDS	3842	6.9306	5.8277	3.8906	0.7985	1.1196	0.4254
6	GPS	5151	7.7263	2.7108	0.7846	0.3889	0.5448	0.2497
7	GLO	3842	6.9306	5.8277	3.8906	0.7985	1.1196	0.4254

Представлені результати експериментальних досліджень цілісності визначення координат повітряного судна. На рис. 6 представлена оцінка цілісності при сумісному використанні чотирьох супутникових навігаційних систем GPS, ГЛОНАСС, GALILEO і BeiDou, а також додаткові параметри які надають уявлення про обстановку навігаційного поля. На рис 6 (а) представлена залежність кількості навігаційних супутників задіяних в навігаційному рішенні від часу проведення експерименту. Червоним кольором позначене рішення отримане без використання диференційного режиму, а синім рішення з використанням методів представлених в даній роботі. На рис 6 (б) представлена залежність просторового геометричного фактору погіршення точності PDOP від часу проведення експерименту. Червоним кольором позначене рішення отримане без використання диференційного режиму, а синім рішення з використанням методів представлених в даній роботі. На рис 6 (в) і (г) показані залежності параметрів оцінки цілісності від часу проведення експерименту по боку і по вертикалі відповідно. Червоною суцільною лінією показане значення рівнів захисту VPL і LPL. Червоною штриховою лінією показане значення порогів спрацювання сигналізації VAL і LAL. Синьою штриховою лінією показані граничні значення похибки навігаційної системи. Похибки навігаційної системи VNSE і LNSE відносно еталонної траєкторії показані суцільною чорною лінією, а їх змодельовані значення суцільною синьою лінією.

