

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ОСТРОУМОВ ІВАН ВІКТОРОВИЧ



УДК 629.735.05: 519.226 (043.3)

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ КОМПЛЕКСНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ
ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗА СУКУПНІСТЮ НАВІГАЦІЙНИХ
ЗАСОБІВ В УМОВАХ РИЗИКУ**

05.22.13 – Навігація та управління рухом

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ-2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі Аеронавігаційних систем Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор,
ХАРЧЕНКО Володимир Петрович,
Національний авіаційний університет,
м. Київ, проректор з наукової роботи.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
СНІЦАРЕНКО Петро Миколайович,
Національний університет оборони України ім. Івана Черняховського, м. Київ, провідний науковий співробітник Центру воєнно-стратегічних досліджень;

доктор технічних наук, професор,
БАРАНОВ Георгій Леонідович,
Національний транспортний університет,
м. Київ, професор кафедри інформаційних систем і технологій;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
ПАВЛІКОВ Володимир Володимирович,
Національний аерокосмічний університет ім. Жуковського «ХАІ», м. Харків, проректор з наукової роботи.

Захист відбудеться «30» червня 2020 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, пр. Любомира Гузара, 1, корп. 1, ауд. 1.001.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, пр. Любомира Гузара, 1.

Автореферат розіслано «27» травня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д.т.н., проф., с.н.с.



С.В. Павлова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Точне визначення координат транспортного засобу є одним з головних завдань сучасних навігаційних систем. Сьогодні авіація є одним з стрімко розвиваючих типів транспорту. Численні переваги авіаційного транспорту, у порівнянні з іншими типами, зумовлюють постійно зростаючу зацікавленість у авіатранспортних послугах. Світова статистика авіап перевезень вказує на постійний ріст попиту на авіаційні послуги, як результат кількість польотів зростає швидкими темпами. За попереднім прогнозам послуги авіаційного транспорту подвоюються до 2034 р. у порівнянні з 2016р. Проте, стрімкий розвиток авіаційного транспорту впливає на завантаженість повітряного простору, пропускна здатність якого є обмеженою.

Вирішення проблеми обмеженості повітряного простору та задоволення потреб у авіап перевезеннях є основним викликом, що виникає перед авіатранспортною системою у майбутньому. Єдиним дієвим способом підвищення пропускної здатності є впровадження нових концепцій повітряного руху, зокрема введення зон вільних польотів (FreeFlight) та запровадження у повітряному просторі аеропорту (ТМА – Terminal Manoeuvring Area) нових схем руху літальних апаратів (ЛА), заснованих на більш точних навігаційних характеристиках. Збільшення вимог до точності позиціонування у повітряному просторі та впровадження нових більш точних навігаційних характеристик відзначено у глобальних та регіональних планах розвитку авіації. Підвищення точності навігаційних визначень є ключовим завданням у підтримці росту кількості авіап перевезень в умовах забезпечення необхідного рівня безпеки авіаційного транспорту.

На сьогоднішній день глобальні супутникові навігаційні системи (GNSS – Global Navigation Satellite System) відіграють основну роль у визначенні координат місцеположення ЛА, що затверджено на міжнародному рівні міжнародною організацією з цивільної авіації (ICAO – International Civil Aviation Organization). Це зумовлено доступністю до використання у глобальному масштабі, високими показниками цілісності, неперервності та точності позиціонування порівняно з іншими наявними методами. Проте, GNSS властиві певні недоліки, такі як: невдала геометрія розташування супутникового сегменту у певний момент часу, що знижує точність позиціонування та велика залежність від штучних завад, що у певних випадках може призводити до повної неможливості визначення координат місцезнаходження. GNSS є чутливою до впливу інтерференції від інших електронних пристроїв та природніх явищ. Оскільки космічний сегмент GNSS знаходиться на значній відстані від користувачів то, потужність сигналу GNSS у сегменті користувача низька і електронне обладнання з достатнім рівнем потужності може повністю завадити позиціонуванню.

Окрім того, на ринку доступна велика кількість систем, що здатні створювати завади у частотному діапазоні GNSS. Малі габаритні розміри та низька вартість зробили їх популярними для користувачів сьогодення з метою забезпечення власної приватності. Подібні системи порушують законодавство з радіочастотного використання, проте зона їх дії є малою, що унеможливує їх виявлення та блокування. Відповідно до цього, ця проблема є актуальною і залишиться такою найближчим часом. Питання визначення власного місцеположення літака є особливо актуальним на етапі зльоту та посадки ЛА, оскільки від точності та доступності позиціонування залежить безпека авіаційних перевезень. Крім того, літак, що знаходиться на малій висоті вразливий до завад, джерело яких може знаходитись на Землі. Погана точність позиціонування може призвести до аварійної ситуації та навіть катастрофи.

Міжнародне світове авіаційне товариство вже багато років займається проблемою пошуку оптимальних альтернативних до GNSS методів позиціонування задля забезпечення продовження польоту за правилами польотів за приладами у випадку відмови GNSS.

У якості альтернативних систем позиціонування на транспортних засобах використовуються інерціальна навігаційна система та алгоритми навігації за парами наземних радіомаяків. Використання інерціальної навігаційної системи обмежено у часі, у зв'язку з накопиченням похибки. Численні фундаментальні дослідження довели актуальність використання наземних систем зональної навігації у якості альтернативних засобів позиціонування. Позиціонування за наземними радіомаяками розглядається як альтернатива супутниковій навігації у глобальних планах розвитку повітряного транспорту. Алгоритми зональної навігації, що застосовуються на повітряному транспорті сьогодні використовують одночасно лише пару радіомаяків для визначення координат, що значно обмежує їх точність.

Питаннями позиціонування ЛА за парами радіонавігаційних засобів займалися відомі вчені А. Сайбель, П. Бакулев, Л. Беляевский, О. Скріпник, В. Рухнов (W. Ruhnow), Д. Сенгупта (D. Sengupta), К. Хіросава (K. Hirasawa), Г. Берц (G. Berz) та інш.

Питання альтернативних до GNSS засобів позиціонування цивільної авіації розглядалися у працях багатьох вчених. Зокрема, Е. Кім (E. Kim) досліджував питання оптимальної форми навігаційних сигналів та інтеграцію позиціонування за парами радіомаяків з мультilateraційними системами; П. Енге (P. Enge), С. Ло (S. Lo), Х. Чен (H. Chen) розглядали можливість підвищення точності DME за рахунок сумісної обробки з сигналами ADS-B та пасивні методи використання DME; О. Кім (O. Kim), Т. Лі (T. Lee), С. Кі (C. Kee), Н. Шенкенбургер (N. Schneckenburger), Д. Шутін (D. Shutin) досліджували перспективні методи позиціонування; Л. Елдредж (L. Eldredge),

М. Харісон (M. Harrison), Р. Кенагі (R. Kenagy), С. Хан (S. Han) проаналізували теперішній стан та виділи перспективні напрямки розвитку альтернативних методів позиціонування.

Запропоновані вченими альтернативні до GNSS методи позиціонування у більшості випадків ґрунтуються на розробці принципово нових систем навігації, чи потребують вагомих змін у наземній аеронавігаційній інфраструктурі, що вимагають значних економічних, часових затрат та передбачають значні труднощі у затвердженні і впровадженні на міждержавному рівні.

Вагомий внесок у розвиток методів визначення координат місцеположення літального апарату, дослідження впливу штучних завад на точність позиціонування у просторі, дослідження питань точності, цілісності та неперервності аеронавігаційної інформації у системах позиціонування ЛА для підвищення безпеки навігації та авіації у цілому зробили також вітчизняні вчені та науковці Національного авіаційного університету: В. Харченко, В. Конін, О. Писарчук, К. Сундучков, Ф. Яновський, Л. Сібрук, Т. Шмельова.

Особливо актуальною проблема точного визначення координат місцеположення ЛА є відповідно до сучасних аеронавігаційних концепцій, що ґрунтуються на широкому використанні аеронавігаційних даних, оцінених на борту ЛА, а відповідно до планів розвитку аеронавігаційної інфраструктури, роль бортових систем позиціонування буде тільки зростати у майбутньому.

Таким чином, дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми, що виникає з протиріччя між можливостями сучасних бортових систем навігації ЛА та зростаючими потребами цивільної авіації, яка полягає у підвищенні точності визначення координат місцеположення ЛА в умовах незапланованої відмови основної системи позиціонування з метою забезпечення виконання сучасних вимог навігації заснованої на характеристиках. Для вирішення поставленої проблеми актуальним є розроблення нових методів позиціонування за сукупністю далекомірних та кутомірних навігаційних засобів, пасивного використання сигналів у системі вимірювання дальності, інформаційних параметрів у системі попередження зіткнень літаків в умовах дії новітніх концепцій зв'язку, навігації та спостереження для підвищення точності та доступності аеронавігаційної інформації в умовах впровадження новітніх концепцій повітряного руху.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема роботи відповідає Програмі розвитку навігаційної інфраструктури Украероруху до 2025 року для забезпечення навігації, заснованої на характеристиках, концепції впровадження «Єдиного Європейського Неба» SESAR Horizon 2020 (PJ14-03-04, APNT) та виконана в рамках

фундаментальних науково-дослідних робіт: шифр 493ДБ–08 – тема «Теоретичні засади багатоальтернативного ситуаційного моделювання та оцінки ризиків в соціотехнічних системах» (номер держреєстрації 0108U004004) (автор був виконавцем роботи), шифр 151ДБ–09 – тема «Розробка та впровадження глосарію міжнародних авіаційних акронімів та термінів» (номер держреєстрації 0109U008048) (автор був виконавцем роботи), шифр 729ДБ–11 – тема «Розроблення автоматизованої системи мінімізації впливу людського фактору з англомовною складовою на безпеку аеронавігаційного обслуговування» (номер держреєстрації 0111U002325) (автор був виконавцем роботи), шифр 131-ДБ17 – тема «Методологія розроблення високоточних динамічних модульних систем багатоальтернативного виявлення, розпізнавання та класифікації об'єктів» (номер держреєстрації 0111U002342) (автор був виконавцем роботи), шифр 133-ДБ17 – тема «Система моніторингу доступності радіонавігаційного поля при заходах на посадку літальних апаратів за сигналами GNSS» (номер держреєстрації 0117U002371)(автор був виконавцем роботи), «SESAR on GNSS Vulnerability Assessment by performing Space Weather Analysis» (Eurocontrol, м. Брюссель, Бельгія) (автор був виконавцем роботи) та науково-дослідницького гранту ім. Дж. В. Фулбрайт «An investigation and development of alternative methods of positioning and navigation for air transport» (ІЕ, університет Пурдю, м. Вест Лафает, США) у 2017-2018 рр.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності та доступності навігаційних параметрів користувачів повітряного простору шляхом розробки методологічних засад позиціонування літального апарату з використанням сукупності радіонавігаційних даних.

Поставлена мета дисертаційного дослідження потребує вирішення таких ієрархічно пов'язаних завдань дослідження:

1. Провести аналіз наукових досліджень та особливостей позиціонування літального апарату для цілей навігації в умовах новітніх авіаційних концепцій та стратегії розвитку аеронавігаційної галузі;

2. Дослідити та оптимізувати математичні моделі позиціонування літального апарату за бінарними співвідношеннями у аеронавігаційній системі задля підвищення точності оцінювання навігаційних даних;

3. Розробити нові методи позиціонування за сукупністю радіонавігаційних засобів з використанням прогнозованих даних, інформації пасивного спостереження та системи попередження зіткнень літаків у повітрі;

4. Дослідити та удосконалити метод оцінювання доступності радіонавігаційних засобів у визначеному повітряному просторі і розробка моделей оцінювання точності за сукупністю радіонавігаційних засобів;

5. Розробити моделі поєднання координатної інформації літального апарату, класифікації та прийняття рішень щодо відповідності специфікаційним вимогам навігації заснованої на характеристиках;

6. Дослідити регіональні особливості мережі наземних радіонавігаційних засобів України з метою розробки дво- та тривимірних моделей відповідності характеристик вимогам зональної навігації;

7. Перевірити та довести працездатність нових методів позиціонування за сукупністю радіонавігаційних засобів шляхом комп'ютерного моделювання з використанням польотної інформації.

Об'єктом дослідження є процес визначення координат місцеположення центру мас літального апарату.

Предметом дослідження є методи визначення координат місцеположення центру мас літального апарату за сукупністю інформації від існуючих радіонавігаційних засобів.

Методи дослідження. Проведені теоретичні дослідження базуються на сучасних теоріях: позиціонування, навігації, поширення електромагнітних хвиль, передачі інформації, спостереження, прогнозування, об'єднання інформації, оптимізації.

При розв'язанні задач використані методи математичного моделювання, теорії ймовірностей, математичної статистики, регресійного аналізу, теорії множин, теорії сигналів та сучасних комп'ютерних технологій. Результати теоретичних досліджень підтверджені результатами комп'ютерного моделювання та експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Уперше розроблено методи позиціонування літального апарату за розширеним вектором інформативних параметрів від наземних радіонавігаційних засобів з використанням прогнозованих параметрів за регресією від далекомірного обладнання та кутової інформації від всенаправлених радіомаяків, що дозволяє підвищити точність кожного з методів шляхом вибору вдалої геометрії взаємного місцерозташування у порівнянні з парним принципом.

2. Уперше розроблено метод позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків у повітрі та інформацією про повітряний рух навколо, отриманої за концепцією автоматичного залежного спостереження, що дозволяє оцінювати координати літального апарату з урахуванням зони невизначеності та підвищувати якість аеронавігаційного забезпечення польотів.

3. Уперше розроблено метод пасивного позиціонування за комбінованою інформацією далекомірного обладнання та автоматичного залежного спостереження, що дозволяє на основі обробки інформаційних повідомлень визначати власне місцеположення у просторі, без випромінювання

електромагнітних хвиль, що зменшить навантаженість на наземні радіонавігаційні засоби.

4. Удосконалено метод оцінювання доступності радіонавігаційних засобів, що на відміну від існуючих методів, враховує індивідуальні особливості наземного обладнання, вплив тропосфери, рельєфу місцевості і штучних споруд, що дозволяє більш точно визначати зону дії наземних радіонавігаційних засобів у повітряному просторі.

