

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

ЯКОВЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ІВАНОВИЧ



УДК 621.396.98

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ ВИСОКОТОЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ
ПАРАМЕТРІВ РУХУ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ
ПО БОРТОВИМ СПОСТЕРЕЖЕННЯМ СИГНАЛІВ ГЛОБАЛЬНИХ
НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ**

05.12.17 – радіотехнічні і телевізійні системи

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків – 2023

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Жаліло Олексій Олександрович,
Харківський національний університет радіоелектроніки, провідний науковий співробітник Науково-дослідного центру інтегрованих інформаційних радіоелектронних систем та технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Жила Семен Сергійович,
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», завідувач кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем

кандидат технічних наук
Погурельський Олексій Сергійович,
Національний авіаційний університет, доцент кафедри аеронавігаційних систем

Захист відбудеться «5» травня 2023 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

Автореферат розісланий « ___ » _____ 2023 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Д. В. Грещук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Обладнання низькоорбітальних космічних апаратів (НКА) приймачами сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), зокрема системи GPS, відкриває унікальні можливості наукових досліджень в таких областях, як геодезія, геодинаміка, уточнення фігури геоїда, моніторинг космічної погоди, метеорологія та ін.

У ряді застосувань (дистанційне зондування Землі, дослідження гравітаційного поля, вивчення танення льодовиків і ін.) визначення поточних координат (позиціонування) НКА має виконуватися на дециметровому і навіть сантиметровому рівні точності. Так, при реалізації місії TOPEX-POSEIDON для виконання глобальних прецизійних зйомок фігури геоїда необхідно було забезпечити визначення траєкторії НКА з сантиметровою точністю. Сучасні SAR-технології (Synthetic Aperture Radar) і InSAR-технології (Interferometric SAR) також вимагають досягнення надзвичайно високої точності координатно-часових визначень низькоорбітальних КА. Традиційні області, в яких ефективно використовуються SAR/InSAR-технології: виявлення забруднень, топографічне і тематичне картографування, оцінка змін клімату та його впливу на навколишнє середовище, моніторинг нестабільних схилів, переміщення об'єктів, земної поверхні, просідання ґрунту при видобутку нафти, газу і т.д.

Задача визначення параметрів руху НКА є актуальною і для України. Зокрема, 13 січня 2022 р. запущено український супутник оптико-електронного спостереження Землі Січ-2-30. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2021-2025 роки передбачає виведення на орбіту ще семи українських супутників – шести апаратів високої просторової роздільної здатності (1 м) та одного – надвисокої роздільної здатності (0,5 м). Розробляється український науково-прикладний проект «Іоносат-Мікро», відповідно до якого передбачено запуск НКА для дослідження іоносфери.

Як правило, для визначення параметрів руху НКА використовуються бортові спостереження сигналів ГНСС, або як єдиного засобу вимірювань, або в поєднанні з іншими засобами (лазерними далекомірними системами, доплерівськими супутниковими системами). Досягнення зазначеного рівня точності визначення параметрів руху неможливо без використання фазових спостережень.

Класичним способом досягнення високої точності навігаційних визначень є використання диференціального методу, при якому спостереження рухомого («роверного») приймача споживача комбінуються з спостереженнями наземних референсних станцій. Однак реалізація диференціального методу для визначення параметрів траєкторій НКА пов'язана зі значними труднощами через істотно різні умови спостережень на борту НКА і на Землі, малі інтервали сумісної радіовидимості середньоорбітальних супутників ГНСС з борта НКА і референсних станцій, труднощі позиціонування НКА над океанами. Іншим методом точного визначення параметрів траєкторій НКА є використання тільки автономних ГНСС-спостережень на борту НКА без вимірювальної інформації референсних станцій. Такий альтернативний метод отримав назву методу точного позиціонування PPP (Precise Point Positioning), який базується на використанні, головним чином, фазових ГНСС-спостережень. Метод PPP в даний час широко використовується в наземних додатках.

При використанні фазових спостережень необхідно вирішити принципову задачу – розв'язати фазову неоднозначність. Розрізняють два методи розв'язання фазової неоднозначності (РФН) – метод з оцінкою дискретних/цілочисельних параметрів фазової неоднозначності як континуальних (float-метод) і метод визначення параметрів фазової неоднозначності саме як дискретних/цілочисельних величин (fixed-метод). Float-реалізація методу PPP в даний час є в арсеналі практично всіх провідних фірм-виробників програмного забезпечення і обладнання. Однак в останні роки спостерігається пік публікацій, пов'язаних з реалізацією fixed-методу реалізації PPP, який за певних умов забезпечує максимальну точність позиціонування при зменшенні інтервалу збіжності PPP-рішень. Це стало можливим у зв'язку з тим, що точність визначення ефемерид і даних годинників супутників ГНСС значно підвищилася, а також стали доступні інші продукти, такі як кодові і фазові затримки в апаратурі ГНСС, зміщення фазових центрів антен відносно центру мас, діаграми нерівномірності фазових характеристик антен та ін.). Саме знання цих даних є необхідною умовою реалізації цілочисельного fixed-методу PPP.

Що стосується застосування PPP для визначення параметрів руху НКА, то, зазвичай, обробка створюється під кожен космічну місію, універсальний метод обробки відсутній, і такими задачами займаються тільки великі наукові центри та космічні агентства, такі, як JPL, DLR, австрійський університет GRAZ, французьке космічне агентство CNES. У теперішній час зусилля вчених зосереджені на підвищенні надійності РФН, підвищенні точності і скороченні часу збіжності PPP-рішень.

На початковому етапі досліджень при визначенні параметрів руху НКА автором було отримано стійке і надійне float-рішення у режимі PPP. Далі була здійснена спроба виконати дискретне/цілочисельне РФН бортових спостережень НКА з використанням поправок на інструментальні затримки в апаратурі супутників ГНСС (GPS), які на дати доступних для обробки та аналізу бортових спостережень НКА почали формуватися та надаватися споживачам французьким космічним агентством CNES. Однак на початковому етапі досліджень стійкого дискретного РФН бортових спостережень НКА досягти не вдалося через, як показав подальший аналіз, недостатню точність поправок на задані дати. Тому виникла нагальна необхідність реалізації і наземного (статичного та кінематичного) режиму PPP та з'ясування причини невдалих спроб досягнення дискретного РФН безіоносферних (Iono-Free) двохчастотних бортових спостережень НКА.

В ході реалізації наземного режиму PPP було розроблено метод та алгоритми формування власних поправок для компенсації вкладу інструментальних затримок в апаратурі супутників GPS за спостереженнями наземної регіональної мережі перманентних референціальних станцій України. На відміну від поправок CNES запропоновані поправки також абсорбують залишкові похибки ефемерид та годинників супутників. З використанням цих власних поправок вдалося досягти стійкого надійного дискретного РФН фазових спостережень різницевої частоти (WideLane-комбінацій), безіоносферних (IonoFree) фазових спостережень і реалізувати fixed-метод PPP як для наземних/навколосемних споживачів, так і для низькоорбітальних космічних апаратів.

Таким чином, тема дисертаційної роботи, що спрямована на розвиток вітчизняних технологій у сфері високоточного визначення параметрів руху НКА

та навколоземних об'єктів, є актуальною й перспективною як з погляду розвитку теорії методів обробки ГНСС-спостережень, так і важливою з погляду їх практичної реалізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження пов'язані із проведенням планових науково-дослідних робіт ДП «ЗАО НДІРВ» (м. Харків), Головної астрономічної обсерваторії НАН України (м. Київ) та Харківського національного університету радіоелектроніки, в яких здобувач був виконавцем: «Розробка прецизійної апаратури просторово-часової прив'язки об'єктів за сигналами супутникових радіонавігаційних систем «ГЛОНАСС» та «NAVSTAR»» (№ ДР 0195U015604); «Розробка апаратури супутникової навігації космічних апаратів» (№ ДР 0195U023338); «Система космічного навігаційно-часового забезпечення України»; «Впровадження-КНЗ» (№ ДР 0108U000047Д); ««Навігація». Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем» (№ ДР 0108U008567); «Створення системи збору, обробки та аналізу наземних і бортових GPS/ГЛОНАСС спостережень для моніторингу, дослідження й моделювання повного електронного вмісту іоносфери у рамках міжнародного проекту «Іоносат-Мікро»» (№ ДР 0115U002688); «Створення технологій побудови багатофункціонального радіотехнічного комплексу для екологічного моніторингу» (№ ДР 0114U002697); «Дослідження повного електронного вмісту іоносфери при спільному використанні диференціального та автономного методів обробки спостережень в регіональних мережах перманентних ГНСС-станцій» (№ ДР 0116U004311С); «Розробка нових інформаційно-вимірювальних систем і технологій координатно-часового і метеорологічного забезпечення та зв'язку» (№ ДР 011U002541); «Удосконалення методів усунення інструментальних похибок іоносферних затримок ГНСС-спостережень з метою підвищення точності моделювання ПЕВ» (№ ДР 0117U00144С); «Розробка нової концепції та шляхів створення високоточної системи траєкторних вимірювань параметрів руху високодинамічних літальних апаратів» (№ ДР 0117U002530); «Створення високоточної багатопозиційної фазової системи «Вега-V» для визначення траєкторій навколоземних високодинамічних об'єктів (БФСТВ)» (№ ДР 0119U000673); «Науково-технічне обґрунтування можливостей GNSS-технології в режимі PPP (Precise Point Positioning) для автономного визначення положень навколоземних високодинамічних об'єктів в складі багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань» (№ ДР 0120U102223); «Науково-технічне обґрунтування можливостей GNSS-технології в режимі PPP (Precise Point Positioning) для автономного визначення положень навколоземних високодинамічних об'єктів в складі багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань» (№ ДР 0121U109921).