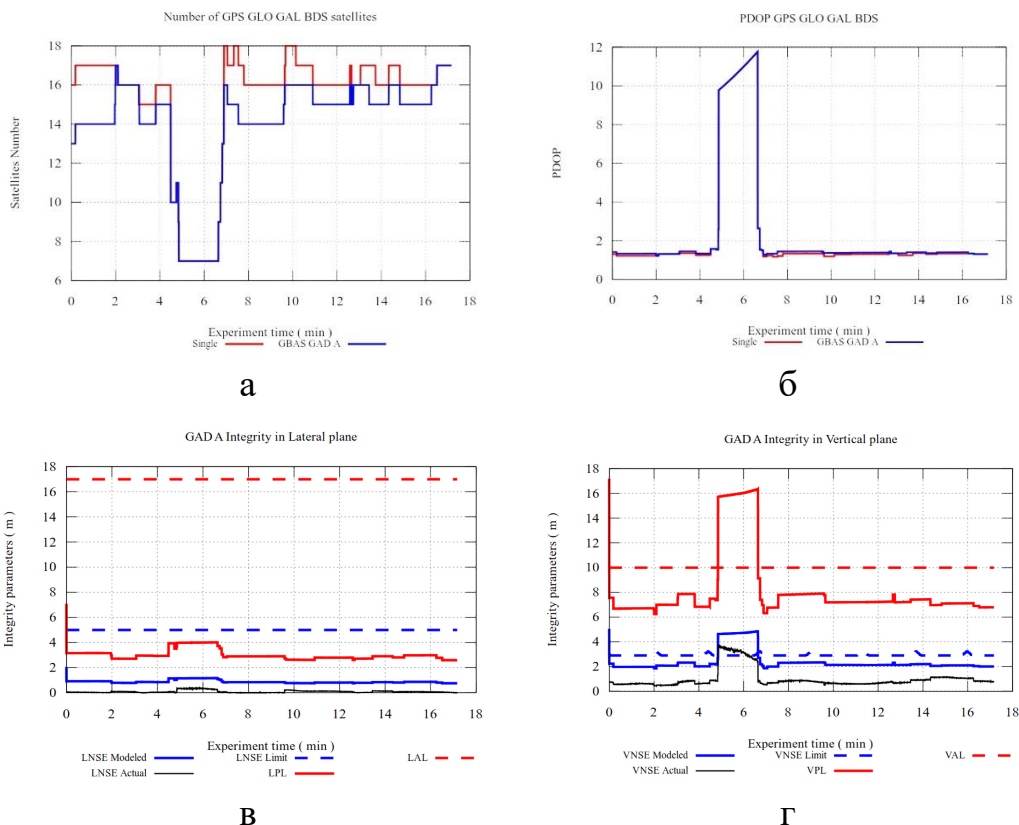


Рис 6 – Оцінка цілісності для супутників чотирьох навігаційних систем.

Результати експериментальних досліджень цілісності навігаційної системи при здійсненні посадки за приладами з використанням спільної обробки сигналів супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, для різних комбінацій супутникових систем представлені в дисертаційній роботі.

Отримано відсоток хибної дієздатності та хибної недієздатності супутникової системи посадки за приладами з використанням спільної обробки сигналів

супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou для різних комбінацій супутникових систем які представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Стан цілісності системи посадки протягом експерименту

№	Супутникові сузір'я які приймають участь в навігаційному рішенні	Кількість епох	Система дієздатна (%)		Система не дієздатна (%)		Система хибно дієздатна (%)		Система хибно не дієздатна (%)	
			По боку	По вертикалі	По боку	По вертикалі	По боку	По вертикалі	По боку	По вертикалі
1	GPS GLO GAL BDS	5151	100	89.5943	0	7.6490	0	0	0	2.7567
2	GPS GLO GAL	5151	100	89.5943	0	7.6490	0	0	0	2.7567
3	GLO GAL BDS	4451	100	1.1009	0	0.0000	0	0	0	98.8991
4	GPS GLO	5151	100	88.9342	0	7.5325	0	0	0	3.5333
5	GLO BDS	3842	100	0	0	0	0	0	0	100
6	GPS	5151	100	55.1932	0	7.5325	0	0	0	37.2743
7	GLO	3842	100	0	0	0	0	0	0	100

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено актуальну науково-технічну задачу розробки методів диференційної навігації повітряних суден за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем, що має важливе значення для підвищення безпеки польотів.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Вперше для multi-GNSS, розроблено метод оцінювання точності визначення координат повітряного судна з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, що дозволяє оцінити в кінематичному режимі точність навігаційної системи при виконанні запланованої операції: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії.
2. Вперше для multi-GNSS, розроблено метод оцінювання цілісності визначення координат повітряного судна з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, що дозволяє отримати відсоток хибної дієздатності та хибної недієздатності супутникової системи посадки для різних комбінацій супутникових систем.
3. Удосконалено модель тропосферної затримки MOPS RTCA DO-229, додана можливість оцінки висоти тропосферної шкали і індексу тропосферної рефракції, що дозволяє використовувати дану модель для оцінювання залишкової тропосферної затримки після здійснення диференційної корекції псевдовідстані в супутниковій системі посадки.
4. Розроблена методика перетворення координат повітряного судна в локальну топоцентричну систему координат пов'язану з злітно-посадковою смугою, що дозволяє визначати параметри цілісності з урахуванням положення злітно-посадкової смуги. Дана система координат визначається за параметрами фінального сегменту заходу на посадку які наземна підсистема multi-GNSS передає на борт повітряного судна.