5. Уперше запропоновано моделі ймовірнісного класифікатора для контролю за витримуванням навігаційних характеристик, що гарантує розпізнавання відповідності специфікаційним вимогам зональної навігації з максимальною ймовірністю.

6. Отримано подальший розвиток оптимізаційної задачі вибору оптимального набору радіонавігаційних засобів, розв'язок якої запропоновано виконувати у термінах цілочисленого лінійного програмування, що дозволить отримати максимально можливу точність позиціонування за кутомірним, далекомірним та кутомірно-далекомірним методами.

7. Уперше розроблено модель оцінювання характеристик поля навігаційних сигналів сформованих наземними радіонавігаційними засобами у тривимірному просторі, що дозволяє отримувати точну тривимірну модель просторових зон відповідності специфікаційним вимогам зональної навігації для задач планування повітряного руху.

Практичне значення одержаних результатів. Виконані дослідження забезпечують досягнення практично важливих результатів, а саме:

1. Розроблено алгоритм вибору оптимального набору радіонавігаційних засобів за критерієм максимальної точності і доступності позиціонування для далекомірного, кутомірного та кутомірно-далекомірного методів з урахуванням неточно відомих координат місцеположення літального апарату, що гарантуватимуть найвищу точність позиціонування.

2. Розроблено програмне забезпечення для оцінювання доступності та точності позиціонування за сигналами далекомірних та кутомірних систем у тривимірному просторі.

3. Узагальнено структуру поєднання координатної інформації на борту літального апарату, що на відміну від існуючої, використовує дані від систем позиціонування за багатьма навігаційними засобами, що дозволяє підвищити надійність та точність навігаційних параметрів.

4. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для оцінювання характеристик позиціонування за парами радіонавігаційних засобів на основі записів тривимірної траєкторії руху ЛА, що дозволяє виконувати дослідження відповідності польотного завдання вимогам зональної навігації.

5. Виконано аналіз аеронавігаційного забезпечення у повітряному просторі України відповідно до специфікаційних вимог навігації заснованої на характеристиках, досліджено зони доступності радіонавігаційних засобів, характеристики точності, що дозволяє сформулювати основні напрямки розвитку аеронавігаційного забезпечення з метою підвищення рівня безпеки авіаперевезень.

6. Розроблено систему для пасивного моніторингу характеристик поля сигналів запиту національної мережі радіонавігаційних засобів, що виконує вимірювання частоти запитів та ефективності функціонування обладнання.

7. Оцінено ризики у аеронавігаційній системі, які є результатом незапланованого відхилення літального апарату від запланованої траєкторії руху, що враховують похибки системи позиціонування за наземними радіонавігаційними засобами та вимоги зональної навігації.

8. Виконано дослідження змін у розподілі поля характеристик радіонавігаційних засобів для повітряного простору України, що стали результатом втрати частини наземного обладнання внаслідок територіального конфлікту на сході та півдні країни.

Оригінальність технічних рішень підтверджено отриманими патентами України на корисну модель «Спосіб позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків», «Спосіб позиціонування за сукупністю сигналів від далекомірного обладнання», «Спосіб позиціонування за сукупністю сигналів від всенапрямлених кутомірних радіомаяків та прогнозованої інформації», «Спосіб пасивного позиціонування за комбінованою інформацією далекомірного обладнання та автоматичного залежного спостереження», «Спосіб визначення координат літального апарату» та десятьма авторськими свідоцтвами на розроблене програмне забезпечення, що використовують розроблені методи, моделі та алгоритми.

Результати роботи можуть бути використані для розробки новітніх систем позиціонування, що можуть виступати у якості резервних до супутникової глобальної системи позиціонування для забезпечення навігації заснованої на характеристиках та вимог управління повітряним рухом в умовах функціонування новітніх авіаційних концепцій, а також у подальших наукових дослідженнях в галузі підвищення ефективності методів та засобів аеронавігації при розробці національної стратегії розвитку радіонавігаційних засобів України з метою підвищення безпеки польотів.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати роботи повною мірою висвітлені у публікаціях [1–66]. Усі результати, подані у дисертаційній роботі, здобувачем отримані особисто. У наукових працях, написаних у співавторстві, здобувачу належить: В роботі [1] – математичні залежності для оцінювання характеристик поля навігаційних сигналів у термінах теорії множин; [2] – метод підвищення точності позиціонування

літального апарату за розширеним вектором інформаційних параметрів від наземних кутомірних радіомаяків з використанням прогнозованих параметрів за регресією; [3] – досліджено моделі оцінювання навігаційних похибок за оптимальним набором далекомірного обладнання у межах повітряного простору України; [5] – математичні залежності для оцінювання координат літального апарату за кутомірно-далекомірним принципом з урахуванням прогнозованих за регресією даних; [6] – програмне забезпечення для вимірювання, декодування та обробки даних персонального пристрою з метою визначення координат об'єкта у просторі; [7] – сформульовано оптимізаційну задачу у термінах лінійного програмування для раціоналізації розміщення наземних радіонавігаційних засобів з метою підвищення точності позиціонування; [15] – програмне забезпечення для ймовірнісної класифікації об'єктів; [16] – математичний апарат та програмне забезпечення для оцінювання доступності поля радіолокаційних сигналів у повітряному просторі України; [18, 61] – запропоновано модель дослідження параметрів магнітного поля Землі на основі вимірювань складових вектору напруженості у зв'язаній з об'єктом системі координат; [19] – виконано комп'ютерне моделювання області простору дестабілізуючих факторів; [20] – проведено дослідження випадку не повної домінанти у наборі нечітких множин; [21] – розроблено метод позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків у повітрі; [23] – проведено оцінювання характеристик DME/DME позиціонування для повітряного простору України, порівняння парного принципу позиціонування та позиціонування за всіма доступними DME у певній частині повітряного простору; [26] – виконано оцінювання ймовірності втрати повітряних кораблів при оптимальному об'ємі вибірки за новими правилами ешелонування під час обслуговування повітряного руху у повітряному просторі України; [27] – проаналізовано основні принципи багатокритеріального оцінювання альтернатив; [28] – розроблено програмне забезпечення для моніторингу положення літаків за повідомлення системи ACARS, та алгоритм перетворення координат літаків для відображення на карті відповідної місцевості; [35] – модель для визначення координат місцеположення безпілотного літального апарату та її програмна реалізація; [36] – математичні моделі позиціонування з використанням фільтрації вхідних даних на нижньому та верхньому рівнях, їх програмна реалізація; [37] – математична модель оцінювання ризику втрати позиціонування за оптимальною парою радіонавігаційних засобів відповідно до вимог зональної навігації; [37] – теоретично сформульовано задачу вибору оптимальної пари радіонавігаційних засобів у термінах цілочисленого лінійного програмування та запропоновано алгоритм пошуку оптимальної пари РНЗ; [39] – виконано порівняння методів позиціонування за парою та за сукупністю радіонавігаційних засобів шляхом комп'ютерного моделювання з

використанням польотних даних; [40] – розроблено підхід до оцінювання характеристик методів позиціонування у тривимірному просторі та проведено оцінювання об'єму повітряного простору відповідності специфікаційним вимогам зональної навігації у межах повітряного простору України; [41] – розроблено моделі класифікатора стану відповідності вимогам зональної навігації за значеннями похибки позиціонування, за величиною похибки у повздовжньому та боковому відхиленні; [42] – розроблено модель позиціонування за багатьма вимірюваннями дальності, виконано оцінювання точності позиціонування для повітряного простору України; [43] – альтернативні до супутникових систем моделі та алгоритми позиціонування та навігації у обчислювальній системі літаководіння; [46] – розроблено структурну схему та програмне забезпечення для дослідження функціонування системи попередження зіткнень літаків у повітрі на основі гомоморфної моделі повітряного руху; [48] – розроблено програмне забезпечення для візуалізації метеорологічної інформації; [51] – розроблено математичну модель системи попередження зіткнень літаків у повітрі та програмне забезпечення моделювання повітряного руху для дослідження принципів її функціонування при різних сценаріях подій; [52] – розроблено структурну схему моніторингу повітряного руху за цифровими повідомленнями ACARS та розроблено програмне забезпечення для візуалізації місцеположення та траєкторії руху ЛА; [53] – проаналізовано впровадження концепцією ADS-B у повітряному просторі України для цілей позиціонування ЛА; [66] – проаналізовано зміни у характеристиках навігаційного поля сигналів далекомірного та кутомірного обладнання у термінах точності та доступності для повітряного простору України.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних конференціях: «Авіа-2009», вересень 2009, Київ, Україна; «Сучасні інформаційні технології в управлінні та професійній підготовці операторів складних систем», жовтень 2009, Кіровоград, Україна; «Проблеми навігації та управління повітряним рухом», листопад 2010, Київ, Україна; «Сучасні інформаційні технології в управлінні та професійній підготовці операторів складних систем», жовтень 2010, Кіровоград, Україна; The Fourth World Congress «Aviation in the XXI-st century. Safety in Aviation and Space Technologies», вересень 2010, Київ, Україна; «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», 2010, Херсон, Україна; «Новітні технології – для захисту повітряного простору», квітень 2011, Харків, Україна; «Авіа-2011» квітень 2011, Київ, Україна; «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», 2011, Херсон, Україна; «Сучасні проблеми авіакосмічних технологій та систем», травень 2011, Житомир, Україна; «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху

CNS/ATM», листопад 2011, Київ, Україна; «Сучасні проблеми авіакосмічних технологій та систем», травень 2012, Житомир, Україна; The Fifth World Congress «Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies», 2012, Київ, Україна; «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики», жовтень 2012, Київ, Україна; «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM», листопад 2012, Київ, Україна; «Сучасні проблеми авіакосмічних технологій та систем», червень 2013, Житомир, Україна; «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики», жовтень 2013, Київ, Україна; The Sixth World Congress «Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies» 2014, Київ, Україна; «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики», жовтень 2014, Київ, Україна; «Авіа-2015», квітень 2015, Київ, Україна; «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики», жовтень 2015, Київ, Україна; IEEE 4th International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control» (MSNMC-2016), жовтень 2016, Київ, Україна; The Seventh World Congress «Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies», 2016, Київ, Україна; «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM», 2016, Київ, Україна; «Science – Future of Lithuania. Transport Engineering and Management», Травень 2017, Вільнюс, Литва; «Авіа-2017», квітень 2017, Київ, Україна; «Актуальные проблемы и перспективы развития авиации», Червень 2017, Мінськ, Беларусь; «Actual problems of unmanned aerial vehicles development» (APUAVD-2017), 2017, Київ, Україна; «Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics» (UkrMiCo-2018), 2018, Одеса, Україна; «Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress» (UKRSYW-2018), 2018, Київ, Україна; «System Analysis & Intelligent Computing» (SAIC-2018), 2018, Київ, Україна; «Methods and Systems of Navigation and Motion Control» (MSNMC -2018), 2018, Київ, Україна; «European microwave conference in central Europe» (EuMCE-2019), 2019, Прага, Чехія; «Signal Processing Symposium» (SPSympo-2019), 2019, Краків, Польща; «Actual problems of unmanned aerial vehicles development» (APUAVD-2019), 2019, Київ, Україна.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 66 наукових праць, у тому числі 24 статті у фахових наукових виданнях України (у тому числі 12 статей без співавторів), 5 статей в міжнародних фахових журналах за кордоном, з них 3 публікації у виданнях з третього квартиля, 5 патентів, один розділ монографії а також 31 робота у збірниках матеріалів і праць міжнародних конференцій.

Сторінка автора в міжнародній наукометричній реферативній базі Scopus (authorId=23478131700) містить 21 наукову працю (Цитування: 54; Індекс Хірша: 5).

Сторінка автора у реферативній базі Google Scholar (user=XcwGeCgAAAAJ) містить 190 наукових праць (Цитування: 370; Індекс Хірша: 10; Індекс i10: 12).

Унікальний ідентифікатор науковця (Open Researcher and Contributor ID – ORCID): 0000-0003-2510-9312.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (359 найменувань) і трьох додатків. Основний зміст викладений на 295 сторінках друкованого тексту, містить 189 рисунків та 20 таблиць. Повний обсяг дисертації становить 463 сторінки, з яких 59 сторінок містять додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, а також наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** проаналізовано стан проблеми позиціонування та навігації літального апарату як динамічної системи в умовах дії негативних факторів і сформульовано постановку основних задач дослідження.

Результати аналізу методів позиціонування та навігації літальних апаратів встановлюють, що GNSS є основним джерелом навігаційних даних через високі показники точності, доступності та неперервності отримуваної інформації у порівнянні з іншими наявними системами. Проте, дія негативних факторів, зокрема таких як інтерференція радіохвиль чи ненавмисне глушіння сигналів, що можуть розглядатися як рідкісні події, значно погіршують характеристики навігації чи навіть можуть призвести до повної неможливості визначення координат місцеположення ЛА у просторі. Результати аналізу безпеки авіаперевезень цивільної авіації показують поступово зростаючу кількість інцидентів, що мали місце з причини неможливості застосування GNSS з метою позиціонування (рис.1).



Рис. 1. Вплив відмов GNSS на безпеку повітряного руху

Аналіз резервних методів і систем позиціонування ЛА вказує на обмеженість методів числення часу у зв'язку з адитивним характером похибки та недостатньою точністю навігаційних визначень за парами наземних кутомірних та кутомірно-далекомірних радіомаяків відповідно до сучасних концепції аеронавігаційного забезпечення польотів. Проте, існуючі методи позиціонування за наземними радіомаяками обмежуються використанням тільки пари радіонавігаційних засобів (РНЗ), що здебільшого не використовують оптимізаційні критерії і не гарантують позиціонування в умовах дії концепції навігації заснованої на характеристиках. Крім того, точність і доступність навігаційних обчислень значною мірою залежать від наземного сегменту обладнання. Тому, одним з напрямків підвищення характеристик позиціонування є розвиток наземної інфраструктури навігаційних засобів та їх ефективне використання. Підвищення характеристик навігаційних визначень, може бути досягнуто шляхом вирішення задачі оптимального вибору РНЗ за критерієм мінімального значення похибки позиціонування:

$$NAV := \{nav|A(wp)\}, NAV^2 = \{<i,j> | i, j \in NAV\},$$

$$x_{opt} \in NAV^2: f(x_{opt}) = \min_{x \in NAV^2} f(x), \quad (1)$$

де NAV – множина унікальних ідентифікаторів доступних до використання у певній точці простору РНЗ, що задається елементами wp_i множини ідентифікаторів РНЗ WP ($NAV \subset WP$), для яких булева функція доступності A повертає дійсні значення; NAV^2 – підмножина бінарного відношення у множині NAV , що складається з впорядкованих пар ідентифікаторів доступних РНЗ; $f(x)$ – функція точності позиціонування; x_{opt} – кортеж оптимальних ідентифікаторів РНЗ.

