

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КОНДРАТЮК ВАСИЛЬ МИХАЙЛОВИЧ



УДК 528.2: 629.78

**МЕТОДИ І АЛГОРИТМИ ПРЕЦИЗІЙНОГО ВИЗНАЧЕННЯ
МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА СИГНАЛАМИ
ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ**

05.22.13 – Навігація та управління рухом

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2021

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України в науково-навчальному центрі «Аерокосмічний центр» та кафедрі аеронавігаційних систем/

- Науковий керівник доктор технічних наук, професор
ХАРЧЕНКО Володимир Петрович,
заслужений діяч науки і техніки України,
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки,
Національний авіаційний університет (м. Київ),
директор ННЦ «Аерокосмічний центр» НАУ.
- Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Писарчук Олексій Олександрович,
лауреат державної премії в галузі науки і техніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» (м. Київ),
професор кафедри обчислювальної техніки;
- кандидат технічних наук
Васильєв Денис Володимирович,
Державне підприємство обслуговування
повітряного руху України (м. Київ),
заступник директора навчально-сертифікаційного
центру.

Захист відбудеться «12» травня 2021 р. о 16.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03 в Національному авіаційному університеті України за адресою: 03058 м. Київ, пр. Любомира Гузара, 1, корп. 1. ауд. 1.001.

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

Автореферат розісланий « » квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03



Н. С. Кузьменко

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Технології й апаратура глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo та їх функціональних доповнень, а також регіональної Японської квазізенітної супутникової системи (Quazi-Zenith Satellite System – QZSS) та Індійської супутникової системи (Indian Regional Navigation Satellite System – IRNSS) все більш масово застосовуються в різних галузях народного господарства та військового призначення, особливо там, де необхідно забезпечити точне позиціонування, навігацію і керування рухомими об'єктами, моніторинг споруджень, різних об'єктів і процесів. ГНСС та їх функціональні доповнення разом з наземними і космічними бортовими системами стають основними засобами навігації й керування рухом й у такому вимогливому до безпеки виду цивільного транспорту як авіація.

Принциповою особливістю ринку ГНСС найближчого майбутнього, є те, що значну його частку становлять цільові диференціальні інформаційні послуги користувачам, які підвищують продуктивність праці, ефективність, точність і безпека всіляких транспортних додатків супутникових технологій, послуги, якими зможе скористатися не вузьке коло професійно орієнтованих організацій, а широке коло користувачів без спеціальної підготовки.

Одним із основних соціотехнічних користувачів навігаційних супутникових систем є авіація та її відповідні служби аеронавігації. Це виражено в принципово новій концепції CNS/ATM, Глобальному Аеронавігаційному Плані до 2030 року (Global AiR Navigation Plan 2016–2030) ІКАО, Європейському плані організації повітряного руху Євроконтролю (European ATM Master Plan), впровадження яких дасть значні можливості розвитку, підвищення безпеки польотів, збільшення авіап перевезень пасажирів і вантажів з високою економічною ефективністю. Самим масовим користувачем супутникових навігаційних технологій стає наземний транспорт, але все більшу популярність набирає використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Мініатюризація електронних засобів, зокрема мультикоптерів, як одного з видів БПЛА де основним засобом навігації є ГНСС, отримують широку сферу застосування (військова сфера, галузь надзвичайних ситуацій, геодезичні застосування, сільське господарство, тощо). Завдяки цим новим і ефективним в реалізації й обслуговуванні технологіям з'явилася й досить швидко розвивається індустрія автоматизованих диспетчерських систем, що дозволяють здійснювати контроль і керування всіма видами транспорту, охорону транспортних засобів і оперативний автоматизований обмін інформацією й повідомленнями між користувачами й диспетчерськими пунктами. Значну роль у забезпеченні навігаційних послуг тут грають, особливо при місцевизначенні в умовах великих міст, диференціальні функціональні доповнення ГНСС. Ця індустрія приносить швидкий і постійно зростаючий економічний ефект у всіх розвинених країнах світу, великий інтерес комерційних організацій обумовлює тенденцію до зниження вартості обладнання користувачів.

Аналіз сучасних супутникових навігаційних технологій і їх потреб на світовому ринку послуг позиціонування показує, що при вимогах дециметрового рівня точності позиціонування використання методів спільної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень без рішення складного завдання розв'язання фазової неоднозначності набуває широкого застосування, головним чином, для одночастотного бюджетного ГНСС-обладнання. Подібні технології активно використовуються для вирішення завдань управління наземним транспортом та БПЛА, точного землеробства, геоінформатики та багато інших додатків. Основні проблемні питання при підвищенні точності позиціонування зосереджені в області обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень, експериментальній верифікації процедур високоточного кінематичного позиціонування (навігації), реалізації процедур розв'язання фазової неоднозначності.

Таким чином, *науково-технічна задача розробки методів і алгоритмів прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за допомогою обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень без ускладненої процедури розв'язання фазової неоднозначності* має важливе промислове значення, є надзвичайно актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Робота виконана в науково-навчальному центрі «Аерокосмічний центр» та кафедрі аеронавігаційних систем факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету.

Дослідження, що представлено в дисертаційній роботі пов'язано з виконанням науково-дослідних робіт і міжнародних грантів в яких здобувач був відповідальним виконавцем: «Розроблення та впровадження апаратно-програмного комплексу моніторингу та управління спеціальними рухомими об'єктами» (№ держреєстрації 0106U011430); «Теоретичні засади високоточних визначень координат в реальному часі на основі супутникових радіонавігаційних систем» (№ держреєстрації 0108U004005), «Дослідження шляхів сертифікації системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України (СКНЗУ) щодо якості надання послуг та забезпечення безпеки їх використання споживачами сигналів глобальних навігаційних супутникових систем», шифр «Безпека» (№ держреєстрації 0107U006891); «Навігація» Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем. («Навігація-Сертифікат». Сертифікація системи). шифр «Навігація-Сертифікат» (№ держреєстрації 0108U008542); «Розробка та дослідження апаратно-програмних засобів споживача для обміну даними з центром обробки спостережень» (№ держреєстрації 0107U000153); «Розроблення апаратно-програмних засобів інтегрованої інерційно-супутникової навігаційної системи для безпілотних літальних апаратів (БПЛА)» (№ держреєстрації 0111U000173); «Мультизадачний комплекс автоматичного управління на базі інтегрованої інерційно-супутникової системи для БПЛА» (№ держреєстрації 0115U002467); Грантова угода № 641517 Горизонт 2020 UKRAINE «Відтворення обізнаності та інновацій в Україні на

основі ЄГНСС» (“UKraine Replication, Awareness and INnovation based on EGNSS”); Система моніторингу доступності радіонавігаційного поля при заходах на посадку літальних апаратів за сигналами GNSS (№ держреєстрації 0117U002371); «Розроблення інтегрованої системи наведення, навігації та управління польотом дрона» (№ держреєстрації 0119U100629). В НДР «Структурно-параметричний синтез розроблення технології побудови геліоенергетичних стратосферних платформ з адаптивно-нейронним керуванням» (№ держреєстрації 0120U101989), (виконавець за напрямом).

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка, дослідження та експериментальна верифікація нових та удосконалених методів і алгоритмів прецизійного визначення місцеположення (позиціонування) рухомих об’єктів на основі більш ефективної сумісної обробки диференціальних кодових і фазових ГНСС-спостережень без застосування ускладнених процедур розв’язання фазової неоднозначності.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

1. Аналіз та розвиток методів і алгоритмів спільної обробки диференціальних кодових і фазових ГНСС-спостережень для цілей високоточного кінематичного позиціонування дециметрової точності без застосування ускладнених процедур розв’язання фазової неоднозначності, включаючи:

– розробку метода і алгоритмів згладжування/фільтрації кодових спостережень з використанням фазових, який враховує вплив накручування фази несучої (так званий “wind-up” ефект), що обумовлене еволюціями, обертаннями об’єктів, що рухаються;

– розробку метода і алгоритмів отримання комбінованого диференціального сумісного кодово-фазового рішення навігаційної задачі з оцінкою початкових фазових неоднозначностей (як континуальних змінних) та без використання операцій згладжування;

– розробку метода і алгоритмів сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що дозволять значимо підвищити точність позиціонування рухомих об’єктів шляхом суттєвого зменшення впливу стрибків оцінок кодово-фазових рішень, обумовлених зміною робочого сузір’я супутників ГНСС.

2. Розробити методику оцінки точності кодово-фазових координатних визначень з використанням диференціальної коригувальної інформації.

3. Провести експериментальне дослідження, для підтвердження ефективності розроблених методів і алгоритмів точного позиціонування.

Об’єкт дослідження – технології і процеси обробки вимірювальної інформації та точного позиціонування по сигналах ГНСС.

Предмет дослідження – методи і алгоритми обробки кінематичних фазових і кодових ГНСС-спостережень.

