

**Я.С. Яцків¹, А.І. Ємець¹, М.О. Литвин¹, О.О. Хода¹,
Н.О. Жаліло¹, О.О. Жаліло², О.О. Желанов², Д.О. Шелковенков²**

¹ Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ ПЕРМАНЕНТНИХ ГНСС-СТАНЦІЙ УКРАЇНИ



Наведено результати виконання Головною астрономічною обсерваторією НАН України та співвиконавцями науково-технічного проекту «Оптимізація мережі перманентних ГНСС-станцій України та дослідна експлуатація центру збору та обробки інформації для забезпечення робіт з геодезії, кадастру та навігації рухомих об'єктів».

Мета проекту — розширення та оптимізація мережі перманентних референцних ГНСС-станцій України, розвиток та впровадження в дослідну експлуатацію центру збору, обробки і надання інформаційних послуг супутникової системи точного позиціонування (сантиметрового рівня точності) для підтримки геодезичних та кадастрових зйомок на території України.

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), перманентна референцна станція; кодові і фазові ГНСС-спостереження, програмно-алгоритмічне забезпечення, технології точного позиціонування.

Науково-технічний проект «Оптимізація мережі перманентних ГНСС-станцій України та дослідна експлуатація центру збору та обробки інформації для забезпечення робіт з геодезії, кадастру та навігації рухомих об'єктів» виконано Головною астрономічною обсерваторією НАН України та співвиконавцями відповідно до Договору № 3 від 01 червня 2010 р. між Національною академією наук України і Головною астрономічною обсерваторією НАН України на основі використання GPS-обладнання та даних центру збору і обробки GPS-спостережень (ГАО НАНУ), а також результатів розробок та досліджень, які були отримані у 2006—2008 рр. [1—6].

Співвиконавці проекту — Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ), м. Харків; Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів; Ужгород-

ський національний університет, м. Ужгород. Партнер проекту — Інститут геодезії і картографії Державної служби геодезії, картографії та кадастру України (м. Київ).

Мета проекту — оптимізація мережі перманентних референцних ГНСС-станцій України, розвиток та впровадження в дослідну експлуатацію центру збору, обробки і надання інформаційних послуг супутникової системи точного позиціонування (сантиметрового рівня точності) для підтримки геодезичних та кадастрових зйомок на території України.

У ході виконання проекту отримані такі головні результати:

1) проведена оптимізація мережі перманентних референцних ГНСС-станцій України шляхом модернізації станцій CNIV (м. Чернігів), UZHL (м. Ужгород), EVPA (м. Єваторія) та підключення до центру автоматизованої обробки інформаційно-виміральної ГНСС-системи (ГАО НАНУ) перманентних референцних станцій у м. Полтава (POLV) та м. Харків (KHAR, SURE);

2) створено модифіковану версію програмного забезпечення (ПЗ) автоматизованої обробки ГНСС-спостережень з новими функціональними можливостями, проведені роботи з тестування нової версії ПЗ; ПЗ реалізує обробку спостережень мереж референцних станцій і приймачів споживачів для цілей високоточного ГНСС-позиціонування;

3) створені нові алгоритми та програмні модулі надійної обробки складних кінематичних файлів одночастотних та двочастотних ГНСС-спостережень з повними або частковими розривами (пропусками) спостережень;

4) розроблено та протестовано комплекс алгоритмів і програмних модулів розрізнення фазової неоднозначності (РФН) і високоточного двочастотного ГНСС-позиціонування кінематичних і статичних об'єктів з використанням фазових спостережень різницевої частоти; похибки визначення поточного місцеположення динамічних об'єктів становлять 3—7 см на базових відстанях 150 км; для статичних визначень похибки не перевищують 2—4 см по всіх координатах на базових відстанях до 200 км;

5) проведена оцінка факторів, що впливають на точність диференціального позиціонування з використанням одночастотних та двочастотних ГНСС-приймачів на базових відстанях до 100 км в умовах розріджених мереж станцій (базові відстані — до 200 км); досліджено, що головною складовою, яка суттєво впливає на якість РФН та позиціонування з використанням одночастотної ГНСС-апаратури, є флуктуаційна похибка іоносферної затримки сигналів;

6) експериментально доведена можливість досягнення дециметрової точності навігаційних визначень у режимі реального часу; експерименти з використанням DGPS/RTK диференціальних корекцій показали стійке досягнення точності 15—25 см для планових координат і 25—50 см для висотної складової на видаленнях до 100 км від найближчої базової станції.

У розд. 1 описані результати модернізації перманентних референцних ГНСС-станцій CNIV

(м. Чернігів), UZHL (м. Ужгород), EVPA (м. Євпаторія) та результати удосконалення програмно-алгоритмічного комплексу (ПАК) автоматизованої обробки ГНСС-спостережень, спрямовані на подолання функціональних обмежень попередньої версії комплексу. У розд. 2 описано розроблений та верифікований програмно-алгоритмічний комплекс обробки фазових ГНСС-спостережень різницевої частоти для задач високоточного кінематичного позиціонування субдециметрової точності. У розд. 3 наведені результати досліджень технології передачі корегувальної інформації окремих референцних станцій в реальному часі з використанням технології NTRIP і досліджень ефективності їх використання для вирішення задач диференціальної навігації, точного землеробства, геодезичних і кадастрових зйомок у DGPS/RTK-режимах позиціонування. У розд. 4 наведено опис результатів досліджень факторів, що впливають на точність диференціального позиціонування з використанням одночастотних та двочастотних ГНСС-приймачів на базових відстанях до 100 км в умовах розріджених мереж станцій (базові відстані — до 200 км). Надані результати високоточного (на сантиметровому рівні) визначення тропосферних затримок. Показано, що головною складовою, яка суттєво впливає на якість позиціонування з використанням одночастотної ГНСС-апаратури, є флуктуаційна складова іоносферної затримки сигналів. У розд. 5 стисло описані головні результати розробки інформаційно-вимірювальної системи та її подальший розвиток.

1. МОДЕРНІЗАЦІЯ ПЕРМАНЕНТНИХ РЕФЕРЕНЦНИХ ГНСС-СТАНЦІЙ УКРАЇНИ. РОЗВИТОК, ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ЦІЛЕЙ ВИСОКОТОЧНОГО ГНСС-ПОЗИЦІОНУВАННЯ

1.1. Модернізація перманентних референцних ГНСС-станцій України

Головною астрономічною обсерваторією НАНУ у 2007—2008 рр. виконано інноваційні

проекти «Інформаційно-вимірювальна GNSS система та мережна VRS-технологія забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок у Закарпатті та Чернігівщині» та «Інформаційно-вимірювальна GNSS та мережа VRS-технологія забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок у Києві та Київській області» [1–7]. При виконанні цих робіт створено прототип інформаційно-вимірювальної супутникової ГНСС-системи (ІВС) забезпечення геодезичних та кадастрових зйомок з використанням спостережень регіональної мережі референціальних перманентних ГНСС-станцій на території Київської, Чернігівської та Черкаської областей. Розробка системи остаточно ще не була завершена, тому для її розвитку, поширення зони дії та введення в дослідну експлуатацію необхідно було доопрацювати ряд технічних рішень, а саме провести модернізацію окремих перманентних референціальних ГНСС-станцій EVPA (м. Євпаторія), CNIV (м. Чернігів) та UZHL (м. Ужгород).

Перманентна GPS-станція «Ужгород» (UZHL) була встановлена 1999 року. Станція UZHL була включена в мережу Міжнародної ГНСС-служби (IGS) та в Європейську перманентну ГНСС-мережу (EPN). Вимірювальна інформація з цієї станції передавалася до трьох міжнародних центрів збору ГНСС-даних (IGN — Франція, OLG — Австрія, BKG — Німеччина) та до локального центру збору даних ГАО НАН України. Одинадцять років GPS-станція UZHL працювала згідно з усіма вимогами міжнародних організацій, проте за цей час обладнання станції відпрацювало свій ресурс і морально застаріло. Останні півроку обладнання на станції працювало зі збоями, часто реєструвалися спостереження GPS-супутників лише на частоті L1. У зв'язку з вищезазначеним виникла нагальна потреба модернізації. Передбачалося, що модернізація станції UZHL дасть змогу спостерігати супутники обох (GPS і ГЛОНАСС) систем [8].

Перманентна GPS-станція «Євпаторія» (EVPA) була встановлена в 1999 р. Станція EVPA включена в Європейську перманентну ГНСС-мережу. Вимірювальна інформація з цієї станції

передається до двох міжнародних центрів збору ГНСС-даних (OLG — Австрія, BKG — Німеччина) та до локального центру збору даних ГАО НАН України. Починаючи від 2009 р., морально застаріле обладнання станції почало працювати зі збоями, часто реєструвалися спостереження GPS-супутників лише на частоті L1. Тому виникла нагальна потреба модернізації станції. Передбачалося, що після модернізації станція EVPA зможе брати участь у спостереженні супутників обох систем.

Перманентна GPS-станція «Чернігів» (CNIV) була встановлена в 2005 р. Станція CNIV включена в Європейську перманентну ГНСС-мережу. Вимірювальна інформація з цієї станції передається до двох міжнародних центрів збору ГНСС-даних (OLG — Австрія, BKG — Німеччина) та до локального центру збору даних ГАО НАН України. Після п'яти років роботи виникла нагальна потреба модернізації обладнання станції [9].

Виконані роботи по модернізації станції дали можливість:

- ✦ відновити повноцінну та безперервну роботу станцій згідно з останніми вимогами міжнародних служб;
- ✦ модернізувати приймачі станцій, що дало змогу одночасно реєструвати сигнали супутників радіонавігаційних систем GPS (США) та ГЛОНАСС (РФ);
- ✦ оновити приймальну апаратуру, здатну забезпечити формування диференціальних корекцій (стандарт RTCM версій 2.3 або 3.0) для покращення визначення координат споживачів, які знаходяться в радіусі 75–100 км від станції;
- ✦ встановити додаткові блоки приймачів, що дають змогу реєструвати нові типи сигналів GPS L2C, а за умови зміни антени — приймати GPS-сигнали на частоті L5;
- ✦ покращити внутрішній генератор приймача, точність якого складає тепер 20 нс.

Як приклад на рис. 1. показана модернізована станція UZHL. Після проведеної модернізації точність визначення координат рухомого

користувача тепер може досягати 2,5 см за умови використання ним двочастотного приймача (режим real-time kinematic) та декількох дециметрів у випадку використання одночастотного приймача (режим differential GPS). Згаданий диференціальний режим особливо корисний для потреб навігації рухомих об'єктів, а також для інших робіт, які вимагають отримання розв'язку задач позиціонування в реальному часі.

З використанням модернізованого обладнання стало можливим реєструвати спостереження не тільки GPS-супутників, а і супутників системи ГЛОНАСС, накопичувати на локальному FTP-сервері необхідну за об'ємом кількість вимірювальної інформації, прийнятої від супутників, виконувати попередній аналіз якості спостережень, забезпечувати через локальний FTP-сервер та мережу Інтернет якісну передачу інформації з ГНСС-станції в реальному часі.

1.2. Розвиток, дослідження та тестування багатофункціонального програмно-алгоритмічного комплексу для цілей високоточного ГНСС-позиціонування

У даному підрозділі описані запропоновані і реалізовані удосконалення ПАК автоматизованої попередньої обробки ГНСС-спостережень, спрямовані на подолання функціональних обмежень попередньої версії програмного комплексу. Наведені результати тестування ПЗ та коротко описані плани його подальшого розвитку і впровадження.

Методична і алгоритмічна основа

При створенні ПАК автоматизованої попередньої обробки ГНСС-спостережень було використано програмний комплекс ОСТАВА_РРА [10–16], який створено при виконанні інноваційних проектів. Комплекс реалізує ряд положень, які можуть бути сформульовані таким чином:

- ✦ розробка має бути спрямована на підготовку даних для застосування до них алгорит-



Рис. 1. Модернізована станція UZHL (встановлена антена та обладнане робоче місце оператора)

мів позиціонування, а не тільки оцінку якості спостережень, як це реалізовано, наприклад, в TEQC [17];

- ✦ розроблювані методи і алгоритми повинні передбачати можливість в першу чергу виправлення аномалій, а не їх видалення з подальшої розробки — мінімізація відбракованих даних і помилкових тривог;
- ✦ розроблювані методи повинні передбачати можливість обробки одночастотних ГНСС-спостережень з використанням (по можливості) тих же принципів, що і для двочастотних даних;
- ✦ методи, що розробляються, мають бути (по можливості) застосовні без використання диференціального підходу обробки;
- ✦ має бути передбачена можливість отримання широкого спектру якісних характеристик про первинні спостереження.

На основі прийнятих постулатів і отриманого досвіду обробки спостережень для ГНСС-

приймачів різних класів і виробників було встановлено, що для отримання даних з найкращою якістю мають бути виконані такі операції [14]:

- ✦ читання текстових або бінарних форматів, прийнятих для обміну ГНСС-інформацією, таких, як RINEX [18], IONEX [19], SP3 [20] тощо;
- ✦ перевірка цілісності даних;
- ✦ виявлення аномалій кодових спостережень;
- ✦ корекція шкали часу;
- ✦ виявлення аномалій фазових спостережень;
- ✦ виявлення, оцінка і корекція фазових стрибків;
- ✦ оцінка приростів координат з використанням фазових спостережень;
- ✦ оцінка рівня шумових і багатопромених похибок.

Особливості програмної реалізації і результати тестування

Методи і алгоритми ПАК ОСТАВА_PPA реалізовані у вигляді програм (скриптів, функцій, DLL-бібліотек) у середовищі програмування MatLab, вибір якого був обумовлений наявністю багатой бібліотеки функцій для виконання матричних операцій, відносно високою швидкістю роботи і наявністю простого та зручного середовища розробки. Це робить можливим створення досить складних програмних комплексів зусиллями людей, що не мають спеціальних поглиблених знань в області програмування. Також слід зазначити, що середовище розробки MatLab постійно розвивається, надаючи з кожним роком все більше можливостей для розробників.

Створений раніше комплекс програм [16] служить бібліотекою функцій і набору програм для таких типів вхідних даних:

- ✦ спостереження нерухомих пунктів з інтервалам між відліками спостережень від 1 до 5 с (ОСТАВА_PPA_Static 1-1/5 Hz);
- ✦ спостереження нерухомих пунктів з інтервалам між відліками спостережень від 10 до 30 с (ОСТАВА_PPA_Static 1/5-1/30 Hz);

- ✦ спостереження рухомих об'єктів з інтервалам між відліками спостережень 1 с (ОСТАВА_PPA_Kinematic 1 Hz).

Основною метою застосування ПАК ОСТАВА_PPA є створення масивів спостережень мереж базових станцій і споживачів, що пройшли попередню обробку, які надалі можуть використовуватися при здійсненні різних методів точного позиціонування. Водночас кінцеві продукти попередньої обробки можуть бути корисними як для операторів мереж базових станцій, що використовують ці дані, так і для таких споживачів-організацій, котрі виконують геодезичні, кадастрові і інші види робіт з використанням ГНСС. Підставою для цього, насамперед, є те, що ПАК ОСТАВА_PPA здатний формувати масиви первинних спостережень, що пройшли попередню обробку (напр., в широко поширеному форматі RINEX).

Застосування ПАК ОСТАВА_PPA, *по-перше*, допомагає споживачам покращувати якість отримуваних ними результатів за рахунок використання початкових даних, в яких вірогідність появи аномалій в кодових або фазових спостереженнях значно занижена. *По-друге*, оцінки якості первинної вимірювальної інформації (напр., рівень багатопромених і шумових похибок кодових спостережень) можуть допомогти в оцінці якості ГНСС-апаратури, місць розміщення приймальних антен і вимірювальних пунктів. *По-третє*, споживачам може бути доступна повна інформація про вимірювальний сеанс, включаючи дані про інтервали безперервності фазових спостережень. Це дає можливість, ґрунтуючись на результатах, отриманих завдяки використанню ОСТАВА_PPA, розробляти і застосовувати власні методи точного позиціонування.