Технічні та економічні вимоги до складу бортового обладнання ЛА сьогодні не дозволяють розширювати інформаційну здатність системи за рахунок збільшення кількості застосовуваних сенсорів для якісного підвищення точності навігаційних розрахунків. Проте, підвищення навігаційних характеристик можливо досягти шляхом розширення вектору інформаційних параметрів прогнозованими даними на основі апріорної інформації отриманої на основі попередніх спостережень та інформаційними сигналами доступними у точці місцеположення ЛА:

$$X = F(D_m, D_p, Y_m, Y_p), \quad (2)$$

де X – координати місцеположення ЛА; F – функція системи навігаційних рівнянь; D_m, D_p – координати місцеположення навігаційних точок для виміряних та прогнозованих параметрів відповідно; Y_m, Y_p – вектори виміряних та прогнозованих параметрів.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету і завдання наукового дослідження, які необхідно вирішити для досягнення поставленої цілі.

У **другому розділі** представлено та проаналізовано методи позиціонування ЛА за бінарними співвідношеннями між множинами кутомірної, далекомірної та кутомірно-далекомірної інформації.

Запропоновано оцінювати точність позиціонування ЛА за множинами кутомірної інформації через внутрішні кути, що характеризують зону невизначеності місцеположення за залежністю випадкової величини $\varphi(\Delta_\alpha)$:

$$\varphi(\Delta_\alpha) = \frac{R_A \sin(\Delta_\alpha)}{\sin\left(\arctg\left(\frac{R_A \sin(\alpha_{AB} - 2\Delta_\alpha)}{R_B + R_A |\cos(\alpha_{AB} - 2\Delta_\alpha)|}\right)\right)}, \quad (3)$$

де Δ_α – випадкова величина похибки вимірювання кутової інформації; R_A, R_B – відстані до кутомірних радіомаяків у площині горизонту; α_{AC} – внутрішній кут між напрямки на радіомаяки.

Дисперсія неперервної випадкової величини оцінюється наступним чином:

$$\sigma_{VOR/VOR}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (\varphi(\Delta_\alpha) - E[\varphi(\Delta_\alpha)])^2 f(\Delta_\alpha) d\Delta_\alpha, \quad (4)$$

де $f(\Delta_\alpha)$ – щільність ймовірності розподілу похибки.

Досягнення максимальних характеристик позиціонування за РНЗ можливе лише за рахунок комплексного вирішування задачі оптимального вибору набору РНЗ та методу позиціонування в умовах дії концепції навігації за характеристиками. У роботі сформульовано оптимізаційну задачу у термінах бінарного цілочисленого лінійного програмування для пошуку ефективного кортежу ідентифікаторів РНЗ на основі даних імітаційного моделювання у точці положення ЛА у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} WX^T &\Rightarrow \min, \\ AX^T &\geq N_{max} \\ GX^T &\geq 30^\circ \\ -GX^T &\geq -150^\circ \\ IX^T &= 1 \\ X &\geq 0, \\ X &\in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (5)$$

де $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ – бінарний вектор, елементи якого відповідають кортежу індексів навігаційних засобів; $W = [W_{DME/DME}, W_{VOR/VOR}, W_{VOR/DME}]$ – вагова матриця; A – бінарна матриця доступності послуг РНЗ; N_{max} – обмеження на максимальну кількість доступних РНЗ; $G = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n]$ – матриця

внутрішніх кутів між напрямками на навігаційні засоби; I – одиничний вектор.

Елементи вектору X визначаються у бінарній формі: $x_i = 1$ відповідає оптимальному кортежу; $x_i = 0$ – відображає можливі, проте неоптимальні рішення. Елементи вагової матриці визначають вагу кожного з доступних методів:

$$\begin{aligned} W_{DME/DME} &= [\sigma_{DME/DME 1}, \sigma_{DME/DME 2}, \dots, \sigma_{DME/DME n}]; \\ W_{VOR/VOR} &= [\sigma_{VOR/VOR 1}, \sigma_{VOR/VOR 2}, \dots, \sigma_{VOR/VOR n}]; \\ W_{VOR/DME} &= [\sigma_{VOR/DME 1}, \sigma_{VOR/DME 2}, \dots, \sigma_{VOR/DME n}]. \end{aligned} \quad (6)$$

Оптимізаційна задача розв'язується одним з методів теорії лінійного програмування, у випадку якщо подібне рішення існує для даного набору кортежів ідентифікаторів. Зокрема, для її розв'язку можуть застосовуватись симплекс метод, метод еліпсоїдів чи перебору.

Експериментальне дослідження моделей позиціонування за бінарними співвідношеннями у аеронавігаційній системі вказують на недостатній рівень точності і доступності відповідно до вимог зональної навігації. Розглянуто питання фільтрації похибок на різних рівнях обробки навігаційної інформації, зокрема на рівні результатів вимірювання сенсорів актуальним є використання алгоритмів фільтрації Калмана. Крім того, досліджено та доведено актуальність застосування методів згладжування даних на рівні обробки траєкторної інформації.

Основним результатом другого розділу є сформульована у термінах цілочисленого лінійного програмування та вирішена задача вибору оптимального набору РНЗ; аналіз методів позиціонування за бінарними співвідношеннями.

У третьому розділі представлено запропоновані методи позиціонування ЛА за сукупністю навігаційних засобів. Розширення інформативних параметрів від РНЗ виконується за рахунок врахування результатів попередніх вимірювань та побудови прогнозу за регресійною моделлю.

Метод позиціонування за розширеним вектором інформативних параметрів від далекомірного обладнання використовує виміряні та прогнозовані за попередніми вимірюваннями значення відстаней.

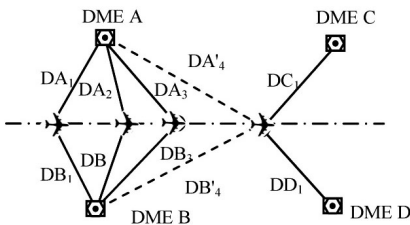


Рис. 2. Формування розширеного вектору параметрів відстані

Метод враховує обмеження на характеристики бортового обладнання та відповідно до пріоритету виконує вимірювання відстаней до оптимальної пари DME A та B ($DA_1, DB_1, DA_2, DB_2, DA_3, DB_3$) на час вимірювання (рис. 2). Змінюваність

характеристик поля навігаційних сигналів вимагає постійного пошуку оптимальної конфігурації кортежу та зміни налаштувань бортового обладнання для виконання наступних вимірювань відповідно до пріоритету точності (DC_1, DD_1). Накопичені спостереження відстаней дозволяють використати регресійні моделі для прогнозування параметрів.

Відповідно на час четвертого спостереження, маємо дві виміряні відстані до DME C і DME D (DC_1, DD_1) та результати прогнозування відстаней до DME A і B (DA'_4, DB'_4). Метод дозволяє розширити вектор відстаней за рахунок прогнозованих значень та передбачає контроль похибок, що вноситься регресійною моделлю на рівні, що не перевищуватиме вигреш від вибору оптимальної геометрії. Система навігаційних рівнянь у локальній системі координат:

$$D^2 = (x_{ЛА} - x_{DME})^2 + (y_{ЛА} - y_{DME})^2 + (z_{ЛА} - z_{DME})^2, \quad (7)$$

де $x_{ЛА}, y_{ЛА}, z_{ЛА}$ – координати ЛА; $x_{DME}, y_{DME}, z_{DME}$ – вектори місцеположення DME; $D = [d_6; d_n]$ – сукупний вектор виміряних та прогнозованих відстаней.

Розв'язок (1) отримується за ітеративним підходом з лінеаризацією рівнянь за рахунок розкладу у ряд Тейлора за похідними першого порядку:

$$\Delta u = (H^T H)^{-1} H^T \Delta D, \quad (8)$$

де Δu – вектор різниці координат місцеположення на кожному кроці ітерації; ΔD – вектор різниці відстаней; H – матриця часткових похідних по координатам.

Прогнозування навігаційної інформації засновано на використанні лінійної регресійної моделі з істинним відгуком у вигляді сплайн функцій:

$$S(t) = \sum_{j=1}^{n+3} B_{j,m}(t) P_j, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (9)$$

де $S(t)$ – результат екстраполяції сплайну на час t ; P_j – вектор контрольних точок сплайн функцій; $B_{j,m}(t)$ – базисні функції сплайну.

У якості $B_{j,m}(t)$ використано функцію Кокс-Де Бура, що визначає j -ту базисну функцію B -сплайну певного степені m :

для $m=1$:

$$B_{j,1}(t) = \begin{cases} 1, & \tau_j \leq t \leq \tau_{j+1} \\ 0, & \tau_j > t > \tau_{j+1} \end{cases},$$

для $m \geq 2$:

$$B_{j,m}(t) = \frac{t - \tau_j}{\tau_{j+m-1} - \tau_j} B_{j,m-1}(t) + \frac{\tau_{j+m} - t}{\tau_{j+m} - \tau_{j+1}} B_{j+1,m-1}(t), \quad (10)$$

де τ – вектор вузлових точок.

Контрольні точки розраховуються за відомою навчальною вибіркою об'ємом n :

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & t_1 \\ p_2 & t_2 \\ \dots & \dots \\ p_n & t_n \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} d_1 & t_1 \\ d_2 & t_2 \\ \dots & \dots \\ d_n & t_n \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} B_{1,m}(t_1) & B_{2,m}(t_1) & B_{3,m}(t_1) & \dots & B_{n,m}(t_1) \\ B_{1,m}(t_2) & B_{2,m}(t_2) & B_{3,m}(t_2) & \dots & B_{n,m}(t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{1,m}(t_n) & B_{2,m}(t_n) & B_{3,m}(t_n) & \dots & B_{n,m}(t_n) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де P – вектор контрольних точок; B – регресійна матриця; D – навчальна вибірка, що містить результати вимірювань та часовий відлік.

Екстраполяція на час спостереження:

$$D = BP. \quad (12)$$

Незсунена оцінка дисперсії оцінюється через суму залишків регресії:

$$\sigma_p^2 = \frac{(D - BT)^T (D - BT)}{n - (N + 3)}, \quad (13)$$

де N – кількість контрольних точок.

У роботі розглядаються два підходи до формування навчальної вибірки інформативних параметрів:

Підхід А «Постійне використання оптимальної пари навігаційних засобів» ґрунтується на традиційному принципі оптимального набору (рис. 3). При цьому, на кожній ітерації оцінюється та налаштовується на вимірювання оптимальний набір навігаційних засобів. У час зміни оптимального кортежу, всі попередні вимірювання утворюють навчальну вибірку для кроків екстраполяції. Даний підхід є повністю сумісним з існуючою структурою бортового обладнання та орієнтований на паралельні обчислення у бортовому навігаційному комплексі.

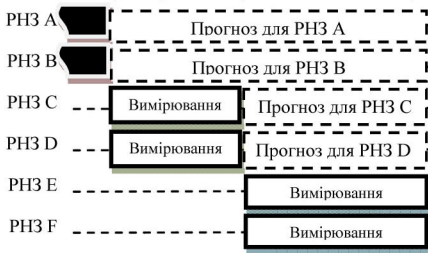


Рис. 3. Підхід А «Постійне використання оптимальної пари навігаційних засобів»

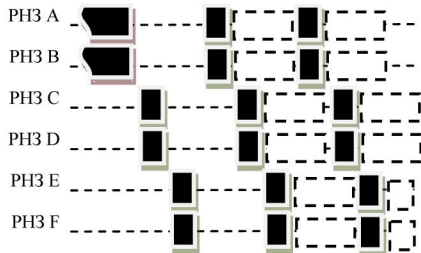


Рис. 4. Підхід Б «Послідовний перебір наявних навігаційних засобів»

Підхід Б «Послідовний перебір наявних навігаційних засобів» заснований на одиничних вимірюваннях у межах множини доступних навігаційних засобів, характеризується однорідністю навчальної вибірки у часі та даними, що покривають усю множину (рис. 4). Основним недоліком підходу Б є затримка на час очікування достатнього об'єму навчальної вибірки, необхідної для прогнозування та розв'язку навігаційного рівняння.

Оцінка дисперсії похибки позиціонування ґрунтується на векторі похибок вимірювання та прогнозування:

$$\sigma_{pDME}^2 = \text{trace}(H_{DME}^T \text{diag}([S_{DMEm}, S_{DMEp}])^{-1} H_{DME})^{-1}; \quad (14)$$

$$H_{DME} = \begin{bmatrix} \frac{x_{ЛА} - x_{DME1}}{D_1} & \frac{y_{ЛА} - y_{DME1}}{D_1} & \frac{z_{ЛА} - z_{DME1}}{D_1} \\ \frac{x_{ЛА} - x_{DME2}}{D_2} & \frac{y_{ЛА} - y_{DME2}}{D_2} & \frac{z_{ЛА} - z_{DME2}}{D_2} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{x_{ЛА} - x_{DME_n}}{D_n} & \frac{y_{ЛА} - y_{DME_n}}{D_n} & \frac{z_{ЛА} - z_{DME_n}}{D_n} \end{bmatrix},$$

де H_{DME} – матриця часткових похідних за координатами; S_{DMEm}, S_{DMEp} – вектори дисперсії похибок вимірювань та прогнозування відстаней.

Метод позиціонування за розширеним вектором інформативних параметрів від кутмірного обладнання ґрунтується на об'єднанні азимутальної інформації від наземних радіонавігаційних засобів з прогнозованими за регресією параметрами на основі попередніх вимірювань (рис. 5).

Місцеположення ЛА розраховується з навігаційного рівняння у матричному вигляді:

$$X = ((A^T A)^{-1} A^T B)^T, \quad A = [\text{tg}(\alpha_i), -1]; \quad X = [x_{ЛА}, y_{ЛА}]; \quad B = [x_i \text{tg}(\alpha_i) - y_i]; \quad i = 1 \dots n. \quad (15)$$

де α_i – вимірюння та прогнозовані значення кутів; x_i, y_i – координати місцеположення РНЗ.