Методи дослідження. Для розробки методів і алгоритмів сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень використовувалися методи математичного аналізу, теорії супутникових радіонавігаційних систем, статистичної теорії оцінювання параметрів, метод математичного моделювання. Функціональність розроблених математичних моделей методів обробки ГНСС-спостережень без

реалізації складних процедур розв'язання фазової неоднозначності перевірялась за допомогою комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень в натурних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Удосконалений метод обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу згладжування/фільтрації кодових спостережень з використанням безперервних фазових спостережень в режимі кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих, враховує вплив накручування фази несучої ("wind-up"-ефект), який проявляється при зміні напрямку руху, еволюціях, обертаннях об'єктів. Даний метод забезпечує підвищення точності оцінки координат рухомих об'єктів до дециметрового рівня.

2. Отримав розвиток метод комбінованого диференціального сумісного кодово-фазового рішення навігаційної задачі з одночасною оцінкою початкових фазових неоднозначностей (як континуальних змінних) та без безпосереднього здійснення операцій згладжування/фільтрації. Метод є найбільш ефективним для спільної обробки спостережень GPS+ГЛОНАСС так як враховує особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів ГЛОНАСС, що забезпечує дециметровий рівень точності.

3. Вперше розроблено метод сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу точного кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих методів, дозволяє усунути варіаційні складові похибки рішення, суттєво зменшення вплив стрибків оцінок кодово-фазових рішень, обумовлених зміною робочого сузір'я супутників ГНСС, а також дозволяє зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженого» та диференціальних рішень.

Практичне значення отриманих результатів

1. Запропоновані нові та удосконалені методи і алгоритми обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень в режимі кінематичного позиціонування є відносно простими та ефективними для реалізації в апаратурі підвищеної точності, призначеної для позиціонування рухомих об'єктів.

2. Розроблений експериментальний зразок ГНСС-апаратури реалізує створені та протестовані методи і алгоритми обробки ГНСС-спостережень. Це забезпечує суттєве (до кілька разів) підвищення точності диференціального позиціонування рухомих об'єктів і може використовуватись в системах управління рухомими об'єктами, а також верифікації автопілотів БПЛА.

3. Запропонована модель похибок ГНСС-спостережень для координатно-часових визначень в диференціальному режимі, може бути застосована для оцінки характеристик точності бюджетної апаратури підвищення точності.

4. Методика оцінки фактичної точності координатних визначень з використанням диференціальної коригувальної інформації, рекомендується для верифікації ГНСС-обладнання користувача для статичного і кінематичного (рухомий об'єкт) режимів позиціонування.

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

підприємства «Оризон-Навігація» та Товариство з обмеженою відповідальністю «Є.П.С.»

Особистий внесок

Основні результати дисертаційної роботи, що отримані автором як самостійно та в співавторстві з іншими вченими, опубліковано в фахових виданнях. Зокрема, в публікаціях [1] авторові належить схему інтеграції ГНСС технологій та зв'язку для моніторингу та управління рухомими об'єктами; в роботі [2] автором обгрунтовано принципи побудови автотранспортних диспетчерських систем управління на базі ГНСС технологій та зв'язку; в [3] автором обгрунтовано вимоги застосування ГНСС технологій та зв'язку в залізничній галузі; в роботі [4] автором розроблено схему експериментального дослідження та участь в обробці даних; в роботі [5] автором запропоновано схему реалізації DGPS/RTK режиму з використанням NTRIP-технології; у роботі [6] автором виконано постановку задачі та обробку даних ГНСС; у роботі [7] автором розроблено схемо-технічного рішення апаратури споживача та участь в обробці даних ГНСС; в роботі [8] автором розроблено алгоритм реалізації Differential Global Positioning System (DGPS) методу для визначення поточних координат рухомих об'єктів; в [7] проведено дослідження доступності диференціального сервісу на території України; в роботах [9, 10] автором самостійно розроблений метод згладжування диференціальних кінематичних кодових ГНСС-спостережень, проведено аналіз методів і алгоритмів кодово-фазового ГНСС-позиціонування та проведено математичне моделювання; в [11] автором запропоновано модель автоматизованого керування літальним апаратом з використанням навігаційних даних супутникових радіонавігаційних системи; в [12] автором запропоновано метод згладжування/фільтрації диференціальних ГНСС спостережень в режимі кінематичного позиціонування.; в [13] автором запропоновано спосіб реалізації супутникових технологій в транспортній логістиці; в [14] автором описана модель передачі даних та вплив нелінійності в каналах; в [15] автором запропоновано метод визначення координат космічного сміття; в [16] автором запропоновано алгоритм позиціонування з обмеженим доступом сигналів ГНСС; в роботах [17, 18, 21, 22] автором розрахована модель передачі даних в супутникових каналах передачі даних для різних стандартів; в [19] автором розроблено методику тестування ГНСС обладнання, постановка експериментального дослідження; в [20] автором розроблено методику верифікації ГНСС обладнання та участь в обробці даних ГНСС; в [23] автором запропоновано модель розрахунку втрат в каналах зв'язку.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації та основні положення, отримані в роботі, представлялися та пройшли апробацію на 23 вітчизняних та міжнародних НТК: VI Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2004», «АВІА-2006», «АВІА-2009», «АВІА-2011», «АВІА-2013», «АВІА-2015» НАУ, м. Київ; Міжнародна конференція з систем локації і навігації (МКЛСН-2005), м. Харків, ХНУРЕ, 19–23 вересня, 2005 р.; 5-ий міжнародний авіакосмічний салон «Авіасвіт–XXI», м. Київ, 2006 р; II Міжнародної конференції GIS и GPS на практиці, м. Хелм, Польща,

19–20 квітня 2007 р.; 4-го Міжнародний радіоелектронний форум (МРФ) «Прикладна електроніка. Стан та перспективи розвитку». 2011; Всесвітній конгрес «Авіація в ХХІ столітті», м. Київ, 2012, 2014; Міжнародні конференції ІЕЕЕ: «Актуальні проблеми розвитку безпілотних літальних апаратів» 2013, «Методи та системи навігації та управління», жовтень 14–17, 2014, «Актуальні проблеми розробки безпілотних літальних апаратів», 2017, «Методи та системи навігації та управління рухом», 2018, «Актуальні проблеми розробки безпілотних літальних апаратів», 2019 м. Київ, Україна.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 61 наукові праці, у тому числі 13 статей у фахових наукових виданнях України (2 статті без співавторів), 1 стаття в міжнародних фаховому журналі, що включено до міжнародної наукометричної бази **Scopus**, 7 статей в міжнародних фахових журналах за кордоном, 2 статті в міжнародних фахових журналах за кордоном, що включено до міжнародної наукометричної бази **Scopus**, 1 патент на винахід, 6 патентів на корисну модель, 20 роботи у збірниках матеріалів і праць міжнародних конференцій, 10 у звітах з науково-дослідних робіт та 1 звіт за міжнародною грантовою Угодою Горизонт 2020. Сторінка автора в міжнародній наукометричній реферативній базі Scopus (authorId=57215328010) містить 10 наукових праць (Цитування: 36; Індекс Хірша: 3). Унікальний ідентифікатор науковця (Open Researcher and Contributor ID–ORCID): 0000-0002-5690-8873.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 2-х додатків. Загальний обсяг дисертації складає 169 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 141 сторінок. Робота містить 51 рисунок та 31 таблицю. Список використаних літературних джерел складається з 132 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** проведено короткий аналіз публікацій, визначено актуальність завдання, надано загальний опис та перспективи розвитку ГНСС, таких як GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo та їх функціональних доповнень, а також регіональних супутникових систем QZSS та IRNSS. Проведено аналіз сучасних вимог до точності та надійності координатних визначень для різних класів користувачів. Виконано порівняння вимог користувачів із можливостями ГНСС на сучасному етапі розвитку. Показано, що забезпечити необхідні навігаційні характеристики для значної кількості користувачів неможливо без впровадження сучасних методів обробки, особливо для не дорогого одночастотного обладнання ГНСС. При цьому, більшість користувачів рухомих об'єктів вимагають підвищеної точності до дециметрового рівня.

На даний час існують диференціальні мережеві підсистеми реального часу, які надають (за допомогою державних національних або комерційних

провайдерів-операторів) інформаційні послуги (диференціальні корекції) для забезпечення точних навігаційних визначень. Точність таких визначень, як правило, становить менш, ніж 1 м (95 %), і для певних варіантів реалізації диференціального режиму ~1–3 дм (95 %) у реальному часі на базових відстанях у десятки та сотні кілометрів, але при цьому необхідно мати дорогі двочастотні/мультичастотні ГНСС-приймачі та додаткове обладнання, щоб забезпечити надійні телекомунікації, а це накладає додаткові фінансові витрати та зайве масогабаритне навантаження.

Одним з ключових елементів розглянутих технологій є одночастотна апаратура споживача, яка є невід’ємною частиною ГНСС. Розроблення та реалізація методів і алгоритмів обробки вимірювальної інформації, які зможуть забезпечити дециметровий рівень точності в апаратурі споживача є пріоритетним при визначенні місцеположення рухомих об’єктів.