Мета і задачі досліджень. Мета дисертаційної роботи полягає в створенні, дослідженні і експериментальному тестуванні вдосконалених та нових методів, алгоритмів і процедур високоточного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів та позиціонування навколоземних об'єктів з сантиметровою/дециметровою точністю у автономному (недиференціальному) режимі PPP (Precise Point Positioning) по бортовим двохчастотним фазовим і кодовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

– розвиток методів, алгоритмів і процедур автономного (недиференціального) позиціонування НКА та навколоземних об'єктів сантиметрової/дециметрової точності, включаючи пошук та дослідження нових алгоритмів «плаваючого» (float) і дискретного/цілочисельного (fixed) розв'язання фазової неоднозначності бортових двохчастотних фазових ГНСС-спостережень в автономному (недиференціальному) режимі точного позиціонування PPP;

– розробка моделей похибок ГНСС-спостережень, методики і алгоритмів оцінки точності траєкторних визначень (позиціонування) для «плаваючого» (float) і дискретного/цілочисельного (fixed) фазових рішень.

– проведення натурних експериментів з використанням реальних бортових GPS-спостережень НКА для підтвердження ефективності теоретичних результатів дисертаційної роботи, апостеріорна оцінка точності визначення параметрів руху НКА PPP-методом.

Об'єкт дослідження – технології та процеси обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень в автономному (недиференціальному) режимі точного позиціонування PPP.

Предмет дослідження – методи і алгоритми реалізації float- і fixed-режимів PPP в задачах високоточного визначення параметрів руху НКА з використанням бортових двохчастотних ГНСС-спостережень з урахуванням особливостей реальної вимірювальної інформації, методи підвищення надійності РФН, зменшення інтервалів збіжності/ініціалізації і підвищення точності визначень параметрів руху НКА.

Методи досліджень: теорія супутникових радіонавігаційних систем, статистична теорія вимірювальних радіосистем, методи математичного аналізу, теорія матриць, методи математичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Отримали подальший розвиток методи та алгоритми реалізації високоточних автономних (недиференціальних) координатних PPP-рішень, включаючи розв'язання початкових неоднозначностей фазових ГНСС-спостережень шляхом отримання «плаваючого» (float) та/або дискретного/цілочисельного (fixed) рішень і їхніх модифікацій як для вимірювань на борту низькоорбітальних космічних апаратів, так і для приземних вимірювань.

Запропоновані нові та вдосконалені існуючі методи і алгоритми реалізації PPP-позиціонування, що дозволяють більш надійно виконувати розв'язання фазової неоднозначності спостережень на значно менших інтервалах збіжності/ініціалізації рішень та потім – виконувати позиціонування на сантиметровому рівні точності. Запропоновані методи та алгоритми, на відміну від відомих, мають ряд істотних особливостей і переваг.

По-перше, в даній роботі вперше запропоновано використовувати так звані «віртуальні» одинарні різниці недиференціальних ГНСС-спостережень з зручною репараметризацією оцінюваних параметрів, що дозволяє поєднати переваги обробки недиференціальних та різницевих спостережень, підвищити надійність реалізації РФН та точного PPP-позиціонування у порівнянні з відомими підходами, які зазвичай використовують або недиференціальні ГНСС-спостереження, або прямі їх одинарні різниці (між ГНСС-супутниками робочого сузір'я).

По-друге, вперше запропонована оригінальна реалізація дискретного/цілочисельного РФН недиференціальних фазових ГНСС-спостережень для

наземних та космічних умов вимірювань, яка, на відміну від відомого та найпоширенішого у світі LAMBDA-методу та інших методів РФН, за рахунок використання спеціальних процедур МНК-оцінювання, верифікації рішень, гнучкого перетворення систем рівнянь спостережень, а також простої репараметризації груп оцінюваних невідомих дозволяє більш надійно виконувати РФН.

По-третє, вперше запропоновані методи та алгоритми PPP-рішень, які в ході РФН в якості проміжного рішення використовують, на відміну від відомих підходів, не «безіоносферні» кодові псевдовідстані низької точності, а більш точне (у кілька разів) нове комбіноване кодово-фазове координатне рішення (на основі спільної обробки кодових спостережень першої частоти ГНСС і двохчастотних неоднозначних фазових «безгеометричних» ГНСС-спостережень), що також дає суттєве (на $\sim 20+30\%$) збільшення надійності РФН та зменшення інтервалу його досягнення (ініціалізації/збіжності PPP-рішення).

2. Розроблено новий більш ефективний алгоритм РФН спостережень різницевої частоти «Wide-Lane» (WL) з використанням лінійної комбінації спостережень Melbourne-Wübbena. Запропоновано новий підхід до формування порогових значень з метою більш надійної верифікації WL-рішень, який дозволяє надійно виконувати РФН за 8+10 хвилин.

3. Для досягнення надійного дискретного/цілочисельного РФН при статичному та кінематичному PPP-позиціонуванні приземних об'єктів та НКА запропонована нова реалізація метода і алгоритмів оцінювання інструментальних фазових затримок в апаратурі супутників ГНСС (GPS), які можуть формуватися по спостереженням не тільки глобальних, а й регіональних мереж ГНСС-станцій (зокрема, української мережі перманентних станцій). При цьому, на відміну від відомих підходів, оцінки інструментальних фазових затримок супутників ГНСС виконуються для різницевої частоти (довжина хвилі $\sim 86,2$ см) і частоти фазових «безіоносферних» комбінацій (довжина хвилі $\sim 10,7$ см) і не розщеплюються на окремі затримки спостережень частот-носіїв, внаслідок чого ці оцінки абсорбують остаточні похибки ефемерид і годинників супутників, що в свою чергу, підвищує надійність дискретного/цілочисельного РФН та досяжність сантиметрової точності PPP-рішень при прийнятному рівні їх ініціалізації/збіжності.

Практичне значення отриманих результатів

1. Виконано експериментальне тестування й проведено дослідження нових та удосконалених методів, алгоритмів і програмних модулів для вирішення завдань точного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів на прикладах НКА FORMOSAT-3/COSMIC (США, Тайвань) та GRACE (США, ФРН). При реалізації кінематичного методу (без використання моделей руху НКА) досягнута практично потенційна точність визначення їх параметрів траєкторій, яка відповідає найсучаснішим світовим досягненням і задовольняє найжорсткішим вимогам до точності визначення параметрів руху НКА для всіх існуючих та майбутніх космічних місій. Зокрема, експериментальні результати показали, що стійко досягається визначення координат НКА (PPP-рішення) з похибками, які не перевищують $\sim 10+20$ см ($P \approx 95\%$) з використанням «плаваючого» методу РФН та $\sim 3+5$ см ($P \approx 95\%$) з використанням дискретного методу РФН. Складові вектора швидкості НКА визначаються з похибками, які не перевищують $\sim 1+2$ мм/с ($P \approx 95\%$).

Для статичного режиму PPP-визначень приземних об'єктів похибки визначення координат на добовому інтервалі не перевищують ~ 8 мм ($P \approx 95\%$). При реалізації дискретного/цілочисельного РФН у статичному режимі позиціонування середній час ініціалізації становить $\sim 15+20$ хвилин, після чого похибки точкових оцінок координат не перевищують $\sim 2+5$ см. Для кінематичного режиму PPP-визначень похибки оцінок координат приземних об'єктів на інтервалі спостережень ~ 2 години не перевищують $\sim 3-5$ см по плановим координатам і $\sim 7-8$ см по висоті. Такі результати відповідають найкращим досягненням провідних наукових лабораторій світу.

2. Запропоновано й апробовано сукупність нових методів, алгоритмів та програмних модулів оцінки фазових інструментальних затримок в апаратурі супутників ГНСС на основі використання спостережень регіональних мереж ГНСС-станцій. З використанням отриманих поправок досягається РФН і отримання «безіоносферних» рішень сантиметрової точності не тільки для наземних об'єктів, а й для бортових вимірювань НКА.

3. Розроблений прототип програмного забезпечення обробки ГНСС-спостережень та позиціонування методом PPP може бути використаний для точного визначення параметрів руху НКА, включаючи супутники дистанційного зондування Землі, супутники радіолокаційної інтерферометрії SAR/InSAR, вітчизняні супутники типу «Січ» та супутники проекту «Іоносат».

Результати дисертаційної роботи впроваджені у ДП «ЗАО НДРВ» (м. Харків), Головної астрономічної обсерваторії НАН України (м. Київ) та Харківського національного університету радіоелектроніки.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно отримані основні результати дисертаційної роботи, які опубліковані в роботах [1, 2]. У роботах, виконаних у співавторстві, авторові належать наступні результати. У роботі [3] наведено результати моделювання для оцінки точності моніторингу координат фазових центрів антен контрольних станцій. У роботі [4] запропоновано алгоритм float-обробки фазових спостережень для відносних геодезичних визначень. У роботі [5] наведено результати розробки апаратури супутникової навігації космічних апаратів «Січ-1М» і Мікросупутник. У роботах [6-8] наведено результати визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів по сигналам ГНСС в режимі PPP. У роботі [9] запропоновано принцип побудови високоточної системи визначення траєкторій космічних апаратів і других високодинамічних об'єктів.

Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи обговорені на наступних міжнародних конференціях [10-30], матеріали яких були включені до дисертації: II European Symposium on GNSS'1998, 20th-23th October 1998, Toulouse – France; II та III науково-практична конференція «Застосування супутникових радіонавігаційних систем (GNSS) в Україні». Харків: ХАІ, 2002, 2003 рр.; Міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» МРФ-2008, МРФ-2009, МРФ-2017 – Харків; Всеукраїнська науково-практична конференція «Наукове забезпечення діяльності оперативного захисту України – Харків, 12 березня, 2015 р.; Міжнародний науковий семінар пам'яті Б.Л. Кащєєва до 96-річчя з дня народження – Харків, 15 березня 2016 р.; X Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія

та вимірювальна техніка», Харків, 5-7 жовтня 2016 р.; XVII, XIX, XX та XXI науково-технічна конференція «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, Чернігів, 2017, 2019, 2020, 2021 рр.; III науково-практична конференція «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» 12-13 вересня 2019 р., Київ, НЦУВКЗ; Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. VII та VIII науково-технічна конференція, Київ; Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи (МІВТС-2020). VII Міжнародна науково-технічна конференція, 18-19 лютого 2020 р., Харків.

Публікації. По тематиці дисертації всього опубліковано 34 наукових роботи, з яких 9 статей, які входять до переліку видань, дозволених МОН України для публікацій результатів досліджень з технічних наук (одна стаття індексована у міжнародних наукометричних базах SCOPUS, Index COPERNICUS та PИNЦ), 25 праць наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (154 найменування), трьох додатків. Загальній обсяг роботи – 249 стор. (з них основний текст – 155 стор., список використаних джерел – 19 стор., рисунки та таблиці на сторінку – 23 стор., додатки – 30 стор., 136 рисунків, 6 таблиць).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність, визначені мета і задачі досліджень, представлені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, коротко описана структура роботи, зміст розділів. Наведено дані про впровадження результатів, особистий внесок автора і публікації.

У першому розділі дисертаційної роботи розглянуто тенденції та шляхи розвитку методів високоточного визначення параметрів руху НКА з використанням сигналів ГНСС. Розглянуто призначення та сфери застосування НКА, проаналізовані сучасні вимоги до точності визначення параметрів руху (параметрів траєкторій) НКА. Проведено огляд відомих методів визначення параметрів руху НКА. Показано, що для забезпечення сучасних вимог щодо надійності та точності визначення параметрів руху НКА необхідно використовувати фазові ГНСС-спостереження та методи точного позиціонування. Описаний метод PPP, показані переваги та висвітлено проблемні питання його використання. Показані особливості використання методу PPP для траєкторних визначень низькоорбітальних космічних апаратів. Сформульовані задачі дослідження.

У другому розділі наведено опис запропонованих автором основних принципів обробки ГНСС-спостережень у режимі PPP. Наведені рівняння ГНСС-спостережень та дано аналіз основних джерел похибок. Розкриті методологічні основи обробки ГНСС-спостережень НКА методом PPP. Наведені перетворення системи рівнянь для реалізації float- та fixed- методів розв'язання фазової неоднозначності та координатних визначень (позиціонування) НКА та наземних/навколоземних об'єктів.

Для визначення параметрів руху НКА використовується безіоносферна фазова комбінація $\tilde{L}'_p(t_i)$ сумісно з комбінованим кодово-фазовим двохчастот-

ним рішенням $\hat{X}_z(t_k)$, одержаним з використанням кодових спостережень $\hat{S}'_z(t_k)$ першої частоти, в яких іоносферні затримки компенсуються шляхом формування та використання «безгеометричних» (GF – Geometry-Free) кодових та фазових двохчастотних комбінацій. При цьому кодова «зашумлена» комбінація суттєво уточнюється підбором рівня (операція «leveling») неоднозначної фазової «безгеометричної» комбінації до однозначної кодової «безгеометричної» комбінації. Для отримання фазового безіоносферного рішення використовуються не фізичні різниці спостережень, а так звані «віртуальні» різниці, що одержуються шляхом реконфігурації невідомих, які підлягають оцінюванню. Цей метод був адаптований для використання у режимі PPP. На відміну від відомих методів, наприклад, фільтра Калмана, в роботі використовується післясагансна реалізація методу найменших квадратів (МНК) з одночасним вирішенням усієї системи рівнянь спостережень на всьому інтервалі спостережень, коли апіорна інформація про динаміку процесів спостережень та їх похибок не використовується. Принциповою умовою, що дозволяє досягти дискретне/цілочисельне PPP-рішення, є наявність кодових та фазових інструментальних поправок. В якості кодових інструментальних поправок в даній роботі використовуються поправки, що формуються службою IGS (International GNSS Service). В якості фазових поправок використовуються власні інструментальні фазові поправки, сформовані за спостереженнями наземної регіональної мережі базових станцій України. Використання власних поправок дозволило досягти стійкого дискретного/цілочисельного РФН спостережень як навколотемних/наземних приймачів споживачів, так і бортових приймачів НКА. Після лінеаризації рівнянь ГНСС-спостережень шляхом розкладання в ряд Тейлора, репараметризації системи рівнянь і формування «віртуальних» різниць спостережень їх вихідну математичну модель для реалізації float-методу PPP для статичного і кінематичного режимів позиціонування можна представити у узагальненому векторно-матричному вигляді:

$$\hat{Q}(t_k) = A_z(t_k) \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \bar{V}_z(t_k) \cdot \eta(t_k) + \Phi_z(t_k) \cdot \bar{a} + H_z(t_k) \cdot \nabla \bar{C}_P + \delta \bar{Q}(t_k), \quad (1)$$

де: $\hat{Q}(t_k)$ - вектор вимірюваних параметрів; $A_z(t_k)$, $\bar{V}_z(t_k)$, $\Phi_z(t_k)$, $H_z(t_k)$ - матриці приватних похідних вимірюваних параметрів за параметрами, що визначаються (координатам фазового центру антени $\bar{X}(t_k)$); величині, пропорційній розбіжності шкал часу приймача і часу ГНСС $\eta(t_k)$; коефіцієнтам розкладання в ряд Фур'є-Лежандра зенітної тропосферної затримки (ЗТЗ) \bar{a} і невідомому вектору фазових констант, які необхідно визначити, $\nabla \bar{C}_P$); $\Delta \bar{X}(t_k)$ - поправки до координат фазового центру антени, які отримані в результаті кодового рішення $\bar{X}(t_k)$; $\delta \bar{Q}(t_k)$ - похибки спостережень, обумовлені шумами і багатопременевістю поширення навігаційних сигналів.

Передбачається, що в спостереження (1) введено всі корекції, які можуть бути змодельовані, а саме тропосферні, іоносферні, релятивістські, геодинамічні тощо.

Для наземного статичного режиму позиціонування оцінювані координати фазового центру не змінюються, та систему (1) можна переписати у вигляді

$$\hat{\dot{Q}}(t_k) = A_z(t_k) \cdot \Delta \bar{X} + \bar{V}_z(t_k) \cdot \eta(t_k) + \Phi_z(t_k) \cdot \bar{a} + N_z(t_k) \cdot \nabla \bar{C}_{\text{пр}} + \delta \bar{Q}(t_k). \quad (2)$$

Для наземних кінематичних вимірювань систему рівнянь (1) можна переписати у вигляді

$$\hat{\dot{Q}}(t_k) = B_z(t_k) \cdot \bar{\theta}(t_k) + \Phi_z(t_k) \cdot \bar{a} + N_z(t_k) \cdot \nabla \bar{C}_{\text{пр}} + \delta \bar{Q}(t_k), \quad (3)$$

де $B_z(t_k) = [A_z(t_k); \bar{V}_z(t_k)]$; $\bar{\theta}(t_k) = [\Delta \bar{X}^T(t_k); \eta(t_k)]^T$.

Для вимірювань на борту НКА тропосферні затримки відсутні і систему рівнянь (2) можна переписати у вигляді

$$\hat{\dot{Q}}(t_k) = B_z(t_k) \cdot \bar{\theta}(t_k) + N_z(t_k) \cdot \nabla \bar{C}_{\text{пр}} + \delta \bar{Q}(t_k). \quad (4)$$

При введенні фазових поправок і РФН WL-спостережень різницевої частоти ГНСС (GPS) можливе розв'язання фазової неоднозначності «безіоносферних» фазових спостережень та отримання дискретного/цілочисельного рішення. Для РФН фазових WL-спостережень різницевої частоти використовуватимемо кодово-фазову лінійну комбінацію Melbourne-Wübbena (MW). В результаті матимемо оцінки дискретних фазових неоднозначностей для заданого інтервалу спостережень, і після введення поправок у «безіоносферні» спостереження вираз (1) можна переписати у такому вигляді:

$$\hat{\dot{Q}}(t_k) = A_z(t_k) \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \bar{V}_z(t_k) \cdot \eta(t_k) + \Phi_z(t_k) \cdot \bar{a} + \dot{N}_z(t_k) \cdot \nabla \bar{N}_{\text{пр}} + \delta \bar{Q}(t_k). \quad (5)$$

Відповідно, зміняться і вирази для випадків реалізації fixed-режиму PPP для різних умов спостережень.