Незважаючи на позитивні якості першої версії ОСТАВА_PPA, в ході її всебічного тестування з використанням спостережень перманентних станцій, а також статичних і кінематичних спостережень, які були надані компаніями, що виконують геодезичні роботи, а також виробниками і дистриб'юторами ГНСС-апаратури, були виявлені проблемні питання, що

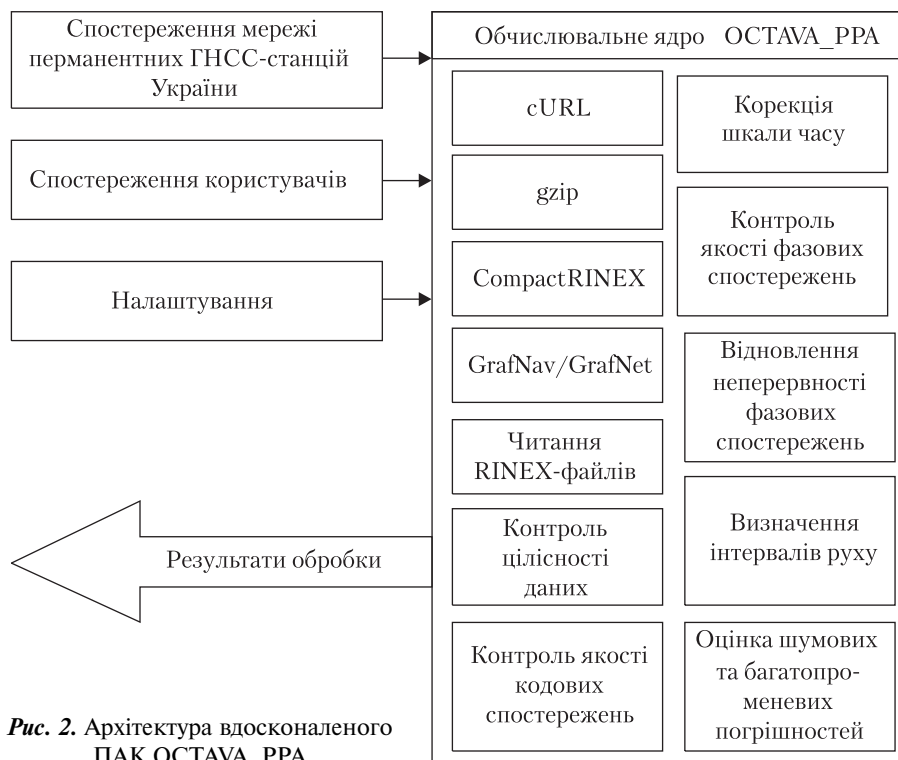


Рис. 2. Архітектура вдосконаленого ПАК OSTAVA_PPA

вимагали доопрацювання як алгоритмічної бази, так і програмних модулів. Крім того, під час тестування були сформовані пропозиції про розширення або зміну функціональних можливостей алгоритмів і програм.

Удосконалення ПАК OSTAVA_PPA

Нижче наведені удосконалення і нововведення, які були виконані в 2010 р. в ПАК OSTAVA_PPA.

Головні зусилля були спрямовані на створення такої програмної реалізації OSTAVA_PPA, яка могла б застосовуватися для вирішення не лише наукових, але і цілого ряду актуальних практичних завдань. Це зумовлено тим, що було прийнято рішення розробити програмний комплекс для попередньої обробки спостережень з найбільш поширеними часовими інтервалами між відліками як для базових станцій, так і польових або пересувних пунктів: від 1 до 5 с.

Важливим рішенням стало прийняття нової архітектури програмного забезпечення (див.

рис. 2). Так, якщо раніше для спостережень базових станцій і рухливих приймачів необхідно було користатися різними програмами, то тепер обробка виконується з використанням однієї і тієї ж програми-ядра, загальної для усіх типів вхідних даних і режимів обробки. Налаштування ядра для завдання режимів обробки здійснюється шляхом формування проектів (формалізованих структур змінних), налаштування з яких прочитуються на початку роботи програми.

Також були виконані роботи, спрямовані на емпіричне визначення порогових значень в різних процедурах, що забезпечують, з одного боку, мінімальний рівень помилкових рішень, з іншого — надійне виявлення і усунення помилок в кодових і фазових спостереженнях для різних типів устаткування.

Підтримка обробки спостережень ГЛОНАСС-супутників

Логічним продовженням роботи над ПАК OSTAVA_PPA стала реалізація підтримки об-

робки не лише GPS-, але і GPS+ГЛОНАСС-спостережень.

Ухвалення рішення про необхідність порівняно простого алгоритмічного, але трудомісткого програмного доопрацювання (вимагається переробка усіх процедур обробки як кодових, так і фазових спостережень) було викликане необхідністю обробки спостережень сучасного ГНСС-устаткування з можливістю прийому сигналів від ГЛОНАСС-супутників. Оскільки принципи обробки кодових і фазових спостережень для систем GPS і ГЛОНАСС схожі, то основною особливістю, яку довелося враховувати при реалізації, став частотний розподіл навігаційних сигналів, використовуваний в ГЛОНАСС. Крім того, при створенні програмних модулів була врахована можливість підтримки і інших ГНСС, таких, як Galileo, EGNOS (якщо в майбутньому для цієї системи будуть доступні ефемериди для геостаціонарних супутників, що передають диференціальні поправки цієї системи) та ін.

Автоматичне виявлення інтервалів руху

Як сказано вище, в процесі обробки спостережень (особливо кінематичних) є потреба оцінки змін координат приймального пункту з часом, що необхідно для виконання забезпечення безперервності фазових спостережень. Дослідження показали, що інформація про зміни координат може бути використана для визначення моментів, коли приймач був нерухомий. На відміну від геодезичних приймачів, де маркери, що вказують на знаходження приймача в русі, розставляються оператором зйомки вручну, в програмі реалізований інтервальный фільтр.

Логіка роботи цього фільтра полягає ось у чому: якщо існує відлік часу i , $i-1$, $i-2$... $i-n$, для яких приріст довжини вектора положення не перевищує деякого значення V_{\max} , то інтервал i ... $i-n$ вважається інтервалом часу, для якого антена навігаційного приймача не переміщлася. Параметри n і V_{\max} можуть встановлюватися довільними, проте експерименталь-

но було встановлено, що для надійної роботи фільтра (вірогідність помилкових тривоги — не більше 1 % при інтервалі між відліками 1 с) оптимальними є $n = 10$ і $V_{\max} = 10$ см/с.

Експерименти показали, що цей фільтр може надійно маркувати статичні і кінематичні файли, отримані в різних режимах зйомки. Інтервальный фільтр добре себе зарекомендував при обробці спостережень, отриманих в режимі «stop-and-go». Особливо він корисний, якщо при великій кількості статичних сесій (10 і більше) в початковому файлі відсутні маркери, які означають початок і закінчення статичних ділянок. Крім того, можуть бути виявлені і усунені помилки операторів устаткування, такі, як переміщення приймача під час інтервалу статичної ініціалізації.

Особливості роботи з файлами спостережень

У першій програмній реалізації ПАК ОСТАВА_PPA інформація базових станцій і споживачів (спостереження і ефемериди) була доступна у вигляді файлів формату RINEX 2.0...2.11. Досвід експлуатації програмного забезпечення показав, що цей факт ускладнює і уповільнює процес обробки спостережень через такі обставини:

- ✦ спостереження базових станцій зазвичай зберігаються в структурі файлових архівів (локальних, національних, міжнародних), де вони з метою економії дискового простору перетворюються з формату RINEX у формат Compact RINEX [21];
- ✦ файли спостережень і ефемерид, розміщені у файлових архівах, а також файли споживачів зазвичай упаковуються з використанням архіваторів з метою економії дискового простору і об'єму даних, що передаються по Інтернету;
- ✦ доступ до файлових архівів базових станцій і споживачів зазвичай здійснюється з використанням протоколів HTTP або FTP;
- ✦ іноді користувачі не мають можливості виконати перетворення спостережень, сформованих їх устаткуванням у форматі, захи-

щеному авторськими і іншими правами, які зазвичай передбачають платний доступ до інформації, у формат RINEX.

Рішення кожного з цих завдань засобами Matlab, як і виконання цих операцій вручну, виявилося нераціональним. Тому були розроблені модулі автоматизації, що дозволяють управляти такими програмами без участі оператора:

- ✦ cURL [22] — програмне забезпечення для завантаження файлів з використанням протоколів HTTP, FTP і інших; дозволяє повністю автоматизувати завантаження файлів з файлових архівів; підтримує різні методи аутентифікації і типи проксі-серверів;
- ✦ RNX2CRX, CRX2RNX [21] — набір утиліт для перетворення файлів з формату RINEX у формат Compact RINEX і назад;
- ✦ gzip [23] — архіватор файлів, який поширюється вільно;
- ✦ wconvert, gpbrin [24] — набір API-утиліт з комерційного програмного продукту GrafNav/GrafNet (вимагає придбання ліцензії, розробляється компанією NovAtel-Waypoint inc, Канада); дозволяють виконати перетворення спостережень більшості сучасних форматів ГНСС-устаткування у формат RINEX 2.10.

Даний набір ПЗ і створені процедури автоматизації його запуску дали можливість автоматизувати усі перераховані вище завдання завантаження і перетворення вимірювальних файлів.

Оптимізація роботи

Перші програмні реалізації OSTAВА_PPA були призначені для верифікації розроблених методів і алгоритмів з метою вивчення їх властивостей. Основна вимога, яка при цьому пред'являлася, полягала в точній відповідності програм і алгоритмів. У 2005 р. був узятий курс на створення такого зразка ПАК, який був би здатним вирішувати не лише наукові, але і практичні завдання. До моменту реєстрації авторських прав на OSTAВА_PPA в 2008 р. програмний комплекс уже неодноразово використовувався при виконанні різних науково-практичних завдань, проте мав ряд обмежень. *По-перше*, це порівняно

низька швидкодія: час обробки одного вимірювального файлу, що містить одну добу вимірювальної інформації, міг досягати 3—6 год; *по-друге*, при обробці файлів тривалістю 12 год і більше виникали проблеми, викликані обмеженим об'ємом оперативної пам'яті.

У зв'язку з тим, що OSTAВА_PPA повинно стати одним з комплексів для створення центру обробки ГНСС-спостережень споживачів, мали бути здійснені заходи з оптимізації програмних модулів як по швидкодії, так і за об'ємом використовуваної пам'яті. Оскільки Matlab є мовою переважно для наукових досліджень, то вирішенню задачі оптимізації при вивченні цього середовища програмування зазвичай не приділяється досить уваги. У літературних джерелах (напр., [25]), створених ентузіастами системи Matlab, можна знайти рекомендації зі створення таких програмних модулів, які будуть ефективно і максимально швидко виконувати будь-які завдання. При цьому швидкість виконання операцій може бути порівнянною із швидкістю програм на мові C. Були розроблені і власні прийоми оптимізації, що дозволило скоротити час обробки одного добового файлу спостережень з 3—6 год до 20—40 хв (залежно від числа аномалій в сеансі).

Вирішення проблеми сегментації оперативної пам'яті

Однією з проблем при роботі з великими масивами (десятки-сотні Мегабайт) в Matlab є так звана *сегментація пам'яті*. Так, якщо безпосередньо після запуску середовища Matlab об'єм змінної пам'яті може складати 1 Гбайт і більше, то після активної роботи із змінним об'ємом в десятки-сотні мегабайт цей об'єм знижується на один-два порядки, що робить подальшу роботу з такими масивами неможливою. Причому після перезавантаження середовища програмування здатність створювати великі змінні об'єми відновлюється. Тому було запропоновано створити програму таким чином.

Допоміжна програма-скрипт формує вхідні дані і структури змінних налаштувань, необ-

хідні для запуску OCAVA_PPA. Потім для виконання основної програми запускається ще одна копія MatLab з використанням можливості команди «dos». У новій копії виконується перевірка доступності необхідного простору оперативної пам'яті з використанням команди «memog». Завершення роботи основної програми є виконання команди «exit», що закриває додаткову копію MatLab. Крім того, подібний підхід дозволяє виконувати обробку декількох файлів одночасно на багатопроекторних комп'ютерах із запуском декількох незалежних копій основної програми.

Застосування Embedded MatLab

Embedded MatLab [26] є пакетом розширення, котрий дає можливість (при дотриманні синтаксису, схожого, але все таки відмінного від традиційного MatLab) створювати програми, які вбудованими засобами системи програмування перетворюють початковий код на мові C і компілюються в C-бібліотеку. Швидкість виконання такої бібліотеки, що найчастіше виконує рутинні алгебраїчні і тригонометричні операції, може бути в 2—3 рази, а іноді і на порядок вище, ніж у MatLab-прототипа.

Були розроблені процедури, що дозволяють компілювати такі C-бібліотеки «на льоту» при виконанні програми. Необхідність цього обумовлена тим, що розмірність і типи усіх змінних для процедур, написаних із застосуванням Embedded MatLab, мають бути обов'язково визначені (при цьому час, що витрачається на компіляцію, значно менший, ніж виграш часу від використання Embedded MatLab).

Слід зазначити, що використання описаного вище підходу, як показали дослідження, виправдані лише для процедур зі значним об'ємом однотипних обчислень, наприклад, у вкладених циклах.

Верифікація і контроль роботоздатності ПАК OCAVA

З метою контролю ефективної роботи ПАК OCAVA була проведена контрольна обробка

спостережень мережі українських перманентних референцних станцій за 7 листопада 2010 р. (день року 311) з темпом вимірювальної інформації 1 Гц: GLSV, CNIV, SMLA, MIKL, POLV, KHAR, SURE, KTVL.

На першому етапі була виконана попередня обробка спостережень за допомогою OCAVA_PPA у режимі GPS, а потім у режимі GPS + ГЛОНАСС. На другому етапі як вихідні дані, так і спостереження після препроцесингу були оброблені ПЗ «GrafNet 8.10.3124» у режимі GPS, а потім у режимі GPS+ГЛОНАСС.

У результаті після урівнювання були отримані 4 набори результатів:

- 1) вихідні дані, тільки GPS;
- 2) вихідні дані, GPS+ГЛОНАСС;
- 3) дані після препроцесингу, тільки GPS;
- 4) дані після препроцесингу, GPS+ГЛОНАСС.

Порівняння результатів показало, що розбіжність результатів оцінок координат для варіантів 1, 2, 3 лежить у межах 5—8 мм щодо еталонних координат. Для варіанта 4 спостерігалися грубі промахи (сотні кілометрів).

Після детального дослідження було встановлено, що промахи виникають у випадку обробки GPS+ГЛОНАСС-спостережень після препроцесингу з використанням ПЗ «GrafNet 8.10.3124», де встановлений режим обробки із застосуванням точних ефемерид. Після відключення режиму роботи з точними ефемеридами результати для варіантів 1, 2, 3, 4 стали дуже близькі (відхилення на міліметровому рівні).

Таким чином, було показано, що RINEX-файли, сформовані з використанням ПАК OCAVA_PPA (версія а.0.7) придатні для обробки сторонніми програмними продуктами. Надалі необхідно провести аналогічне тестування з використанням як наукових, так і прикладних пакетів післясеансної обробки ГНСС-спостережень. Це дасть змогу виявити можливі помилки в ПЗ OCAVA, а також виробити рекомендації щодо використання цих програмних продуктів разом з даними препроцесингу.

Плани впровадження і подальшого розвитку ПАК ОСТАВА_PPA

В ГАО НАНУ завершено створення Центру автоматизованої обробки ГНСС-спостережень, метою якого є надання таких послуг:

- ✦ аналіз якості спостережень споживачів;
- ✦ доступ до спостережень мережі базових станцій, що пройшли попередній контроль якості;
- ✦ автоматизована обробка статичних і кінематичних спостережень споживачів з метою отримання високоточних координатних рішень;
- ✦ перерахунок систем координат та ін.

Найважливішою складовою програмного комплексу створеного Центру обробки спостережень є ПАК ОСТАВА, який виконуватиме обробку двочастотних і одночастотних ГНСС-спостережень (GPS+ГЛОНАСС+ SBAS) мережі перманентних референсних станцій і спостережень споживачів України, виконаних у статичному і кінематичному режимах вимірів. Відмінною особливістю обчислювального комплексу Центру обробки є можливість отримання сантиметрової точності позиціонування (як у статичному, так і в кінематичному режимах) за результатами спостережень порівняно недорогого одночастотного геодезичного ГНСС-устаткування, яке нині дуже широко використовується в Україні при виконанні геодезичних, кадастрових і інших робіт, де вимагається висока точність координатних визначень.