У **другому розділі** представлено нові та удосконалені методи і алгоритм обробки ГНСС-спостережень для підвищення точності диференціальних координатних визначень, що базуються на теорії супутникових радіонавігаційних систем.

Запропоновано удосконалений метод обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу згладжування/фільтрації кодових спостережень з використанням безперервних фазових спостережень в режимі кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих, враховує вплив накручування фази несучої (“wind-up”-ефект), який проявляється при зміні напрямку руху, еволюціях, обертаннях об’єктів. Даний метод (умовно назвемо метод 1) використовує представлення рівнянь спостережень у вигляді «віртуальних подвійних різниць», що дає можливість використовувати діагональні кореляційні матриці похибок диференціальних кодових та фазових спостережень та виконати їх оптимальну статистичну обробку. Урахування та парирування впливу “wind-up”-ефекту фазових вимірювань при виконанні згладжування кодових спостережень з використанням фазових дозволяє суттєво зменшити багатопроміневість і шумові складові кодових спостережень та у підсумку підвищити точність кінематичного позиціонування.

Розроблений підхід був побудований з урахуванням наступних обмежень:

- в кодових і фазових спостереженнях виключені аномалії;
- в фазових спостереженнях виключені циклічні скачки («сліпи») і відновлена безперервність спостережень.

Нижче наведена вихідна система рівнянь спостережень, яка використовувалася при розробці методу обробки.

$$\begin{cases} \Delta \hat{S}_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \underbrace{\Delta_{AB}(t_k) + \Delta b_{cAB}}_{\eta_S} + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) + \Delta I_{AB}^j(t_k) + \delta \Delta S_{AB}^j(t_k) \\ \Delta \hat{L}_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \underbrace{\Delta_{AB}(t_k) + \Delta b_{oAB}}_{\eta_L} + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) - \Delta I_{AB}^j(t_k) - \Delta N_{AB}^j \cdot \lambda_1 + \\ + \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^j(t_k) \end{cases} \quad (1)$$

де $\Delta \hat{S}_{AB}^j(t_k)$, $\Delta \hat{L}_{AB}^j(t_k)$ – одинарні різниці кодових і фазових спостережень;

- $\Delta R_{AB}^j(t_k)$ – одинарні різниці відстаней «супутники-приймач»;
 η_S, η_L – змінні, що включають в себе розбіжності шкал часу між прийомними пунктами і різниці затримок в трактах приймачів;
 $\Delta Tr_{AB}^j(t_k)$ – різниці тропосферних затримок;
 $\Delta I_{AB}^j(t_k)$ – різниці іоносферних затримок;
 ΔN_{AB}^j – одинарні різниці фазових неоднозначностей;
 $\phi_{wp}(t_k)$ – ефект накручування фази («wind-up»);
 $\delta \Delta S_{AB}^j(t_k), \delta \Delta L_{AB}^j(t_k)$ – багатопроменева і шумова складові похибок.

Далі реалізується наступний алгоритм:

- 1) вводим корекції на затримки сигналів в тропосфері та іоносфері з використанням відповідних моделей;
- 2) виконуємо лінеаризацію функцій відстаней з використанням попередніх менш точних оцінок координат об'єкту;
- 3) формуємо реальні подвійні різниці кодових і фазових спостережень (у подвійних різницях для GPS-спостережень «wind-up»-ефект повністю компенсується);
- 4) формуємо комбінації «код-фаза» подвійних різниць спостережень та оцінюємо середнє значення (оцінка рівнів «код-фаза») по кожному набору «код-фаза» подвійних різниць спостережень;
- 5) виконуємо операції заміни кодових лінійних комбінацій (ЛК) (подвійних різниць) фазовими з урахуванням оцінок рівнів «код-фаза» (умовне згладжування) та з збереженням динаміки функцій подвійних різниць спостережень;
- 6) виконуємо обробку одинарних різниць спостережень вибраного референцного супутника – оцінюємо середнє значення, виконуємо операцію заміни рівня «код-фаза» (згладжування);
- 7) отримуємо комбінації згладжених подвійних різниць спостережень та згладжених одинарних різниць для референцного супутника – повертаємося до обробки одинарних різниць згладжених спостережень.

Лінеаризовану систему рівнянь згладжених кодових спостережень маємо в остаточному вигляді:

$$\begin{cases} \Delta \tilde{S}_{AB}^1(t_k) = \|a_{\bar{X}}^1(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \tilde{\eta}_{SL}(t_k) + \delta \tilde{f}_{AB}^1(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^1(t_k) \\ \Delta \tilde{S}_{AB}^2(t_k) = \|a_{\bar{X}}^2(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \tilde{\eta}_{SL}(t_k) + \delta \tilde{f}_{AB}^2(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^2(t_k) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \Delta \tilde{S}_{AB}^m(t_k) = \|a_{\bar{X}}^m(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \tilde{\eta}_{SL}(t_k) + \delta \tilde{f}_{AB}^m(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^m(t_k) \end{cases} \quad (2)$$

де змінні $\tilde{\eta}_{SL}(t_k)$, що оцінюються разом з поправками координат $\Delta \bar{X}(t_k)$ методом найменших квадратів, включають в себе остаточний «wind-up»-ефект; $\delta \tilde{f}_{AB}^m(t_k)$ – сумарні остаточні повільно змінюючися складові похибок.

На рис. 1 представлено результати обробки експериментальних даних подвійних різниць кодових і «згладжених» кодових спостережень.

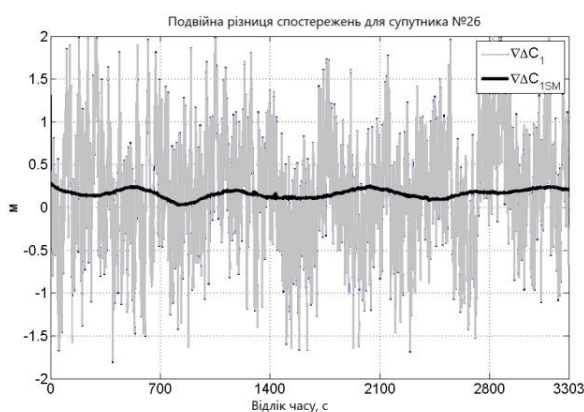
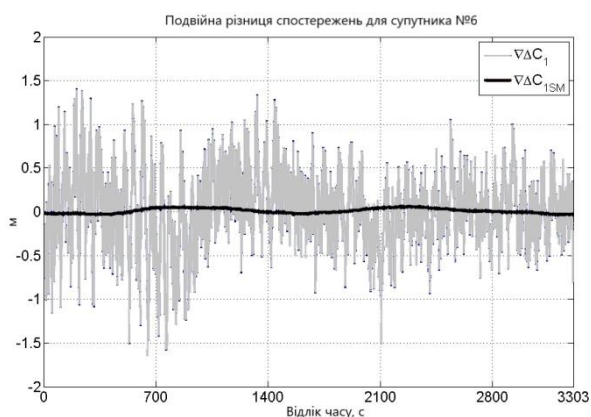


Рисунок 1. Подвійні різниці кодівих і «згладжених» кодівих спостережень отримані в результаті обробки спостережень за запропонованим методом

На рис. 2 наведено результати обробки експериментальних даних для координатного рішення при використанні диференціального кодового рішення та «згладжених» кодівих вимірювань, які були оброблені з використанням традиційного диференціального кодового рішення, методу згладжування/фільтрації («Hatch»-фільтр) і запропонованого в даній роботі методу 1 обробки ГНСС-спостережень.

Як видно з рис. 2 реалізація нового підходу до обробки ГНСС-спостережень, дозволяє значно підвищити точність координатних визначень.

Даний метод забезпечує підвищення точності оцінки координат до дециметрового рівня як для рухомих, так і для статичних об'єктів. У даному розділі також представлено розроблений метод (умовно позначим його як метод 2) комбінованого диференціального кодового і фазового так званого «плаваючого» (float) рішення.

Відмінною особливістю даного методу, в порівнянні з попереднім, є те, що в обробку спільно включаються кодові і фазові спостереження, без безпосереднього здійснення операцій згладжування/фільтрації. Оцінка «рівня» фазових спостережень щодо кодівих здійснюється спільно з оцінкою

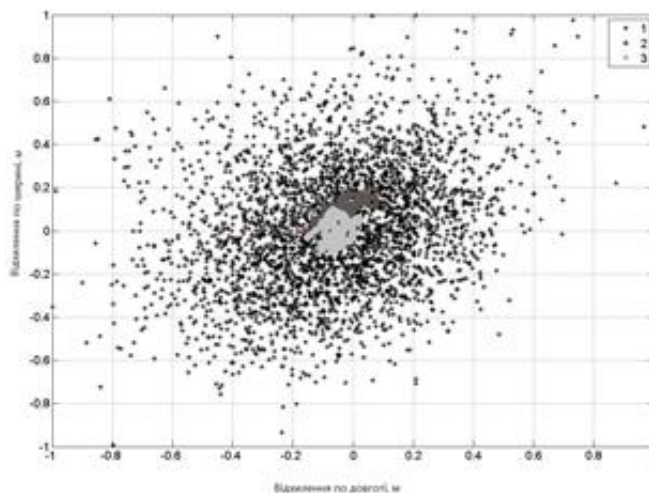


Рисунок 2. Відхилення отриманого рішення по плановим координатами від еталонних оцінок координат (1 – диференціальне кодове рішення; 2 – «Hatch»-фільтр; 3 – метод 1 обробки ГНСС-спостережень)

координатно-часових параметрів. Описаний в дисертації метод 2 реалізує обробку фазових спостережень, при якому дискретні цілочисельні фазові неоднозначності трактуються як континуальні невідомі параметри, оцінка яких здійснюється спільно з залишковими систематичними похибками подвійних різниць фазових спостережень. В процесі обробки кодівим і фазовим спостереженням надаються відповідні вагові коефіцієнти. Метод передбачає,

що у використовуваних спостереженнях виключені аномалії (пропуски, фазові циклічні скачки) і відновлена безперервність фазових спостережень.