Для наземного статичного fixed-метода PPP система рівнянь має вигляд

$$\hat{\dot{Q}}(t_k) = A_z(t_k) \cdot \Delta \bar{X} + \bar{V}_z(t_k) \cdot \eta(t_k) + \Phi_z(t_k) \cdot \bar{a} + \dot{N}_z(t_k) \cdot \nabla \bar{N}_1 + \delta \bar{Q}(t_k). \quad (6)$$

Для наземного кінематичного fixed-метода PPP система рівнянь має вигляд

$$\hat{\dot{Q}}(t_k) = B_z(t_k) \cdot \bar{\theta}(t_k) + \Phi_z(t_k) \cdot \bar{a} + \dot{N}_z(t_k) \cdot \nabla \bar{N}_1 + \delta \bar{Q}(t_k). \quad (7)$$

Для fixed-методу PPP на борту НКА система рівнянь має вигляд

$$\hat{\dot{Q}}(t_k) = B_z(t_k) \cdot \bar{\theta}(t_k) + \dot{N}_z(t_k) \cdot \nabla \bar{N}_1 + \delta \bar{Q}(t_k). \quad (8)$$

Для оцінки характеристик якості та верифікації PPP-рішень визначені методики апостеріорної оцінки точності та інтервалів збіжності/ініціалізації float-та fixed-рішень.

Для апостеріорної оцінки точності визначення параметрів руху НКА використовується сталонна траєкторія, визначена з високою точністю кінематичним методом у закордонних центрах обробки. Результати визначення параметрів руху НКА за розробленими алгоритмами порівнюються з параметрами руху

НКА, розрахованими по еталонній траєкторії на момент часу прийому інформації бортовим GPS-приймачем.

Для оцінки інтервалів збіжності/ініціалізації float- та fixed-рішень були розроблені та апробовані на реальних вимірюваннях окремі авторські методики.

У третьому розділі розроблено та досліджено комплекс алгоритмів float-методу оцінки (розв'язання) фазової неоднозначності двохчастотних фазових ГНСС-спостережень та високоточного позиціонування методом PPP навколоземних/наземних об'єктів (у статичному і кінематичному режимах) та визначень параметрів руху НКА (у кінематичному режимі спостережень).

Реалізація кінематичного float-рішення методом PPP для навколоземних/наземних об'єктів полягає у рішенні загальної системи рівнянь (1). Для випадку НКА система (1) не містить складову $\Phi_{\Sigma}(t_k) \cdot \bar{a}$, оскільки на висотах руху НКА тропосферний шар відсутній. Необхідно провести спільну оцінку параметрів $\Delta\bar{X}(t_k)$, $\eta(t_k)$, \bar{a} і ∇C_{Γ}^r ($j = \overline{1, m}$; $j \neq r$).

Після реалізації процедур попередньої обробки спостережень (введення поправок, отримання безіоносферного кодового (P1 або C/A) рішення, використовуючи процедуру «levelling» кодових GF-спостережень і фазових GF-спостережень) та їх лінійних комбінацій (ЛК) систему рівнянь (1) представимо у наступному вигляді:

$$\hat{\hat{Q}}_{\Sigma}(t_k) = \Phi_{\Sigma}(t_k) \cdot \hat{\Theta}(t_k) + \Phi_{\Sigma}(t_k) \cdot \bar{a} + H_{\Sigma}(t_k) \cdot \nabla \bar{C} + \delta \hat{\hat{Q}}_{\Sigma}(t_k). \quad (9)$$

З урахуванням представлень $G_{\Sigma}(t_k) = \left\| \Phi_{\Sigma}(t_k) : H_{\Sigma}(t_k) \right\|$, $\bar{\mu} = \left\| \bar{a}^T : \nabla \bar{C}^T \right\|^T$ представимо запропоноване float-рішення у вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{\hat{\mu}} &= K_{22} \cdot \sum_{i=1}^k \left[G_{\Sigma}^T(t_i) \cdot P(t_i) \cdot \hat{\hat{Q}}_{\Sigma}(t_i) \right]; \quad K_{22} = \left\{ \sum_{i=1}^k \left[G_{\Sigma}^T(t_i) \cdot P(t_i) \cdot G_{\Sigma}(t_i) \right] \right\}^{-1}; \\ P(t_i) &= W(t_i) - W(t_i) \cdot A_{\Sigma}(t_i) \cdot \left[A_{\Sigma}^T(t_i) \cdot W(t_i) \cdot A_{\Sigma}(t_i) \right]^{-1} \cdot A_{\Sigma}^T(t_i) \cdot W(t_i); \\ \hat{\hat{\Theta}}(t_i) &= \left[A_{\Sigma}^T(t_i) \cdot W(t_i) \cdot A_{\Sigma}(t_i) \right]^{-1} \cdot A_{\Sigma}^T(t_i) \cdot W(t_i) \cdot \left[\hat{\hat{Q}}_{\Sigma}(t_i) - G_{\Sigma}(t_i) \cdot \hat{\hat{\mu}} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

$W(t_i)$ – вагова (зворотна кореляційній) матриця спостережень.

В результаті отримаємо float-оцінки всіх шуканих параметрів $\Delta\hat{\hat{X}}(t_k) \Rightarrow \hat{\hat{X}}(t_k)$; $\hat{\hat{a}} \Rightarrow \Delta\hat{\hat{x}}(t_k) \Rightarrow \hat{\hat{Z}}(t_k)$; $\eta(t_k)$; $\nabla \bar{C}$.

При реалізації двохчастотного float-рішення PPP для статичного режиму ГНСС-спостережень потрібно вирішити систему рівнянь (3).

Введемо такі позначення:

$$G_{\Sigma}(t_k) = \left\| A_{\Sigma}(t_k) : \Phi_{\Sigma}(t_k) : H_{\Sigma}(t_k) \right\|, \quad \bar{\mu} = \left\| \Delta\hat{\hat{X}}^T : \bar{a}^T : \nabla \bar{C}^T \right\|^T.$$

Далі по відомій схемі формуємо МНК-рішення:

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= K_{22} \cdot \sum_{j=1}^n G_{\Sigma}^T(t_j) \cdot P(t_j) \cdot \hat{Q}(t_j); \quad K_{22} = \left[\sum_{j=1}^n G_{\Sigma}^T(t_j) \cdot P(t_j) \cdot G_{\Sigma}^T(t_j) \right]^{-1}; \\ P(t_j) &= W(t_j) - W(t_j) \cdot \hat{V}_x(t_j) \cdot \left[\hat{V}_x^T(t_j) \cdot W(t_j) \cdot \hat{V}_x(t_j) \right]^{-1} \cdot \hat{V}_x^T(t_j) \cdot W(t_j); \\ \eta(t_j) &= \left[\hat{V}_x^T(t_j) \cdot W(t_j) \cdot \hat{V}_x(t_j) \right]^{-1} \cdot \hat{V}_x^T(t_j) \cdot W(t_j) \cdot \left[\hat{Q}(t_j) - G_{\Sigma}(t_j) \cdot \hat{\mu} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

$W(t_j)$ – вагова (зворотня кореляційній) матриця спостережень.

В якості вихідних даних для експериментального відпрацювання та тестування створеного програмно-математичного забезпечення обробки GPS-спостережень float-методом PPP були використані добові спостереження 11 станцій ГНСС-мережі перманентних референціальних станцій України, з них 5 станцій (GLSV, KHAR, KTVL, MIKL, POLV) входять у міжнародні мережі IGS і EPN, накопичені 10 січня та 19 червня 2013 р. На рис. 1 представлений приклад результатів обробки сеансу спостережень станції GLSV (м. Київ) за 10 січня 2013 р. з використанням float-методу реалізації PPP-рішення. Наведені статистичні характеристики похибок позиціонування для заданих значень вірогідності.

Ілюстрації експериментальних порівняльних результатів обробки двохчастотних кодових та фазових GPS-спостережень (10.01.2013 р.) з використанням float-методу реалізації PPP-рішення для станцій мережі представлені на рис. 2. У разі реалізації статичного режиму вимірювань похибки добових float PPP-рішень, отриманих з використанням розроблених автором реалізацій алгоритмів точного позиціонування методом PPP, як показали експерименти, не перевищують $\sim 5-8$ мм (з ймовірністю 95%).

Для тестування розробленої реалізації float-методу PPP на реальних натурних кінематичних вимірюваннях були використані ГНСС/GPS-спостереження двохчастотного приймача (NovAtel, Канада), встановленого на борту літака АН-158. Сеанс GPS-спостережень був зареєстрований 22 жовтня 2010 р., тривалість польоту становила близько 2,5 годин (7:52:50 – 10:24:45). На рис. 3 показані результати визначення траєкторії літака АН-158.