Точність навігаційних визначень, можна представити у вигляді середньоквадратичного відхилення:

$$\sigma_{pVOR}^2 = \text{trace}(H_{VOR}^T \text{diag}([S_{VORm}, S_{VORp}])^{-1} H_{VOR})^{-1}. \quad (16)$$

$$H_{VOR} = \begin{bmatrix} \frac{y_{VOR/VOR1} - y_{ЛА}}{d_1^2} & \frac{x_{ЛА} - x_{VOR/VOR1}}{d_1^2} \\ \frac{y_{VOR/VOR2} - y_{ЛА}}{d_2^2} & \frac{x_{ЛА} - x_{VOR/VOR2}}{d_2^2} \\ \dots & \dots \\ \frac{y_{VOR/VOR_n} - y_{ЛА}}{d_n^2} & \frac{x_{ЛА} - x_{VOR/VOR_n}}{d_n^2} \end{bmatrix},$$

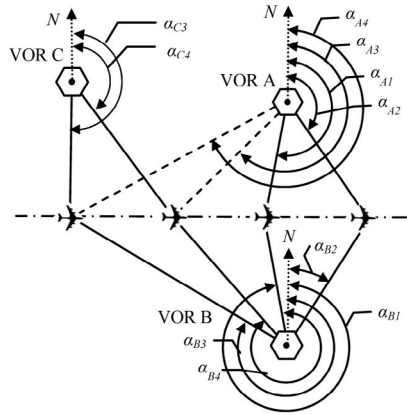


Рис. 5. Формування розширеного вектору кутової інформації

де H_{VOR} – матриця часткових похідних за координатами; S_{VORm}, S_{VORp} – вектори дисперсії похибок вимірювань та прогнозування відстаней.

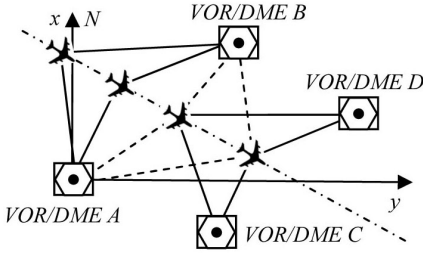


Рис. 6. Формування розширеного вектору відстаней та кутової інформації

Метод позиціонування за розширеним вектором інформативних параметрів від кутомірно-далекомірною обладнання доповнює вектори вимірювань азимутів та відстаней до навігаційних засобів прогнозованими даними за результатами попередніх спостережень на час вимірювання (рис. 6).

Координати місцеположення ЛА оцінюються з навігаційного рівняння у матричному вигляді:

$$X = (A^T_{VOR/DME} A_{VOR/DME})^{-1} A^T_{VOR/DME} B_{VOR/DME},$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{PK} \\ y_{PK} \end{bmatrix}; B_{VOR/DME} = \begin{bmatrix} x_1 + d_1 \cos(\alpha_1) \\ x_2 + d_2 \cos(\alpha_2) \\ \dots \\ x_n + d_n \cos(\alpha_n) \\ y_1 + d_1 \sin(\alpha_1) \\ y_2 + d_2 \sin(\alpha_2) \\ \dots \\ y_n + d_n \sin(\alpha_n) \end{bmatrix}; A_{VOR/DME} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ \dots & \dots \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ \dots & \dots \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

де $A_{VOR/DME}$ – індикаторна матриця, що групує елементи рівняння; $B_{VOR/DME}$ – матриця навігаційних рівнянь.

Оцінка середньо-квадратичного відхилення похибки позиціонування у горизонтальній площині:

$$\sigma^2_{VOR/DME} = \text{trace}((H^T_{VOR/DME} W^{-1}_{VOR/DME} H_{VOR/DME})^{-1}), \quad (18)$$

де $H_{VOR/DME} = [H_{DME}; H_{VOR}]^T$ – матриця часткових похідних; $W_{VOR/DME} = \text{diag}([S_{DMEm}, S_{DMEp}, S_{VORm}, S_{VORp}])$ – кореляційна матриця похибок вимірювального обладнання та прогнозування.

Метод позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків передбачає використання результатів активного вимірювання відстаней до користувачів повітряного простору обладнаних літаковими відповідачами та даних про місцеположення отриманих з інформаційних повідомлень за концепцією автоматичного залежного спостереження (ADS-B). У цьому випадку кожний користувач повітряного простору розглядається як навігаційна точка з неточно відомим

місцеположенням у зв'язку з впливом негативних факторів. Система навігаційних рівнянь у прямокутній системі координат:

$$D_{ACAS}^2 = (x_{ЛА} - x_{ADS-B})^2 + (y_{ЛА} - y_{ADS-B})^2 + (z_{ЛА} - z_{ADS-B})^2, \quad (19)$$

де $x_{ЛА}$, $y_{ЛА}$, $z_{ЛА}$ – координати місцеположення ЛА; x_{ADS-B} , y_{ADS-B} , z_{ADS-B} – вектори координат місцеположення користувачів повітряного простору отримані за інформацією ADS-B; D_{ACAS} – вектор відстаней за інформацією системи попередження зіткнень літаків.

Система нелінійних рівнянь розв'язується за ітеративним підходом з лінеаризацією рівнянь у ряд Тейлора за похідними першого порядку:

$$\Delta u = (H_{ACAS}^T H_{ACAS})^{-1} H_{ACAS}^T \Delta D_{ACAS}, \quad (20)$$

$$H_{ACAS} = \begin{bmatrix} \frac{x_{приб} - x_{ADSB1}}{D_{приб1}} & \frac{y_{приб} - y_{ADSB1}}{D_{приб1}} & \frac{z_{приб} - z_{ADSB1}}{D_{приб1}} \\ \frac{x_{приб} - x_{ADSB2}}{D_{приб2}} & \frac{y_{приб} - y_{ADSB2}}{D_{приб2}} & \frac{z_{приб} - z_{ADSB2}}{D_{приб2}} \\ \frac{x_{приб} - x_{ADSB3}}{D_{приб3}} & \frac{y_{приб} - y_{ADSB3}}{D_{приб3}} & \frac{z_{приб} - z_{ADSB3}}{D_{приб3}} \end{bmatrix}; \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}; \Delta D_{ACAS} = \begin{bmatrix} D_{приб1} - D_{ACAS1} \\ D_{приб2} - D_{ACAS2} \\ D_{приб3} - D_{ACAS3} \end{bmatrix},$$

де H_{ACAS} – матриця часткових похідних; Δu – вектор різниці координат на різних етапах ітерації; ΔD_{ACAS} – вектор різниці відстаней.

Запропоновано оцінювати точність позиціонування через складові середньоквадратичного відхилення похибки по осям системи координат з урахуванням похибки визначення місцеположення навігаційних точок, що має наступний вигляд:

$$G = U(\sigma_d + H_{ADS-B}^T W^{-1} S_{ADS-B} H_{ADS-B} (W^{-1})^T) U^T, \quad (21)$$

$$U = (H^T W^{-1} H)^{-1} H^T W^{-1}; H_{ADS-B} = -H,$$

$$G = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_y^2 & \sigma_{yz}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_z^2 \end{bmatrix},$$

де H – матриця часткових похідних; σ_d – середньоквадратичне відхилення похибки вимірювання відстаней; S_{ADS-B} – коваріаційна матриця похибок координатної інформації; W – матриця ваги.

Дисперсія похибки позиціонування у горизонтальній площині:

$$\sigma_h^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2. \quad (22)$$

Елементами коваріаційної матриці похибок місцеположення навігаційних точок може служити категорія точності NACp (Navigation Accuracy Category for Position) з повідомлень за концепцією автоматичного залежного спостереження.

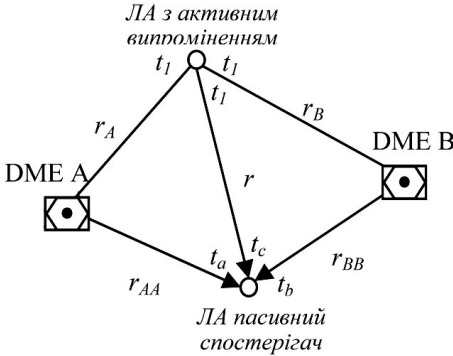


Рис. 7. Відстані між елементами системи при пасивному прийманні сигналів DME

Метод пасивного позиціонування за комбінованою інформацією далекомірною обладнання та автоматичного залежного спостереження ґрунтується на прийманні навігаційних сигналів у каналі зв'язку далекомірною обладнання інших ЛА та використанні різниці часу в прийманні сигналів для визначення гіперболічної лінії положення у просторі. Під час навігації ЛА виконує вимірювання відстані до двох DME А та DME В (рис. 7). Оскільки

навігаційні сигнали запиту та відповіді у каналі зв'язку є унікальними для кожного ЛА, то відстежуючи частоти далекомірів можна виміряти час між фіксацією запиту t_c та відповідями t_a , t_b . Припускаючи припущення, про одночасне вимірювання відстаней до двох DME, пропонується визначити місцеположення пасивного спостерігача, розв'язуючи наступну систему навігаційних рівнянь:

$$\begin{aligned}
 c(t_a - t_b) &= r_A - r_B + r_{AA} - r_{BB} \\
 c(t_a - t_c) &= r_A - r + r_{AA} + c\tau \\
 c(t_b - t_c) &= r_B - r + r_{BB} + c\tau \\
 r_A^2 &= (x_{ЛА} - x_{DMEA})^2 + (y_{ЛА} - y_{DMEA})^2 + (z_{ЛА} - z_{DMEA})^2 \\
 r_B^2 &= (x_{ЛА} - x_{DMEB})^2 + (y_{ЛА} - y_{DMEB})^2 + (z_{ЛА} - z_{DMEB})^2 \\
 r_C^2 &= (x - x_{ЛА})^2 + (y - y_{ЛА})^2 + (z - z_{ЛА})^2 \\
 r_{AA}^2 &= (x - x_{DMEA})^2 + (y - y_{DMEA})^2 + (z - z_{DMEA})^2 \\
 r_{BB}^2 &= (x - x_{DMEB})^2 + (y - y_{DMEB})^2 + (z - z_{DMEB})^2,
 \end{aligned} \tag{23}$$

де r_A , r_B – відстані між ЛА та наземними радіомаяками DME А та DME В відповідно; r_{AA} , r_{BB} – відстані між пасивним приймачем та наземними радіомаяками DME А та DME В відповідно; r – відстань між ЛА та пасивним приймачем; $x_{ЛА}$, $y_{ЛА}$, $z_{ЛА}$ – положення ЛА; x_{DMEA} , y_{DMEA} , z_{DMEA} – місцеположення DME А; x_{DMEB} , y_{DMEB} , z_{DMEB} – місцеположення DME В; x , y , z – координати положення пасивного приймача; c – швидкість світла; τ – час затримки у DME.

Матрицю похибок позиціонування запропоновано оцінювати у наступному вигляді:

$$G = (H^T H)^{-1} H^T [\sigma_{\Delta R} + H_{ЛА} H_{ЛА}^T \sigma_{ЛА}] ((H^T H)^{-1} H^T)^T, \tag{24}$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x_{ЛА} - x_A}{r_{AA}} & \frac{x_{ЛА} - x_B}{r_{BB}} & \frac{y_{ЛА} - y_A}{r_{AA}} & \frac{y_{ЛА} - y_B}{r_{BB}} & \frac{z_{ЛА} - z_A}{r_{AA}} & \frac{z_{ЛА} - z_B}{r_{BB}} \\ \frac{x_{ЛА} - x_A}{r_{AA}} & \frac{x_{ЛА} - x_C}{r_{CC}} & \frac{y_{ЛА} - y_A}{r_{AA}} & \frac{y_{ЛА} - y_C}{r_{CC}} & \frac{z_{ЛА} - z_A}{r_{AA}} & \frac{z_{ЛА} - z_C}{r_{CC}} \\ \frac{x_{ЛА} - x_B}{r_{BB}} & \frac{x_{ЛА} - x_C}{r_{CC}} & \frac{y_{ЛА} - y_B}{r_{BB}} & \frac{y_{ЛА} - y_C}{r_{CC}} & \frac{z_{ЛА} - z_B}{r_{BB}} & \frac{z_{ЛА} - z_C}{r_{CC}} \end{bmatrix} \quad H_{ЛА} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{x_{ЛА} - x_C}{r_C} & \frac{y_{ЛА} - y_C}{r_C} & \frac{z_{ЛА} - z_C}{r_C} \\ \frac{x_{ЛА} - x_C}{r_C} & \frac{y_{ЛА} - y_C}{r_C} & \frac{z_{ЛА} - z_C}{r_C} \end{bmatrix},$$

де H , $H_{ЛА}$ – матриці часткових похідних від навігаційного рівняння за координатами пасивного спостерігача та координатами ЛА відповідно; $\sigma_{\Delta R}$ – середньоквадратичне значення похибки при вимірюванні різниці відстані; $\sigma_{ЛА}$ – середньоквадратичне значення похибки координат ЛА.

Основним результатом розділу є розроблені методи та моделі інтегрованого позиціонування за сукупністю радіонавігаційних засобів.

У четвертому розділі розглядаються особливості позиціонування за сукупністю навігаційних засобів. Зокрема досліджено проблему оцінювання доступності позиціонування. Розглянуто основні моделі оцінювання просторової зони, у межах якої надаються послуги наземних РНЗ. Удосконалено метод оцінювання доступності радіонавігаційних засобів для навігації, що ґрунтується на

представленні повітряного простору у вигляді множини елементарних частин. Геометричні розміри елемента простору визначають роздільну здатність дослідження (рис. 8). Доступність послуг навігаційних засобів визначається шляхом порівняння координат центру кожного елемента простору з тривимірною зоною дії навігаційного засобу, що

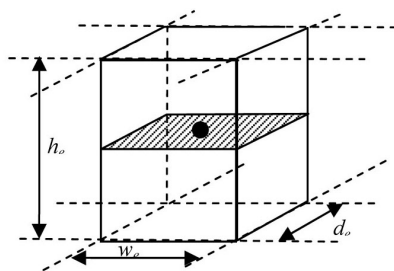


Рис. 8. Елемент повітряного простору

оцінюється за рівнянням максимальної дальності дії радіозв'язку, технічними характеристиками антенної системи та впливу рельєфу місцевості на поширення радіохвиль. У дослідженні враховується вплив затухання радіохвиль під час поширення у тропосфері та вплив дифракції від висотних елементів Земної поверхні. У якості моделі Земної поверхні використано цифрову карту рельєфу, отриману за даними дослідної місії SRTM (Shuttle Radar Topography Mission of space Shuttle Endeavor) 11–12 лютого 2000р, що має глобальне покриття з роздільною здатністю 1' та 3'. Розроблений метод є універсальним та дозволяє оцінювати доступність РНЗ як для певного висотного рівня так і для діапазону висот з побудовою тривимірної моделі доступності.