Особливу увагу приділено обробці методом 2 спостережень ГНСС з частотним розподілом спектрів випромінюваних сигналів. Запропонований удосконалений метод комбінованого диференціального кодового і фазового рішення є найбільш ефективним для спільної обробки спостережень GPS+ГЛОНАСС, так як він враховує особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів ГЛОНАСС та забезпечує дециметровий рівень точності кінематичного позиціонування.

В роботі також запропоновано метод (умовно позначим його як метод 3) сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу точного кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих методів, дозволяє усунути варіаційні складові похибки рішення і виключає стрибки координат, що викликані зміною робочого сузір'я супутників ГНСС. Метод заснований на використанні оцінок зміни безперервних фазових ГНСС-спостережень (збільшень) за часом.

Розроблений метод враховує наступні обмеження:

– в використовуваних кодових і фазових спостереженнях виключені аномалії;

– в фазових спостереженнях виключені циклічні скачки (т.зв. «сліпи») і відновлена безперервність спостережень;

– метод 3 використовує та уточнює згладжене (по методу 1) диференціальне кодово-фазове координатне кінематичне рішення.

В якості вхідних даних запропонований метод обробки використовує такі параметри:

$$\begin{cases} \Delta\hat{L}_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \eta_L + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) - \Delta I_{AB}^j(t_k) - \Delta N_{AB}^j \cdot \lambda_1 + \\ + \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) + \delta\Delta L_{AB}^j(t_k) \\ \bar{X}_B(t_k) = X_B(t_k) + \delta X_B(t_k) \end{cases}, \quad (3)$$

де $\Delta\hat{L}_{AB}^j(t_k)$ – одинарні різниці фазових спостережень;

$\Delta\bar{X}(t_k)$ – оцінки координат, отриманих з використанням алгоритму по методу 1;

$X_B(t_k)$ – координати, що оцінюються;

$\delta X_B(t_k)$ – похибки оцінок координат, що отримані методом 1;

В процесі обробки формуються прирощення (збільшення) диференціальних фазових спостережень і координат у часі:

$$\begin{cases} d\Delta\hat{L}_{AB}^j(t_{k,k-1}) = \Delta\hat{L}_{AB}^j(t_k) - \Delta\hat{L}_{AB}^j(t_{k-1}), k = \overline{2\dots n}. \\ d\Delta\bar{X}(t_{k,k-1}) = \Delta\bar{X}(t_k) - \Delta\bar{X}(t_{k-1}) \end{cases} \quad (4)$$

Після цього виконуємо рішення навігаційної задачі – оцінюємо прирощення координат по прирощенням фазових спостережень за часом. Використання прирощень фазових спостережень виключає необхідність виконання розв'язання фазової неоднозначності (РФН). Рішення навігаційної задачі виконується методом найменших квадратів.

Після рішення навігаційної задачі виконується операція інтегрування отриманих прирощень координат. Ця операція дозволяє отримати зміни координат у часі з точністю до констант в перший момент часу. Оскільки систематичні похибки визначення збільшень координат в даному випадку малі, а флуктуаційні похибки суміжних фазових спостережень виключаються, то інтегральне значення прирощень координат буде залежати від похибок першої і кінцевої епохи інтервалу інтегрування. Це дає можливість отримати зміни координат у часі з високою точністю і уникнути різких викидів координат при зміні супутникової конфігурації, які притаманні методу 1 (згладженому кодово-фазовому рішенню). При цьому залишаються невідомим початкове значення першої епохи спостережень. Визначення середнього значення координат здійснюється за оцінками координат, що отримані методом 1.

Для уточнення середнього значення координат усереднення виконується в два етапи: на першому етапі усуваються епохи, на яких координати виходять за поріг 3σ , на другому – оцінюється середнє значення координат. Підсумкові координати дорівнюють сумі проінтегрованих прирощень координат і середніх значень координат, отриманих за методом 1. Таким чином, точність модифікованого згладженого рішення обмежується точністю визначення середніх значень координат, отриманих методом 1.

Нижче на рис. 3 приведена блок-схема обробки ГНСС-спостережень.

Даний метод обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень дозволяє усунути варіаційні складові похибки рішення і виключає стрибки координат, що викликані зміною робочого сузір'я супутників.

Метод дозволяє, як показали дослідження, всередньому у ~ 2 рази зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженого» рішення і в ~ 3 – 4 рази по відношенню до диференціальних DGPS-рішень.

В другому розділі дисертаційної роботи запропонована модель похибок ГНСС-спостережень, як інструмент оцінки точності отриманих рішень – індикатор якості позиціонування.

Модель враховує внесок основних джерел похибок спостережень, де для кожної складової були прийняті оцінки середньоквадратичних похибок (СКП), які оцінені на результатах власних та зарубіжних досліджень.

В запропонованій моделі враховуються наступні складові:

1) ефемеридні похибки – похибка вимірювань, обумовлена неточністю ефемерид, що є проекцією вектора помилок координат супутника на напрями приймач-супутники;



Рисунок 3. Блок-схема обробки ГНСС-спостережень методом 3

2) похибки, обумовлені неточним урахуванням тропосферної затримки навігаційних сигналів – при обробці спостережень, для компенсації тропосферних затримок використовувалася модель MOPS (Minimum Operational Performance Standard); згідно з результатами експериментальних досліджень залишкова похибка компенсації тропосферної затримки при використанні моделі MOPS становить ~5–10 % від розрахункової величини;

3) похибки, обумовлені неточним урахуванням іоносферних затримок навігаційних сигналів; для компенсації іоносферної затримки використовуються глобальні іоносферні моделі Klobuchar і GIM IONEX; результати зарубіжних і вітчизняних досліджень показали, що залишкові похибки (СКП) компенсації іоносферної складової при обробці спостережень можуть бути наступними:

– при застосуванні моделі Klobuchar $\sigma_{\Delta I}(t) = 0,50 \cdot \Delta I$;

– при використанні моделі GIM IONEX $\sigma_{\Delta I}(t) = 0,30 \cdot \Delta I$;

4) похибки, обумовлені шумами і багатопроміневістю ГНСС- спостережень: для кодових спостережень GPS – $\sigma_{ш/мл}(t) = 0,4$ м, для фазових GPS та ГЛОНАСС спостережень – $\sigma_{ш/мл}(t) = 0,003$ м; для кодових спостережень ГЛОНАСС $\sigma_{ш/мл}(t) = 1$ м, в дану складову включена похибка, обумовлена частотними затримками в каналах;

5) в реалізації методу 1, при оцінці рівня фазових спостережень відносно кодових для оцінки точності отриманого значення $\sigma_{LC}(t)$ запропоновано використання алгоритму автокореляційного аналізу.

У підсумку, на кожен момент часу для кожного супутника розраховується сумарна дисперсія похибок. З набору розрахункових величин $\sigma_n^2(t)$ при вирішенні навігаційної задачі формується діагональна кореляційна (та потім – вагова) матриця похибок вимірюваних параметрів. Потім формується матриця похідних параметрів, що вимірюються за параметрами, що оцінюються (матриця плану) та з використанням відомих співвідношень визначається кореляційна матриця похибок параметрів, що оцінюються.

У **третьому розділі** представлено методику апостеріорної оцінки точності запропонованих методів обробки ГНСС-спостережень та позиціонування з використанням диференціальної корегувальної інформації.

Оцінка фактичної точності координатних визначень проводиться для двох режимів роботи користувальницького ГНСС-устаткування: для нерухомого приймача – статичний режим; для мобільного приймача – кінематичний режим.

Тестування і дослідження розроблених алгоритмів обробки вимірювань виконувалися за наступною методикою:

1. ГНСС-спостереження піддаються попередній обробці з використанням програмно-алгоритмічного забезпечення (ПАЗ) “ОСТАВА_PPA” (спільна розробка фахівців ХНУРЕ та ГАО НАН України), яке виконує оцінку якості використовуваних кодових і фазових спостережень, усунення циклічних фазових стрибків, редагування вимірювальної інформації і т.ін.