5. Удосконалена модель тропосферної затримки MOPS RTCA DO-229 дозволяє за відсутності метеорологічних даних отримати залишкову тропосферну затримку після здійснення диференційної корекції псевдовідстані. На відміну від стандартної моделі область застосування удосконаленої моделі розширена до застосування в системі посадки за приладами яка відповідає концепції GBAS.
6. Розроблений апаратно-програмний комплекс що реалізує створені методи і моделі і дозволяє в умовах напівнатурного моделювання досліджувати точність навігаційного рішення та цілісність multi-GNSS при виконанні запланованої операції: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou.
7. Розроблене програмне забезпечення апаратно програмного комплексу частково може бути використано в якості прототипу для створення системи супутникової навігації для всіх стадій польоту з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, з урахуванням здійснення контролю якості навігаційного поля.
8. Результати експериментальних досліджень точності визначення координат повітряного судна при виконанні запланованої операції: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou підтвердили принципову можливість створення системи супутникової навігації для всіх стадій польоту, з урахуванням здійснення контролю якості навігаційного поля.
9. Результати експериментальних досліджень цілісності у вигляді відсоткових значень хибної дієздатності та хибної недієздатності супутникової системи посадки за приладами з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou можуть бути використані при створенні системи супутникової навігації для всіх стадій польоту.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Список публікацій у фахових наукових виданнях України

1. Куценко О.В. Визначення еталонних координат та траєкторій при проведенні досліджень супутникових навігаційних систем. Вісник інженерної академії України – 2010. – №2. – С. 8-11.
2. Ковалевський Е.О., Куценко О.В. Контроль цілісності супутникової радіонавігаційної системи з використанням групи фільтрів Калмана. Вісник НАУ – 2010. – №2. – С. 66-69.
3. Конин В.В., Куценко А.В., Олевинская Т.И. Экспериментальная оценка применения высокоточных технологий GNSS для посадки воздушных судов малой авиации. Вісник інженерної академії України – 2017. – №1. – С. 8-14.
4. Kondratiuk V., Konin V., Kutsenko O., Ilnytska S. Testing Static and Kinematic Modes of Precise Point Positioning Service in Ukraine. Radioelectronics and Communications Systems, 2019, 62(10). – С. 530–540. (**Scopus**).
5. Kondratiuk V. M., Konin V. V., Ilnytska S. I., Kutsenko O. V. Zhuliany Airport as a Possible Candidate for Ranging and Integrity Monitoring Station placement in Kyiv region

ISSN 1990-5548 Electronics and Control Systems 2019.
N 4 (62): 16–23. ISSN: друковане – 1990–5548.

Список публікацій у міжнародних фахових журналах за кордоном

6. Жалило А. А., Кондратюк В. М., Куценко А. В., Конин В. В., Сушко В. Г., Харченко В. П., Шелковенков Д. А., Шокало В. М. GPS-навигация и геодезическая съемка – результаты экспериментальной верификации технологии OMNISTAR. Научный Вестник ГосНИИ «Аэронавигация», № 7. – М. : 2007. – С. 27–35.
7. O. Kutsenko, S. Pnytska, V. Konin. Investigation of the residual tropospheric error influence on the coordinate determination accuracy in a satellite landing system. Aviation 22, No. 4, 156 (Dec. 2018). DOI: 10.3846/aviation.2018.7082 (**Scopus**).

Розділи монографій

8. Valerian Shvets, Svitlana Pnytska, Oleksandr Kutsenko. Application of Computer Modelling in Adaptive Compensation of Interferences on Global Navigation Satellite Systems. Cases on Modern Computer Systems in Aviation Chapter 14. International Publisher of Progressive Information Science and Technology Research, USA, Pennsylvania. 2019. - P. 339-380