Досліджено поєднання навігаційної інформації у бортовому обчислювальному комплексі. Зокрема, розширено модель поєднання координат на високому рівні за методом максимальної достовірності, шляхом використання даних від методів позионування за сукупністю навігаційних засобів.

Розроблено ймовірнісний підхід до класифікації похибок відповідно до норм навігації за характеристиками, що ґрунтується на прийнятті рішення про відповідність певним специфікаційним вимогам зональної навігації на основі максимуму апостеріорної ймовірності за значеннями NSE, за повздовжнім та боковим відхиленнями та за компонентами напрямками. Модель класифікатора стану за повздовжнім та боковим значенням TSE:

$$q_k(x_{\bar{o}}, x_n) = \frac{p_k \rho_k(x_{\bar{o}}, x_n)}{\sum_{j=1}^N p_j \rho_j(x_{\bar{o}}, x_n)}; \quad k = \overline{1, N}, \quad (25)$$

де p_k – апіорна ймовірність кожного стану відповідності специфікаційним вимогам; ρ_k – умовні щільності.

Апіорні ймовірності станів оцінюються за законом розподілу відхилень ЛА від запланованої траєкторії руху. У якості моделі відхилень запропоновано використовувати трикомпонентний багатопараметричний розподіл похибок у загальному вигляді:

$$\rho(x, \alpha, \beta, A, B, M) = \frac{\alpha}{2a_1 b_1 \Gamma(b_1)} \exp\left(-\left|\frac{x - \mu_1}{a_1}\right|^{b_1}\right) + \frac{\beta}{2a_2 b_2 \Gamma(b_2)} \exp\left(-\left|\frac{x - \mu_2}{a_2}\right|^{b_2}\right) + \frac{(1 - \alpha - \beta)}{2a_3 b_3 \Gamma(b_3)} \exp\left(-\left|\frac{x - \mu_3}{a_3}\right|^{b_3}\right), \quad (26)$$

$$\alpha + \beta \leq 1,$$

де $A=(a_1, a_2, a_3)$ – вектор параметрів масштабу $a_i > 0$; $B=(b_1, b_2, b_3)$ – вектор параметрів форми $b_i > 0$; $M=(\mu_1, \mu_2, \mu_3)$ – вектор математичних сподівань; $\Gamma(b_i)$ – Ейлерова Гамма-функція; α – параметр, що визначає внесок похибки позионування; β – параметр, що визначає внесок похибки пілотування.

Трьохкомпонентна модель відхилень ЛА від запланованої траєкторії руху дозволяє оцінити вплив похибок системи навігації (NSE – Navigation System Error), похибок пілотування (FTE – Flight Technical Error) та рідкісних подій на політ ЛА, у той час як щільність розподілу похибок у загальному вигляді дозволяє виконувати налаштування форми розподілу поступово змінюючись від нормального до експоненціального вигляду (рис. 9). Статистичний аналіз траєкторної інформації дозволяє оцінити параметри щільності $\rho(x, \alpha, \beta, A, B, M)$

наприклад з використанням методу максимальної достовірності та виконати оцінювання апріорних ймовірностей шляхом інтегрування за межами відхилень.

Зокрема, запропонована модель була використана для оцінювання ризику викатки ЛА за межі злітно-посадкової смуги у аеропорті Університету Пурдю (LAF). Більшість статистичних даних містять дані польоту від непрофесійних пілотів з високими значеннями FTE, що є хорошим прикладом незбалансованого рівнів FTE та NSE.

За результатами обробки навчальної вибірки, що містила 8946 вимірів отримано наступні параметри: $\alpha = 0.1$, $\beta = 0.19$, $\mu_1 = 1.2 \times 10^{-3}$, $\mu_2 = 1.9 \times 10^{-3}$, $\mu_3 = 2.0 \times 10^{-3}$, $a_1 = 32$, $a_2 = 6$, $a_3 = 1$, $b_1 = 0.65$, $b_2 = 0.67$, $b_3 = 0.51$. Ризик викатки за межі злітно-посадкової смуги склав 7.2×10^{-3} .

Кожний стан системи характеризується певною умовною двохпараметричною щільністю розподілу Гауса (рис. 10) з вектором математичних сподівань $M_k = [\mu_{\sigma}, \mu_n]$ та матрицею середньоквадратичних відхилень похибок $B_k = \text{diag}([\sigma_{\sigma}^2, \sigma_n^2])$. Оцінка апостеріорної щільності наведена на рис. 11.

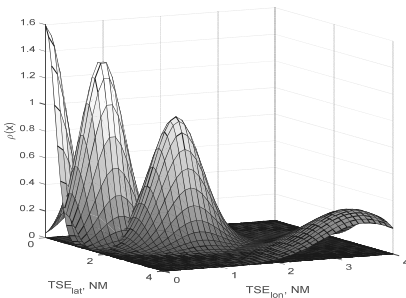


Рис. 10. Умовні щільності

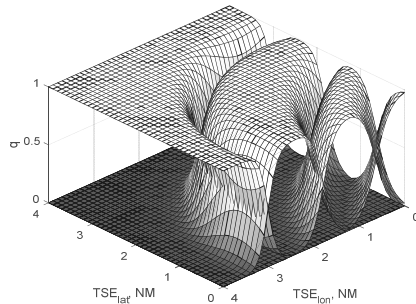


Рис. 11. Апостеріорні щільності

Досягнення найвищих показників при позиціонуванні за РНЗ можливе лише за раціонального розміщення наземної частини обладнання. Нажаль, мережа наземних навігаційних засобів розбудовувалася з орієнтацією на забезпечення польотів за класичними методами навігації, відповідно конфігурація мережі виявляється неоптимальною за вимогами навігації за характеристиками (PBN – Performance-Based Navigation), що діють сьогодні. Задача оптимізації розглядається з точки зору пошуку більш раціонального розміщення наземних радіомаяків з множини доступних територій для

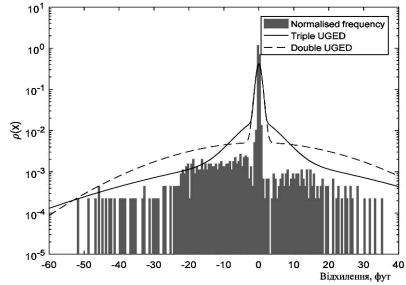


Рис. 9. Трикомпонентний багатопараметричний розподіл похибок

забезпечення вимог RNAV 1 у контрольованому повітряному просторі та вимог RNAV 0.3 у визначених аеропортних зонах.

У роботі запропоновано модель для проведення аналізу повітряного простору щодо відповідності вимогам зональної навігації на основі тернарних співвідношень між множинами. Досліджуваний простір задається множиною упорядкованих кортежів координат $\langle x, y, z \rangle$:

$$X \times Y \times Z = \{ \langle x, y, z \rangle \mid x \in X, y \in Y, z \in Z \}, \\ X = \{ x \mid x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \}; Y = \{ y \mid y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \}; Z = \{ z \mid z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \}. \quad (27)$$

де X, Y, Z – множини, що визначають геометричні розміри досліджуваного повітряного простору; $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}, z_{\min}, z_{\max}$ – граничні межі, що визначають досліджуваний повітряний простір у Декартовій системі координат.

Множини відповідності навігаційних характеристик вимогам зональної навігації (RNAV – Area navigation), що діють у межах досліджуваного повітряного простору представляються у вигляді підмножин $RNAV_i$ множини PBN :

$$PBN \subseteq RNAV_{DME/DME} \cup RNAV_{VOR/DME} \cup RNAV_{VOR/VOR} \cup \\ \cup RNAV_{DMEs} \cup RNAV_{VOR/DMEs} \cup RNAV_{VORs}, \quad (28)$$

де $RNAV_i \subseteq X \times Y \times Z$.

Об'єм повітряного простору та площа відповідності певній специфікаційній вимозі для визначеного висотного рівня можуть бути оцінені:

$$S_{FL, RNAV} = (x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min}) |PBN| |X|^{-2}, \quad (29)$$

$$V_{RNAV} = (x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})(z_{\max} - z_{\min}) |PBN| |X|^{-3}. \quad (30)$$

Здатність досліджуваного простору забезпечувати автоматичний перехід на резервну систему навігації у випадку відмови позиціонування за парою далекомірного обладнання до навігації за VOR/DME та у випадку повної відмови далекомірного обладнання до позиціонування за кутомірною інформацією оцінюється за допомогою зв'язаності множин:

$$M = RNAV_{DME/DME} \cap RNAV_{VOR/DME} \cap RNAV_{VOR/VOR}, \quad (31) \\ M \neq \emptyset.$$

Дослідження зон можливості використання певних методів позиціонування дозволяють провести аналіз повітряного простору на предмет забезпеченості вимогам певних навігаційних специфікаціям. Крім того, множинний аналіз дозволяє виявити зони простору $\overline{PBN} = \{ L_i \mid L_i \not\subset PBN \}$, що не відповідають вимогам зональної навігації та розробити стратегію покращення послуг аеронавігаційного забезпечення. На

рис. 12 та рис. 13 наведено оцінені моделі простору відповідності вимогам RNAV у випадку оптимальних наборів для DME/DME та VOR/VOR методів позиціонування у межах повітряного простору України.

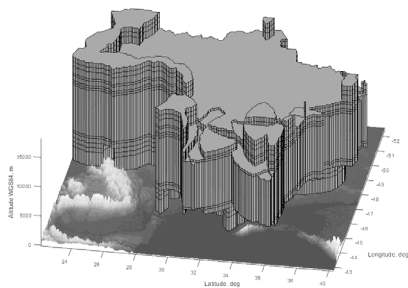


Рис. 12. Модель простору відповідності вимогам RNAV 1 за DME/DME позиціонуванням

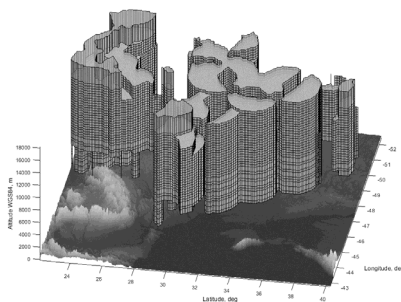


Рис. 13. Модель простору відповідності вимогам RNAV 5 за VOR/VOR позиціонуванням

Результати аналізу повітряного простору України до вимог зональної навігації для різних методів позиціонування за парами навігаційних засобів у процентному співвідношенні до загального об'єму досліджуваного простору країни представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Об'єм простору відповідності до вимог зональної навігації для різних методів позиціонування у процентному співвідношенні до загального об'єму повітряного простору країни

RNAV	DME/DME	VOR/DME	VOR/VOR
RNAV 1	74,6 %	4,58 %	0 %
RNAV 2	74,78 %	26,64 %	0,78 %
RNAV 5	74,78 %	70,38 %	32,5 %

Запропоновано виконувати оцінювання ризику втрати позиціонування відповідно до категорій зональної навігації, що дозволяє провести аналіз замкнутого повітряного простору, щодо відповідності вимогам зональної навігації у ймовірнісних величинах. Оцінювання ризику відбувається у чотири етапи:

1. Вибір моделі багатовимірної щільності розподілу похибок системи позиціонування за боковим та повздовжніми відхиленнями ЛА.
2. Оцінювання параметрів щільності розподілу похибок позиціонування
3. Закріплення моделі похибок за кожною точкою простору у межах досліджуваного об'єму (рис. 14).

4. Оцінювання ризику втрати позиціонування як об'єму фігури обмеженої щільністю розподілу та циліндричним еліпсом, що встановлює допустимі межі для зональної навігації:

$$R_{pos} = 1 - \iint_{2TSE_{RNAV}} \rho(x, y) dx dy. \quad (32)$$

Результати оцінювання ризику втрати позиціонування ЛА за наземними РНЗ отриманий за ітеративним підходом для повітряного простору України наведено на рис. 15.

Основним результатом є метод оцінювання доступності радіонавігаційних засобів; моделі ймовірного класифікатора для контролю за витриманням навігаційних характеристик; запропоновано використання трикомпонентного багатопараметричного розподілу похибок для оцінювання ризиків втрати норм ешелонування ЛА; модель поєднання координатної інформації за сукупністю РНЗ; модель оцінювання характеристик поля навігаційних сигналів сформованих РНЗ у тривимірному просторі.

У **п'ятому розділі** виконано аналіз поля навігаційних сигналів наземних РНЗ у межах повітряного простору України, щодо відповідності вимогам RNAV. Національна мережа радіонавігаційних засобів. України містить 12 DME (BAH, IHA, IHR, IKI, IKV, KSN, KVR, ILO, ILV, STB, VIN, YHT) та 8 VOR/DME (BRP, DNP, IVF, KHR, KVH, LIV, ODS, SLV), представлених маршрутними та термінальними типами обладнання. У дослідженні враховано дію наземних засобів розміщених на територіях Польщі, Словаччини, Угорщини, Румунії, Молдови, Росії, Білорусії та Туреччини за даними eAIS (electronic Aeronautical Information Services).