2. Виконується обробка спостережень і визначаються високоточні еталонні оцінки координат кінематичних об’єктів і станцій з використанням апробованого

ліцензійного програмного забезпечення “GrafNav/GrafNet” (NovAtel Inc./Waypoint, Канада).

3. Для кожного сеансу спостережень роверного (рухомого) приймача і референсних станцій виконується їх повна обробка з використанням експериментального ПАЗ, що реалізує класичний метод обробки (“Hatch” – фільтр) та розроблені методи і алгоритми обробки та позиціонування.

Обробка ГНСС-спостережень має виконуватись з використанням:

- “Hatch” – фільтру з постійною часу 100 с;
- обробки ГНСС-спостережень методом підбору рівня при кодово-фазовому згладжуванні (умовно позначимо його методом 1);
- обробки спостережень методом отримання комбінованого диференціального кодово-фазового рішення (умовно позначимо його методом 2).

Обробка спостережень проводиться для інтервалів часу 300, 900, 1800 с.

Для компенсації іоносферної складової похибок використовуються глобальні іоносферні моделі Klobuchar і GIM IONEX. Для компенсації тропосферного складової похибок використовується модель MOPS.

4. Виконується обчислення відхилень (нев’язань) отриманих рішень (результатів позиціонування) від еталонного рішення з розрахунком статистичних характеристик невід’язань.

Критеріями якості проведених розробок і досліджень – точності координатних визначень з використанням розроблених методів, алгоритмів і експериментального ПАЗ обробки ГНСС-спостережень, як впливає з викладеного, є:

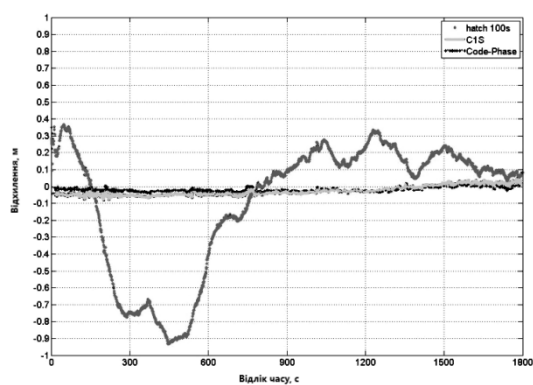
- статистичні характеристики відхилень отриманих рішень від еталонних і їх відповідність світовим аналогам;
- статистичні характеристики залишків – різниць між вимірюваними параметрами і обчисленими за оцінками рішення навігаційної задачі.

У **четвертому розділі** представлені результати експериментальних досліджень з використанням кінематичних ГНСС-спостережень та висновки порівняльного аналізу отриманих результатів з використання розроблених методів точного позиціонування.

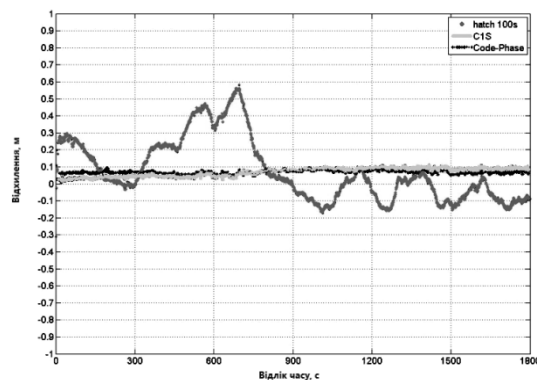
Для обробки кінематичних спостережень використано результати експериментальних даних (приймача NovAtel DL-V3), встановленого на борту гелікоптера в процесі геодезичної аерофотозйомки. Обробка даних була виконана на ділянці вимірювань зі зміною віддалення гелікоптера (Vert) від базової станції від 35 м до 22 км. Дослідження проводились в рамках виконання держбюджетних НДР.

Приклад результатів обробки кінематичних вимірювань. Для обробки вимірювань було застосовано класичний метод (“Hatch”-фільтр), а також розроблені методи 1) обробки ГНСС-спостережень методом підбору рівня при кодово-фазовому згладжуванні і 2) обробки спостережень методом отримання комбінованого диференціального кодово-фазового рішення.

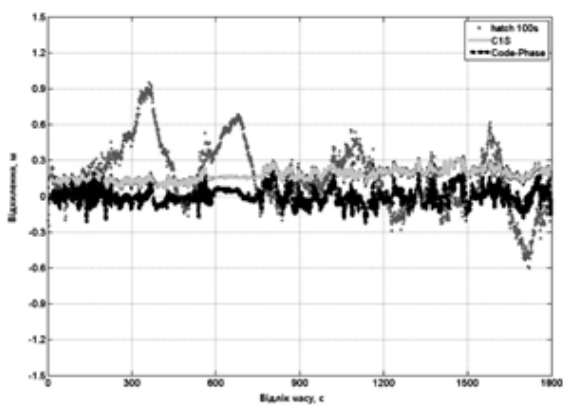
На рис. 4 наведені відхилення координат ровера Vert від еталонних (отримані по двочастотним фазовим ГНСС-спостереженням з використанням апробованого ліцензійного програмного забезпечення “GrafNav/GrafNet”, NovAtel Inc./Waypoint, Канада).



а



б



в

Рисунок 4. Відхилення отриманих рішень для ровера Vert по широті (а), довготі (б) і по висоті (в) при обробці одночастотних ГНСС-вимірювань (“Hatch”-фільтр, “CIS” – метод 1, “Code-Phase” – метод 2)

спостережень ГЛОНАСС (або GPS+ГЛОНАСС), тому що дозволяє врахувати особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів; цей метод показав дещо гірші результати у порівнянні з методом підбору рівня при кодово-фазовому згладжуванні на інтервалах часу менше $\sim 15\text{--}30$ хв. та на базових віддаленнях більше ~ 50 км; при інтервалах спостережень $\sim 30\text{--}60$ хв. і більше результати обробки спостережень згаданими методами практично не відрізняються;

– результати позиціонування з використанням спільних спостережень GPS та ГЛОНАСС показали, що вже на коротких проміжках часу ($\sim 5\text{--}15$ хв.) досягається точність (СКП) позиціонування $\sim 10\text{--}15$ см і вище, а на інтервалах 30 хв. і вище точність позиціонування становить $\sim 7\text{--}12$ см по всіх координатах;

Результати досліджень обробки спостережень із застосуванням 3-го методу сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень (див. розділ 2) представлено на отриманих даних під час проведення експерименту на аеродромі Бородянка (Київська обл.). В результаті експерименту були отримані вимірювання з борта безпілотного літального апарату (БПЛА). На час проведення експерименту на аеродромі була встановлена наземна референсна

Обробка кінематичних ГНСС-спостережень з використанням запропонованих алгоритмів показала наступне:

– розроблені методи (1, 2) обробки спостережень дозволяють отримати дециметрову точність кінематичного позиціонування навіть на коротких інтервалах спостережень (від 5 хвилин); використання запропонованих методів дозволяє отримати точність (середньоквадратичні похибки – СКП) кінематичних координатних визначень $\sim 10\text{--}15$ см по плановим координатам і $\sim 10\text{--}20$ см по висоті;

– метод (2) отримання комбінованого кодово-фазового (float) рішення найбільш підходить для обробки

станція (РС) PILB (Бородянка), базова відстань до станції GLSV (Голосієво ~ 52,5 км). Визначення координат РС PILB виконувалося щодо станції GLSV двочастотним однобазовим фазовим методом.

На рис. 5, 6 наведені графічні результати отриманого рішення, а саме траєкторія руху БПЛА при проведенні експерименту та зміна висоти БПЛА при проведенні експерименту.