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Куценко О.В. Экспериментальне визначення залишкових похибок контрольно-корегувальної станції DGNS. Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2011», Київ, 19–21 квіт. 2011 р. – К., 2011. – Т. 2. – С. 8.33–8.36.
10. Конин В. В., Куценко О. В. Визначення цілісності сигналів у просторі супутниковою системою посадки повітряних суден / П'ята міжнародна науково-практична конференція Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті, 28–30 травня 2013 р.: зб. матеріалів конф. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2013. –Т1.– С. 17 - 20.
11. Kutsenko O. V., Pnytska S. I., Kondratyuk V. M., Konin V. V. Unmanned Aerial Vehicle Position Determination in GNSS Landing System. 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2017 – Proceedings, 2018, January, c. 79–83. (**Scopus**).
12. V. V. Konin, O. V. Kutsenko, E. O. Lukianenko and S. I. Pnytska. Experimental Investigation of Multi-GNSS in Static Mode. 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 2018, pp. 179-182, doi: 10.1109/MSNMC.2018.8576274. (**Scopus**).
13. Pnytska S., Kondratiuk V., Kutsenko O., Konin V. Potential Possibilities of Highly Accurate Satellite Navigation Use for Landing Operations of Unmanned Aerial Systems. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2019 – Proceedings, 2019, c. 174–177, 8943873. (**Scopus**).
14. Y. Averyanova, O. Kutsenko and V. Konin. Interference Suppression at Cooperative Use of GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252766. (**Scopus**).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

Патенти і авторські свідоцтва

15. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Погурельський О. С. Система диспетчерського керування рухомими біологічними об'єктами з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації: пат. № 39917 Україна: МПК G01S 5/14; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.

16. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Геодезичний GNSS прилад: пат. № 40233 Україна: МПК G01S 5/14; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.
17. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Ільницька С. І., Кондратюк М. В., Васильєв І. В., Савченко О. В. Система високоточного визначення координат на основі супутникових радіонавігаційних систем: пат. Україна: МПК (2006.01) G01S 5/14. № 78185; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.
18. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Тунік А. А. Ільницька С. І., Валденмайер Г. Г., Вишнякова Є. В. Трикоз В. П., Куценко О. В., Кондратюк М. В. Васильєв І. В. Савченко О. В. Малогабаритна інерціально-супутникова інтегрована навігаційна система: пат. Україна: МПК (2013.01) G01C 23/00. № 79932; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9.
19. Куценко О.В., Конін В.В. Кондратюк В.М. Модель системи наземного доповнення до глобальної навігаційної супутникової системи («Multi GBAS»). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 99339. Дата реєстрації 31 серпня 2020 р.

Звіти з НДР

20. «Дослідження шляхів сертифікації системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України (СКНЗУ) щодо якості надання послуг та забезпечення безпеки їх використання споживачами сигналів глобальних навігаційних супутникових систем», шифр «Безпека» (№ держреєстрації 0107U006891).
21. «Навігація» Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем». («Навігація-Сертифікат». Сертифікація системи). шифр «Навігація-Сертифікат» (№ держреєстрації 0108U008542).
22. «Розробка та дослідження апаратно-програмних засобів споживача для обміну даними з центром обробки спостережень» (№ держреєстрації 0107U000153).
23. «Розроблення апаратно-програмних засобів інтегрованої інерційно-супутникової навігаційної системи для безпілотних літальних апаратів (БПЛА)» (№ держреєстрації 0111U000173).
24. «Мультизадачний комплекс автоматичного управління на базі інтегрованої інерційно-супутникової системи для БПЛА» (№ держреєстрації 0115U002467).
25. Горизонт 2020. Грантова угода № 641517 UKRAINE «Відтворення обізнаності та інновацій в Україні на основі ЄГНСС» ("UKraine Replication, Awareness and INnovation based on EGNSS").
26. «Система моніторингу доступності радіонавігаційного поля при заходах на посадку літальних апаратів за сигналами GNSS» (№ держреєстрації 0117U002371).
27. «Розроблення інтегрованої системи наведення, навігації та управління польотом дрона» (№ держреєстрації 0119U100629).

АНОТАЦІЯ

Куценко О.В. Методи диференційної навігації повітряних суден за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 «Навігація та управління рухом» – Національний авіаційний університет, МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі розробки методів диференційної навігації повітряних суден за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем, що має важливе значення для підвищення безпеки польотів.

Метою дисертаційної роботи є розробка і експериментальне дослідження нових і удосконалених методів диференційної навігації повітряних суден за сигналами multi-GNSS, при виконанні операцій: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії.