Подальший розвиток описаного програмного комплексу пов'язаний з розширенням функціональних можливостей ПАК ОСТАВА_PPA шляхом удосконалення існуючих, створення і впровадження нових методів і алгоритмів попередньої обробки і аналізу ГНСС-спостережень.

Розроблений ПАК ОСТАВА_PPA не має аналогів в Україні, є конкурентоздатним унікальним науково-технічним продуктом багаторічної розробки і досліджень творчого колективу авторів. Цей комплекс дозволив виконати цілий ряд актуальних науково-практичних досліджень в області розробки нових ефек-

тивних методів і алгоритмів точного ГНСС-позиціонування.

2. ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНИЙ КОМПЛЕКС ОБРОБКИ ФАЗОВИХ ГНСС-СПОСТЕРЕЖЕНЬ РІЗНИЦЕВОЇ ЧАСТОТИ ДЛЯ ВИСОКОТОЧНОГО КІНЕМАТИЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

Визначення високоточного місцеположення (*позиціонування*) по сигналах ГНСС неможливе без використання фазових спостережень. Головними задачами обробки фазових ГНСС-спостережень є усунення циклічних/напівциклічних стрибків і розрізнення фазової неоднозначності [27, 28, 29]. Задача розрізнення фазової неоднозначності (РФН) полягає у визначенні початкової кількості цілих циклів для кожної ділянки спостережень групи супутників відносно одного (будь-якого) з них (референсного). Проблема РФН може бути вирішена однозначно тільки для т. з. подвійних різниць фазових спостережень при дотриманні певних умов і обмежень [27]. При цьому вважається, що для кожної ділянки спостережень фазові стрибки виключені, інакше ділянка із стрибками має бути розбита на дві або більше окремих ділянок з безперервною зміною фази. Наявність неусунених фазових стрибків призводить до збільшення кількості початкових неоднозначностей, зменшення інтервалів накопичення цільових функцій і, відповідно, до зменшення надійності РФН. Тому усунення фазових стрибків і розрізнення початкової фазової неоднозначності повинні вирішуватися у взаємозв'язку. Правильне узгодження початкових неоднозначностей (кількості цілих циклів) в подвійних різницях фазових спостережень — між приймачами (одинарні диференціальні різниці) і між супутниками поточного робочого сузір'я — гарантує отримання сантиметрової, а у ряді випадків і міліметрової точності як у статичному, так і в кінематичному (для рухомих об'єктів) режимах позиціонування.

Нами розглядаються результати розробки і дослідження одного з методів РФН для лінійної комбінації (ЛК) фазових GPS-спостережень

різницевої частоти — Wide Lane (WL) з довжиною хвилі $\lambda = 86,2$ см [27, 29, 30]. При цьому розглядається задача не лише оцінки надійності РФН для цієї лінійної комбінації, але й оцінки потенційних можливостей використання фазових GPS-спостережень різницевої частоти для високоточного позиціонування, зокрема при виконанні аерофотозйомки і інших геодезичних робіт в кінематичному режимі. Подальший виклад ведеться в припущенні, що фазові спостереження безперервні, тобто циклічні і напівциклічні фазові скачки GPS-спостережень обох частот усунені.

Відомим підходом до вирішення задачі РФН є підхід, заснований на комбінуванні фазових і кодових спостережень, тобто використанні комбінації Melbourne-Wübbena (MW) [27, 29, 30, 31]. Особливість цієї відомої комбінації полягає в тому, що вона є «безгеометричною», не містить ефемеридно-часових, тропосферних і іоносферних складових помилок спостережень, а відповідні подвійні різниці ЛК MW не містять і апаратних затримок, але містять шукану фазову неоднозначність WL у присутності багатопроменевої і шумів кодових спостережень. Тому, усереднюючи комбінацію MW (подвійну різницю) за часом, можна оцінити цілочисельну неоднозначність як континуальну величину, а потім округлити її до найближчого цілого значення [27]. Оцінка неоднозначностей лінійних фазових комбінацій WL з використанням кодово-фазових комбінацій MW дозволяє перейти до однозначних фазових WL-спостережень [30, 31]. Але проблема полягає в тому, щоб отримати достовірну оцінку в умовах багатопроменевої складової кодових спостережень, що повільно змінюється, особливо коли спостереження виконуються в різних умовах і при різних налаштуваннях GPS-приймачів. Необхідно відмітити, що в доступних авторах джерелах відсутні які-небудь достатні відомості і рекомендації за рішенням цієї проблеми у викладеній постановці. В цілому, багато досліджень, присвячених задачам РФН ГНСС-спостережень, в тій або іншій мірі розглядають

задачу і умови верифікації отриманого рішення РФН, тобто надійності оцінювання цілочисельних змінних, оскільки ціна помилки навіть в один фазовий цикл — багатократне погіршення точності координатного рішення.

З метою дослідження можливостей використання кодово-фазових комбінацій MW раніше були проведені спеціальні дослідження, в результаті яких був запропонований надійний алгоритм РФН для ЛК WL і процедура верифікації оцінки цілочисельних неоднозначностей подвійних різниць фазових спостережень різницевої частоти [31]. Обмеженням запропонованого методу є те, що для вирішення задачі РФН використовувалися традиційні подвійні різниці фазових спостережень, тоді як формування і обробка таких різниць стосовно ЛК MW призводить до часткової втрати інформації, оскільки ділянки спільної видимості референсного і поточного супутників, як правило, мають меншу протяжність, чим кожна з ділянок окремо. Це за певних умов призводить до недостовірної оцінки неоднозначностей і зменшення надійності РФН. Тому з точки зору задачі РФН WL з використанням кодово-фазових комбінацій MW представляє значний інтерес розробка і дослідження ефективніших методів і алгоритмів рішення цієї задачі, збільшення надійності РФН, а також рішення задачі позиціонування з максимальною досяжною точністю і достовірністю з використанням WL-комбінації.

2.1. Короткий опис розробленого програмно-алгоритмічного комплексу для вирішення задач високоточного кінематичного позиціонування з використанням фазових GPS-спостережень різницевої частоти. Деякі особливості запропонованої процедури обробки двочастотних GPS-спостережень

Розроблений програмний пакет використовує як вхідні дані результати попередньої обробки GPS-спостережень, отримані з використанням вітчизняного програмного комплексу OCTAVA_PPA [10–16].

До складу алгоритмічного і програмного забезпечення входять основні модулі обробки GPS-спостережень. Трьохетапна процедура РФН фазових WL-спостережень включає такі алгоритми:

- ✦ розрізнення фазової неоднозначності WL-спостережень з використанням лінійної комбінації Melbourne-Wübbena і верифікації отриманого рішення;
- ✦ розрізнення фазової неоднозначності WL-спостережень, для яких запропонований спосіб обробки ЛК Melbourne-Wübbena не дозволив досягти надійного рішення задачі РФН (при обробці використовуються тільки фазові WL-спостереження і оцінюються як континуальні, так і цілочисельні параметри);
- ✦ верифікації отриманих оцінок фазової неоднозначності мережним методом (зрівнювання цілочисельних неоднозначностей шляхом замикання контурів наземної конфігурації станцій і/або поточного супутникового сузір'я).
- ✦ зваженого МНК-рішення [32] навігаційної задачі з використанням фазових WL-спостережень і розрахунку кореляційної матриці погрішностей оцінюваних координатно-часових і швидкісних параметрів.

Розроблені алгоритми і програмні модулі мають такі істотні особливості:

- ✦ при рішенні задачі РФН з використанням ЛК MW не вимагається формування подвійних різниць спостережень, оскільки запропоновано метод РФН з формуванням т. з. *віртуальних* подвійних різниць спостережень (див. підрозділ 2), а для оцінки надійності і верифікації РФН застосовуються спеціально розроблені алгоритми, що використовують техніку автокореляційного аналізу кодово-фазових ЛК MW [31];
- ✦ розроблені і досліджені алгоритми РФН з використанням ЛК MW мають універсальний характер і можуть бути застосовані для «мережевого» розрізнення фазової неоднозначності — стосовно спостережень мережі

наземних GPS-станцій і груп «роверів» (статичні і рухомі об'єкти);

- ✦ розроблений підхід до верифікації оцінок фазових неоднозначностей шляхом порівнювання цілочисельних неоднозначностей шляхом замикання контурів (трикутників) наземної конфігурації станцій і/або поточного супутникового сузір'я з обмежувачими умовами;
- ✦ використання розроблених алгоритмів розрахунку і обліку в WL-спостереженнях іоносферних затримок з використанням моделі іоносфери Міжнародної ГНСС-служби (IGS) дозволяє підвищити надійність розрізнення фазових неоднозначностей WL-спостережень навіть на коротких часових ділянках і базових відстанях до 150—200 км.

На рис. 3 представлена схема обробки спостережень Wide Lane, яка реалізована у програмно-алгоритмічному комплексі.

2.2. Трьохетапна процедура розрізнення фазової неоднозначності спостережень різницевої частоти

Трьохетапна процедура РФН

З урахуванням обмеження при використанні подвійних різниць фазових спостережень була запропонована трьохетапна процедура РФН WL, яка включає такі алгоритми РФН:

- ✦ універсальний алгоритм РФН в однобазовому і мережевому режимах спостережень з використанням ЛК MW;
- ✦ алгоритм РФН WL-спостережень, для яких на попередніх етапах обробки ЛК MW не досягнуте надійне рішення задачі РФН;
- ✦ мережний алгоритм верифікації оцінок цілочисельної фазової неоднозначності.

Запропонований універсальний алгоритм РФН заснований на переформатуванні системи рівнянь і формуванні т. з. *віртуальних подвійних різниць*. Алгоритм РФН WL-спостережень, що є *першим етапом* обробки спостережень, включає наступні дії.

1. Формуємо, використовуючи спрощений запис моделі спостережень, ЛК WL $\hat{L}_{wk}^j(t)$ фазо-

вих спостережень, Narrow Lane (NL) $\hat{S}_{Nk}^j(t)$ кодових спостережень і потім комбінація Melbourne — Wübbena $\hat{\mu}_k^j(t)$ на трасі «супутник—приймач» (2):

$$\begin{cases} \hat{L}_{Wk}^j(t) = F_k^j(t) + \gamma \cdot I_k^j(t) - N_{Wk}^j \cdot \lambda_W + \Delta c_W + \delta L_{Wk}^j(t) \\ \hat{S}_{Nk}^j(t) = F_k^j(t) + \gamma \cdot I_k^j(t) + \Delta c_N + \delta S_{Nk}^j(t); \end{cases} \quad (1)$$

$$\hat{\mu}_k^j(t) = \hat{L}_{Wk}^j(t) - \hat{S}_{Nk}^j(t) = N_{Wk}^j \cdot \lambda_W + \Delta c_\mu + \mu_{NMPk}^j(t), \quad (2)$$

де $F_k^j(t)$ — функція змінних, які не залежать від частоти; $\gamma = \lambda_2 / \lambda_1$, де $\lambda_{1,2}$ — довжини хвиль на несучих частотах GPS; $I_k^j(t)$ — абсолютна величина іоносферної затримки в спостереженнях на частоті L1 GPS; $N_{Wk}^j(t)$ — початкові неоднозначності фазових спостережень на різницевої частоті; $\Delta c_W, \Delta c_N, \Delta c_\mu$ — невідомі величини (постійні на інтервалі спостережень), пропорційні затримкам в аналогових трактах j -го супутника і k -го приймача; $\delta L_{Wk}^j(t), \delta S_{Nk}^j(t), \mu_{NMPk}^j(t)$ — похибки, обумовлені багатопророменовістю поширення навігаційних сигналів і шумами спостережень.

2. Оцінюємо зважене середнє значення $\hat{\mu}_k^j(t)$ для кожної траси «супутник—приймач» із застосуванням алгоритмів оцінки і верифікації, що враховують автокореляційні властивості кожної послідовності. Для верифікації отриманого рішення і, відповідно, надійності РФН розраховуємо дисперсію $\sigma_{\mu_k}^2$ уточненого середнього значення;

$$\hat{\mu}_k^j = \frac{1}{\sum p_k^2(t)} \cdot \sum p_k^2(t) \cdot \hat{\mu}_k^j(t), \quad (3)$$

де $p_i(t)$ — вагові коефіцієнти.

Розрахунок $\sigma_{\mu_k}^2$ справедливий, якщо беруться незалежні відліки функції середньоквадратичного відхилення [32]. Для визначення кількості незалежних відліків визначаються інтервали кореляції для кожної з послідовностей. Вибірка значень p_k через інтервал кореляції t_{corr} дозволяє вважати ці величини некорельованими — $\sigma_{\mu_k}^2 = \left[\sum p_k^2(t_{corr}) \right]^{-1}$. Після розрахунку дисперсії визначаємо максимальну похибку $\hat{\mu}_k^j$ як

$\Pi_{\mu_k} = 3 \cdot \sigma_{\mu_k}$ і, порівнюючи розраховану похибку зі встановленим порогом $(5/12) \cdot \lambda_W$, приймаємо рішення про достовірність отриманої оцінки.

3. Після отримання набору оцінок $\hat{\mu}_k^j$ і їх похибок Π_{μ_k} переходимо до алгоритму формування «віртуальних» подвійних різниць на прикладі двох приймачів. Вибираємо референцний супутник (ділянку) і відносно нього трансформуємо систему рівнянь таким чином (4):

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_i^{(j)} &= \omega_1^{(1)} + \nabla \beta_1^{(j,1)} + \Delta \alpha_{i1}^{(1)} + \nabla \Delta N_{i1}^{(j,1)} \cdot \lambda_W, \\ (i = \overline{2, m}; j = \overline{2, n}); \hat{\mu}_i^{(j)} &= \omega_1^{(1)}, (i = 1; j = 1); \\ \hat{\mu}_i^{(j)} &= \omega_1^{(1)} + \Delta \alpha_{i1}^{(1)}, (i = \overline{2, m}; j = 1); \\ \hat{\mu}_i^{(j)} &= \omega_1^{(1)} + \nabla \beta_1^{(j,1)}, (i = 1; j = \overline{2, n}); \end{aligned} \quad (4)$$

де $\omega_1^{(1)} = N_{W1}^{(1)} \cdot \lambda_W + \Delta c_{WN1}^{(1)}$; $\Delta \alpha_{21}^{(1)} = \Delta N_{W21}^{(1)} \cdot \lambda_W + \Delta c_{WN21}^{(1)}$; $\nabla \beta_1^{(j,1)} = N_{W1}^{(j)} \cdot \lambda_W - N_{W1}^{(1)} \cdot \lambda_W - \Delta c_{WN}^{(j)} + \Delta c_{WN}^{(1)}$, $\nabla \Delta N_{W21}^{(j,1)} = [N_{W2}^{(j)} - N_{W1}^{(j)}] - [N_{W2}^{(1)} - N_{W1}^{(1)}]$.

4. Формуємо вектор вхідних параметрів для процедури РФН. Для однобазового режиму він представляється у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_{[2-n]} &= \bar{F} \left\{ \begin{matrix} \omega_1, \Delta \alpha_{21}, \nabla \beta, \nabla \Delta \bar{N} \\ [1] \quad [1] \quad [n-1] \quad [n-1] \end{matrix} \right\} + \delta \bar{\mu}, \quad (5) \\ K_\mu &= \text{diag} \{ \sigma_{\mu_1}^2, \sigma_{\mu_2}^2, \dots, \sigma_{\mu_n}^2 \} \end{aligned}$$

де K_μ — кореляційна матриця вхідних параметрів.

5. Формуємо МНК-оцінку вихідних параметрів:

$$\hat{\theta} = [A^T K_\mu^{-1} A]^{-1} A^T K_\mu^{-1} \hat{\mu}, \quad (6)$$

де $\hat{\theta} = \left\| \omega_1 \Delta \alpha_{21} \nabla \beta^{(2,1)} \dots \nabla \beta^{(n,1)} \nabla \Delta N_{21}^{(2,1)} \dots \nabla \Delta N_{21}^{(n,1)} \right\|^T$,

$K_0 = [A^T K_\mu^{-1} A]^{-1}$; A — матриця частинних похідних вимірюваних параметрів по параметрах, що визначаються; $\hat{\theta}$ — вектор вихідних параметрів; K_0 — кореляційна матриця похибок вихідних параметрів.