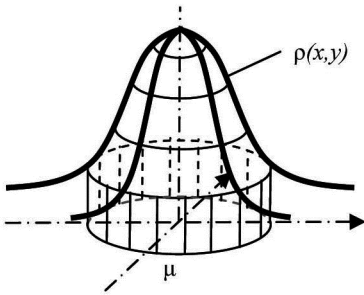


Рис. 14. Оцінювання ризику у випадку двопараметричної моделі

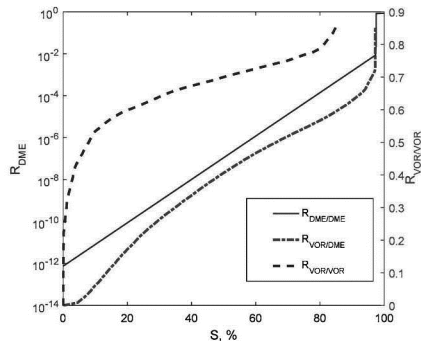


Рис. 15. Розподіл ризику у межах повітряного простору країни

У межах досліджуваного повітряного простору для різних висотних рівнів оцінено загальну кількість доступних далекомірних та кутомірних радіомаяків (рис. 16); показник доступності послуг позиціонування кожного з

методів для висотних рівнів (рис. 17); просторові зони відповідності методу позиціонування за DME/DME вимогам RNAV (рис. 18 та рис. 19), VOR/DME (рис. 20 та рис. 21) і VOR/VOR (рис. 22 та рис. 23).

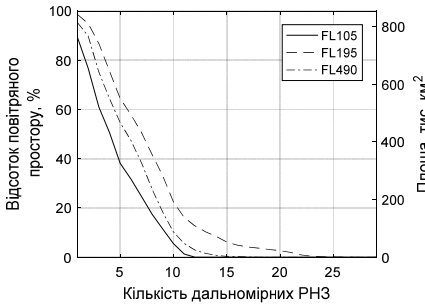


Рис. 16. Забезпеченість послуг РНЗ у повітряному просторі України

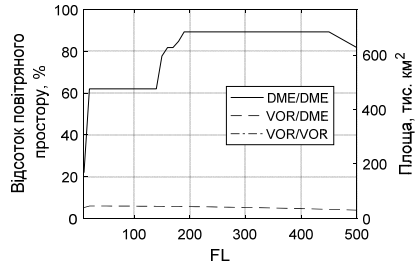


Рис. 17. Порівняльний аналіз парних РНЗ вимогам RNAV 1

У роботі виконано верифікацію алгоритму оптимального вибору набору РНЗ шляхом комп'ютерного моделювання з використанням траєкторної інформації. На рис. 24 наведено результати вибору оптимального набору РНЗ для рейсу «AUI25» (UKBB/UKHH) у вигляді графу.

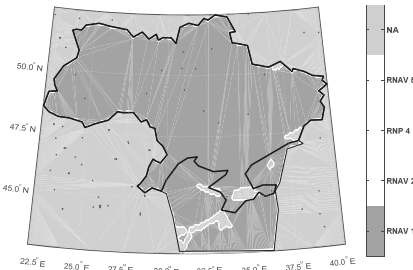


Рис. 18. Відповідність позиціонування за DME/DME FL195 вимогам RNAV

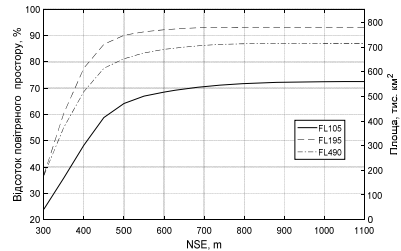


Рис. 19. Оцінка розподілу NSE за оптимальної пари DME/DME у повітряному просторі України

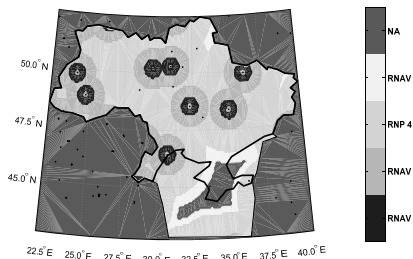


Рис. 20. Відповідність позиціонування за VOR/DME FL195 вимогам RNAV

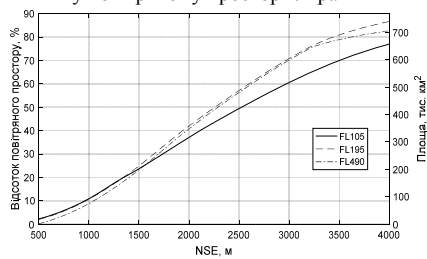


Рис. 21. Оцінка розподілу NSE за оптимальної пари VOR/DME у повітряному просторі України

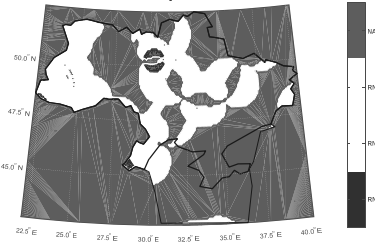


Рис. 22. Відповідність позиціонування за VOR/VOR FL195 вимогам RNAV

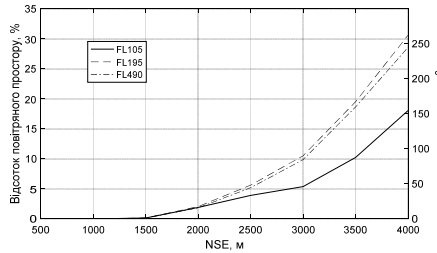
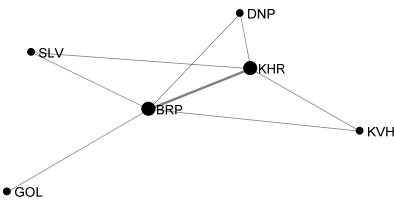
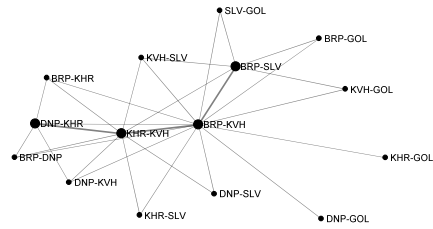


Рис. 23. Оцінка розподілу NSE за оптимальної пари VOR/VOR у повітряному просторі України

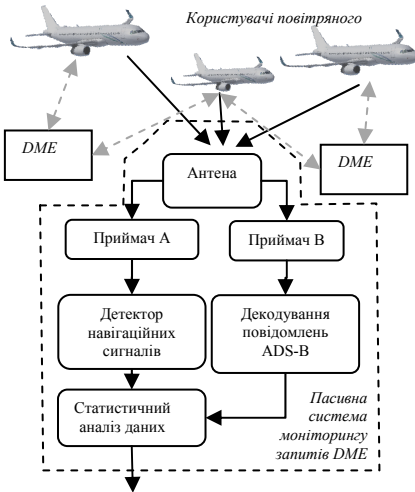


а



б

Рис. 24. Граф зміни оптимального набору РНЗ: а – VOR/VOR, б – VOR/DME



Оцінка навантаження на наземну мережу DME

Рис. 25. Структурна схема системи пасивного моніторингу

З метою оцінювання характеристик поля сигналів запиту наземної мережі РНЗ розроблено систему пасивного моніторингу навігаційних сигналів. До складу системи входять два приймачі: перший для моніторингу навігаційних сигналів DME, другий – для приймання інформаційних повідомлень за концепцією автоматичного залежного спостереження (рис. 25). За результатами експериментальних спостережень, виконано вимірювання частоти запитів наземної частини обладнання (рис. 26), що не перевищило 511 Гц в умовах приймання сигналів від семи ЛА, встановлено факти запиту бортовим обладнанням частин наземної мережі недоступних у точці спостереження, що свідчить про неналежні налаштування бортового обладнання.

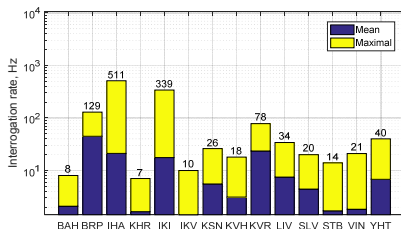


Рис. 26. Результати вимірювання частоти запитів DME

За розробленою системою виконано оцінювання ефективності наземної частини обладнання по відповіді. Зокрема для «BRP» DME середній показник ефективності склав 76 %.

Територіальний конфлікт на сході та півдні країни призвів до втрати обладнання двох VOR/DME («DON» і «SMF») та DME («MRP» і «KRH»). Втрата РНЗ негативно відбилася на показниках точності позиціонування за навігаційними засобами у повітряному просторі країни. На рис. 27 та рис. 28 представлено результати порівняльного аналізу показників стану мережі наземних радіомаяків на 2018 рік з кінцем 2013 року для висотного рівня FL 195.

Результати досліджень показали, що площа RNAV 1 скоротилася з 95,49 % у 2013 р. до 83,28 % у 2018 р., а площа повітряного простору, що відповідає вимогам RNAV 2 скоротилася на 11,53 %.

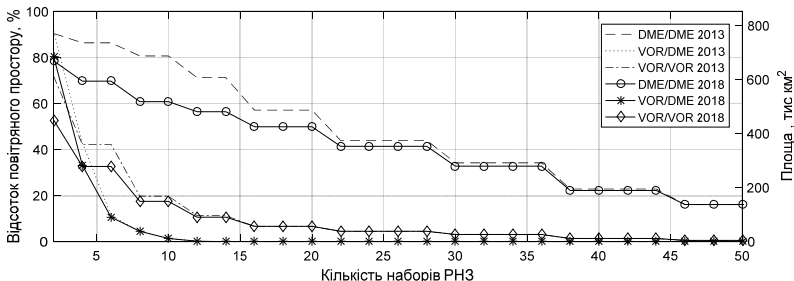


Рис. 27. Зміни у кількості наборів РНЗ доступних для навігації

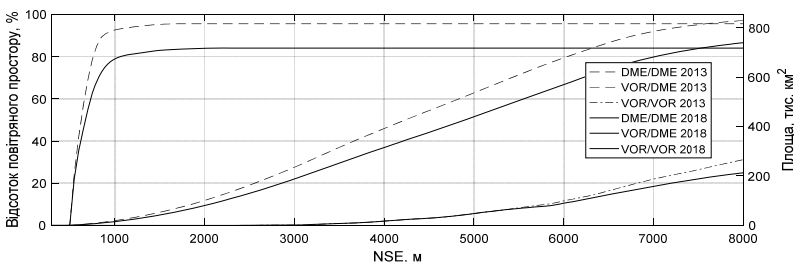


Рис. 28. Точність навігаційних визначень

Верифікацію запропонованих методів позиціонування за сукупністю РНЗ було виконано за допомогою імітаційного комп'ютерного моделювання з використанням польотних даних, зафіксованих наземною станцією моніторингу сигналів ADS-B. Зокрема результат оцінювання доступності позиціонування за DME для маршруту польоту «UDN560» Бориспіль (UKBB) – Бухарест (LROP), від 4 жовтня 2017р наведено на рис. 29. Результати верифікації запропонованого методу позиціонування за сукупністю сигналів від VOR з використанням траєкторної інформації рейсу «BRU830» за маршрутом Київ (UKBB) – Мінськ (UMMS) від 21 вересня 2017 р. представлені на рис. 30. Верифікація розробленого методу позиціонування за сукупністю сигналів від VOR/DME проведено для польотних даних рейсу «AUI35», з сполученням «Бориспіль» (UKBB) – «Львів» (UKLL) від 10 квітня 2018 р. (рис. 31).

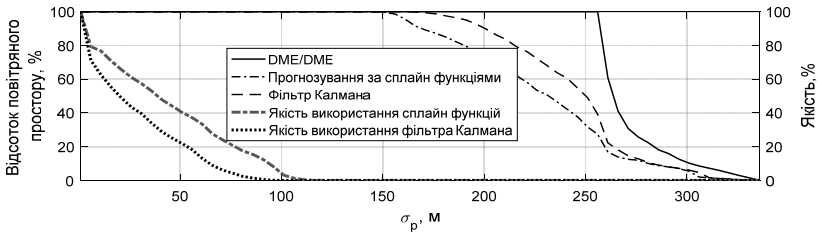


Рис. 29. Доступність позиціонування за DME/DME (для рейсу «UDN560»)

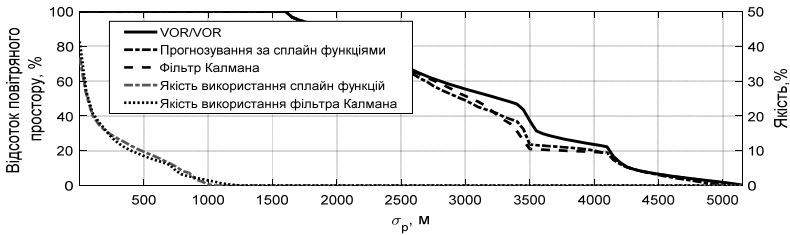


Рис. 30. Доступність позиціонування за VOR/VOR (для рейсу «BRU830»)

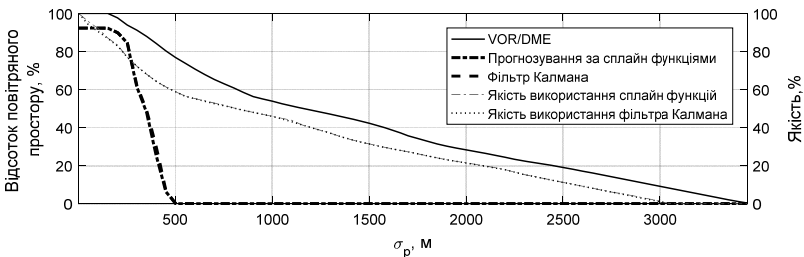


Рис. 31. Доступність позиціонування за VOR/DME (для рейсу «AUI35»)

Результати оцінювання точності позиціонування для розробленого методу позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків за (22) наведено на рис. 32 для випадку FL 195 з використанням даних про повітряний рух отриманих за допомогою приймача сигналів ADS-B. У досліджуваному сценарії забезпечувалось позиціонування з використанням 18 ЛА розміщених у зоні дії системи спостереження.

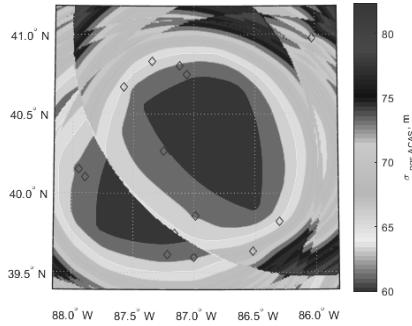


Рис. 32. Точність позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків

У роботі вперше проведено дослідження розходження результатів оцінювання точності позиціонування для оптимального набору РНЗ за різними моделями та визначено їх вплив для національної межі РНЗ України (рис. 33). Зокрема досліджено вплив неврахування відстані до РНЗ у обчисленні похибки бортового обладнання (у моделі DO-189), моделі за матрицею часткових похідних для горизонтальної площини, тривимірного простору, врахування похибки барометричного висотоміра та в умовах застосування зваженого методу найменших квадратів.