В дисертаційній роботі проведений аналіз документів провідних організацій та наукових публікацій в авіаційній і космічній галузях. За цими даними можна стверджувати, що авіаційний транспорт відіграє провідну роль у забезпеченні стійкості економічного та соціального розвитку. Ключовим елементом, який забезпечує ефективність і надійність експлуатації авіаційного транспорту є аеронавігаційне забезпечення, зокрема його радіонавігаційна складова. Особливе значення приділяється розробці супутникових систем посадки. Розглянута прийнята ІКАО класифікація заходів на посадку, і проведений аналіз існуючих категорійних систем посадки за приладами. Наданий опис вимог які висуваються до супутникової системи посадки.

Аналіз показав, що актуальною науковою задачею є розробка методів диференційної навігації повітряних суден за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем, що має важливе значення для підвищення безпеки польотів.

В дисертаційній роботі розглянутий фінальний сегмент заходу на посадку та локальна топоцентрична Декартова система координат XUV пов'язана з злітно-посадковою смугою. Розглянуто похибки які виникають в системі посадки за приладами по сигналам кількох навігаційних супутникових систем. Представлено існуючі і розроблені моделі які дозволяють зменшити вплив даних похибок. Зокрема розроблену модель залишкової тропосферної затримки після здійснення диференційної корекції псевдовідстані ключовою особливістю якої є можливість застосування за відсутності метеорологічних даних. Надана модель корекції псевдовідстані і псевдошвиткості які розраховуються за даними отриманими з кількох наземних навігаційних приймачів, з метою передачі в бортову підсистему системи посадки.

В дисертаційній роботі представлені існуючі і розроблені методи виявлення збоїв в наземній підсистемі системи посадки, визначення вкладу наземної підсистеми в похибку скоректованої псевдовідстані, оцінювання точності і цілісності визначення координат, в кінематичному режимі для різних комбінацій супутникових систем.

В дисертаційній роботі описаний розроблений апаратно-програмний комплекс що реалізує створені методи і моделі і дозволяє в умовах напівнатурного

моделювання досліджувати точність та цілісність навігаційного рішення при виконанні запланованої операції: маневру в зоні аеродрому, здійснення за-ходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou.

Надані результати льотних випробувань розробленого апаратно-програмного комплексу. Експериментальний політ являв собою відпрацювання лінійної траєкторії, що імітує фінальну ділянку заходу на посадку і проліт над злітно посадковою смугою.

За результатами випробувань отримані такі дані: оцінка вкладу наземної підсистеми в похибку визначення псевдовідстані протягом проведення експерименту; для супутникової навігаційної системи при виконанні запланованої операції: маневру в зоні аеродрому, здійснення за-ходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou отримані еліпсоїди похибок навігаційної системи та, відсоток хибної дієздатності та хибної недієздатності системи.

У дисертаційній роботі отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше для multi-GNSS, розроблено метод оцінювання точності визначення координат повітряного судна з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, що дозволяє оцінити в кінематичному режимі точність навігаційної системи при виконанні запланованої операції: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії.
2. Вперше для multi-GNSS, розроблено метод оцінювання цілісності визначення координат повітряного судна з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, що дозволяє отримати відсоток хибної дієздатності та хибної недієздатності супутникової системи посадки для різних комбінацій супутникових систем.
3. Удосконалено модель тропосферної затримки MOPS RTCA DO-229, додана можливість оцінки висоти тропосферної шкали і індексу тропосферної рефракції, що дозволяє використовувати дану модель для оцінювання залишкової тропосферної затримки після здійснення диференційної корекції псевдовідстані в супутниковій системі посадки.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що:

1. Розроблена методика перетворення координат повітряного судна в локальну топоцентричну систему координат пов'язану з злітно-посадковою смугою, що дозволяє визначати параметри цілісності з урахуванням положення злітно-посадкової смуги. Дана система координат визначається за параметрами фінального сегменту заходу на посадку які наземна підсистема multi-GNSS передає на борт повітряного судна.
2. Удосконалена модель тропосферної затримки MOPS RTCA DO-229 дозволяє за відсутності метеорологічних даних отримати залишкову тропосферну затримку після здійснення диференційної корекції псевдовідстані. На відміну від стандартної моделі область застосування удосконаленої моделі розширена до застосування в системі посадки за приладами яка відповідає концепції GBAS.