6. Для отриманих оцінок $\nabla \Delta \hat{N}_{21}^{(n,1)}$ обчислюємо максимальну похибку згідно з алгоритмом верифікації [31], з урахуванням залишку від округлення до найближчого цілого числа. У разі достовірності рішення оцінка $\nabla \Delta \hat{N}_{21}^{(n,1)}$ округляється до цілого числа і враховується в

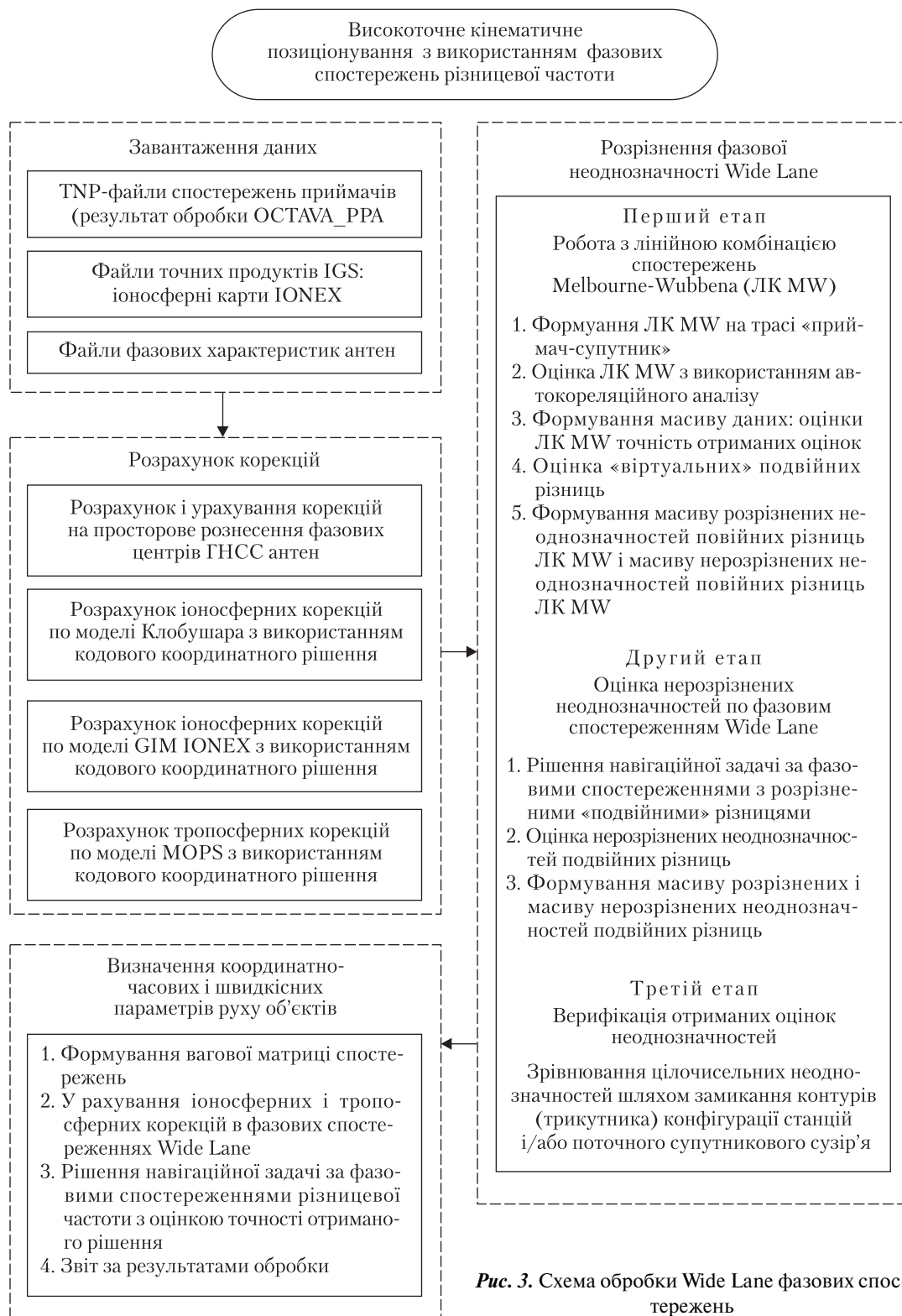


Рис. 3. Схема обробки Wide Lane фазових спостережень

(4), після чого формується новий вектор $\hat{\theta}$, при цьому матриця K_{μ} залишається незмінною.

Результати експериментальних досліджень підтвердили придатність алгоритму РФН для ефективного використання і показали, що використання підходу «віртуальних» подвійних різниць дає можливість підвищити надійність РФН в порівнянні з традиційним підходом.

За результатами оцінки вектора $\hat{\theta}$ згідно з виразом (4) формується вектор поправок в WL-спостереження $\hat{\mu}_{cor}$. У випадку, якщо застосування вищеописаного алгоритму не дало можливості отримати усі достовірні оцінки $\nabla \hat{N}_{21}^{(n,1)}$, вони включаються в число оцінюваних параметрів при подальшій обробці.

Другим етапом РФН WL є підхід, що припускає обробку одинарних різниць WL-спостережень і отримання спільної оцінки континуальних параметрів, а також неоднозначностей $\nabla \hat{N}_{21}^{(n,1)}$, що залишились нерозрізненими. У цьому випадку отримані континуальні МНК-оцінки неоднозначностей округляються і також піддаються верифікації на достовірність.

Для верифікації отриманих оцінок $\nabla \hat{N}_{21}^{(n,1)}$ на третьому етапі використовується підхід, що передбачає застосування мережевого методу — зрівнювання цілочисельних неоднозначностей шляхом замикання контурів (трикутників) конфігурації станцій і/або поточного супутникового сузір'я. Обмежуюча умова для трикутника з вершинами i, j, k ($k > j > i$) має вигляд:

$$N_{ji} + N_{kj} + N_{ik} = 0. \quad (7)$$

Цей спосіб дає можливість перевірити «замикання» усіх трикутників і визначити нев'язки після РФН WL. У випадку, коли які-небудь нев'язки не дорівнюють нулю — знайти і виправити зміщення в оцінках $\nabla \hat{N}_{21}^{(n,1)}$ сторін. Після чого вони враховуються в (4) і вектор $\hat{\mu}_{cor}$ уточнюється.

Обмеження і можливості розвитку методу позиціонування з використанням фазових GPS-спостережень різницевої частоти

Відомими обмеженнями розглянутого методу позиціонування з використанням фазових

WL-спостережень є менша точність координатних визначень порівняно з використанням початкових фазових спостережень на двох частотах L1 і L2. Це обумовлено, *по-перше*, збільшеними (приблизно у 4 рази) флуктуаційними і багатопроблемними складовими похибок спостережень ЛК WL і, *по-друге*, необхідністю використання моделей для іоносферної корекції, оскільки фазова комбінація WL є, по суті, одночастотною. Використати «безіоносферні» комбінації фазових L1- і L2-спостережень в спостереженнях WL безпосередньо неможливо, оскільки це вимагає вирішити задачу РФН для спостережень обох частот, що є окремою складною задачею.

Величезною перевагою використання односторонніх WL-спостережень є забезпечення високої надійності і збіжності рішення задачі РФН для фазових L1- і L2-спостережень, тобто можна розглядати рішення задачі РФН для WL-спостережень як проміжне, що дозволяє істотно обмежити невизначеність неоднозначності L1- і L2-спостережень для досягнення цілочисельного фінального рішення, якщо це можливо. У разі неможливості отримання цілочисельного двочастотного рішення на практиці використовують або WL-рішення, або т. з. «плаваюче» (float) рішення, яке вимагає накопичення спостережень на тривалих інтервалах часу. Крім того, float-рішення є набагато менш точним, чим WL-рішення, у разі кінематичних вимірів.

Слід зазначити і відому перевагу використання ЛК WL/MW для вирішення задач РФН практично на будь-яких (до 4 тис. км і навіть більше) базових відстанях, а також для забезпечення отримання попереднього високоточного рішення методом точного позиціонування — PPP (Precise Point Positioning). Це досягається за рахунок описаних вище особливостей ЛК MW і за рахунок важливої властивості ЛК WL. Ця комбінація вільна від впливу т. з. *wind-up*-ефекту, що характеризується додатковим набігом фаз L1- і L2-спостережень за рахунок переміщення супутників відносно приймальної антени GPS-приймача (або обертання антени навколо своєї геометричної осі) [27].

2.3. Алгоритми високоточного позиціонування і врахування погрешностей ГНСС-спостережень

Для вирішення задачі координатно-часових визначень об'єктів застосовуємо традиційну процедуру зваженого ітераційного МНК-рішення навігаційної задачі з використанням диференціальних однозначних фазових спостережень:

$$\hat{\theta}_{(L+1)} = \hat{\theta}_{(L)} + \Delta\hat{\theta}_{(L+1)}, \quad (8)$$

$$\Delta\theta_{(L+1)} = [A_{(L)}^T W A_{(L)}]^{-1} A_{(L)}^T W [\hat{Q} - F(\hat{\theta}_{(L)})], \quad (9)$$

де $\hat{\theta}$ — вектор оцінюваних параметрів; \hat{Q} — вектор результатів вимірів; A — матриця похідних, що оцінюються по вимірюваним параметрам; W — вагова матриця вимірюваних параметрів, де $W = K^{-1}$; $F(\hat{\theta}_{(L)})$ — вектор вимірів, розрахований за моделлю спостережень (1); K — кореляційна матриця вимірюваних параметрів, $K = \text{diag} \{ \sigma_1^2(t), \sigma_2^2(t), \dots, \sigma_n^2(t) \}$, L — номер ітерації.

Для оцінки точності координатних визначень запропонована модель похибок спостережень враховує такі джерела і складові:

- ✦ ефемеридні похибки $\sigma_{\text{еф}}(t)$;
- ✦ похибки, обумовлені неточним врахуванням тропосферної затримки навігаційних сигналів $\sigma_{\Delta T_T}(t)$;
- ✦ похибки, обумовлені неточним врахуванням іоносферної затримки навігаційних сигналів $\sigma_{\Delta I}(t)$;
- ✦ похибки, обумовлені шумом і багатопроменевістю WL-спостережень $\sigma_{\text{ш/бп}}(t)$;
- ✦ похибки, обумовлені неточним врахуванням варіацій фазових характеристик приймальних GPS-антен $\sigma_{\text{вфц}}(t)$;
- ✦ залишкові похибки координатної прив'язки приймальної антени базової станції $\sigma_{\text{БС}}(t)$.

Ця модель похибок була запропонована для оцінки апріорної точності отриманого рішення при обробці однозначних фазових WL-спостережень, де для основних джерел погрешностей спостережень були прийняті такі величини середньоквадратичних похибок (СКП): $\sigma_{\text{еф}}(t) =$

$= 0,015$ м, $\sigma_{\text{ш/бп}}(t) = 0,025$ м, $\sigma_{\text{вфц}}(t) = 0,01$ м, $\sigma_{\text{БС}}(t) = 0,01$ м. Для оцінки СКП, обумовлених тропосферною і іоносферною затримками сигналів, були підібрані процентні долі від диференціальних корекцій, розрахованих за моделями $\sigma_{\Delta T_T}(t) = k_{T_T} \cdot \Delta T_T$ та $\sigma_{\Delta I}(t) = k_{\text{ION}} \cdot \Delta I$, де k_{T_T} , k_{ION} — коефіцієнти, вибрані апріорі ($k_{T_T} = 0,05 \div 0,1$; $k_{\text{ION}} = 0,3 \div 0,4$). У результаті для кожного супутника розраховується сумарна дисперсія похибок спостережень:

$$\sigma_n^2(t) = \sigma_{\text{еф}}^2(t) + \sigma_{\text{ш/бп}}^2(t) + \sigma_{\text{вфц}}^2(t) + \sigma_{\text{БС}}^2(t) + \sigma_{\Delta I}^2(t) + \sigma_{\Delta T_T}^2(t). \quad (10)$$

Після вирішення координатної задачі за результатами псевдошвидкісних вимірів визначаються складові вектора швидкості об'єкту.

Для координатних визначень у режимі післясеансної обробки спостережень з метою компенсації основних джерел варто використовувати дані, що надаються міжнародними ГНСС-центрами: точні оцінки координат супутників, відхилень шкал часу супутників відносно системної шкали, глобальні карти електронної концентрації в іоносферному шарі GIM IONEX та ін. Використання моделі GIM IONEX при обробці спостережень є доцільним, оскільки ця модель дозволяє точніше компенсувати іоносферні варіації (рис. 4).

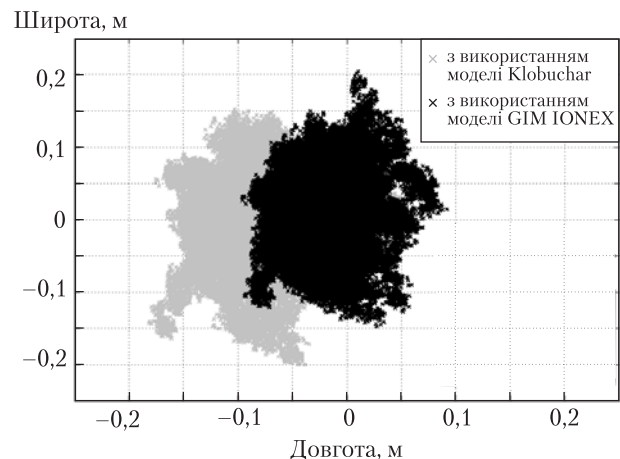


Рис. 4. Відхилення оцінок планових координат станцій PRYL від еталонних значень при обробці спостережень відносно станції GLSV

Для вирішення задачі оцінки і врахування фазових характеристик ГНСС-антен запропоновано простий в реалізації спосіб, який дає можливість без додаткових матеріальних витрат і дорогого спеціалізованого устаткування провести оцінку фазових калібровок ГНСС-антен для конкретних умов експлуатації і уточнити відхилення положення середнього фазового центру антени відносно референційної точки антени [33, 34]. При обробці ЛК GPS-спостережень на частотах L1, L2 GPS необхідно враховувати те, що для кожної з частот положення і варіації фазових центрів (ФЦ) відрізняються і при лінійному комбінуванні величини похибок можуть досягати 10—12 см.

Для врахування відхилень між ФЦ використано алгоритм розрахунку поправок, що дає можливість перенести спостереження на частоті L2 GPS до ФЦ на частоті L1 GPS. Вхідними даними, необхідними для функціонування алгоритму, є:

- ✦ вектор відхилень фазового центру на L2 відносно ФЦ на L1 в місцевій системі координат;
- ✦ кут місця і азимут, під яким навігаційний космічний апарат видно для приймача;
- ✦ інформація про кутову орієнтацію антени;
- ✦ калібровка ГНСС-антени.

Вихідними даними алгоритму є величина поправки для фазових центрів і скоректовані спостереження на частоті GPS L2.

2.4. Результати експериментального тестування розробленого програмно-алгоритмічного комплексу високоточного позиціонування з використанням фазових GPS-спостережень різницевої частоти

Методика оцінки точності координатних визначень з використанням розробленого методу і алгоритмів розрізнення фазової неоднозначності і високоточного позиціонування

Для натурального тестування запропонованих алгоритмів і процедур обробки GPS-спостережень були використані декілька сеансів реальних кінематичних спостережень при проведенні аерофотозйомки на борту літальних апаратів (гелікоптер, літак) і спостереження наземних роверів і базових станцій перманентної мережі. При проведенні тестування і дослідження розроблених процедур обробки вимірів виконувалися за такою методикою:

✦ спостереження підлягають попередній обробці з використанням програмного забезпечення OSTA_VA_PPA [10-16], яке дозволяє оцінити якість використовуваних кодових і фазових спостережень, усунути циклічні фазові стрибки, відновити безперервність фазових спостережень;

✦ обробка спостережень з метою отримати високоточні (з сантиметровою точністю) еталонні оцінки координат кінематичних об'єктів, станцій і роверних пунктів з використанням ліцензійного ПЗ GrafNav/GrafNet (NovAtel Inc./ Waypoint, Канада);

✦ виявлення фазових неоднозначностей різницевої частоти з використанням ЛК Melbourne-Wübbena методом формування «віртуальних» подвійних різниць;

✦ розрізнення неоднозначностей, для яких запропонований спосіб обробки ЛК Melbourne-Wübbena не дав можливості досягти надійного рішення задачі РФН (на цьому етапі для обробки використовуються тільки фазові спостереження WL і оцінюються як континуальні, так і цілочисельні змінні);

✦ перевірка (верифікація) отриманих оцінок неоднозначностей мережевим методом — урівнюванням цілочисельних неоднозначностей шляхом замикання контурів наземної конфігурації станцій і/або поточного супутникового сузір'я;

✦ формування і введення вектора поправок у фазові WL-спостереження;

✦ вирішення навігаційної задачі з апіорною оцінкою точності з використанням однозначних фазових WL-спостережень (для компенсації іоносферною складовою погрішностей використовуються моделі Klobuchar і GIM IONEX; для компенсації тропосферною складовою погрішностей використовується модель MOPS [35]);

✦ обчислення відхилень (нев'язок) отримано-

го WL-рішення від еталонного з розрахунком статистичних характеристик отриманого рішення; порівняння апіорної і апостеріорної оцінок точності позиціонування.