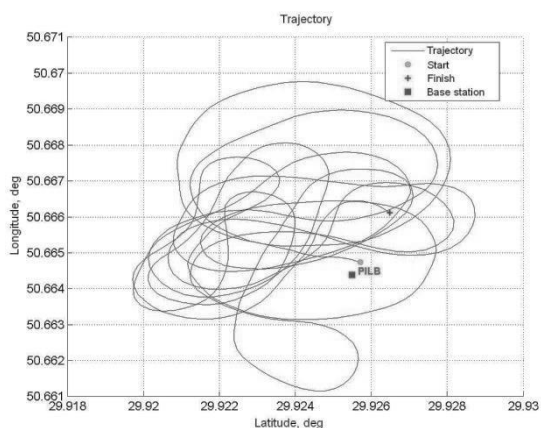


Рисунок 5. Траєкторія руху БПЛА

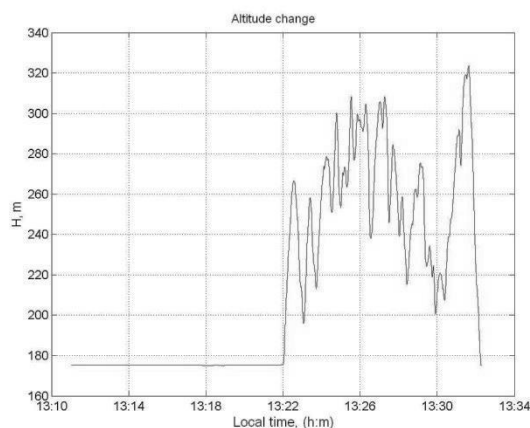
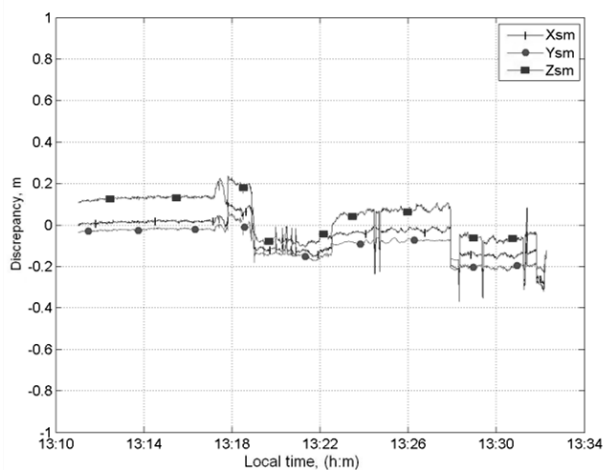
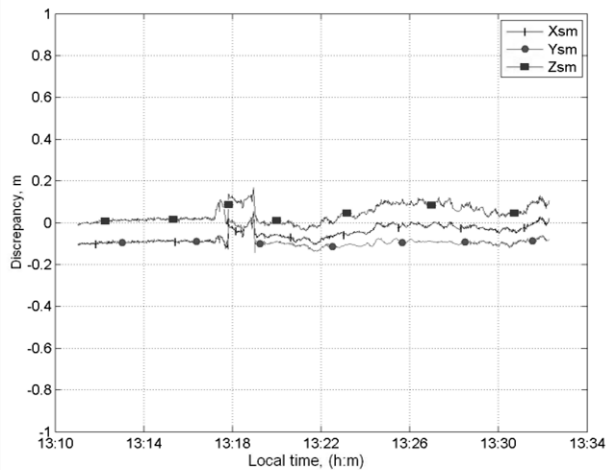


Рисунок 6. Зміна висоти БПЛА

На рис. 7 представлені відхилення (від еталонного двочастотного рішення) диференціальних (щодо РС PILB) кінематичних рішень по методу 1 і по методу 3.



а



б

Рисунок 7. Відхилення кінематичних диференціальних рішень, отриманих з використанням *методу 1* (а) і *методу 3* (б), від еталонних оцінок за координатами XYZ щодо РС PILB

Похибки DGPS рішень (з вірогідністю $p = 95\%$) щодо станцій “PILB” (базове відстань до 1 км) і “GLSV” (базове відстань ~ 52,5 км) практично однакові і складала ~25–30 см за плановими складовими координат і ~1 м по висоті.

Похибки при рішенні запропонованим методом 1 збільшуються зі збільшенням базової відстані (в основному висотна складова). Щодо станції “PILB” похибки рішення ($p = 95\%$) складала ~10–15 см для планових координат і ~25 см для висоти. Щодо станції “GLSV” похибки рішення ($p = 95\%$) складала ~10 см для планових координат і ~56 см для висоти.

Похибки рішення методом 3 ($p = 95\%$) щодо станції “PILB” склали ~ 10 см для всіх трьох координат. Щодо станції «GLSV» похибки рішення ($p = 95\%$) склали ~ 5 см для планових координат і ~ 20 см для висоти.

Метод 3 дозволяє практично повністю усунути варіаційні складові похибки рішення, і стрибки координат, що викликані змінною робочого сузір'я супутників (різка зміна геометричного фактору GDOP), до якого досить відчутно згладжене рішення. В основному, точність позиціонування, при використанні методу 3 обробки спостережень, залежить від точності визначення середніх значень координат, отриманих за згладженим рішенням по методу 1. Використання методу 3 дозволяє в середньому у ~ 2 рази зменшити похибки позиціонування по відношенню до згладженого рішення і у $\sim 3-4$ рази по відношенню до DGPS рішення.

Експериментальні дослідження проводились в натурних умовах з використанням розробленого експериментального зразка (рис. 8) та експериментальних моделей БПЛА і квадрокоптера.

Апробацію методики було проведено в рамках виконання міжнародного проєкту за програмою Горизонт 2020 Грантова угода № 641517 UKRAINE «Відтворення обізнаності та інновацій в Україні на основі ЄГНСС» (“UKraine Replication, Awareness and INnovation based on EGNSS” для визначення характеристик прийому сигналів ГНСС на території аеропорту Київ «Жуляни» (вибір точок розміщення RIMS-станції) На рис. 9 показано пункти, відповідно до яких застосовувалась методика досліджень.



Рисунок 8. Фото експериментального зразка



Рисунок 9. Аеропорт Жуляни

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена науково-технічна задача розробка методів і алгоритмів прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за допомогою обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень без ускладненої процедури розв'язання фазової неоднозначності. Розроблені методи і алгоритми, на відміну від відомих, дозволяють усунути вплив «wind-up»-ефекту (накручування фази при еволюціях об'єкту) на точність згладжування/фільтрації кодових ГНСС-спостережень з використанням фазових, суттєво зменшити варіаційні складові похибок координатних рішень та підвищити точність до дециметрового рівня диференціального позиціонування об'єктів, що рухаються.

Результати обробки кінематичних спостережень з використанням запропонованих методів і алгоритмів і їх порівняльний аналіз із зарубіжними аналогами показали наступне:

1) обробка ГНСС-спостережень з використанням запропонованих методів дозволяє отримати точність (середньоквадратичні похибки – СКП) кінематичних координатних визначень $\sim 10\text{--}15$ см по плановим координатам і $\sim 10\text{--}20$ см по висоті;

2) метод отримання комбінованого кодово-фазового (float) рішення найбільш підходить для обробки спостережень ГЛОНАСС (або GPS+ГЛОНАСС), тому що дозволяє врахувати особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів; цей метод показав дещо гірші результати у порівнянні з методом підбору рівня при кодово-фазовому згладжуванні на інтервалах часу менше $\sim 15\text{--}30$ хв. та на базових віддаленнях більше ~ 50 км; при інтервалах спостережень $\sim 30\text{--}60$ хв. і більше результати обробки спостережень згаданими методами практично не відрізняються;

3) результати позиціонування з використанням спільних спостережень GPS та ГЛОНАСС показали, що вже на коротких проміжках часу ($\sim 5\text{--}15$ хв.) досягається точність (СКП) позиціонування $\sim 10\text{--}15$ см і вище, а на інтервалах 30 хв. і вище точність позиціонування становить $\sim 7\text{--}12$ см по всіх координатах;

4) «згладжені» координатні рішення в значній мірі звужують область пошуку дискретних цілочисельних оцінок (розв'язання) фазових неоднозначностей, тобто є важливою і необхідною складовою обробки для отримання надійного диференціального позиціонування найвищої точності;

5) вперше розроблений новий метод сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень дозволяє практично повністю усунути варіаційні складові похибки рішення і стрибки координат, що викликані змінною робочого сузір'я супутників; використання даного методу дозволяє в середньому у ~ 2 рази зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженого» рішення і в $\sim 3\text{--}4$ рази по відношенню до стандартних DGPS рішень.

Запропоновані методи точного позиціонування в цілому дозволяють отримати координатні рішення з більшою точністю у порівнянні з рішеннями провідних світових виробників. Це дозволяє говорити про те, що подальший розвиток запропонованих методів і алгоритмів та їх практичне впровадження дозволить створити конкурентоспроможні додатки для вирішення різноманітних задач прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ***Список публікацій у фахових наукових виданнях України***

1. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Трикоз В. П., Вишнякова Є. В., Газнюк М. О. Впровадження супутникових навігаційних технологій та зв'язку в систему моніторингу та управління рухомими об'єктами. Научно-технический журнал. Технологические системы. № 3, К. : 2006. – С. 45–47. *ISSN: друковане – 2074-0603.*
2. Скорік Є. Т., Кондратюк В. М. Супутникові технології навігації та зв'язку для автотранспортної галузі, «Наука та інновації» 2007, 3 (1): 67–83.
3. Скорік Є. Т., Пасічник Л. П., Кондратюк В. М. Супутникові технології радіонавігації та радіозв'язку на залізничному транспорті «Наука та інновації» 2007, 3 (1): 90–105.
4. Жаліло О., Желанов О., Шелковенков Д., Шокало В., Кондратюк В., Литвин М, Флерко С., Черевко В. Результати експериментальних досліджень реалізації DGPS/RTK режиму супутникового позиціонування з використанням NTRIP-технології. Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва», 2008. – Вип. 1(15). Львів. – С. 125–132. *SSN: 1819-1339.*
5. Яцків Я. С., Харченко В. П., Шокало В. М., Терещук О. І., Жаліло О. О., Кондратюк В. М., Куценко О. В., Лук'янов О. М., Литвин М. О., Шелковенков Д. О., Желанов О. О., Грінченко О. В., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В. Практика створення в Україні інформаційно-вимірювальної GNSS-системи та мережної VRS-технології забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок. Наука та інновації, Т. 5, № 2. – С. 5–22, Видавничий дім «Академперіодика», Київ, 2009. *ISSN: друковане – 2409–9066, 1815–2066 електронне – 2413–4996, 2413–497X.*
6. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Застосування диференціальних методів глобальних навігаційних супутникових систем у визначеннях поточних координат рухомих об'єктів. Вісник Національного авіаційного університету. – К., 2010. – № 2(43). – С. 46–52. *ISSN: друковане – 1813–1166 електронне – 2306–1472.*
7. Кондратюк В. М. Усовершенствованный метод сглаживания дифференциальных кинематических кодовых ГНСС- наблюдений. Системи управління, навігації та зв'язку – 2011. – № 3(19). – С. 8– 13. *ISSN: друковане – 2073-7394.*
8. Кондратюк В. М. Сравнительный анализ методов и алгоритмов кодово-фазового ГНСС-позиционирования. Вісник інженерної академії – 2012. – № 1. – С. 57–61.
9. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М. Інформаційне забезпечення автоматизованого керування літальним апаратом з використанням системи GNSS. Вісник Національного авіаційного університету Київ, 2013. – № 2 (55). – С. 40–43.
10. Кондратюк В. М. Желанов А. А., Дицкий И. В., Бессонов Е. А. Модифицированный алгоритм сглаживания/фильтрации дифференциальных гнсс наблюдений в режиме кинематического позиционирования. Вестник НАУ. – 2014. – № 4. – С. 56–64.
11. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M. RPAS ADS-B Trajectory Control Data Transmission via Satellite. Proceedings of the NAU, 2017, v. 3, pp. 26–32.

12. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M., Ermakov A. U., Chernyuk E. O. Influence of Transmitter Nonlinearities on Data Transmission from Remotely Piloted Air System. Proceedings of the NAU, 2017, v. 3, pp. 33–41.

13. Kondratiuk V., Konin V., Kutsenko O., Ilytska S. Testing Static and Kinematic Modes of Precise Point Positioning Service in Ukraine. Radioelectronics and Communications Systems, 2019, 62(10). – С. 530–540. (**Scopus**).

14. Kondratiuk V. M., Konin V. V., Ilytska S. I., Kutsenko O. V. Zhuliany Airport as a Possible Candidate for Ranging and Integrity Monitoring Station placement in Kyiv region ISSN 1990-5548 Electronics and Control Systems 2019. N 4 (62): 16–23. ISSN: друковане – 1990–5548.

Список публікацій у міжнародних фахових журналах за кордоном

15. Жалило А. А., Кондратюк В. М., Куценко А. В., Конин В. В., Сушко В. Г., Харченко В. П., Шелковенков Д. А., Шокало В. М. GPS-навигация и геодезическая съемка – результаты экспериментальной верификации технологии OMNISTAR. Научный Вестник ГосНИИ «Аэронавигация», № 7. – М. : 2007. – С. 27–35.

16. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Ільницька С. І. Исследование работоспособности дифференциального сервиса на территории Украины. Научный вестник. Секция технических наук – г. Хелм, Польша, № 1/2009. – С. 51–61.

17. Kharchenko V., Kondratiuk V. Aerospace Navigation Technologies in Logistic. "Logistics and Transport" Journal, ISSN: 1734-2015. No 2 (2015). – P. 5–10.

18. Kharchenko V., Grekhov A., Kondratiuk V., Nagorna K. ADS-B Satellite Communication Channel Based on IEEE 802.16 Standard. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2017. ISSN 2255-9876 (online) ISSN 2255-968X (print) December 2017, vol. 5, pp. 18–27.

19. Kondratiuk V., Kovalevskiy E., Ilytska S. Determination of Space Debris Coordinates by Means of a Space Service Vehicle. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2017. Mar 2017, vol. 3, pp. 31–37.

20. Kondratiuk V., Kovalevskiy E., Ilytska S. Integrated Positioning System With Restricted Access to Navigation Satellite Signals. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2017. ISSN 2255-9876 (online) ISSN 2255-968X (print) December 2017, vol. 5, pp. 60–66.

21. Grekhov A., Kondratiuk V., Ilytska S. RPAS Satellite Communication Channel Based on IEEE 802.11 b Standard. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2019, 7 (1), 32–40.

22. Grekhov A., Kondratiuk V., Ilytska S. RPAS communication channels based on WCDMA 3GPP standard. Aviation, 2020, 24(1). – С. 42–49. (**Scopus**).

23. Ilytska S. I., Li F., Grekhov A., Kondratiuk V. Loss Estimation for Network-Connected UAV/RPAS Communications. IEEE Access, 2020, 8, стр. 137702–137710, 9149599. (**Scopus**).

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

24. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Способы и средства оценки тактико-технических характеристик широкозонных функциональных дополнений GPS (GNSS). Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.17–21.23.

25. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Методики експериментальної оцінки навігаційних характеристик широкозонних функціональних доповнень GPS(GNSS). Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.10–21.16.

26. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Зарубежный опыт создания и применения систем FIS (Fight Inspection Systems) для контроля характеристик и сертификации авионики и аэронавигационного обеспечения воздушных судов с использованием DGPS (DGNSS) подсистем. Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.1–21.9.

27. Жалило А. А., Кондратюк В. М. Спутниковый высокоточный дифференциальный VBS&HP-сервис компании FUGRO/OMNISTAR BV: технологии GPS-местопределения и их характеристики. Сборник трудов 2-го Международного радиоэлектронный Форума (МРФ-2005) «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Международная конференция по системам локации и навигации (МКЛСН-2005), г. Харьков, ХНУРЭ, 19–23 сентября 2005 г., – Т. 2. – С. 516–519.

28. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Трикоз В. П., Вишнякова Є. В., Газнюк М. О. Впровадження супутникових навігаційних технологій та зв'язку у систему моніторингу та управління рухомими об'єктами. 5-ий міжнародний авіакосмічний салон «Авіасвіт–XXI», 2006 р.

29. Харченко В. П., Кондратюк В. М. Аспекты создания и практической реализации интегрированных систем GIS, GPS и беспроводной связи. Материалы II Международной конференции GIS и GPS в практике. – г. Хелм, Польша, 19–20 апреля 2007 г. – С. 55–61.

30. Кондратюк В. М., Мелкумян В. Г. Оцінка якості навігаційного забезпечення супутникових радіонавігаційних систем з використанням диференціальної коригувальної інформації. Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2009». – Т. 1. – К. : НАУ, 2009. – С. 7.45–7.48.

31. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Тунік А. А., Ільницька С. І., Куценко О. В., Вишнякова Є. В. Розробка інтегрованої навігаційної системи для безпілотного літального апарата. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2011», Київ, 19–21 квіт. 2011 р. – К., 2011. – Т. 2. – С. 8.14–8.17.

32. Кондратюк В. М., Желанов А. А. Высокоточное позиционирование движущихся объектов с использованием усовершенствованного метода сглаживания кодовых дифференциальных ГНСС-наблюдений. Сборник научных трудов 4-го международного радиоэлектронного форума (МРФ) «Прикладная электроника. Состояние и перспективы развития». 2011. – Т. 1, ч. 2. – С. 79–82.

33. Kharchenko V., Kondratyuk V., Kutsenko O. Experimental validation of small integrated navigation system. Proceedings of the Fifth World Congress “Aviation in the XXI-st century”: “Safety in Aviation and Space Technologies”. Vol. 2. Kyiv 2012. – P. 3.2.30–3.2.35.

34. Харченко В. П., Кондратюк В. М. Навігаційні технології в автотранспортній галузі. Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2013». – Т. 2. – К. : НАУ, 2013. – С. 7.42–7.46.

35. Kharchenko, V., Kondratiuk, V., Ilnytska, S., Kutsenko, O., Larin, V. Urgent problems of UAV navigation system development and practical implementation. 2013 IEEE 2nd International Conference on Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments, APUAVD 2013 – Proceedings, 2013. – С. 157–160, 6705313. **(Scopus)**.

36. Kharchenko V. P., Kondratiuk V. M., Ilnytska S. I., Kutsenko O. V. Recommendations to UAV navigation system test validation and some practical results. 2014 IEEE 3rd International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC 2014 – Proceedings, 2014. – С. 31–34, 6979723. **(Scopus)**.

37. Kharchenko V., Kondratiuk V., Kutsenko O., Vyshnyakova E., Ismael A. Some practical results of integrated navigation system flight testing. Proceedings of the Sixth World Congress “Aviation in the XXI-st century”: “Safety in Aviation and Space Technologies”. September 23–25, 2014. Vol. 2. Kyiv 2014. – P. 3.2.30–3.3.1.

38. Kharchenko V., Konin V., Kondratiuk V., Ilnytska S., Kutsenko O., Vyshnyakova E., Shmelyov T., Shyshkov F. Acceleration of GNSS applications development and facilitation of their broad acceptance in Ukraine through international cooperation and own experience Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції «ABIA–2015». – К. : НАУ, 2015. – С. 8.89–8.101.

39. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M., Nagorna K. N. Nonlinearities Impact on RPAS Data Transmission. 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2017 – Proceedings, 2018, January, с. 188–191. **(Scopus)**.

40. Kutsenko O. V., Ilnytska S. I., Kondratiuk V. M., Konin V. V. Unmanned Aerial Vehicle Position Determination in GNSS Landing System. 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2017 – Proceedings, 2018, January, с. 79–83 **(Scopus)**.

41. Ilnytska S. I., Kondratiuk V. M., Vyshnyakova Ye. V., Tunik A. A. Experimental Investigation of Multi-GNSS in Static Mode. 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC 2018 – Proceedings, 2018, с. 132–134, 8576271. **(Scopus)**.

42. Ilnytska S., Kondratiuk V., Kutsenko O., Konin V. Potential Possibilities of Highly Accurate Satellite Navigation Use for Landing Operations of Unmanned Aerial Systems. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2019 – Proceedings, 2019, с. 174–177, 8943873. **(Scopus)**.

43. Grekhov A., Kondratiuk V., Ilnytska S., Vyshnyakova E., Kondratiuk M., Trykoz V. Satellite Traffic Simulation for RPAS Swarms. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2019 – Proceedings, 2019, с. 265–269, 8943881. **(Scopus)**.

Патенти

44. Баранов Г. Л., Беляєвський Л. С., Дмитриченко М. Ф., Дмитрієв М. М., Кошовий А. А., Кондратиук В. М., Левковець П. Р., Топольськов Є. О. Система диспетчерського керування рухомими об'єктами з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації. Патент на винахід № 75709 Бюл. № 5, 2006 р.

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

46. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Ільницька С. І. Апаратно-програмний комплекс моніторингу та управління рухомими об'єктами : пат. № 50277 Україна, МПК G01S 5/14; опубл. 25.05.10, Бюл. № 10.

47. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Харченко В. П. Спосіб придушення широкосмугових завад в аеронавігації: пат. № 75978 Україна, МПК H01Q 21/06; опубл. 25.12.2012, Бюл № 24.

48. Харченко В. П. Кондратюк В. М. Вишнякова Є. В. Трикоз В. П., Куценко О. В., Ільницька С. І., Кондратюк М. В. Васильєв І. В. Савченко О. В. Система високоточного визначення координат на основі супутникових радіонавігаційних систем: пат. Україна: МПК (2006.01) G01S 5/14. № 78185; заявл. 10.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.

49. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Харченко В. П. Комбінований спосіб пеленгації джерела випромінювання радіосигналу: пат. № 129990 Україна; опубл. 26.11.2018, бюл. № 22.

50. Харченко В. П., Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Кондратюк М. В. Комбінований спосіб визначення координат радіовипромінюючих об'єктів: пат. № 139423 Україна; опубл. 10.01.2020, бюл. № 1.

Звіти з НДР

51. «Розроблення та впровадження апаратно-програмного комплексу моніторингу та управління спеціальними рухомими об'єктами» (№ держреєстрації 0106U011430).

52. «Теоретичні засади високоточних визначень координат в реальному часі на основі супутникових радіонавігаційних систем» (№ держреєстрації 0108U004005).

53. «Дослідження шляхів сертифікації системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України (СКНЗУ) щодо якості надання послуг та забезпечення безпеки їх використання споживачами сигналів глобальних навігаційних супутникових систем», шифр «Безпека» (№ держреєстрації 0107U006891).

54. «Навігація» Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем». («Навігація-Сертифікат». Сертифікація системи). шифр «Навігація-Сертифікат» (№ держреєстрації 0108U008542).

55. «Розробка та дослідження апаратно-програмних засобів споживача для обміну даними з центром обробки спостережень» (№ держреєстрації 0107U000153).

56. «Розроблення апаратно-програмних засобів інтегрованої інерційно-супутникової навігаційної системи для безпілотних літальних апаратів (БПЛА)» (№ держреєстрації 0111U000173).

57. «Мультизадачний комплекс автоматичного управління на базі інтегрованої інерційно-супутникової системи для БПЛА» (№ держреєстрації 0115U002467).

58. Горизонт 2020. Грантова угода № 641517 UKRAINE «Відтворення обізнаності та інновацій в Україні на основі ЄГНСС» ("UKraine Replication, Awareness and INnovation based on EGNSS").

59. «Система моніторингу доступності радіонавігаційного поля при заходах на посадку літальних апаратів за сигналами GNSS» (№ держреєстрації 0117U002371).

60. «Розроблення інтегрованої системи наведення, навігації та управління польотом дрона» (№ держреєстрації 0119U100629).

61. «Структурно-параметричний синтез розроблення технології побудови геліоенергетичних стратосферних платформ з адаптивно-нейронним керуванням» (№ держреєстрації 0120U101989).

АНОТАЦІЯ

Кондратюк В. М. Методи і алгоритми прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

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

Дисертаційна робота присвячена застосуванню глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) для вирішення актуальних наукових завдань: прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за допомогою обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень без ускладненої процедури розв'язання фазової неоднозначності.

В дисертації вирішено науково-технічну задачу розробки методів і алгоритмів прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за допомогою обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень без ускладненої процедури розв'язання фазової неоднозначності.

Удосконалено метод обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу згладжування/фільтрації кодових спостережень з використанням безперервних фазових спостережень в режимі кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих, враховує вплив накручування фази несучої ("wind-up"-ефект), який проявляється при зміні напрямку руху, еволюціях, обертаннях об'єктів. Даний метод забезпечує підвищення точності оцінки координат рухомих об'єктів до дециметрового рівня.

В процесі наукових досліджень отримав розвиток метод комбінованого диференціального сумісного кодово-фазового рішення навігаційної задачі з одночасною оцінкою початкових фазових неоднозначностей (як континуальних змінних) та без безпосереднього здійснення операцій згладжування/фільтрації. Метод є найбільш ефективним для спільної обробки спостережень GPS+ГЛОНАСС так як враховує особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів ГЛОНАС, що забезпечує дециметровий рівень точності.

Вперше розроблено метод сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу точного кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих методів, дозволяє усунути варіаційні складові похибки рішення, суттєво зменшення вплив стрибків оцінок кодово-фазових рішень, обумовлених зміною робочого сузір'я супутників ГНСС, та, в середньому, у 2 рази зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженого» рішення і в 3–4 рази по відношенню до DGPS рішень.

Розроблена методика оцінки фактичної точності координатних визначень з використанням диференціальної коригувальної інформації, що дозволяє провести верифікацію ГНСС-устаткування користувача для двох режимів роботи: для нерухомого приймача – статичний режим та для мобільного приймача – кінематичний режим.

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи, диференціальна навігація, точність, надійність, спостереження, похибка.

ABSTRACT

Kondratiuk V. M. Methods and algorithms of precision position determination of moving objects using signals of global navigation satellite systems. – Qualification scientific work as a manuscript.

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

The dissertation is devoted to the application of global navigation satellite systems (GNSS) to solve relevant scientific problems: precision position determination of moving objects by processing the carrier-phase and code GNSS observations without a complicated procedure of the carrier-phase ambiguity resolution.

The dissertation solves the scientific and technical problem of developing methods and algorithms for precision position determination of moving objects by processing the carrier-phase and code GNSS observations without a complicated procedure of the carrier-phase ambiguity resolution.

The method for processing carrier-phase and code GNSS observations has been improved that solves the task of smoothing/filtering of code observations using continuous carrier-phase observations in the mode of kinematic positioning, which in a contrast to other known methods takes into account the influence of carrier phase contribution ("wind-up"-effect), which is manifested during change of motion direction, evolution and rotations of moving objects. This method ensures accuracy of moving objects coordinates determination increase up to decimeter level.

In the process of scientific research, the method of combined differential compatible code and carrier-phase solution of the navigation problem was developed with simultaneous estimation of initial carrier-phase ambiguities (as continuous variables) and without direct smoothing / filtering operations. The method is the most effective for the joint processing of GPS + GLONASS observations as it takes into account the peculiarities of the frequency distribution of the spectrums of the emitted GLONASS signals, which provides a decimeter level of accuracy.

For the first time, a method of joint processing the carrier-phase and code GNSS observations was developed, which solves the problem of accurate kinematic positioning, which, unlike known methods, allows eliminating variational components of solution error, significantly reducing the impact of estimates of code-phase solutions due to changes in the working constellation of GNSS satellites, and, on average, 2 times reducing the positioning errors with regard to the "smoothed" solution and 3–4 times with regard to DGPS solutions.

A method for estimating the actual accuracy of coordinate determinations using differential correction information has been developed, which allows to make verification of the user's GNSS equipment for two operating modes: for a fixed receiver – static mode and for a mobile receiver – kinematic mode.

Keywords: global navigation satellite systems, differential navigation, accuracy, reliability, observation, error.

Підп. до друку 08.04.2021. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,39. Обл.-вид. арк. 1,5.
Тираж 100 пр. Замовлення № 61-1.

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