3. Розроблений апаратно-програмний комплекс що реалізує створені методи і моделі і дозволяє в умовах напів-натурного моделювання досліджувати точність навігаційного рішення та цілісність multi-GNSS при виконанні запланованої операції: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou.
4. Розроблене програмне забезпечення апаратно програмного комплексу частково може бути використано в якості прототипу для створення системи супутникової навігації для всіх стадій польоту з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем: GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou, з урахуванням здійснення контролю якості навігаційного поля.
5. Результати експериментальних досліджень точності визначення координат повітряного судна при виконанні запланованої операції: маневру в зоні аеродрому, здійснення заходу на посадку з вертикальним скеровуванням і по категорії з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou підтвердили принципову можливість створення системи супутникової навігації для всіх стадій польоту, з урахуванням здійснення контролю якості навігаційного поля.
6. Результати експериментальних досліджень цілісності у вигляді відсоткових значень хибної дієздатності та хибної недієздатності супутникової системи посадки за приладами з використанням різних комбінацій сигналів супутникових систем GPS, GLONASS, GALILEO і BeiDou можуть бути використані при створенні системи супутникової навігації для всіх стадій польоту.

Ключові слова: навігація, система посадки, глобальна навігаційна супутникова система, точність, цілісність.

ABSTRACT

Kutsenko O. V. Aircraft differential navigation methods using global navigation satellite systems signals. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.22.13 "Navigation and Traffic Management" – National Aviation University, MES of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem: aircraft differential navigation methods development with the use of global navigation satellite systems signals. That is important for increasing the safety of flights.

The aim of the dissertation is the develop and experimentally study new and improved methods of aircraft differential navigation with the use multi-GNSS signals for performing operations: a maneuver in the aerodrome area, landing approach with vertical guidance and categorical.

The dissertation analyzes the documents of leading organizations and scientific publications in the aviation and space industries. According to these data, it can be argued that air transport plays a leading role in ensuring the sustainability of economic and social development. A key element that ensures the efficiency and reliability of air transport operations is air navigation support, in particular its radio navigation component. Special attention is paid to the development of satellite landing systems. The ICAO classification of landing approaches is considered, and the analysis of existing categorical systems of instrumental landing is presented. A requirements description for the satellite landing system is provided.

The analysis showed that the actual scientific task is aircraft differential navigation methods development with the use of global navigation satellite systems signals, which is important for improving flight safety.

In the dissertation, the final approach segment and the local Cartesian coordinate system XYV connected with the runway are considered. The errors arising in the instrumental aircraft landing system with the use of several satellite systems signals are considered. Presented existing and developed models that reduce the impact of these errors. In particular, the developed model of residual tropospheric delay after the differential correction of the pseudorange. A key feature of which is the possibility of application in case of meteorological data absence. Given a model of pseudorange and pseudorate correction witch calculated from data obtained from several ground-based receivers, and transmit to the landing system onboard subsystem.

The dissertation presents existing and developed methods for detecting failures in the landing system ground subsystem, determining the contribution of the ground subsystem to the error of the corrected pseudorange, estimating the accuracy and integrity of coordinate determination in a kinematic mode for different combinations of satellite systems.

The dissertation describes the developed hardware and software complex that implements created methods and models and allows navigation solution accuracy and integrity hardware in the loop simulation research, for performing operations: a maneuver in the aerodrome area, landing approach with vertical guidance and categorical, using different signals combinations from satellite systems: GPS, GLONASS, GALILEO and BeiDou.