Формування еталонних вимірjовальних оцінок координат з використанням апробованого зарубіжного програмного забезпечення

Нижче наведені приклади результатів обробки кінематичних спостережень, виконаних на борту гелікоптера за 179-й день 2006 р. і літака за 250-й день 2006 р. Максимальне віддалення гелікоптера від базової станції (БС) склало приблизно 96 км, максимальна висота польоту — близько 800 м відносно висоти установки антени БС. Для літака максимальне віддалення від БС склало приблизно 150 км, висота польоту відносно БС — орієнтовно 3000 м. Тривалість сеансу спостережень для приймача на борту гелікоптера склала приблизно 3,5 год, а на борту літака — майже 2,5 год.

Для роботи із статичними спостереженнями використані результати обробки спостережень станцій перманентної мережі України (GLSV (Київ/Голосіїв); PRYL (Прилуки, Чернігівська обл.); SMLA (Сміла, Черкаська обл.)) і роверних пунктів, розгорнутих на території Черкаської (0001) і Чернігівської (0006) областей за 346-й день 2008 р.

У табл. 1 наведені еталонні оцінки координат фазових центрів антен на частоті L1 GPS для станцій і роверних пунктів. У табл. 2 наведені довжини базових ліній між пунктами мережі.

Порівняльний аналіз отриманих результатів натурних експериментів. Порівняння апіорної і апостеріорної оцінок точності позиціонування

Для обробки спостережень станцій GLSV, PRYL, SMLA було обрано період часу, що не містить переривів у вимірах в усіх сеансах, а саме від 00:00 до 19:00. Сеанси вимірів містять дані для супутників з кутами над горизонтом більше 7.5°. Обробка вимірів здійснювалася за такою методикою. Незалежно оброблялися три

базові лінії: GLSV—PRYL, GLSV—SMLA, SMLA—PRYL. У кожному випадку координати базового приймача (GLSV, SMLA) фіксувалися і визначалися координати роверного приймача (PRYL, SMLA).

Обробка спостережень роверних пунктів 0006 і 0001 проводилася таким чином. Незалежно оброблялися базові лінії: GLSV (PRYL, SMLA) — 0006, GLSV (PRYL, SMLA)—0001 (статична сесія), GLSV—0001 (кінематична сесія).

Обробка спостережень кінематичних спостережень при аерофотозйомці проводилася відносно наземних базових пунктів, оцінки координат яких були визначені відносно найближчих базових перманентних станцій. У процесі обробки визначалися координати фазового центру антени роверного приймача, потім розраховувалися нев'язки отриманих рішень з еталонними координатами в геодезичних координатах ($\Delta B, \Delta L, \Delta H$) і в прямокутних координатах $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$.

Обробка усіх наборів спостережень проводилася з використанням моделей компенсації іоно-

Таблиця 1
Координати фазових центрів антен на частоті L1 для станцій і роверних пунктів

Станція / пункт	Координати ECEF XYZ		
	X, м	Y, м	Z, м
GLSV	3512888,9382	2068979,9650	4888903,2969
PRYL	3425673,1824	2174035,4809	4904999,9735
SMLA	3546267,7367	2204463,9913	4805379,2588
0001	3502498,7734	2160368,7961	4856832,0808
0006	3452744,1373	2106256,8263	4915492,4872

Таблиця 2
Довжини базових ліній, км

Станція / пункт	GLSV	PRYL	SMLA	0001
PRYL	137,5			
SMLA	162,6	159,3		
0001	97,4	91,7	80,7	
0006	75,6	73,7	174,7	94,0

сферної затримки Klobuchar і GIM IONEX.

Нижче (табл. 3—6) наведені нев'язки отриманих зважених усереднених координатних рішень для базових станцій і роверів (статичні сесії) в прямокутних координатах ΔX , ΔY , ΔZ і геодезичних координатах (ΔB , ΔL , ΔH).

Нев'язки отриманих WL-рішень відносно еталонного рішення для кінематичних спостережень (висота польоту $H = 800\text{--}3000$ м) по планових координатах в середньому складають 3—5 см, а по висоті — 5—7 см. Викиди понад 10 см обумовлені зміною геометричної конфігурації супутникового сузір'я і зростан-

ням флуктуацій іоносферної складової погрішності. Слід зазначити, що погіршення точності визначення висоти (при $H \approx 3000$ м) істотно збільшується завдяки впливу неточного врахування тропосферної похибки через значний перепад висот між приймачами.

Результати аналізу оцінок взаємних координат на наземних базових лініях до 200 км показали таке. При використанні моделі Klobuchar типове максимальне відхилення отриманих оцінок від еталонних значень по планових координатах не перевищувало 5 см, а по висоті — 9 см. При використанні моделі GIM IONEX максимальне відхилення оцінок по усіх координатах не перевищувало 4—5 см.

На основі результатів обробки спостережень з використанням запропонованого комплексу можна констатувати, що для позиціонування на базових відстанях 150—200 км можна досягнути субдециметрової/сантиметрової точності:

- ✦ статичного режиму позиціонування — 2—4 см (СКП) за всіма координатами;
- ✦ кінематичного режиму позиціонування — 3—5 см (СКП) за плановими координатами і 3—7 см (СКП) по висоті.

Порівняння апріорної і апостеріорної оцінок точності позиціонування з використанням модифікованого методу і алгоритмів обробки фазових спостережень показало, що апріорна оцінка точності координатно-часових визначень може бути використана як внутрішній надійний індикатор точності позиціонування.

Як приклад на рис. 5 наведені нев'язки координатного рішення відносно еталонних оцінок з результатами розрахунку апріорної оцінки точності (95 %) за моделлю похибок. На рис. 5 (а, в, д) наведені нев'язки отриманого рішення для кінематичних спостережень на борту гелікоптера (висота польоту — приблизно 800 м), а на рис. 5 (б, г, е) — для кінематичних спостережень на борту літака (висота польоту — приблизно 3000 м). Аналіз отриманих результатів показав, що розрахункова оцінка точності (95 %) для спостережень на борту літака відповідає апостеріорній оцінці точності,

Таблиця 3

Нев'язки координатних визначень в прямокутних координатах

Базова лінія	Координати, м	Використовувана іоносферна модель	
		Klobuchar	GIM IONEX (IGS)
GLSV — PRYL	ΔX	0,0664	0,0442
	ΔY	-0,0508	0,0041
	ΔZ	0,0425	0,0709
GLSV — SMLA	ΔX	-0,0039	-0,0252
	ΔY	-0,0777	-0,0491
	ΔZ	0,0440	-0,0126
SMLA — PRYL	ΔX	0,0774	0,0637
	ΔY	0,0462	0,0593
	ΔZ	0,0034	0,0828

Таблиця 4

Нев'язки координатних визначень в геодезичних координатах

Базова лінія	Координати, м	Використовувана іоносферна модель	
		Klobuchar	GIM IONEX (IGS)
GLSV — PRYL	ΔB	0,0047	0,0145
	ΔL	-0,0785	-0,0201
	ΔH	0,0511	0,0799
GLSV — SMLA	ΔB	0,0623	0,0276
	ΔL	-0,0640	-0,0284
	ΔH	0,0044	-0,0404
SMLA — PRYL	ΔB	-0,0675	-0,0135
	ΔL	-0,0025	0,0159
	ΔH	0,0597	0,1133

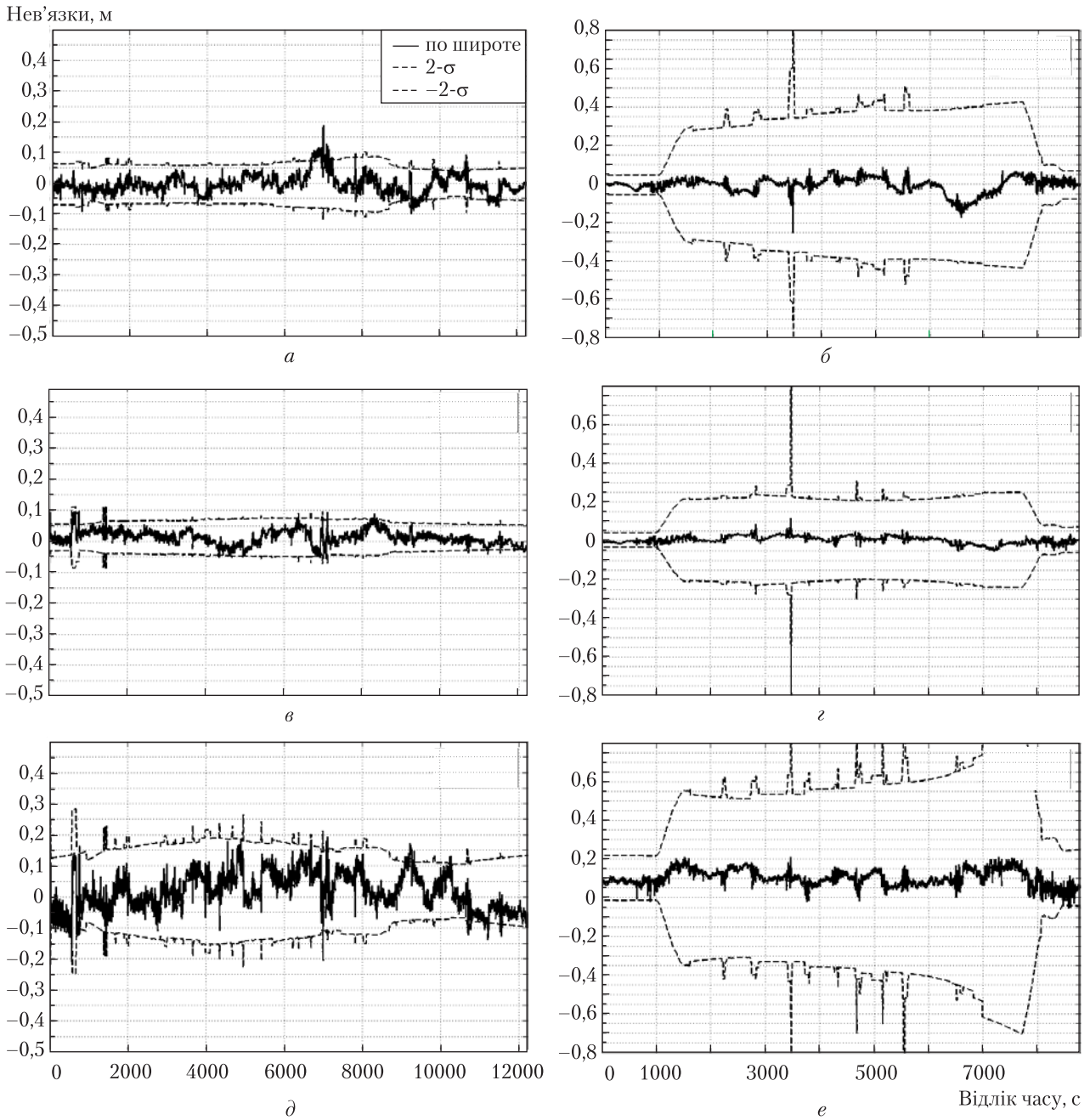


Рис. 5. Нев'язки отриманого WL-рішення відносно еталонних оцінок та апіорна оцінка точності рішення, розрахована за моделлю похибок, для спостережень на борту гелікоптера (*a*, *в*, *д*) і на борту літака (*б*, *г*, *е*)

яка була отримана шляхом обробки нев'язок отриманого рішення відносно еталонного. Оцінка точності рішення для спостережень на борту літака на момент підйому на висоту більш

ніж 1000 м не співпадає з апостеріорною оцінкою точності. Дана розбіжність обумовлена неповною компенсацією похибок, обумовлених затримкою сигналів у тропосфері.

Отже, можна зробити такі висновки:

1. Розроблено вітчизняний програмно-алгоритмічний комплекс високоточного позиціонування з використанням фазових GPS-спостережень різницевої частоти.

2. Запропоновані нова ефективна реалізація і розвиток диференціального методу і алгоритмів високоточного позиціонування з використанням фазових GPS-спостережень різницевої частоти. Розроблені алгоритми і програмні модулі, які об'єднані в трьохетапну процедуру РФН WL і мають ряд істотних особливостей, а саме:

- ✦ універсальний алгоритм РФН в однобазовому і мережевому режимах з використанням ЛК MW та формуванням т. з. *віртуальних* подвійних різниць спостережень;
- ✦ підхід до розрахунку граничних похибок оцінок фазових неоднозначностей за рахунок аналізу кореляційних властивостей багатопроменевої і шумової складових MW-спостережень;

- ✦ алгоритм РФН WL спостережень, що припускає обробку одинарних різниць WL-спостережень і отримання спільної оцінки континуальних параметрів і неоднозначностей, що залишилися нерозрізненими;

- ✦ алгоритм верифікації оцінок цілочисельної фазової неоднозначності, що базується на застосуванні урівнювання цілочисельних неоднозначностей шляхом замикання контурів наземної конфігурації станцій і/або поточного супутникового сузір'я.

3. Для оцінки точності визначення координатних параметрів запропонована модель похибок спостережень. Проведено порівняння апріорної і апостеріорної оцінок точності позиціонування з використанням модифікованого методу і алгоритмів обробки фазових спостережень. Показано, що апріорна оцінка точності координатно-часових визначень може бути внутрішнім надійним індикатором точності позиціонування.

Таблиця 5

Нев'язки координатних визначень у прямокутних і геодезичних координатах для пункту 0006

Координати, м	Використовувана іоносферна модель					
	Klobuchar			GIM IONEX (IGS)		
	GLSV-0006	PRYL-0006	SMLA-0006	GLSV-0006	PRYL-0006	SMLA-0006
ΔX	0,0674	-0,0312	0,15591	0,0332	-0,0157	0,0924
ΔY	-0,0281	0,0449	0,0995	-0,0020	-0,0046	0,0485
ΔZ	-0,0106	-0,0259	-0,0137	0,0254	-0,0316	0,0776
ΔB	-0,0399	-0,0139	-0,1519	-0,0051	-0,0115	-0,0315
ΔL	-0,0590	0,0546	0,0038	-0,0190	0,0121	-0,0067
ΔH	0,0189	0,0221	0,1064	0,0370	-0,0314	0,1260

Таблиця 6

Нев'язки координатних визначень у прямокутних і геодезичних координатах для пункту 0001

Координати, м	Використовувана іоносферна модель					
	Klobuchar			GIM IONEX (IGS)		
	GLSV-0001	PRYL-0001	SMLA-0001	GLSV-0001	PRYL-0001	SMLA-0001
ΔX	-0,0071	-0,1060	0,0037	-0,0199	-0,0584	-0,0337
ΔY	0,0597	-0,0002	0,0195	-0,0169	-0,0200	0,0005
ΔZ	0,0076	-0,0419	-0,0531	-0,0469	-0,0963	-0,0170
ΔB	0,0133	0,0421	-0,0445	-0,0104	-0,0159	0,0108
ΔL	-0,0512	0,0554	0,0146	-0,0039	0,0136	0,0181
ΔH	-0,0718	-0,0903	-0,0321	-0,0525	-0,1125	-0,0313

4. Виконано експериментальне тестування і проведені дослідження запропонованої трьох-етапної процедури РФН з використанням реальної вимірювальної інформації. Узагальнюючий аналіз потенційних можливостей запропонованого методу позиціонування показав, що при використанні фазових WL-спостережень надійно досягається повне розрізнення фазових неоднозначностей. Для кінематичних спостережень залежно від умов проведення вимірів досягається точність позиціонування 3—7 см (СКП) за всіма координатами на віддаленнях до 200 км, а для статичного режиму зйомки — 2—4 см (СКП) за всіма координатами на базових відстанях до 200 км.