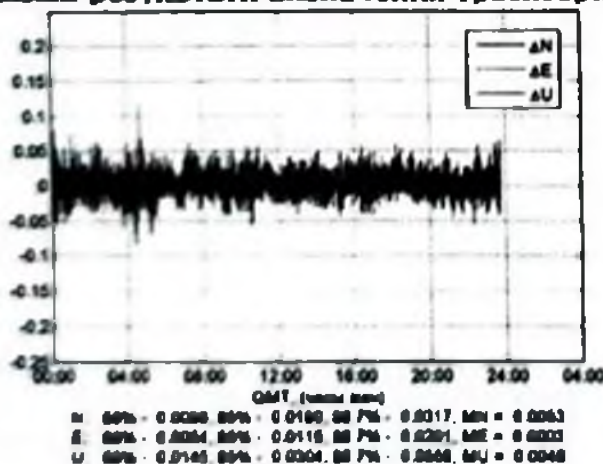


Рис. 1 – Нев'язання (у метрах) float PPP-рішення (у топоцентричній місцевій системі координат) відносно еталону – похибки поточних оцінок координат станції GLSV

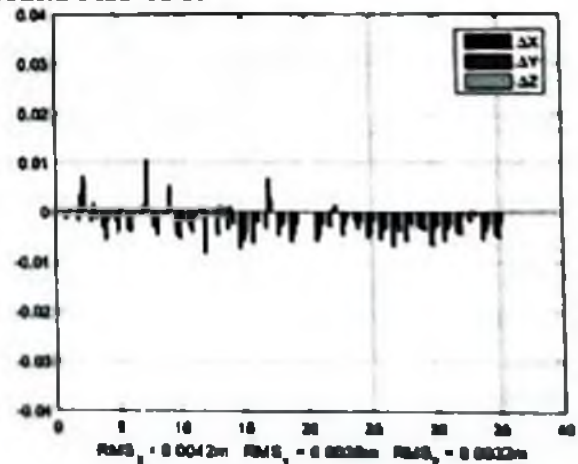


Рис. 2 – Відхилення добового float PPP-рішення (XNUPP) від усереднених оцінок координат станцій у ГСК (на 10.01.2013 р.)

Оцінки середньоквадратичних похибок (СКП/RMS) фазового рішення лежать в межах: $\sim 2,5 - 5$ см по плановим координатам та $\sim 6 - 7,5$ см по висоті. СКП відхилень рішень не перевищують: $\sim 1,8$ см по плановим координатам та $\sim 3,7$ см по висоті. Таким чином, сумарні похибки (СКП/RMS) кінематичного float PPP-рішення на інтервалі спостережень $\sim 2,5$ години не перевищують $\sim 3 - 5$ см по плановим координатам і $\sim 7 - 8$ см по висоті.

На рис. 4 показані експериментальні криві збіжності «плаваючих» (float) PPP-рішень як функцій інтервалу накопичення спостережень. Середній час збіжності (з ймовірністю $P \approx 95\%$) float PPP-рішень для статичного режиму вимірювань становить ~ 30 хв. для порогу стійкого досягнення точності 5 см. Максимальний час збіжності може досягати ~ 90 хв. для такого ж порогу.

Для кінематичного float PPP-рішення, як показало тестування, середній час збіжності до рівня похибок координат ~ 5 см складає $\sim 1,5-2,0$ години.

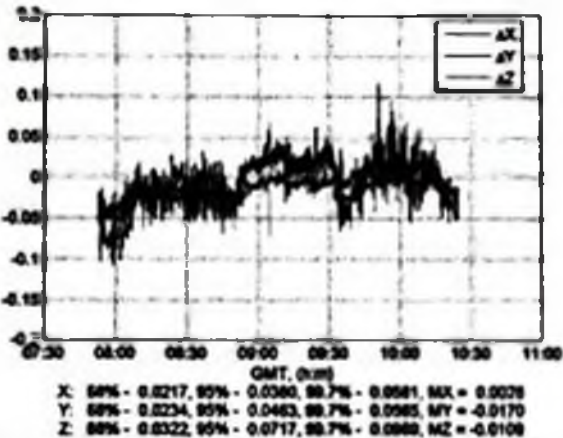


Рис. 3 – Відхилення (нев'язання) фазового float PPP-рішення від еталонного в Гринвічській системі координат, м

На рис. 5 наведені невязання (в метрах) по відношенню до еталонної траєкторії супутника FM1 угруповання COSMIC. В якості еталонних значень при апостеріорній оцінці точності були використані оцінки поточних координат НКА з декларованими похибками на рівні ~ 5 см, отримані виконавцями космічної програми COSMIC шляхом комбінованої обробки бортових GPS-спостережень кінематичним та динамічним методами. Експериментальні результати показали, що запропоновані алгоритми обробки бортових GPS-спостережень дозволяють визначати поточні координати НКА з похибками $\sim 10+20$ см ($P \approx 95\%$) при рівні МНК-залишків $\sim 0,01-0,02$ м. Останнє свідчить про хорошу внутрішню збіжність рішень на рівні похибок фазових вимірів.

При вирішенні задач відшукання float і fixed PPP-рішень у даній роботі автором запропоновано використовувати в якості проміжного, на відміну

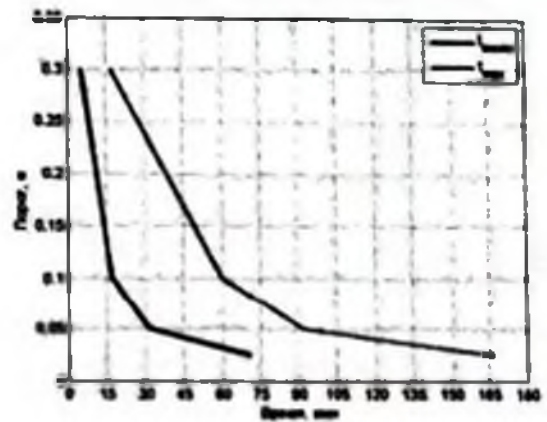


Рис. 4 – Приклад оцінки збіжності float PPP-рішень для статичного режиму вимірювань

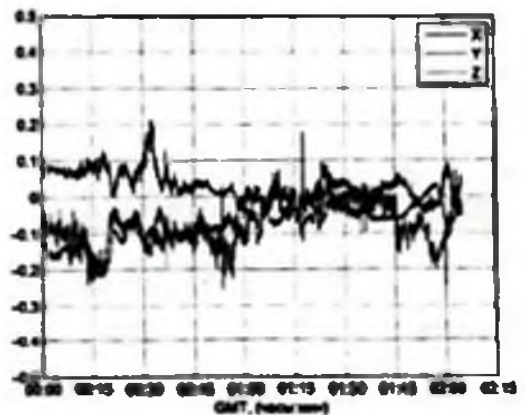


Рис. 5 – Нев'язання (в метрах) float IF-рішення щодо еталона

від відомих підходів, не «безіоносферні» кодові псевдовідстані низької точності, а більш точне (у кілька разів) нове комбіноване кодово-фазове координатне рішення (на основі спільної обробки кодових спостережень першої частоти ГНСС і двохчастотних неоднозначних фазових «безгеометричних» ГНСС-спостережень), що дає суттєве (на $\sim 20+30\%$) збільшення надійності РФН та зменшення інтервалу його досягнення (збіжності PPP-рішення).

У четвертому розділі розроблено та досліджено комплекс алгоритмів дискретного/цілочисельного fixed-методу РФН двохчастотних фазових ГНСС-спостережень при наземному статичному і кінематичному позиціонуванні та при визначенні параметрів руху НКА методом PPP.

Вихідними даними для експериментального тестування послужили добові спостереження 35 перманентних референційних ГНСС-станцій України, накопичені 10 січня та 19 червня 2013 р., а також 6 сеансів спостережень НКА COSMIC та НКА GRACE на ті самі дати.

Для fixed-методу PPP на борту НКА систему рівнянь (8) представимо у вигляді:

$$\dot{\hat{Q}}(t) = A(t) \cdot \bar{\Theta}(t) + \dot{H}(t) \cdot \nabla \bar{N}_{1Q} + \delta \bar{Q}(t), \quad (12)$$

$$\dot{H}(t) = -\lambda_{\kappa} \cdot H(t); \quad H(t) = -\frac{1}{\lambda_{\kappa}} \cdot \dot{H}(t).$$

Після декореляції та «стиснення» (перетворення) система рівнянь приводиться до вигляду

$$\hat{\gamma} = R \cdot \nabla \bar{N}_{1Q} + \delta \bar{\gamma}, \quad K_{\gamma} = E_{(s-1)}.$$

На цьому кроці можна отримати float МНК-оцінку вектору $\nabla \bar{N}_{1Q}$ та її точність (кореляційну матрицю похибок):

$$\begin{cases} \nabla \hat{N}_{1Q} = (R^T \cdot R)^{-1} \cdot R^T \cdot \hat{\gamma} \\ \text{або} \\ \nabla \hat{N}_{1Q} = \left[\sum_{i=1}^t R^T(t_i) \cdot R(t_i) \right]^{-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^t R^T(t_i) \cdot \hat{\gamma}(t_i) \right] \\ \delta \nabla \hat{N}_{1Q} = (R^T \cdot R)^{-1} \cdot R^T \cdot \delta \bar{\gamma} \\ \hat{K}_{\nabla \hat{N}_{1Q}} = (R^T \cdot R)^{-1} = \left[\sum_{i=1}^t R^T(t_i) \cdot R(t_i) \right]^{-1} \end{cases} \quad (13)$$

У випадку, коли координати станції відомі з високою точністю, систему рівнянь можна представити у векторно-матричному вигляді

$$\hat{Q}(t_s) = \bar{V}(t_s) \cdot \eta_{NL}(t_s) + \Phi(t_s) \cdot \bar{\alpha} + \dot{H}_W(t_s) \cdot \nabla \bar{N}_1 + \delta \bar{Q}(t_s).$$

Після декореляції та «стиснення» система рівнянь приводиться до вигляду

$$\hat{\gamma}_N = R_N \cdot \nabla \bar{N}_1 + \delta \bar{\gamma}_N; \quad K_{\gamma_N} = E.$$