Presented flight test results of the developed hardware and software complex. The experimental flight has a linear trajectory that simulates the landing final approach segment and the flight over the runway.

According to the test results, the following data were obtained: ground subsystem contribution estimation to the pseudorange error during the experiment; for satellite navigation system during the planned operation: maneuver in the aerodrome area, landing approach with vertical guidance and categorical using different signals combinations from satellite systems:

GPS, GLONASS, GALILEO and BeiDou, navigation system error ellipsoids and the percentage false system capacity and false system incapacity were obtained.

The following new scientific results are obtained in the dissertation:

1. For the first time for multi-GNSS, a method of the aircraft coordinates accuracy determining using different signals combinations from satellite systems: GPS, GLONASS, GALILEO and BeiDou was developed, which allows evaluating the accuracy of the navigation system in kinematic during the planned operation: a maneuver in the aerodrome area, landing approach with vertical guidance and categorical.
2. For the first time for multi-GNSS, a method of the aircraft coordinates integrity determining using different signals combinations from satellite systems: GPS, GLONASS, GALILEO and BeiDou was developed, which allows obtaining the percentage false system capacity and false system incapacity for different satellite system combinations.
3. Improved MOPS RTCA DO-229 tropospheric delay model. Ability to estimate the height of the tropospheric scale and tropospheric refraction index was added, which allows using this model for estimation of the residual tropospheric delay after onboard pseudorange differential correction.

The practical significance of the dissertation is following:

1. Developed aircraft coordinates converting method into a local Cartesian coordinate system XYV associated with the runway, which allows determining the integrity parameters taking into account the position of the runway. This coordinate system is determined by the parameters of the landing final approach segment which ground subsystem of multi-GNSS transmits onboard.
2. The advance of MOPS RTCA DO-229 tropospheric delay model allows estimating residual tropospheric delay after pseudorange differential correction in case of meteorological data absence. In contrast to the standard model, the scope of the advanced model has been extended for use in the landing system that corresponds to the GBAS concept.
3. Developed hardware & software complex implements created methods and models and allows use hardware in the loop simulation to investigate the accuracy of the navigation solution and integrity of multi-GNSS for performing the planned operations: maneuver in the aerodrome area, landing approach with vertical guidance and categorical, using different signals combinations from satellite systems: GPS, GLONASS, GALILEO and BeiDou
4. The developed software in the hardware & software complex can be partially used as a prototype for the creation of a satellite navigation system for all stages of flight using different signals combinations of satellite systems: GPS, GLONASS, GALILEO and BeiDou, taking into account the implementation of navigation fields quality control.
5. The experimental investigations result of the aircraft coordinates accuracy determining using different signals combinations from satellite systems: GPS, GLONASS, GALILEO and BeiDou during the planned operation: maneuver in the aerodrome area, landing approach with vertical guidance and categorical, confirmed principle possibility of creating a satellite navigation system for all stages of the flight, taking into account the implementation of the navigation field quality control.
6. The experimental investigations result of the integrity in the form of percentage false system capacity and false system incapacity of satellite instrumental landing system using different signals combinations from satellite systems: GPS, GLONASS, GALILEO and BeiDou can be used for the creation of satellite navigation system for all stages of flight.

Keywords: navigation, landing system, global navigation satellite systems, accuracy, integrity.

Підписано до друку 17.08.2021
Формат 60x90 1/16. Папір офсетний № 2
Друк цифровий.
Ум. друк. арк. 0,9 арк.
Тираж 100 прим. Замовлення № 4876

Надруковано в типографії ФОП Степенко Р.Д.
02660, м. Київ, б-р Дружби Народів, 24/2
тел.: +38 (044) 223-81-79, www.urb.com.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 7205 від 03.12.2020