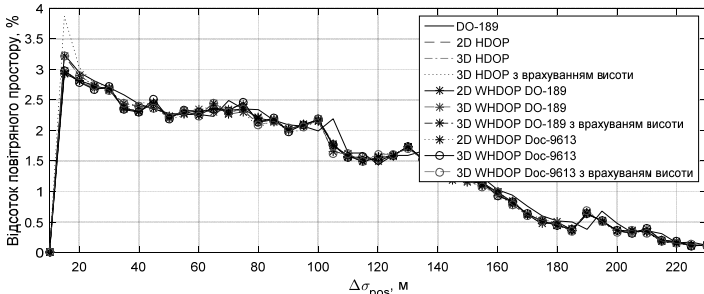


Рис. 33. Порівняльний аналіз моделей за площею повітряного простору для FL195

Встановлено, що розходження у результатах оцінювання σ_{pos} залежить від конфігурації геометрії наземної мережі РНЗ і не перевищує 140 м у межах 2 % повітряного простору України.

ВИСНОВКИ

У науковій роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему підвищення точності визначення координат місцеположення ЛА в умовах незапланованої відмови основної системи позиціонування з метою забезпечення виконання сучасних вимог навігації заснованої на характеристиках. Проблема вирішена за рахунок розроблення нових методів визначення координат місцеположення ЛА за сукупністю інформації від далекомірного обладнання, кутомірної інформації та комбінованої інформації від наземних радіомаяків, отриманої з результатів вимірювання пари бортового обладнання та екстрапольованих польотних даних за регресією; пасивного використання навігаційних сигналів у системі вимірювання дальності користувачів повітряного простору; поєднання інформації за концепцією автоматичного залежного спостереження з даними спостереження бортової системи попередження зіткнень літаків у повітрі в умовах дії концепцій зв'язку та спостереження для підвищення точності та доступності аеронавігаційної інформації в умовах впровадження новітніх концепцій аеронавігації. Підвищення ефективності запропонованих методів досягається шляхом раціоналізації використання наземної мережі радіонавігаційних засобів для покращення характеристик позиціонування у просторі. У виконаному дисертаційному дослідженні отримано такі наукові та прикладні результати:

1. Запропоновано та обґрунтовано використання прогнозованих значень навігаційних параметрів у процесі позиціонування за сигналами систем зональної навігації. Досліджено різні підходи до формування послідовності вимірювань обмеженої кількості сенсорів бортового обладнання при формуванні навчальної вибірки для прогнозування значень навігаційних параметрів. Проаналізовано переваги та недоліки використання оптимальної сукупності радіонавігаційних засобів та циклічно повторюваного, послідовного вимірювання радіонавігаційних параметрів. Розроблено методи позиціонування літального апарату за сукупністю навігаційної інформації отриманої за результатами безпосередніх вимірювань датчиків літака та прогнозованих за регресією значень на основі попередніх вимірювань. Зокрема розроблено методи позиціонування за сукупністю інформації від далекомірного обладнання, сукупністю кутової інформації від всенаправлених радіомаяків, та їх комбінації. Розроблені та досліджені моделі дії похибок позиціонування, що враховують похибки прогнозування.

2. Розроблено та запатентовано метод позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків у повітрі та інформацією про повітряний рух навколо, отриманої за концепцією автоматичного залежного спостереження. Виведені та досліджені математичні залежності для оцінювання впливу неточно-відомих координат літаків-навігаційних точок при використанні їх для позиціонування.

3. Розроблено метод пасивного позиціонування за комбінацією інформаційних сигналів далекомірного обладнання та інформацією бортової

системи приймання сигналів спостереження за концепцією автоматичного залежного спостереження, що дозволяє на основі обробки інформаційних повідомлень визначати власне місцеположення у просторі на основі різністно-далекомірного принципу, без випромінювання електромагнітних хвиль.

4. Удосконалено метод оцінювання доступності радіонавігаційних засобів, що враховує індивідуальні особливості наземного обладнання, вплив тропосфери, рельєфу місцевості і штучних споруд на поширення сигналів радіонавігаційних засобів, що дозволяє більш точно визначати зону дії наземних радіонавігаційних засобів у повітряному просторі.

5. Одержано математичні моделі ймовірнісного класифікатора для контролю за витримуванням навігаційних характеристик з гарантуванням розпізнавання відповідності специфікаційним вимогам зональної навігації з максимальною ймовірністю. Розроблено модель класифікатора стану динамічної системи відповідно до норм зональної навігації за повздовжнім та боковим відхиленням літака від запланованої траєкторії руху та за компонентами-напрямами.

6. Математично сформульовано оптимізаційну задачу вибору оптимального набору радіонавігаційних засобів, розв'язок якої запропоновано виконувати у термінах цілочисленного лінійного програмування, за парами кутомірних, далекомірних та кутомірно-далекомірних радіонавігаційних засобів.

7. Розроблено модель оцінювання характеристик поля навігаційних сигналів сформованих наземними РНЗ у тривимірному просторі, що дозволяє оцінювати тривимірну модель просторових зон відповідності специфікаційним вимогам зональної навігації для задач планування повітряного руху.

Запропоновані в даній дисертаційній роботі методи та моделі використанні в Державному підприємстві обслуговування повітряного руху України Міністерства інфраструктури України, Товаристві з обмеженою відповідальністю «Вертолітний тренувальний центр», Науково-навчальному центрі «Аерокосмічний центр» та у навчальному процесі Національного Авіаційного Університету, що підтверджено актами впровадження.

ОСНОВНІ РОБОТИ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в закордонних наукових журналах

1. Ostroumov I. V., Kharchenko V. P., Kuzmenko N. S. An airspace analysis according to area navigation requirements. *Aviation*. 2019. № 23(2). – P. 36–42 DOI: 10.3846/aviation.2019.10302 (Scopus, Q3)

2. Ostroumov I. V., Kuzmenko N. S. Accuracy improvement of VOR/VOR navigation with angle extrapolation by linear regression. *Telecommunications and Radio Engineering*. Begell, New York, 2019. № 78(15). – P. 1399–1412. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i15.90 (Scopus)

3. Ostroumov I. V., Kuzmenko N. S. Compatibility analysis of multi signal processing in APNT with current navigation infrastructure. *Telecommunications and Radio Engineering*. Begell, New York, 2018. № 77(3) P. 211–223. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i3.30 (Scopus, Q3)

4. Остроумов И. В. Алгоритм выбора оптимальной пары радионавигационных средств при определении местоположения летательного аппарата. *Электроника*,

Радиофизика, Радиотехника, Информатика. Доклады Белорусского Государственного Университета Информатики и Радиоэлектроники. 2018, Минск. № 3(113). – С. 72–79.

5. Ostroumov I. V., Kuzmenko N. S. Accuracy assessment of aircraft positioning by multiple Radio Navigational aids. Telecommunications and Radio Engineering. Begell, New York, 2018. № 77(8). – P. 705–715. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i8.40 (Scopus, Q3)

Статті у наукових фахових виданнях

6. Ostroumov I. V., Protsenko E., Rudenko M. Application of pocket device sensors for moving object positioning in air space. Proceedings of the National Aviation University. 2019. № 79(2). – P. 12–18 DOI: 10.18372/2306-1472.79.13826.

7. Ostroumov I. V., Kharchenko V. P., Kuzmenko N. S. Optimization task of navigational aids ground network. Proceedings of the National Aviation University. Kyiv, 2018. № 3(76). – P. 16–22. DOI: 10.18372/2306-1472.76.13150.

8. Остроумов І. В. Аналіз перспективних систем зональної навігації. Системи управління, навігації та зв'язку. 2018. № 52(6). – С. 14–19 DOI: 10.26906/SUNZ.2018.6.014.

9. Ostroumov I. Passive positioning method using distance measuring equipment and automatic dependent surveillance-broadcast data. Proceedings of the National Aviation University. Kyiv, 2018. № 2(75). – P. 19–25. DOI: 10.18372/2306-1472.75.13113.

10. Остроумов І. В. Поєднання координатної інформації за ймовірністним підходом. Системи управління, навігації та зв'язку. 2018. № 3(49). – С. 3–8. DOI: 10.26906/SUNZ.2018.3.003.

11. Остроумов І. В. Оцінювання точності вимірювань дальномірного обладнання. Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2018. № 2(146). – С. 71–75. DOI: 10.32620/akt.2018.2.10.

12. Ostroumov I. V. Error of positioning by DME/DME and VOR/DME pairs. Systems of control, navigation and communication. 2018. № 1(47). – P. 12–16. DOI: 10.26906/SUNZ.2018.1.012.

13. Остроумов І. В. Оцінювання точності визначення лінії положення за парою далекомірного обладнання DME при вирішенні навігаційних задач. Системи управління, навігації та зв'язку. 2017. № 2(42). – С. 8–12.

14. Остроумов І. В. Оцінювання доступності наземних радіонавігаційних засобів. Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радиотехніка. Радіоапаратобудування. 2017. № 69. С. 35–40. DOI: 10.20535/RADAP.2017.69.35-40. (Web of Science)

15. Kharchenko V., Kukush A., Kuzmenko N., Ostroumov I. Probabilistic approach to object detection and recognition for videostream processing. Proceedings of the National Aviation University. NAU, 2017. Vol. 71. № 2. P. 8–14. DOI: 10.18372/2306-1472.71.11741.

16. Остроумов І. В., Ковальчук О. В., Гавриленко А. М., Низяева К. М. Доступність радіолокаційних станцій у повітряному просторі. Вісник інженерної академії України. 2017. № 1. – С. 21–25.

17. Остроумов І. В. Оцінювання максимальної дальності дії радіонавігаційних засобів. Вісник інженерної академії України. 2016. № 4. – С. 30–35.

18. Ostroumov I. V., Mironyuk O. O., Nychak M. V. Local magnetic field data processing. Proceedings of the National Aviation University. Kyiv, 2015. Vol. 62. № 1. – P. 23–28. DOI: 10.18372/2306-1472.62.7761.

19. Melkumyan V. G., Maliutenko T. L., Ostroumov I. O. Models of consideration of degradation and regenerative processes during the service technological systems design. Proceedings of the National Aviation University. Kyiv, 2015. Vol. 62. № 1. – P. 30–35. DOI: 10.18372/2306-1472.62.7767.

20. Melkumyan V. G., Ostroumov I. O., Maliutenko T. L. Problem formalization of polyergatic transport technological systems design. Proceedings of the National Aviation University. Kyiv, 2014. Vol. 61. № 4. – P. 21–27. DOI: 10.18372/2306-1472.61.7582.

21. Остроумов І. В., Чаплінський Д. В. Позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків. Вісник інженерної академії України. 2014. № 1. – С. 32–36.

22. Остроумов І. В. Оцінювання точності DME/DME позиціонування для повітряного простору України. Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць. К. : НАУ, 2013. № 3(43). – С. 61–67.

23. Остроумов І. В., Лопатко Т. Б. Використання радіомаяків DME для визначення місцеположення у повітряному просторі України. Вісник інженерної академії України. 2013. № 4. – С. 300–305.

24. Остроумов І. В. Оцінка точності позиціонування за сигналами радіомаяків VOR. Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць. К. : НАУ, 2012. № 3(39). – С. 102–107.

25. Остроумов І. В. Електронний тренажер системи попередження зіткнень літаків. Вісник Національного Авіаційного Університету. 2011. Т. 46. № 1. – С. 46–51. DOI: 10.18372/2306-1472.46.2082.

26. Знаковська С. А., Остроумов І. В., Чинченко Ю. В. Оцінка ризику втрати повітряних кораблів у повітряному просторі України за новими правилами ешелонування. Вісник інженерної академії України. 2011. № 1. – С. 30–34.

27. Чинченко Ю. В., Знаковська С. А., Остроумов І. В. Підтримка прийняття рішень щодо безпеки польотів за допомогою багатокритеріального оцінювання альтернатив. Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць. К.: НАУ, 2011. № 1(33). – С. 162–167.

28. Ostroumov I. V., Kuz'menko N. S. Application for aircraft tracking. Proceedings of the National Aviation University. Kyiv, 2011. Vol. 48. № 3. – P. 43–48. DOI: 10.18372/2306-1472.48.44.

29. Остроумов І. В. Концепція «Мобільне небо». Вісник Національного Авіаційного Університету. 2009. Т. 40. № 3. – С. 91–95. DOI: 10.18372/2306-1472.40.1751

Патенти

30. Пат. КМ 136412 Україна. Спосіб визначення координат літального апарата / І. В. Остроумов, В. П. Харченко, Н. С. Кузьменко. Опубл.27.08.2019. Бюл. № 16.

31. Пат. на КМ 134570 Україна. Спосіб пасивного позиціонування за комбінованою інформацією далекомірного обладнання та автоматичного залежного спостереження / І. В. Остроумов, В. П. Харченко, Н. С. Кузьменко. Опубл.27.05.2019. Бюл. № 10.

32. Пат. на КМ 134569 Україна. Спосіб позиціонування за сукупністю сигналів від всенаправлених кутомірних радіомаяків та прогнозованої інформації / І. В. Остроумов, В. П. Харченко, Н. С. Кузьменко. Опубл.27.05.2019. Бюл. № 10.

33. Пат. на КМ 134058 Україна. Спосіб позиціонування за сукупністю сигналів від дальномірного обладнання / І. В. Остроумов, В. П. Харченко, Н. С. Кузьменко. Опубл.25.04.2019. Бюл. № 8.

34. Пат. на КМ 98724 Україна. МПК (2015.01). Спосіб позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків / І. В. Остроумов, Н. С. Кузьменко. Опубл. 12.05.2015. Бюл. № 9.