5. Показано, що використання моделі GIM IONEX при обробці спостережень є доцільним, тому вона дає можливість точніше компенсувати регулярні іоносферні затримки.

6. Проведені дослідження фазових характеристик ГНСС-антен в конкретних умовах експлуатації. Експерименти проводилися з використанням програмно-апаратної бази станції SURE (ХНУРЕ, Харків). Показано, що при лінійному комбінуванні спостережень величина відхилень між ФЦ на частотах L1, L2 GPS може досягати 10—12 см, що підтверджує необхідність обліку фазових характеристик GPS/ГНСС-антен для задач високоточного позиціонування.

3. ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕДАЧІ DGPS/RTK ДИФЕРЕНЦІЙНИХ КОРЕКЦІЙ ВІД ПЕРМАНЕНТНИХ РЕФЕРЕНЦІЙНИХ ГНСС-СТАНЦІЙ. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Короткий опис експериментальних робіт

Метою проведення експериментальних досліджень була оцінка точності і надійності навігаційних визначень рухомого об'єкту на віддаленнях від базової станції приблизно 20—100 км. Експеримент повинен був відповісти на питання, чи досягається точність в декілька дециметрів на віддаленнях 50 км і більше [1—7].



Рис. 6. Двочастотний приймач NovAtel DL-V3



Рис. 7. Антена NovAtel GPS-600-LB

Склад експериментального комплексу:

- ✦ двочастотна базова GPS-станція Харківського національного університету радіоелектроніки SURE;
- ✦ одночастотний приймач NovAtel OEMV1 (наданий НПК «Європромсервіс»);
- ✦ двочастотний приймач NovAtel DL-V3 з антеною (наданий НПК «Європромсервіс»);
- ✦ ноутбук з програмним забезпеченням NovAtel CDU, SLOG і GNSS Solution;
- ✦ антена NovAtel GPS-600-LB;
- ✦ антенний спліттер;



Рис. 8. Одночастотний приймач NovAtel OEMV1 в корпусі FlexPack

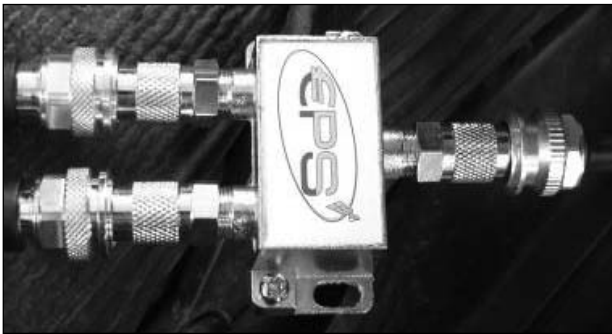


Рис. 9. Антенний спліттер

- ✦ акумулятор 12 В;
- ✦ телефон Nokia 3110 Classic;
- ✦ адаптер Bluetooth.

3.2. Методика проведення робіт

Для отримання еталонних оцінок координат використовувався двочастотний приймач NovAtel DL-V3 (рис. 6) з антеною геодезичного класу NovAtel GPS-600-LB (рис. 7). Еталонні траєкторії були отримані в післясеансному режимі з використанням програмного комплексу NovAtel GrafNav/GrafNet 8.10. Похибки оцінки еталонної траєкторії — приблизно 5 см. Накопичення вимірювальної інформації виконано в режимі кінематичної зйомки із статичною ініціалізацією. Час статичної ініціалізації роз-

раховувався, виходячи з емпіричного співвідношення: $5 \text{ хв} + R \text{ (у км)}/2$, де R — віддалення від точки стояння до базової станції. Приймач NovAtel OEMV1 з підтримкою технології GL1 DE в корпусі FlexPack (рис. 8) був підключений до тієї ж антени за допомогою антенного спліттера (рис. 9). Налагодження режиму роботи, накопичення вимірювальної інформації приймача OEMV1 і подача на його вхід DGPS поправок RTCMType1 здійснювалося за допомогою ноутбука. Увесь експериментальний комплекс був змонтований на базі легкового автомобіля (рис. 10). Дослідження були проведені на віддаленнях 20, 45, 60 і 85 км.

3.3. Результати експериментальних робіт

Аналіз результатів порівняння еталонної траєкторії, отриманої з використанням двочастотного устаткування, з результатами, отриманими в польових умовах з використанням одночастотного устаткування, показав таке:

- ✦ при забезпеченні безперервної передачі DGPS-поправок від базової станції до рухомого приймача можливе досягнення граничних похибок (95 %) 30—50 см для планових координат і 0,5—1 м — для висотної складової на віддаленнях до 100 км;
 - ✦ при використанні технології NovAtel GL1 DE фільтрації координат можливе розрізнення траєкторії руху на паралельних смугах двосмугової автомобільної дороги або встановлення руху по одній смузі;
 - ✦ після збою в процесі прийому диференціальних поправок з наступним відновленням DGPS-режиму необхідно виконувати скидання фільтра GL1DE, що дозволить уникнути непередбачуваного зростання абсолютних похибок, обумовлених процесом фільтрації координат.
- Нижче наведені нев'язки оцінок координат, отриманих у реальному часі за допомогою одночастотного приймача NovAtel OEMV1 в режимі DGPS відносно еталонної траєкторії, отриманої в післясеансному режимі обробки для віддалень 20 км (рис. 11, 12), 45 км (рис. 13, 14), 60 км (рис. 15, 16) і 85 км (рис. 17, 18).

Нев'язки планових координат (рис. 11, 13, 15, 17) наведені в місцевій системі координат: Південь—Північ (вісь Y, м) та Захід—Схід (вісь X, м). Нев'язки висотної складової (рис. 12, 14, 16, 18) представлені в системі координат: висота (вісь Y, м) та час (вісь X, с).

Проведені експерименти показали стійке досягнення точності (95 %) — 30—50 см для планових координат та 0,5—1 м для висотної складової на відстаннях до 100 км від базової станції. При цьому важливими умовами є виконання вимірів без затінювань і з надійним зв'язком, що допускає перерви зв'язку не більше 2—3 хв. При використанні технології NovAtel GLIDE досягається високоточний розподіл паралельних трас руху транспортного засобу на автомобільній дорозі. Особливістю використання технології GLIDE в умовах тривалих перерв зв'язку (більше 5—10 хв) є необхідність скидання фільтра координат шляхом подачі на вхід приймача відповідної команди.

Таким чином, запланована програма робіт успішно виконана: експериментально доведена можливість досягнення заданої точності навігаційних визначень у режимі реального часу з використанням DGPS-технології NovAtel GLIDE. Досягнення заданої точності гарантується на віддаленні від базової станції до 100 км.

4. ОЦІНКА ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТОЧНІСТЬ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ОДНОЧАСТОТНИХ ТА ДВОЧАСТОТНИХ ГНСС-ПРИЙМАЧІВ ЗА НАЯВНОСТІ РОЗРІДЖЕНИХ МЕРЕЖ РЕФЕРЕНЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

4.1. Фактори, що впливають на точність визначення відносних координат споживачів з використанням фазових ГНСС-вимірів на середніх (70—100 км) базових відстанях за наявності розріджених мереж станцій

Відомо, що точність диференціального позиціонування на сантиметровому рівні (а також можливість досягнення високої надійності розрізнення фазової неоднозначності) залежить від рівня ефемеридних, тропосферних та іоносферних похибок ГНСС-вимірювань. Бу-



Рис. 10. Експериментальний комплекс на базі автомобіля

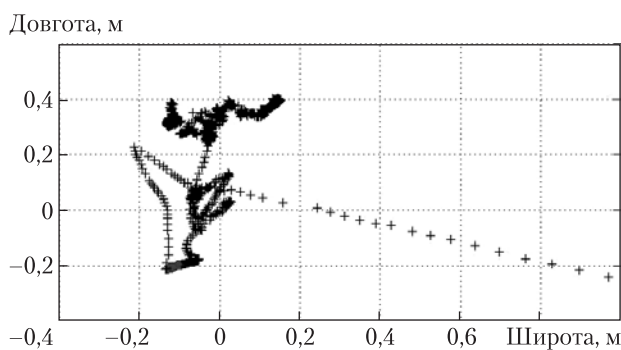


Рис. 11. Нев'язки DGPS-рішення по планових координатах. Розрахункові планові координати. Відстань 20 км

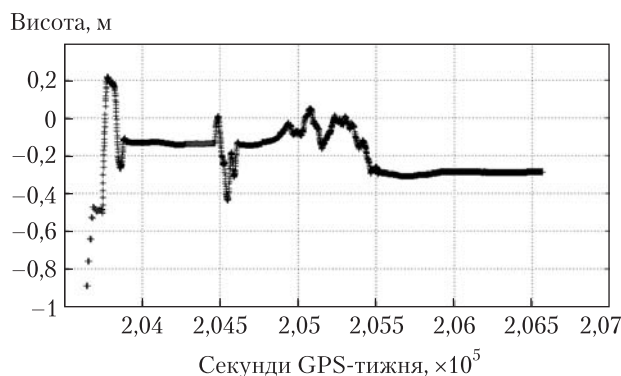


Рис. 12. Нев'язки DGPS-рішення по висоті. Розрахункова висота. Відстань 20 км

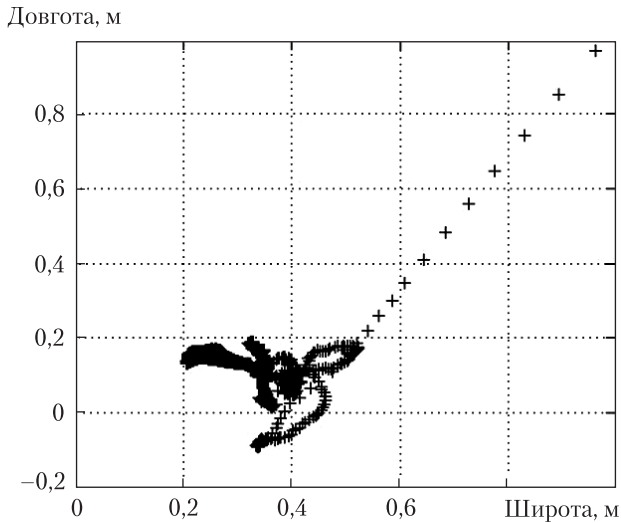


Рис. 13. Нев'язки DGPS-рішення по планових координатах. Розрахункові планові координати. Відстань 40 км



Рис. 14. Нев'язки DGPS-рішення по висоті. Розрахункова висота. Відстань 40 км

демо розглядати задачу точного ГНСС-позиціонування за умов використання відносно розрізнених мереж референцих двочастотних станцій (базові відстані — 150—200 км або більше). Припустимо, що визначаються координати одно- та/або двочастотних приймачів споживачів на відстанях до 100 км відносно найближчої станції мережі в їх околі. Режими вимірювань (зйомки) можуть бути статичними або кінематичними, а час накопичення спостережень (окрема сесія) може коливатися від кількох хвилин до кількох годин.

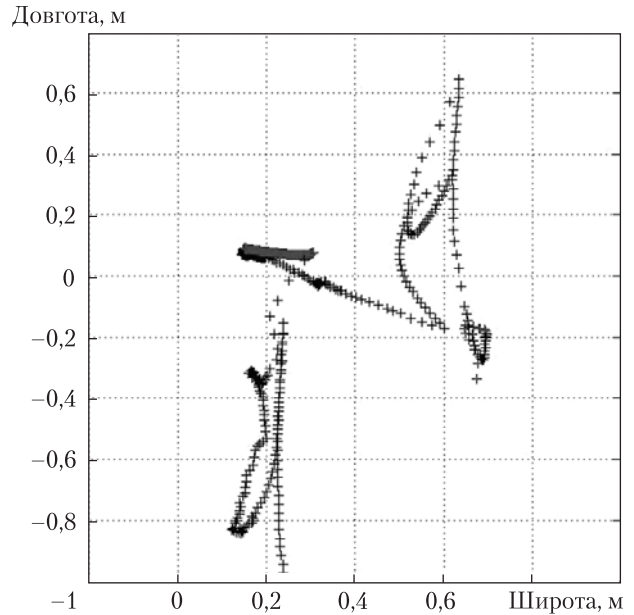


Рис. 15. Нев'язки DGPS-рішення по планових координатах. Розрахункові планові координати. Відстань 60 км

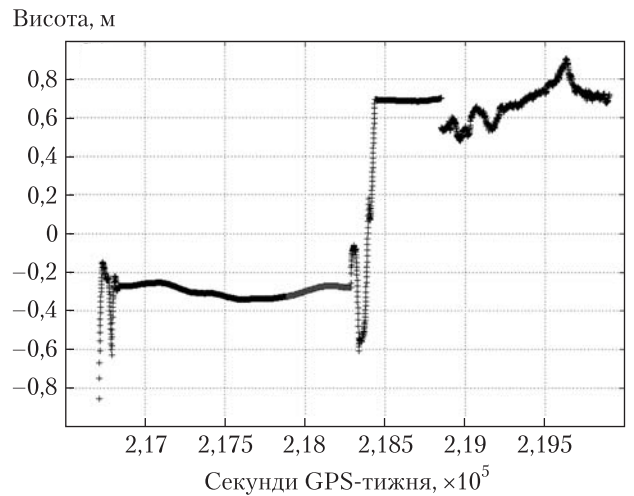


Рис. 16. Нев'язки DGPS-рішення по висоті. Розрахункова висота. Відстань 60 км

Проблема полягає в тому, щоб визначити, за яких умов може бути досягнута сантиметрова точність визначення положення статичного або кінематичного об'єкту з використанням дорогого двочастотного приймача або більш дешевого одночастотного приймача геодезич-

ного класу. Нагадаємо, що досягнення заданої сантиметрової точності залежить від вирішення головного питання фазових вимірів — надійного усунення фазових стрибків та вирішення задачі РФН. Float-оцінки для РФН можуть бути використані без класичного РФН (пошук найкращої комбінації циклічних неоднозначностей), але такі оцінки не дають надійного і точного рішення для кінематичної зйомки і потребують накопичення інформації на досить великих інтервалах, навіть для статичного позиціонування.

Аналіз світового досвіду, численні експерименти і накопичений авторами досвід на попередніх етапах розробки дозволяють визначити головні проблеми та перешкоди для точного позиціонування за наведених умов. Насамперед практичний інтерес має використання саме одночастотної, відносно недорогої і доступної ГНСС-апаратури. Для таких умов (одночастотна апаратура, точність 1—2 см, кінематична зйомка, великі (~100 км) базові відстані та невеличкі (15—30 хв) інтервали спостережень) поки що не знайдено позитивного рішення.

Зазначимо, що вплив ефемеридних похибок на точність вирішення всіх задач обробки фазових спостережень і позиціонування практично дуже малий для випадку диференціального методу на означених базах. Це відноситься і до точних ефемерид системи GPS, і до ефемерид GPS, що передаються у реальному часі.

Виникає проблема щодо тропосферної та іоносферної складових похибок вимірювань та їх співвідношення. Порівняння результатів багатьох натурних експериментів, отриманих одночасно з двочастотною і одночастотною ГНСС-апаратурами, показують, що в умовах рівнинної місцевості (без значних перепадів висот) використання апріорних тропосферних моделей затримок сигналів для означених базових відстаней дає практично повну компенсацію тропосферних похибок. Оцінка та зональна інтерполяція тропосферних затримок дає приблизно той же результат. Це видно з порівняння нев'язок реальних вимірів та моделей вимі-

рів для одночастотного та двочастотного приймачів. При використанні двочастотного приймача (коли іоносферна затримка практично повністю компенсується) нев'язки на базах до 200 км коливаються на рівні шумів та багатопроменевості фазових спостережень. У випадку одночастотних вимірів та компенсації іоносферної затримки за допомогою апріорних «трендових» моделей нев'язки в тих же умовах та на базах 50—200 км, як правило, досягають рівня від 5—7 см до 10—20 см.