Пошук дискретного рішення для вектору $\nabla \bar{N}_1$ виконується шляхом мінімізації цільової функції:

$$\left[\hat{\gamma}_N - R_N \cdot \nabla \bar{N}_1 \right]^T \cdot \left[\hat{\gamma}_N - R_N \cdot \nabla \bar{N}_1 \right] \rightarrow \min_{\nabla \bar{N}_1} \Rightarrow \nabla \hat{N}_1. \quad (14)$$

Після цього отримаємо й оцінки вектору \bar{a} :

$$\left[\hat{d} - D_N \cdot \nabla \hat{N}_1 \right] = D_z \cdot \bar{a} + \delta \bar{d} \Rightarrow \hat{\bar{a}} = \left[D_z' \cdot D_z \right]^{-1} \cdot D_z' \cdot \left[\hat{d} - D_N \cdot \nabla \hat{N}_1 \right];$$

$$K_{\bar{a}} = \left[D_z' \cdot D_z \right]^{-1}.$$

Дискретний/цілочисельний метод позиціонування PPP може бути реалізований лише за умови правильного та надійного РФН WL-спостережень різницевої частоти, а час отримання цілочисельного рішення значною мірою визначається часом отримання надійного РФН. У даній роботі для РФН WL-спостереження використовується кодово-фазова комбінація Melbourne-Wübbena (MW). Для перевірки правильності розв'язання неоднозначності автором розроблено метод контролю та виправлення неоднозначностей, при використанні якого досягається надійний контроль та виправлення неоднозначностей WL-спостережень. Приклади-ілюстрації результатів дослідження надійності (ймовірності прийняття вірного рішення) РФН WL-комбінації спостережень наведено на рис. 6 та 7 для спостережень станцій GLSV (Київ) та KTVL (сміт. Кацівелі, Крим) за 10 січня та 19 червня 2013 р. При цьому оцінювалася надійність РФН як із використанням традиційного підходу до обробки кодово-фазових комбінацій MW, так і з використанням запропонованого критерію оцінки якості поточного дискретного РФН-рішення для фазових комбінацій WL.

Надійне дискретне/цілочисельне РФН-рішення для WL-комбінацій фазових спостережень різницевої частоти досягається на інтервалах накопичення ~8–10 хвилин за умови контролю якості цих рішень з використанням запропонованого критерію.

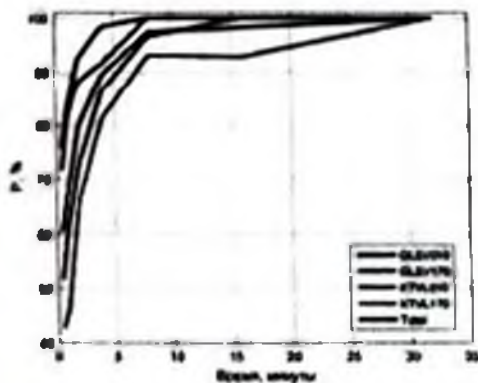


Рис. 6 – Оцінка ймовірності правильного виконання РФН з використанням традиційного підходу

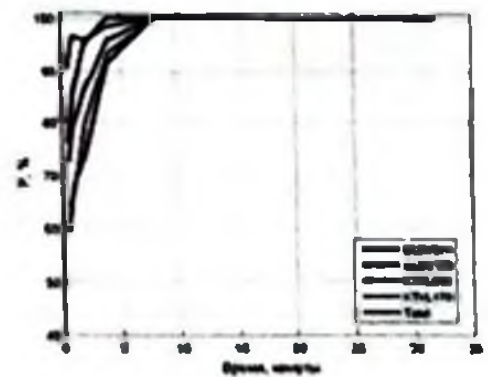


Рис. 7 – Оцінка ймовірності правильного виконання РФН з використанням запропонованого критерію оцінки якості дискретних рішень

Форма щільової функції (14) сильно залежить від багатьох факторів: геометричних умов, інтервалу спостережень, рівня шумів та багатопроементності, залишкових повільно змінюючихся похибок спостережень тощо. Як показали дослідження, для методу PPP, на відміну від диференціального методу, щільова функція менш опукла, тому точність попереднього рішення набуває ключового значення для досягнення надійного РФН та отримання фінального рішення.

Порівняльні ілюстрації експериментальних float та fixed PPP-рішень для наземної станції GLSV (Київ) (10.01.2013 р.) представлені на рис. 8, де зображені нев'язання (в метрах) координатних рішень (та їх статистичні характеристики) у Грінвічській системі координат відносно еталонних значень.

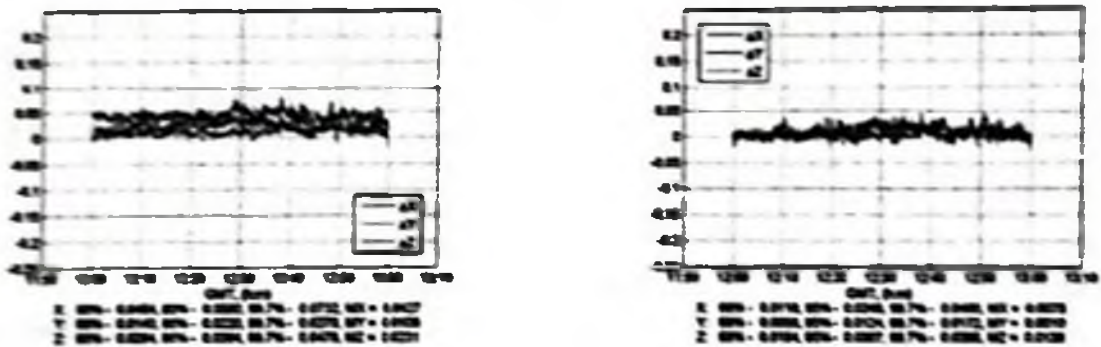


Рис. 8 – Відхилення (нев'язання) фазових float (а) та fixed (б) PPP-рішень від еталонного, м

На рис. 9 наведено приклади результатів IF-float та IF-fixed PPP-рішень НКА GRACE-A на інтервалі 8:30 – 10:38 із добових спостережень 19.06.2013.

Експериментальні дослідження показали, що з використанням розробленого fixed-методу PPP досягається стійке визначення координат НКА з похибками $\sim 3\div 5$ см ($P \approx 95\%$). Середні інтервали ініціалізації цілочисельних fixed PPP-рішень склали: ~ 30 хв. із ймовірністю $P \approx 67\%$, $\sim 45\text{--}60$ хв. з ймовірністю $P \approx 85\%$ та $\sim 90\text{--}120$ хв. з ймовірністю, близькою до 100%.

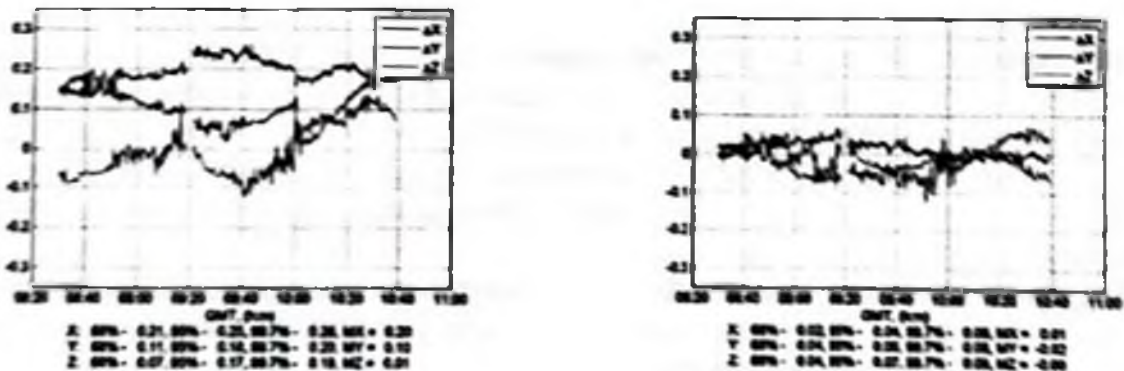


Рис. 9 – Відхилення (нев'язання) фазових float (а) та fixed (б) PPP-рішень від еталонного, м

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача високоточного визначення параметрів руху НКА по бортовим спостереженням сигналів ГНСС шляхом удосконалення відомих і створення нових методів і алгоритмів обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень в режимі PPP, включаючи нові методи розв'язання неоднозначності фазових вимірювань, що дозволяє виконувати позиціонування НКА на сантиметровому рівні точності.

В ході вирішення вказаної задачі отримані такі науково-практичні результати:

1. Отримали подальший розвиток методи та алгоритми реалізації високоточних автономних (недиференціальних) координатних PPP-рішень, включаючи РФН ГНСС-спостережень шляхом отримання «плаваючого» (float) та/або дискретного/цілочисельного (fixed) рішень і їхніх модифікацій як для вимірювань на борту НКА, так і для приземних вимірювань.

2. Розроблено новий більш ефективний алгоритм РФН спостережень різницевої частоти «Wide-Lane» (WL). Запропоновано новий підхід до формування порогових значень з метою більш надійної верифікації WL-рішень.

3. Для досягнення надійного дискретного/цілочисельного РФН запропонована нова реалізація метода і алгоритмів оцінювання інструментальних фазових затримок в апаратурі супутників ГНСС (GPS), які можуть формуватися по спостереженням не тільки глобальних, а й регіональних мереж ГНСС-станцій.

В області експериментальних досліджень:

1. Виконано експериментальне тестування й проведено дослідження нових та удосконалених методів, алгоритмів і програмних модулів для вирішення завдань точного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів на прикладах НКА FORMOSAT-3/COSMIC (США, Тайвань) та GRACE (США, ФРН).