Матеріали конференцій, які включено до наукометричних баз Scopus

35. Protsenko E., Rudenko M., Ostroumov I.V. Unmanned Aerial Vehicle Positioning by data from Pocket Device Sensors . Actual problems of unmanned aerial vehicles development: APUAVD-2019 6th International Conference of IEEE. 2019. – P. 161–164. DOI: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943882. (Scopus)
36. Kuzmenko N. S., Ostroumov I. V., Kharchenko V. P. Improving the Accuracy of Aircraft Positioning by Navigational Aids Using Kalman Filter. Signal Processing Symposium: SPSympo-2019, International Conference of IEEE. 2019. – P. 109–114. DOI: 10.1109/SPS.2019.8882072. (Scopus)
37. Ostroumov I. V., Kuzmenko N. S. Risk Analysis of Positioning by Navigational Aids. Signal Processing Symposium: SPSympo-2019, International Conference of IEEE. 2019. – P. 92–95. DOI: 10.1109/SPS.2019.8882003. (Scopus)
38. Ostroumov I. V., Kuzmenko N. S., Marais K. Optimal Pair of Navigational Aids Selection. Methods and Systems of Navigation and Motion Control: MSNMC 2018 5th International Conference of IEEE (Kyiv, 16–18 October 2018). Kyiv, 2018. – P. 32–35. DOI: 10.1109/MSNMC.2018.8576293 (Scopus)
39. Kuzmenko N. S., Ostroumov I. V., Marais K. An Accuracy and Availability Estimation of Aircraft Positioning by Navigational Aids. Methods and Systems of Navigation and Motion Control: MSNMC 2018 5th International Conference of IEEE (Kyiv, 16–18 October 2018). Kyiv, 2018. – P. 36–40. DOI: 10.1109/MSNMC.2018.8576276 (Scopus)
40. Kuzmenko N. S., Ostroumov I. V. Performance Analysis of Positioning System by Navigational Aids in Three Dimensional Space. 2018 IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC) (Kyiv, 8–10 October 2018). Kyiv, 2018. – P. 101–104. DOI: 10.1109/SAIC.2018.8516790. (Scopus)
41. Ostroumov I. V., Kuzmenko N. S. An area navigation (RNAV) system performance monitoring and alerting. 2018 IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC) (Kyiv, 8–10 October 2018). Kyiv, 2018. – P. 211–214. DOI: 10.1109/SAIC.2018.8516750. (Scopus)
42. Ostroumov I. V., Kuzmenko N. S. Accuracy estimation of alternative positioning in navigation. Methods and Systems of Navigation and Motion Control: MSNMC 2016 4th International Conference of IEEE (Kyiv, 18–20 October 2016). Kyiv, 2016. – P. 291–294. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783164. (Scopus)

Розділи монографії

43. Ostroumov I. V., Kuzmenko N. S. Applications of Artificial Intelligence in Flight Management Systems. In T. Shmelova, Y. Sikirda, & A. Sterenharz (Eds.), Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries, Hershey, PA: IGI Global. doi:10.4018/978-1-7998-1415-3.ch007, 2019. – P.180-192. ISBN: 978-179-981-415-3.

Матеріали конференцій

44. Остроумов І. В. Основні переваги застосування концепції «мобільне небо» для України. Авіа-2009 : міжнародна науково-технічна конференція (Київ, 21–23 вересня 2009). К., 2009. – С. 6.45–6.47.
45. Остроумов І. В. Застосування методів позиціонування у мережі мобільного зв'язку для навігації рухомих об'єктів. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон: Вид-во Херсонського державного морського інституту, 2010. Т. 2. – С. 57–59.

46. Остроумов І. В., Чинченко Ю. В. Електронний навчальний комплекс системи попередження зіткнень літаків у повітрі. Сучасні інформаційні технології в управлінні та професійній підготовці операторів складних систем : Міжнародна науково-практична конференція (Кіровоград, 27–28 жовтня 2010). Кіровоград, 2010. – С. 19–22.

47. Ostroumov I. V. Monitoring of private aviation flying. Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies: The Fourth World Congress. Kyiv: NAU, 2010. Vol. 1. – P. 329–338.

48. Kuz'menko N. S., Ostroumov I. V. Weather Web Service. Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies : The Fourth World Congress. Kyiv: NAU, 2010. Vo. 1. – P. 329–338.

49. Ostroumov I. V. Monitoring of general aviation flights by ADS-B. Polit. Challenges of science today: XI International Scientific and Practical Conference of Young Researchers and Students (Kyiv, 6–8 April 2011). K., 2011. – P. 57.

50. Остроумов І. В. Підвищення рівня безпеки авіаперевезень за рахунок використання концепції ADS-B в Україні. Новітні технології – для захисту повітряного простору: сьома наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба (Харків, 13–14 квітня 2011). Х. : ХУПС ім. І. Кожедуба, 2011. – С. 39–40.

51. Solomina N. O., Ostroumov I. V. TCAS modeling software for support education process. AVIA-2011: The Tenth International Conference of Science and Technology (Kyiv, 19–21 April 2011). K.:NAU, 2011. Vol. 2. – P. 7.16–7.19.

52. Остроумов І. В., Кузьменко Н. С. Моніторинг повітряного руху за повідомленнями ACARS. Авіа-2011 : міжнародна науково-технічна конференція (Київ, 19–21 квітня 2011). К., 2011. Т. 2. – С. 7.44–7.47.

53. Ostroumov I. V., Kuz'menko N. S. ADS-B tracking in Ukrainian airspace. Problems of CNS/ATM development: International Scientific-Metodical Conference of Researches (Kyiv, 21–23 November 2011). K., 2011. – P. 70.

54. Ostroumov I. V. Position detection by angular method in air navigation. Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies : The Fifth World Congress. Kiev: NAU, 2012. Vol. 2. – P. 3.2.51–3.2.53.

55. Остроумов І. В. Оцінка перспектив розвитку систем попередження зближень літаків у повітрі. Сучасні проблеми авіакосмічних технологій та систем : тези науково-практичного семінару (Житомир, 23–27 травня 2012). Житомир, 2012. – С. 11.

56. Остроумов І. В. Віртуальне середовище відображення навігаційних даних. Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики: тези доповідей І Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих учених (Київ, 24–25 жовтня 2012). К. : НАУ, 2012. – С. 43.

57. Ostroumov I. V. Positioning by VOR signals in Ukraine region. Problems of CNS/ATM development and ATM: International Scientific-Metodical Conference of Researches (Kyiv, 28–30 November, 2012). K., 2012. – P. 74.

58. Остроумов І. В. Інтеграція координатної інформації у обчислювальній системі літаководіння. Сучасні проблеми авіакосмічних технологій та систем: тези науково-практичного семінару (Житомир, 17–23 червня 2013). Житомир, 2013. – С. 19.

59. Ostroumov I. V. Nav aids facility for aircraft positioning. Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies: The Sixth World Congress. Kyiv: NAU, 2014. Vol. 2. – P. 3.2.1–3.2.5.

60. Ostroumov I. V. Features of position detection by distance measurement equipment. Problems and prospects of Aeronautics and Astronautics: III National Scientific Conference of young scientists and students (Kyiv, 23–24 October 2014). Kyiv, 2014. – P. 15.

61. Ostroumov I. V., Mironyuk O. O., Nychak M. V. Interpolation of magnetic field characteristics by spline functions. Problems and prospects of Aeronautics and Astronautics: IV National Scientific Conference of young scientists and students (Kyiv, 28–29 October 2015). Kyiv, 2015. – P. 5.

62. Ostroumov I. V. Reducing of GPS positioning error by real time ionosphere activity monitoring. Problems and prospects of Aeronautics and Astronautics: IV National Scientific Conference of young scientists and students (Kyiv, 28–29 October 2015). Kyiv, 2015. – P. 4.

63. Ostroumov I. V. Timing problem of multi DME/DME approach. Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies: The Seventh World Congress. Kyiv : NAU, 2016. Vol. 2. – P. 3.6.5–3.6.7.

64. Ostroumov I. V. Estimation of user location by data from different sources. Polit. Challenges of science today: XIV International Scientific and Practical Conference of Young Researchers and Students (Kyiv, 6–8 April 2016). K., 2016. – P. 85.

65. Ostroumov I. V. Analysis of DME/DME positioning facility for Ukrainian airspace. Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies: The Seventh World Congress. Kyiv : NAU, 2016. Vol. 2. – P. 3.6.1–3.6.4.

66. Ostroumov I. V., Kuzmenko N. S. Historical Changes in Performance of Positioning by Navigational Aids in Ukrainian Airspace. Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress: UKRSYW of IEEE (Kyiv, 2–6 October 2018). Kyiv, 2018. – P. 291–294.

АНОТАЦІЯ

Остроумов І. В. Методологічні засади комплексного позиціонування літальних апаратів за сукупністю навігаційних засобів в умовах ризику. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – «Навігація та управління рухом», Національний авіаційний університет, м. Київ, 2020.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення точності визначення координат місцеположення літального апарату в умовах незапланованої відмови основної системи позиціонування з метою забезпечення виконання сучасних вимог навігації заснованої на характеристиках.

Розроблено та запатентовано методи позиціонування літального апарату за сукупністю навігаційної інформації отриманої за результатами вимірювань датчиків та прогнозованих за регресією значень на основі попередніх вимірювань. Зокрема, розроблено методи позиціонування за сукупністю інформації від далекомірного обладнання, сукупністю кутової інформації від всенапрямлених радіомаяків, та їх комбінації, що дозволяє підвищити точність кожного з методів шляхом вибору оптимальної геометрії взаємного місцезрештування у порівнянні з існуючими методами позиціонування за парами навігаційних засобів.

Запропоновано методи позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків у повітрі та інформацією про повітряний рух

навколо, отриманої за концепцією автоматичного залежного спостереження, що дозволяє оцінювати координати літального апарату з урахуванням зони невизначеності.

Розроблено метод пасивного позиціонування, що використовує сигнали далекомірного обладнання, наявні у просторі, у якості опорного навігаційного сигналу для отримання часової різниці фіксації сигналів на борту літака, що дозволяє визначати власне місцеположення у просторі на основі різнісно-далекомірного принципу без випромінювання електромагнітних хвиль, що зменшить завантаженість наземних радіонавігаційних засобів.

Удосконалено метод оцінювання доступності радіонавігаційних засобів, що враховує індивідуальні особливості наземного обладнання, вплив тропосфери, рельєфу місцевості і штучних споруд на поширення сигналів радіонавігаційних засобів та дозволяє більш точно визначати зону дії наземних радіонавігаційних засобів у повітряному просторі.

Вперше запропоновані моделі ймовірнісного класифікатора для контролю за витримуваним навігаційних характеристик, що гарантують розпізнавання відповідності специфікаційним вимогам зональної навігації з максимальною ймовірністю.

Сформульовано та вирішено оптимізаційну задачу вибору оптимального набору радіонавігаційних засобів у термінах цілочисленого лінійного програмування, що дозволяє оптимально використовувати наземний сегмент радіонавігаційного обладнання.

В роботі уперше розроблено модель оцінювання характеристик поля навігаційних сигналів сформованих радіонавігаційними засобами у тривимірному просторі, що дозволяє отримувати точну тривимірну модель просторових зон відповідності специфікаційним вимогам зональної навігації для задач планування повітряного руху. Модель ґрунтується на ітеративному підході оцінювання характеристик позиціонування за різними методами з використанням розбиття повітряного простору на елементарні частинки та інтегрального оцінювання контурів просторових об'єктів. Розроблену модель використано для оцінювання тривимірних зон простору відповідності різним вимогам зональної навігації для різних методів навігації у межах повітряного простору України.

У сукупності розроблені методи надають якісно нове рішення задачі забезпечення систем літального апарату навігаційною інформацією у випадку відмови основного джерела даних позиціонування. Застосування розроблених методів відповідає напрямкам розвитку авіаційної галузі та підвищує безпеку авіаційних перевезень.

Ключові слова: навігація; позиціонування; наземні радіонавігаційні засоби; точність; доступність; повітряний простір; прогнозування; зона дії; навігація заснована на характеристиках.

ABSTRACT

Ostroumov I. V. Methodological foundation of integrated aircraft positioning by multiple navigational aids under risk condition. – Qualification scientific work under manuscript copyright.

Thesis for the degree of doctor of technical sciences in specialty 05.22.13 – “Navigation and traffic control”. – National Aviation University, Kyiv, 2020.

Thesis is dedicated to solve scientific-technic problem of aircraft coordinates’ accuracy improvement in the case of primary positioning system malfunction in order to guarantee performance-based navigation requirements.

New methods of aircraft positioning by advanced integration of measured data from air navigation sensors and values predicted by regression model obtained with a help of previous measurements were developed.

In particular, positioning methods by aggregate data from distance measuring equipment, angular information from omni-directional beacons, and their combinations have been developed, which allows to increase the accuracy of each of the methods by choosing the optimal geometry of the relative positioning in comparison with the existing methods of positioning by pairs of navigation means.

The methods of airplane positioning by data of traffic collision and avoidance system and information about the air traffic, obtained by automatic dependent surveillance-broadcast, which allows to estimate the coordinates of the aircraft taking into account the areas of uncertainty, are offered.

Developed passive positioning method uses navigational signals of distance measuring equipment available in space as a reference signal to obtain a temporal difference in the signals fixation on-board the aircraft, that reduce the load of ground-based infrastructure.

The method of estimating the availability of navigation aids has been improved, by taking into account the individual characteristics of ground equipment, the influence of the troposphere, terrain and artificial structures on the propagation of signals, that helps to identify operational volume of navigational aids.

Models of probabilistic classifier for controlling the holding of navigation characteristics, which guarantee recognition of compliance with the air navigation specifications with maximum probability, were first proposed.

The optimization problem of choosing the optimal set of radio navigation aids in terms of integer linear programming is formulated and solved, which allows optimal use of the terrestrial segment of navigation equipment.

In this paper, we first developed a model for estimating the characteristics of a field of navigation signals generated by navigational aids in three-dimensional space, which allows to obtain an accurate three-dimensional model of volume in accordance with the specifications of area navigation for air traffic planning tasks. The model is based on an iterative approach to evaluate the positioning characteristics of various methods using the partitioning of air space into elementary particles and the integral estimation of the contours of spatial objects. The developed model was used to evaluate three-dimensional volume of air space compliance with different area navigational requirements within Ukrainian airspace.

In complex, the developed methods provide new solution to the problem of providing aircraft systems with navigation information in case of failure of the main source of positioning data. Application of the developed methods corresponds to the directions of development of aviation industry and improves safety of aviation transportation.

Keywords: navigation; positioning; navigational aids; accuracy; availability; airspace; prediction; service volume; performance based navigation.

Підп. до друку 27.05.2020. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк.2,32. Обл.-вид. арк. 2,5.
Тираж 100 пр. Замовлення № 13-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Любомира Гузара, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002