Причину треба шукати в недосконалої іоносферних моделей. Але останні дослідження (див. нижче розд. 4.3) показали, що іоносферні затримки мають флуктуаційну складову, яку не можна моделювати в принципі, тобто VRS-технологія інтерполяції іоносферної складової добре працює тільки на відстанях до 50 км. Саме тому фірми Trimble і Leica для надійної роботи VRS-технології будують і використовують мережі перманентних станцій з базами, що не перевищують 50—70 км.

Таким чином, проведена оцінка факторів, що впливають на точність диференціального позиціонування на базових відстанях до 100 км в умовах розріджених мереж станцій (базові відстані — до 200 км), показала, що головною складовою, яка суттєво впливає на якість РФН та позиціонування з використанням одночастотної ГНСС-апаратури, є флуктуаційна похибка іоносферної затримки сигналів. Докладніше це показано в [2, 7].

З метою оцінки флуктуаційних похибок іоносферної затримки сигналів разом з інформаційними параметрами (і досягнення сантиметрової точності у визначених жорстких умовах) на даному етапі проводяться тестування нового методу позиціонування (див. нижче).

4.2. Визначення зенітних тропосферних затримок у мережі базових ГНСС-станцій

Вплив тропосфери на точність координатних визначень за сигналами навігаційних супутників

Нейтральна атмосфера (насамперед, тропосфера) впливає на поширення радіосигна-

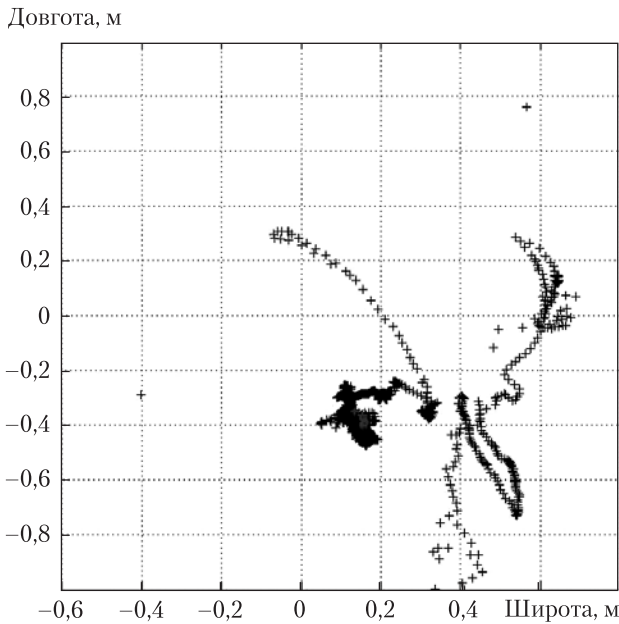


Рис. 17. Нев'язки DGPS-рішення по планових координатах. Розрахункові планові координати. Відстань 85 км

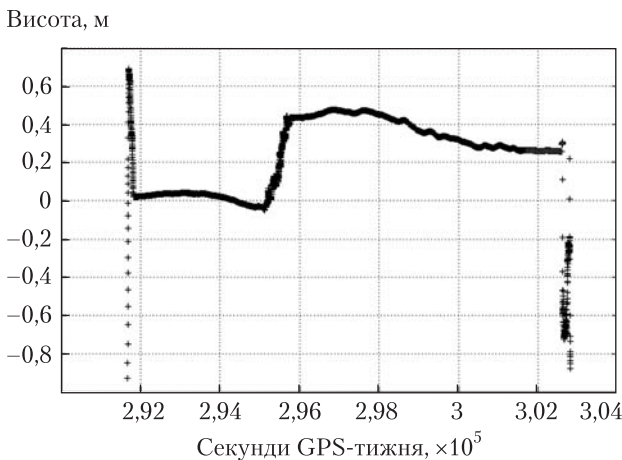


Рис. 18. Нев'язки DGPS-рішення по висоті. Розрахункова висота. Відстань 85 км

лів і проявляється в їхній затримці. Величина цієї затримки залежить від коефіцієнта рефракції (n) і визначається інтегралом уздовж шляху поширення сигналу (s):

$$\sigma^{trop} = \int (n - 1) \times ds. \quad (11)$$

За останні десятиліття запропонована велика кількість методик, що дозволяють оцінити

значення тропосферних затримок сигналів. До них відносяться моделі Saastamoinen (1972), Hopfield (1969), Lanyi (1984), Chao (1972), Marini і Murray (1973), Elgered (1985), Davis (1985), Rahnemoon (1988), Ifadis (1986), Black (1978), Yionoulis (1970), Davis, Bauersima (1983), Mendes (1998), Herring (1992), Niell (1996, 2000), MOPS (2001) та ін. Така велика кількість моделей є наслідком складності рішення задачі моделювання просторового розподілу параметрів тропосфери (температури, тиску й вологості).

Основний недолік цих моделей полягає в тому, що вони не враховують дійсного просторового розподілу параметрів тропосфери. Існуючі моделі більшою мірою базуються на використанні приземних даних про параметри реальної тропосфери у місці дислокації приймача навігаційних сигналів. Деякі з них (напр., модель MOPS) використовують прогнознi значення температури, тиску та вологості на основі сезонних трендів їх коливань.

Компенсація тропосферних затримок при обробці навігаційних сигналів на основі тільки приземних (реальних або прогнозованих) значень параметрів тропосфери дає можливість визначити зенітні тропосферні затримки сигналів з точністю 5–10 см (95 %).

Для високоточних вимірювань доцільно використовувати технології, які дозволяють врахувати реальний стан тропосфери.

Визначення зенітних тропосферних затримок в місцях дислокації базових станцій ГНСС-мережі

Запропонований алгоритм визначення зенітних тропосферних затримок є удосконаленням алгоритмів, розроблених в рамках науково-технічних проектів зі створення інформаційно-вимірювальної ГНСС-системи та мережної VRS-технології забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок [1–4]. Він передбачає визначення зенітних тропосферних затримок в місцях розташування базових станцій мережі і їх широтно-довготну й висотну апроксимації для оцінювання тропосферних затримок в точках

розміщення роверних приймачів. Алгоритм інтерполяції тропосферних затримок виявився достатньо ефективним. А щодо алгоритму визначення зенітних тропосферних затримок для базових станцій, то під час їх дослідної експлуатації виявився ряд недоліків (напр., використання в процедурі оцінювання других різниць вільних від впливу іоносфери комбінацій вимірювань двочастотних приймачів навігаційних сигналів занадто ускладнило реалізацію інтервальної обробки вимірювальної інформації). Це позначилося, в першу чергу, на складності коректного формування коваріаційної матриці комбінацій вимірювань. Крім того, обчислювальні процедури виявились достатньо повільними.

Запропонований новий алгоритм визначення зенітних тропосферних затримок оснований на використанні перших різниць вільних від впливу іоносфери комбінацій вимірювань двочастотних приймачів навігаційних сигналів, розташованих на базових станціях мережі. Детальний опис алгоритму приведений в [7].

Для моделювання алгоритму була застосована інформація станцій GLSV (Київ); CNIV (Чернігів); PRYL (Прилуки); SMLA (Сміла), зареєстрована у сеансі вимірювань 10 грудня 2008 р. Оцінювання зенітних тропосферних затримок відбувалось на інтервалах тривалістю 30 і 60 хв. Методика визначення параметрів, які аналізуються, наведена в [7].

Визначення зенітних тропосферних затримок проводилось як для окремих пар станцій (GLSV і CNIV, GLSV і PRYL, GLSV і SMLA), так і в мережному режимі одразу для сукупності всіх станцій мережі.

Порівнювальний аналіз рішень для кожної з пар станцій дозволяє проконтролювати якість рішень — їх взаємну відповідність. У [7] наведені результати оцінювання зенітних тропосферних затримок для станції GLSV, яка була обрана як центральна, з використанням інформації кожної з пар станцій. Оцінки зенітних тропосферних затримок для станції GLSV, сфор-

мовані з використанням різних наборів даних, в цілому відповідають одна одній. Водночас оцінки, отримані на інтервалі 60 хв, відрізняються меншим розкидом значень. Аналогічний висновок можна зробити і за оцінками затримок для станції GLSV, отриманими з одночасним використанням інформації всіх станцій мережі. Оцінки відхилень зенітних тропосферних затримок для периферійних станцій відносно станції GLSV також мають більш стабільний характер при обробці на інтервалі 60 хв.

Середньоквадратичні похибки (СКП) отриманих оцінок зенітних тропосферних затримок для станції GLSV не перевищують 7 мм при оцінюванні на інтервалі 30 хв і 3,5 мм при оцінюванні на інтервалі 60 хв. СКП оцінок відхилень зенітних тропосферних затримок для периферійних станцій відносно станції GLSV не перевищує 0,8 мм при оцінюванні на інтервалі 30 хв і 0,3 мм при оцінюванні на інтервалі 60 хв. Отримані СКП оцінок не є домінуючими у визначенні тропосферних затримок. Набагато більший внесок роблять складові похибок, які повільно змінюються (напр., похибки, обумовлені багатопроменим поширенням сигналів). Відповідні розбіжності в параметрах зенітних тропосферних затримок для станції GLSV можуть досягати 10 см при оцінюванні на інтервалі 30 хв і 4,5 см при оцінюванні на інтервалі 60 хв. Розбіжності оцінок відхилень зенітних тропосферних затримок для периферійної станції та станції GLSV можуть досягати 1,2 см при оцінюванні на інтервалі 30 хв і 4,5 мм при оцінюванні на інтервалі 60 хв. Дані оцінки отримані за умови, що похибки, які повільно змінюються, обумовлені багатопроменим поширенням сигналів.

Таким чином, на точність побудови регіональної моделі тропосфери найбільшою мірою впливають похибки, обумовлені багатопроменим поширенням сигналів. Використання інтервалу оброблення тривалістю 60 хв суттєво зменшує вплив багатопроменового поширення сигналів на оцінювання тропосферних затримок.

4.3. Просторово-часові властивості іоносферної затримки в задачах точного ГНСС-позиціонування з використанням одночастотних спостережень

Відомо, що іоносферна складова похибок ГНСС-позиціонування є найбільш значимою порівняно з іншими складовими, тому що іоносфера є надзвичайно мінливим середовищем поширення навігаційних сигналів. Точне врахування іоносфери при використанні одночастотного ГНСС-устаткування для позиціонування з сантиметровою точністю (1–2 см) — досить складна задача.

При використанні двочастотних (або трьохчастотних) ГНСС-приймачів проблема врахування іоносферної затримки вирішується досить просто шляхом формування т. з. *безіоносферних лінійних комбінацій* (ЛК) спостережень. Щодо одночастотних приймачів, то традиційний шлях компенсації іоносферної затримки полягає у використанні ЛК кодових і фазових спостережень (диференціальний метод) і наступного введення поправок у ці ЛК. Розрахунок поправок здійснюється з використанням традиційних, т. з. *трендових* моделей (напр., Klobuchar).

Проведені дослідження оцінки просторово-часових властивостей іоносфери показали, що при виконанні кінематичних спостережень на середніх базових відстанях (50–100 км і більше) точне позиціонування за фазовими спостереженнями одночастотних приймачів із сантиметровою точністю практично неможливе саме через вплив флуктуаційної складової іоносферної затримки. У зимовий період височастотна складова (період флуктуацій 5–20 хв і більше) може досягати рівня 15–30 см. У літній період рівень флуктуацій іоносферної затримки, як правило, значно менше (5–7 см). Коефіцієнт кореляції флуктуацій на базових відстанях понад 10–50 км практично дорівнює нулю.

Через те, що парк одночастотної апаратури в Україні становить 80–90 % ринку геодезичного ГНСС-устаткування, завдання досягнення сантиметрового рівня точності на середніх

базових відстанях є дуже важливим для всіх практичних використань — геодезії землевпорядження, геоінформаційних систем (ГІС) і ін. Тому отримані та стисло описані нижче результати досліджень просторово-часових властивостей іоносферної затримки свідчать про актуальність і практичну значимість пошуку та реалізації методів ефективного усунення розглянутих обмежень відносно дешевого одночастотного ГНСС-устаткування.

Традиційний спосіб компенсації іоносферної затримки одночастотних спостережень полягає у використанні диференціального методу координатних визначень, ефективність якого залежить від довжини базової відстані. Інший спосіб компенсації іоносферної затримки припускає використання іоносферних моделей Klobuchar, GIM IONEX і ін. Точність позиціонування з використанням таких «трендових» іоносферних моделей досить обмежена й обумовлена ступенем просторово-часової декореляції іоносферних затримок рознесених у просторі ГНСС-приймачів. Саме тому істотний науковий і практичний інтерес представляє врахування залишкової флуктуаційної похибки іоносфери, а саме визначення ступеня просторово-часової декореляції іоносферних затримок сигналів за реальними даними, тобто оцінка радіуса просторової кореляції флуктуаційної складової іоносферної затримки з урахуванням зміни сезонної активності іоносфери.

Окремим завданням може бути оцінка можливості прогнозування іоносферних збурювань за даними суміжної доби завдяки тому, що період обігу орбітального угруповання GPS навколо Землі становить приблизно 12 год. Через 24 год супутник буде перебувати практично на тому самому місці простору, тому з'являється можливість прогнозування іоносферних параметрів у задачах точного позиціонування.

У результаті виконаних досліджень із використанням реальних спостережень двох мереж перманентних референціальних станцій [7] (мережі станцій України і Великобританії) отримані попередні оцінки просторово-часових власти-

востей флюктуаційної складової іоносфери. Для досліджень були використані результати попередньої обробки фазових спостережень, отримані з ПАК ОСТАВА_PPA. Це дало можливість позбутися циклічних фазових стрибків і звести всі виміри до цілих GPS-секунд.

Для вивчення сезонної просторової кореляції використані дані базових станцій англійської мережі з малими (до 50 км), середніми (від 50 до 170 км) і великими (понад 170 км) лініями по напрямках *захід—схід* і *північ—південь*, а також української мережі станцій із середніми й великими базовими лініями [7]. Для дослідження часових (добових) кореляційних властивостей іоносфери взяті суміжні дні 182 і 183 року 2007 (літо) для англійської мережі базових станцій та дні 345 і 346 року 2008 (зима) для української мережі базових станцій.

Дані іоносферної затримки за літній сезон показали, що на малих базових лініях (50 км і менше) по напрямку *захід—схід* іоносферна затримка має значну кореляцію на кутах місця вище 40°; з ростом довжини базових ліній вище 50 км спостерігається значна декореляція іоносферних флюктуацій. У зимовий період іоносфера має значно більший рівень флюктуацій, ніж літом. Рівень високочастотних флюктуацій (період — приблизно 20—30 хв) у значній мірі залежить від кута місця супутника. Так, у зимовий період на кутах місця вище 70° рівень флюктуацій склав приблизно 7 см, у літній період, де іоносфера відносно спокійна, флюктуації помітно знижуються на кутах місця вище 40° і становлять близько 2 см.

На основі порівняння даних зимового й літнього періодів сонячної активності видно, що диференціальний режим здатний компенсувати іоносферні флюктуації на базових лініях до 25—30 км, але зі збільшенням вимірювальної бази кореляція знижується й у зимовий період іоносферна затримка не може бути ефективно компенсована, навіть на зазначених відносно невеликих базових відстанях. З аналізу отриманих результатів також випливає, що високочастотні іоносферні флюктуації на суміжних добах є не-

корельованими і їхні оцінки на попередній добі не можуть бути використані для прогнозування.

Проведений цикл досліджень оцінки просторово-часових властивостей іоносфери показав, що при виконанні кінематичних спостережень на середніх базових відстанях (50—100 км і більше) точне позиціонування за фазовими спостереженнями одночастотних приймачів із сантиметровою точністю практично неможливе саме через вплив флюктуаційної складової іоносферної затримки. У зимовий період високочастотна складова (період флюктуацій — 5—20 хв і більше) може досягати рівня 15—30 см. У літній період рівень флюктуацій іоносферної затримки, як правило, у кілька разів менше (5—7 см). Коефіцієнт кореляції флюктуацій на базових відстанях понад 10—50 км практично дорівнює нулю.

5. ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ. ПОДАЛЬШИЙ РОЗВИТОК

1. У 2007—2010 рр. була створена й протестована інформаційно-вимірювальна система (ІВС), що реалізує принципи мережної (зональної) диференціальної VRS-корекції спостережень і надання інформаційних послуг на території певного регіону. До складу системи входять підсистеми:

- ✦ базових станцій;
- ✦ збору й накопичення даних, обробки спостережень (пост-обробка);
- ✦ передачі DGPS/RTK-корекцій у реальному часі з використанням технології NTRIP;
- ✦ апаратно-програмні засоби споживача для обміну даними із центром обробки, а також для прийому DGPS/RTK-корекцій спостережень із використанням засобів мобільного зв'язку GSM/GPRS.

2. Були проведені натурні випробування з використанням вимірювальної інформації мережі перманентних референціальних ГНСС-станцій України і тестових спостережень споживачів. Показано, що в зоні дії мережі станцій з міжбазовими відстанями до 200 км досягається сантиметрова/субдециметровая точність координатних

визначень (одно- і двочастотні GPS-приймачі) у режимі постобробки. При реалізації кінематичного DGPS/RTK-позиціонування в реальному часі споживачі можуть виконувати геодезичну RTK-зйомку (точність 2—5 см) у радіусі 20 км щодо найближчої базової станції.

3. Для післясеансної обробки GPS-спостережень був розроблений і протестований комплекс програмного забезпечення автоматизованої обробки ГНСС-спостережень. У складі програмного комплексу (ПК) реалізовані оригінальні нові ефективні алгоритми обробки фазових і кодових GPS-спостережень розріджених мереж перманентних базових станцій. Програмний комплекс виконує:

- ✦ попередню обробку GPS-спостережень, включаючи контроль і забезпечення якості (QC/QA) на всіх стадіях обробки, усунення фазових циклічних/напівциклічних стрибків і ін.;
- ✦ згладжування кодових спостережень із використанням «безстрибкових» фазових спостережень;
- ✦ розрізнення фазової неоднозначності спостережень;
- ✦ оцінку й моделювання поточних зональних тропосферних і іоносферних затримок, формування зональних корекцій VRS/FKP-типу;
- ✦ оцінку поточних координат роверних приймачів споживачів.

4. Була проведена оптимізація мережі перманентних референціальних ГНСС-станцій України шляхом модернізації станцій CNIV (м. Чернігів); UZHL (м. Ужгород); EVPA (м. Євпаторія) та здійснено підключення до центру автоматизованої обробки (ГАОНАНУ) інформаційно-вимірювальної ГНСС-системи референціальних перманентних станцій у м. Полтава (POLV) та м. Харків (KHAR, SURE). Це дає можливість покрити близько 35—40 % території України послугами диференціальної навігації (у реальному часі) та точного позиціонування (в *on-line* режимі післясеансної обробки).

Подальше удосконалення характеристик і функціональних можливостей ІВС передбача-

ється виконати шляхом розробки й впровадження альтернативного, більше ефективного, підходу точного мережевого позиціонування, заснованого на централізованій спільній обробці спостережень груп споживачів. Він полягає у реалізації «кооперативної» оптимізованої оцінки й наступного моделювання зональних тропосферних і іоносферних корекцій разом з іншими оцінюваними параметрами з використанням всього ансамблю одночастотних/двочастотних ГНСС-спостережень референціальних станцій мережі й спостережень всіх споживачів, розташованих довільним чином у зоні дії мережі. Такий спосіб організації обробки може претендувати на інформаційну оптимальність при вирішенні розглянутого класу завдань мережевого позиціонування завдяки синергії вимірювальної інформації мережі референціальних станцій і всіх споживачів, зокрема найбільш складного завдання моделювання зональних іоносферних і тропосферних затримок, особливо в умовах збурювань. Розгортання й експлуатація інфраструктури ГНСС-мереж є недешевими, тому допускається обслуговування одночасно декількох або багатьох споживачів. Даний підхід дозволяє обійти принципове інформаційне обмеження існуючих VRS/FKP- і MAX/i-MAX-технологій, коли диференціальне позиціонування кожний споживач виконує сам, використовуючи корекції, сформовані тільки мережею базових станцій. Інформаційна допомога від інших споживачів при таких мережевих технологіях через такий спосіб організації RTK-позиціонування неможлива. Кооперативний підхід, завдяки його додатковим інформаційним можливостям, дасть змогу збільшувати ефективні базові відстані в мережах референціальних станцій і дозволить більш широко використовувати недорогі одночастотні геодезичні приймачі. На даний стадії виконання проекту розглянуто тільки режим накопичення даних і їхньої спільної постобробки. У перспективі (з розвитком інформаційних і телекомунікаційних технологій, а також з ростом сегмента спожив-

вачів) реалізація оптимального «кооперативного» позиціонування для режиму RTK не уявляється нездоланною проблемою.

У 2011 р. планується розпочати дослідну (а згодом і штатну) експлуатацію створеної багатофункціональної інформаційно-виміральної системи шляхом надання інформаційних послуг всім споживачам України, які використовують супутникові ГНСС-технології точного позиціонування. Система буде підтримувати виконання всіх складових геодезичної зйомки (геодезія, картографія, кадастр, межування та інвентаризація земель, ГІС, інженерна геодезія тощо), транспортної навігації, координатної підтримки енергетичної інфраструктури, екологічного моніторингу тощо. Розроблена вітчизняна технологія точного позиціонування дає можливість в зоні дії інформаційно-виміральної ГНСС-системи надавати послуги точного координатного забезпечення споживачам з використанням не тільки дорогого двочастотного, а й відносно дешевшого (у 3—5 разів) одночастотного ГНСС-обладнання. Завдяки тому, що парк одночастотної апаратури в Україні становить 80—90 % ринку геодезичного ГНСС-устаткування, досягнення сантиметрового рівня точності на середніх базових відстанях (50—100 км) з використанням одночастотного ГНСС-обладнання є дуже важливою економічною перевагою перед традиційними західними технологіями. Детальні розрахунки реального економічного ефекту від впровадження результатів проекту будуть виконані за результатами дослідної експлуатації системи.

Важливим є те, що в Україні прийнята Концепція національної програми в сфері топографо-геодезичної діяльності й картографування. Вона розроблена Міністерством екології й природних ресурсів України й затверджена розпорядженням Уряду від 29 грудня 2010 р. № 2354-р (див. <http://www.interfax.com.ua/rus/main/57893/>). Згідно з Концепцією Україна планує провести реформу в сфері топографо-геодезичної діяльності й національного картографування й створити нову інфраструктуру

для збору й використання геопросторових даних у 2011—2015 рр.

Виконаний ГАО НАН України науково-технічний проект повністю відповідає цій Концепції в сфері топографо-геодезичної діяльності й картографування, а також відкриває нові можливості запровадження в Україні ГНСС-навігації рухомих об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Створення та розвиток технологій віртуальних референційних GPS-станцій (2006—2007 рр.)*, тема № 229-В, ГАО НАНУ // *Заключний науково-технічний звіт*, 2007. — 234 с.
2. *Інформаційно-вимірвальна GNSS система та мережна VRS технологія забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок у Закарпатті та Чернігівщині* // *Заключний звіт про виконання інноваційного науково-технічного проекту*, ГАО НАНУ, 2007. — 85 с.
3. *Інформаційно-вимірвальна GNSS та мережа VRS-технологія забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок у Києві та Київській області* // *Заключний звіт про виконання інноваційного науково-технічного проекту*, ГАО НАНУ, №0108U003130, 2008. — 100 с.
4. *Науково-технічний звіт про виконання НДР «Удосконалення та дослідження апаратно-програмного комплексу збору і автоматизованої мережної обробки GNSS-спостережень»* (шифр «Мережа—ХНУРЕ/2008»), ХНУРЕ, № 0108U008263, 2008. — 83 стор.
5. *Науково-технічний звіт про виконання НДР «Удосконалення, дослідження та верифікація апаратно-програмних засобів споживача інформаційно-виміральної GPS/GNSS системи»* (шифр «Мережа—НАУ/2008»), НАУ, 2008. — 35 с.
6. *Яцків Я.С., Харченко В.П., Шокало В.М. та ін.* *Практика створення в Україні інформаційно-виміральної GNSS-системи та мережної VRS-технології забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок* // *Наука та інновації*. — 2009. — Т. 5, № 2. — С. 5—22.
7. *Науково-технічний звіт про виконання НДР «Розробка, дослідження та тестування програмного забезпечення автоматизованої мережної обробки ГНСС-спостережень»* (шифр «Мережа — ХНУРЕ/2010»), ХНУРЕ, № 0110U005842, 2010. — 107 с.
8. *Науково-технічний звіт про виконання НДР «Проектування і розгортання перманентної референційної ГНСС-станції нового покоління на території Ужгородського національного університету»* (шифр роботи «Мережа-УжНУ/2010»), УжНУ, № 0110U006204, 2010. — 25 с.

9. *Науково-технічний звіт про виконання НДР «Модернізація перманентної референційної ГНСС-станції CNIV (м. Чернігів), розробка документації і проведення експериментальних робіт з оновлення обладнання станції», ЧДПЕУ, 2010. — 32 с.*
10. *Pre-Processing & Analysis software «ОСТАВА_PPA»: concept, possibilities and features, initial test results / A.A. Zhaililo, N.V. Sadanova // Proceedings of the 2004 International Symposium on GNSS/GPS (GNSS 2004), Sydney, Australia, 6–8 December 2004.*
11. *Carrier-phase cycle-slip detection, estimation and correction of dual — frequency GPS data — new efficient technique, algorithms and experimental results / A.A. Zhaililo, N.V. Sadanova // Abstract book, «Astronomy in Ukraine — Past, Present and Future», MAO — 2004 Conference devoted to the 60th anniversary of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, 15–17 July, Kiev, Ukraine. — P. 154.*
12. *Features and service performance of multifunctional software toolkit «ОСТАВА» for processing and analysis of GPS/GNSS observations / A. Zhaililo, D. Shelkovenkov // GEOS 2007 Conference Proceedings, Prague, Czech Republic, 1st–2nd March 2007. — P. 102–110.*
13. *«ОСТАВА»: багатофункціональний програмний інструментарій обробки і аналізу GPS/GNSS спостережень / А.А. Жалило, Д.А. Шелковенков. Інтегровані навігаційні системи // XIV междунар. конф., травень 2007, С.-Пб. — С. 319–321.*
14. *Контроль якості кодових і фазових GPS-спостережень на етапі попередньої обробки / Д.А. Шелковенков. Інтегровані навігаційні системи // XIV междунар. конф., травень 2007. — С.-Пб. — С. 310–312.*
15. *Про контроль якості двочастотних GPS-спостережень на етапі попередньої обробки: праці міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та електронні технології», Одеса, 22–26 травня 2006 р. // Одеський національний політехнічний університет: ВМВ, 2006. — Т. 1. — С. 233.*
16. *Програмний продукт «Програмний комплекс ОСТАВА_PPA». ГАО НАНУ/ Жалило О.О., Шелковенков Д.О. // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №24507. — К: Міністерство освіти і науки, 2008.*
17. *TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data / L.H. Estey, C.M. Meertens // GPS Solutions. — 1999. — Vol. 3. — P. 42–49.*
18. *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11 / W. Gurtner, L. Estey // Режим доступу : ftp://ftp.unibe.ch/aiub/rinex/rinex211.txt.*
19. *IONEX: The IONosphere maps EXchange format Version 1 / S.Schaer, W. Gurtner// Режим доступу : ftp://igschb.jpl.nasa.gov/igschb/data/format/ionex1.ps.*
20. *The National Geodetic Survey Standard GPS Format SP3 / Paul R. Spofford, Benjamin W. Remondi // Режим доступу : http://igschb.jpl.nasa.gov/igschb/data/format/sp3_docu.txt.*
21. *Hatanaka and RINEX Format Information // Режим доступу : http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/hatanaka.html.*
22. *«CURL» // Режим доступу : http://ru.wikipedia.org/wiki/CURL.*
23. *«gzip» // Режим доступу : http://ru.wikipedia.org/wiki/Gzip.*
24. *GrafNav/GrafNet. User Guide // Режим доступу : http://www.novatel.com/Documents/Waypoint/Downloads/NavNet 810_Manual.pdf.*
25. *Writing Fast MATLAB Code // Режим доступу : http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/5685 — writing — fast — matlab — code.*
26. *Embedded MATLAB // Режим доступу : http://www.mathworks.com/help/toolbox/eml/.*
27. *Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика: пер. з англ. / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтнегер, Д. Коллінз. Пер. з англ. під ред. Я.С. Яцківа. — К.: Наук. думка, 1995. — 380 с.*
28. *Мониторинг геометрической конфигурации многобазисной сети широкозонной дифференциальной подсистемы космических навигационных систем NAVSTAR и ГЛОНАСС / А.А. Жалило, С.Н. Флерко, А.И. Яковченко // Космічна наука та технологія. — 1999. — Т. 5, № 1. — С. 59–68.*
29. *Long Baseline GPS Kinematic Positioning by Wide-Lane Combination / Isshiki H. // Conference Proceedings The Society of Naval Architects of Japan. — Vol. 3, №2004S-G2-10.*
30. *An Application of Wide-Lane to Long Baseline GPS Measurements / Isshiki H. // ION GPS/GNSS 2003.*
31. *Желанов А.А. Алгоритм и процедура верификации оценки целочисленных неоднозначностей фазовых GPS наблюдений разностной частоты // Всеукр. межвед. науч.-техн. сб-к «Радиотехника». — 2009. — Вып. 158. — С. 43–52.*
32. *Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. — М.: Сов. радио, 1978. — 350 с.*
33. *Жалило А.А., Желанов А.А., Шелковенков Д.А., Шокало В.М. Разработка методики оценки качества фазовых калибровок GPS-антенн геодезического класса. Предварительные результаты экспериментальных исследований // Радиотехника. — 2007. — Вып. 148. — С. 186–198.*
34. *Жалило А.А., Желанов А.А., Шелковенков Д.А., Шокало В.М. Оценка точности калибровки положения и вариаций фазовых центров приемных GPS/GNSS антенн // Космічна наука і технологія. — 2008. — С. 39–52.*
35. *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/ Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA/DO-229C, November 28, 2001.*

Я.С. Яцкив, А.И. Еметс,
М.А. Литвин, О.А. Хода, Н.О. Жалило,
А.А. Жалило, А.А. Желанов, Д.А. Шелковенков

ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТИ
ПЕРМАНЕНТНЫХ ГНСС-СТАНЦИЙ УКРАИНЫ

Приведены результаты выполнения Главной астрономической обсерваторией НАН Украины и соисполнителями научно-технического проекта «Оптимизация сети перманентных ГНСС-станций Украины и исследовательская эксплуатация центра сбора и обработки информации для обеспечения работ по геодезии, кадастру и навигации подвижных объектов».

Цель проекта — расширение и оптимизация сети перманентных референчных ГНСС-станций Украины, развитие и внедрение в исследовательскую эксплуатацию центра сбора, обработки и предоставление информационных услуг спутниковой системы точного позиционирования (сантиметрового уровня точности) для поддержки геодезических и кадастровых съемок на территории Украины.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутники системы (ГНСС), перманентная референчная станция; кодовые и фазовые ГНСС-наблюдения, программно-алгоритмическое обеспечение, технологии точного позиционирования.

Ya.S. Yatskiiv, A.I. Emets,
M.O. Lytvyn, O.O. Khoda, N.O. Zhalilo,
O.O. Zhalilo, O.O. Zhelanov, D.O. Shelkovenkov

OPTIMIZATION OF THE PERMANENT GNSS
STATIONS NETWORK OF UKRAINE

The results of execution by the Main Astronomical Observatory of NAS of Ukraine and co-executors of the scientific and technical project «Optimization of the permanent GNSS- stations network of Ukraine and experimental operation of the centre of information gathering and processing for geodetic, cadastral surveying and navigation of mobile objects» are presented. The purpose of the project — extension and optimization of the network of permanent reference GNSS—stations of Ukraine, development and implementation in operational testing of the centre of information gathering and processing and rendering services of the satellite system of precision positioning (centimeter accuracy level) for supporting geodetic and cadastral survey in the territory of Ukraine.

Key words: Global Navigation Satellite System (GNSS), permanent reference station; code and carrier-phase GNSS observations, software and algorithmic toolkit, high precision positioning technologies.

Стаття надійшла до редакції 18.05.11