2. Запропоновано й апробовано сукупність нових методів, алгоритмів та програмних модулів оцінки фазових інструментальних затримок в апаратурі супутників ГНСС на основі використання спостережень регіональних мереж ГНСС-станцій.

3. Розроблений прототип програмного забезпечення обробки ГНСС-спостережень та позиціонування методом PPP може бути використаний для точного визначення параметрів руху НКА, включаючи супутники дистанційного зондування Землі, супутники радіолокаційної інтерферометрії SAR/InSAR, вітчизняні супутники типу «Січ» та супутники вітчизняного проекту «Іоносат».

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

1. При реалізації кінематичного методу (без використання моделей руху НКА) досягнута практично потенційна точність визначення їх параметрів траєкторій, яка відповідає найсучаснішим світовим досягненням і задовольняє найжорсткішим вимогам до точності визначення параметрів руху НКА для всіх існуючих та майбутніх космічних місій. Зокрема, експериментальні результати показали, що стійко досягається визначення координат НКА (PPP-рішення) з

похибками, які не перевищують $\sim 10+20$ см ($P \approx 95\%$) з використанням «плаваючого» методу РФН та $\sim 3+5$ см ($P \approx 95\%$) з використанням дискретного методу РФН. Складові вектора швидкості НКА визначаються з похибками, які не перевищують $\sim 1+2$ мм/с ($P \approx 95\%$).

2. Для статичного режиму PPP-визначень приземних об'єктів похибки визначення координат на добовому інтервалі не перевищують ~ 8 мм ($P \approx 95\%$). При реалізації дискретного/цілочисельного РФН у статичному режимі позиціонування середній час ініціалізації становить $\sim 15+20$ хвилин, після чого похибки точкових оцінок координат не перевищують $\sim 2+5$ см. Для кінематичного режиму PPP-визначень похибки оцінок координат приземних об'єктів на інтервалі спостережень ~ 2 години не перевищують $\sim 3-5$ см по плановим координатам і $\sim 7-8$ см по висоті. Такі результати відповідають найкращим досягненням провідних наукових лабораторій світу.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в низці держбюджетних НДР та ДКР, які виконувалися в Дочірньому підприємстві «ЗАО НДІРВ», Головної астрономічної обсерваторії НАН України та Харківському національному університеті радіоелектроніки, що підтверджено відповідними актами впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Жалило А.А., Флерко С.Н., Яковченко А.И. Мониторинг геометрической конфигурации многобазисной сети пунктов широкозонной дифференциальной подсистемы спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС // Космічна наука і технологія. – К.: – Т.5, № 1. – 1999. – С. 59-68. DOI: [10.15407/knit1999.01.059](https://doi.org/10.15407/knit1999.01.059).

2. Жалило А.А., Яковченко А.И. Способ реализации относительных геодезических определений по сигналам GPS/GLONASS с использованием float-обработки фазовых наблюдений // Известия ВУЗов. – К.: – Т.42, №12. – 1999. – С.55-61. DOI: [10.3103/S073527271999120092](https://doi.org/10.3103/S073527271999120092).

3. Ефимов С.К., Нестерович А.Г., Яковченко А.И. Аппаратура спутниковой навигации КА «Січ-1М» и «Микроспутнику» // Космічна наука і технологія. – К.: – Т.7, № 4. – 2001. – С. 114-116.

4. Яковченко А.И. Учёт «wind-up»-эффекта в задачах высокоточного GPS-позиционирования // Радиотехника. Х.: – Выпуск №165 – 2011. – С.75-79.

5. Яковченко А.И. Основные источники и составляющие погрешностей ГНСС-наблюдений и их моделирование при реализации метода точного позиционирования PPP // Радиотехника. Х.: – Выпуск №169 – 2012. – С.315-330.

6. Жалило А.А., Яковченко А.И. Определение параметров траекторий низкоорбитальных космических аппаратов PPP-методом по результатам бортовых GPS-наблюдений // Радиотехника. Х.: – 2016. – № 184. С. 80 - 85.

7. Zhalilo A., Yakovchenko A. Development of PPP-method realization for low earth orbit satellite trajectory determination using on-board GPS-observations [Текст] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий (EJET). Х.: – 2016. – №5/9 (83). – С.33-40. DOI: [10.15587/1729-4061.2016.81026](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81026).

8. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-метода определения параметров движения низкоорбитальных спутников по результатам бортовых GPS-наблюдений. Украинский метрологический журнал. Х.: – 2017. – №1. –

C.15-19. DOI: [10.24027/2306-7039.1.2017.101882](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2017.101882).

9. Жалило А.А., Дохов А.И., Катюшина Е.В., Васильева Е.М., Яковченко А.И., Лукьянова О.А. Разработка высокоточной системы определения траекторий космических аппаратов и других высокодинамичных объектов. Журнал «Прикладная радиоэлектроника». Х.: – 2017 г. – Т.16 №3-4. – С. 112-117.

10. Zhalilo A.A., Yakovchenko A.I. The realization technique and features of the GPS/GLONASS relative geodetic adjustment using float solution // Proceedings of the 2nd European symposium on GNSS'98. - Toulouse, France, October 20-23, 1998.- Tome 2. - IX-P-02. - P. 1-5.

11. Ефимов С.К., Иванов А.С., Хижняк В.В., Яковченко А.И. Аппаратура спутниковой навигации для ракет-носителей. Матер. II-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 13-14 июня 2002 г., Х.: ХАИ, 2002.

12. Ефимов С.К., Иванов А.С., Хижняк В.В., Яковченко А.И. Применение бортовых приемников GPS для траекторных измерений ракет-носителей. Матер. III-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 12-13 июня 2003 г., Х.: ХАИ, 2003.

13. Яковченко А.И., Лукьянов А.М., Аксюта Г.В. О результатах совместной проверки характеристик приемников фирмы Ashtech GG24 и Z18 на пункте контроля навигационного поля GNSS в АО «НИИРИ» (г. Харьков). Матер. III-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 12-13 июня 2003 г., Х.: ХАИ, 2003.

14. Рудич А.В., Яковченко А.И., Ноздрин И.Г. Тестирование работы СКНОУ методом виртуальных тестовых радионавигационных приёмников. 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008. Сборник научных трудов. Том I. Международная конференция «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». Ч. 1. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2008. – С.325-328.

15. Яковченко А.И. Результаты применения технологии точного позиционирования при обработке GPS-наблюдений. 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008. Сборник научных трудов. Том I. Международная конференция «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». Ч. 1. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2008. – С.329-332.

16. Конышева Г.Н., Нестерович А.Г., Рудич А.В., Яковченко А.И. Существующие и потенциальные возможности СКНОУ по обеспечению в реальном времени высокоточного определения координат потребителей навигационной информации на территории Украины. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 2. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2011. – С.16-17.

17. Конышева Г.Н., Нестерович А.Г., Рудич А.В., Яковченко А.И. Оценка точности определения координат потребителя в кинематическом режиме при использовании информации СКНОУ. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I. Конференция «Интегриро-

ванні інформаційні радіозлектронні системи і технології». Ч. 2. – Х.: АНПРЗ, ХНУРЗ. 2011. – С.29-31.

18. Яковченко А.И. Моделирование источников погрешностей при высокоточном GPS-позиционировании. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 2. – Х.: АНПРЗ, ХНУРЗ. 2011. – С.97-100.

19. Яковченко О.І. Застосування методу точного позиціонування при проведенні аварійно-рятувальних робіт. Збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наукове забезпечення діяльності оперативного-рятувальних підрозділів (теорія і практика)». Національний університет цивільного захисту України – Х., 12 березня, 2015.

20. Жалило А.А., Яковченко А.И. Определение параметров траекторий низкоорбитальных космических аппаратов PPP-методом по результатам бортовых GPS-наблюдений. Радиометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані. Міжнародний науковий семінар пам'яті Б.Л. Кашеєва до 96-річчя з дня народження - Україна, Х., 15 березня 2016 р.

21. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-метода определения параметров движения низкоорбитальных спутников по результатам бортовых GPS-наблюдений – X Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка». Збірник тез доповідей конференції, Х., 5-7 жовтня 2016 р., с. 71.

22. Жалило А.А., Дохов А.И., Катюшина Е.В., Яковченко А.И., Лукьянова О.А., Васильева Е.М. Высокоточная многофункциональная система определения траекторий летательных аппаратов авиационных, ракетных и космических комплексов. Збірник тез доповідей 17 науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 07 – 08 вересня 2017 р, с. 151-153.

23. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-технологий статического и кинематического ГНСС-позиционирования. 6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017. Конференция «РАДИОЛОКАЦИЯ. СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИЯ. РАДИОМОНИТОРИНГ». Сборник научных трудов. – Х.: АНПРЗ, ХНУРЗ, Издательство «Точка», 2017. – С.216-219.

24. Жалило О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Катюшина О.В., Лук'янова О.О. Поточний стан розробки багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань. Збірник тез доповідей XIX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 05 – 06 вересня 2019 р, с. 99-100.

25. Zhalilo O.O., Dokhov O.I., Yakovchenko O.I. Multi-positional phase system of trajectory measurements and experimental confirmation of its accuracy using GPS-observations of the ukrainian reference stations. Матер. III-ї наук.-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» 12 - 13 вересня 2019 року, К., НЦУВКЗ, С.105-106.

26. Zhalilo O.O., Yakovchenko O.I. LEOS trajectory determination using the on-board GPS-observations and PPP-technologies of their processing. Матер. III-ї наук.-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспекти-

ви» 12 - 13 вересня 2019 року, К., НЦУВКЗ, С.107.

27. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І. Експериментальне підтвердження точності багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань «Вега-V» з використанням GPS-спостережень референціальних станцій України. Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. Матер. VII наук.-техн. конф., К., 9-10 жовтня 2019 р., с. 308-309.

28. Жалило А.А., Яковченко А.И. PPP-технологии точного GPS-позиционирования. Результаты разработок ХНУРЭ 2014-2019 г. г. Метрология, інформаційно-вимірювальні технології та системи (МІВТС-2020). Матер. VII Міжнародної наук.-техн. конф. – Х., 2020. – С. 31. DOI: [10.24027/2306-7039.1A.2020.193279](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1A.2020.193279).

29. Жалило А.А., Дохов А.И., Яковченко А.И. Автономное (PPP) и дифференциальное (DGPS) кинематическое позиционирование. Сравнение точности на примере обработки бортовых GPS-наблюдений самолёта АН-158. Метрология, інформаційно-вимірювальні технології та системи (МІВТС-2020). Матер. VII Міжнародної наук.-техн. конф. – Х., 2020. – С. 33. DOI: [10.24027/2306-7039.1A.2020.193279](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1A.2020.193279).

30. Дохов О.І., Жаліло О.О., Літус Ю.П., Тевяшев А.Д., Шостко І.С., Яковченко О.І. Розробка полігонного комплексу радіотехнічних та квантово-оптичних систем траєкторних вимірювань. Збірник XX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 78-79.

31. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Літус Ю.П., Катюшина О.В., Лук'янова О.О., Медведський М.М., Пал В.О. Реалізація ГНСС-технології автономної PPP-навігації високодинамічних об'єктів з використанням корекцій SBAS. Збірник XX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 85.

32. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Медведський М.М. Калібрування та контроль точності багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань. Збірник XX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 85-86.

33. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І. Траєкторні визначення приземних літальних апаратів з використанням бортових GPS-спостережень, проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. Матер. VIII наук.-техн. конф., К., 15 жовтня 2020 р., С.115-116.

34. Жалило О.О., Дохов О.И., Яковченко О.И., Литус Ю.П., Катюшина О.В., Лук'янова О.О., Медведський М.М., Пал В.О. Возможности автономной PPP-навигации навколосредных высокочастотных объектов по сигналам ГНСС. Збірник XXI науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 2 – 3 вересня 2021 р, с. 99-101.

АНОТАЦІЯ

Яковченко О. І. Розвиток методів високоточного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів по бортовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.17 «Радіотехнічні та телевізійні системи». – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2023.

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача високоточного визначення параметрів руху НКА по бортовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) шляхом удосконалення відомих і створення нових методів і алгоритмів обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень в режимі PPP (Precise Point Positioning), включаючи нові методи розв'язання неоднозначності фазових спостережень, що дозволяє виконувати позиціонування низькоорбітальних космічних апаратів та навколосемних об'єктів на сантиметровому рівні точності.

Викладено результати розвитку і верифікації методів і алгоритмів отримання «плаваючого» (float) та/або дискретного/цілочисельного (fixed) розв'язання фазової неоднозначності і їхніх модифікацій в ході PPP-рішень, які реалізують запропоновані автором спеціальні процедури спільного МНК-оцінювання сукупності інформаційних і неінформаційних параметрів з використанням фазових і кодових ГНСС-спостережень робочого сузір'я супутників.

Запропонована і апробована нова реалізація метода оцінки комбінацій інструментальних кодових та фазових затримок в бортовій апаратурі супутників ГНСС (GPS) і формування поправок, які враховуються по спостереженням не тільки глобальних, а й регіональних мереж ГНСС-станцій (зокрема, української мережі перманентних станцій) та дозволяють досягти надійного дискретного/цілочисельного РФН і реалізувати найбільш точний fixed-метод PPP.

В роботі показано, що при реалізації кінематичного методу досягнута потенційна точність визначення параметрів траєкторій НКА, яка відповідає найсучаснішим світовим досягненням і задовольняє найжорсткішим вимогам до точності для існуючих та майбутніх космічних місій. Зокрема, експериментальні результати показали, що стійко досягається визначення координат НКА (PPP-рішення) з середньоквадратичними похибками, які не перевищують $\sim 10 \div 20$ см (з вірогідністю $P \approx 95\%$) з використанням «плаваючого» методу РФН та $\sim 3 \div 5$ см ($P \approx 95\%$) з використанням дискретного методу РФН.

Достовірність наукових результатів і висновків, сформульованих в дисертації, доведена, перш за все, експериментальною перевіркою основних викладених наукових положень на великій кількості реальних сесій ГНСС спостережень.

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), розв'язання фазової неоднозначності (РФН), режим точного позиціонування PPP (Precise Point Positioning), спостереження, алгоритм, точність, похибка, надійність, верифікація.

ABSTRACT

Yakovchenko O.I. Development of the methods for high precision determination of the motion parameters of Low Earth Orbit satellites based on the on-board observations of global navigation satellite systems signals. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (PhD) in specialty 05.12.17 «Radio engineering and Television systems» – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2023.

The dissertation solves the scientific and technical problem of high precision determination of the motion parameters of Low Earth Orbit satellites (LEOs) based on the on-board observations of global navigation satellite systems (GNSS) signals by improving the known methods and creating new methods and algorithms for processing carrier-phase and code GNSS-observations in the PPP (Precise Point Positioning) mode, including new methods for resolving the ambiguity of carrier phase observations, allowing the positioning of the LEOs and near-ground objects at the centimeter level of the accuracy.

There are presented the results of the development and verification of methods and algorithms for obtaining «floating» (float) and/or discrete/integer (fixed) resolution of carrier-phase ambiguity (CPAR) and their modifications in the course of PPP solutions that implement the special procedures proposed by the author for conjoint LSM-estimation of the information and non-information parameters using carrier phase and code GNSS-observations of the working constellation of satellites.

The proposed and studied algorithms involve the use of a multi-stage procedure for processing the observations, where at each stage the solution is refined. This makes it possible to obtain a reliable solution to the problem of determining the motion parameters of the LEOs and the location of near-ground objects at the centimeter level of accuracy under different measurement conditions. So, for the first time, the algorithms have been proposed, that in the course of CPAR use as an intermediate solution in contrast to the known approaches, not «ionosphere-free» code pseudoranges of low accuracy, but a more accurate (several times) new combined (smoothed) code+phase coordinate solution (based on a common processing code pseudoranges of the first (L1) GNSS/GPS frequency and dual-frequency ambiguous phase «geometry-free» GNSS-observations), which gives a significant (by ~20+30%) increase in the reliability of the CPAR and a decrease the interval for its achievement (initialization/convergence of the PPP solution).

It is suggested and tested new implementation of the method for estimating the combinations of instrumental code and carrier-phase delays in the on-board equipment of GNSS (GPS) satellites and generating the corrections calculated from observations of not only global, but also regional networks of GNSS-stations (in particular, the Ukrainian network of permanent reference stations), allowing achieve the reliable discrete/integer CPAR and to realize the most accurate PPP fixed method.

The dissertation shows that when implementing the kinematic mode the potential accuracy of determining the LEOs trajectory parameters has been achieved, which meets the most modern world achievements and satisfies the stringent accuracy requirements for existing and future space missions. In particular, the experimental results have shown that a stable determination of the LEOs coordinates (PPP-solutions) is achieved with root-mean-square (RMS) errors not exceeding $\sim 10+20$ cm (with a probability $P \approx 95\%$) using the float CPAR method and $\sim 3+5$ cm ($P \approx 95\%$) using the discrete fixed CPAR method. The components of the velocity vector of the LEOs are determined with errors (RMS) not exceeding $\sim 1+2$ mm/sec ($P \approx 95\%$).

For the static mode of PPP-determinations of near-ground objects the RMS of the estimates of coordinates on a daily interval do not exceed ~ 8 mm ($P \approx 95\%$). When implementing a fixed CPAR in a static positioning mode the average initialization time is $\sim 15+20$ min, after which the errors of point estimates of coordinates do not exceed $\sim 2+5$ cm. For the kinematic mode of PPP-determinations RMS of the coordinate estimates for near-ground objects over the observation interval of ~ 2 hours do not exceed $\sim 3-5$ cm in plan and $\sim 7-8$ cm in height. Such results correspond to the achievements of the leading scientific laboratories of the world.

The reliability of the scientific results and conclusions formulated in the dissertation has been proven, first of all, by experimental verification of the main scientific provisions outlined on a set of real sessions of GNSS observations. Methods for estimating the actual accuracy of coordinate determinations are proposed, including an approach with the implementation of the carrier-phase differential method, which made it possible to carry out reliable verification of PPP solutions for static and kinematic positioning.

Keywords: global navigation satellite systems (GNSS), carrier phase ambiguity resolution (CPAR), PPP (Precise Point Positioning) mode, observations, algorithm, accuracy, error, reliability, verification.

Підп. до друку __. __. 23.

Формат 60x84 1/16.

Спосіб друку – ризографія.

Умов. друк. арк. 1,5.

Зам. №. 21-323

Наклад 100 прим.

Ціна договірна.

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Науки, 14

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі ХНУРЕ
м. Харків, просп. Науки, 14