

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Діцький Ігор Володимирович

УДК 621.396.98

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ
НЕОДНОЗНАЧНОСТІ ТА УСУНЕННЯ СТРИБКІВ ФАЗОВИХ
ВИМІРЮВАНЬ У ЗАДАЧАХ ТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПО
СИГНАЛАХ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ
СИСТЕМ**

05.12.17 – радіотехнічні і телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Жаліло Олексій Олександрович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки,
провідний науковий співробітник науково-
навчального центру кафедри основ радіотехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
професор
Кортунов В'ячеслав Іванович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»,
завідувач кафедри виробництва радіоелектронних
систем літальних апаратів

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Карлов Дмитро Володимирович,
Харківський університет Повітряних Сил
ім. Івана Кожедуба
начальник науково-дослідного відділу наукового
центру Повітряних Сил, м. Харків

Захист відбудеться «29» грудня 2014 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14, ауд. 13.

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

Автореферат розісланий «27» листопада 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи

Точне визначення місцеположення (позиціонування) з використанням глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) широко застосовується в таких додатках, як геодезія, картографія, межування землі, кадастр, аерофотознімання, ГІС, точне землеробство, геодинаміка тощо. У цих додатках визначення координат повинне виконуватися на сантиметровому й навіть на міліметровому рівні точності. Досягнення зазначеного рівня точності позиціонування не можливе без використання фазових спостережень. Однак фазові ГНСС-спостереження мають відмінні риси: вони є неоднозначними і, як правило, з ряду причин (втрата спостереження за супутниками, підвищеним рівнем шумів і багатопромієвості, збої в роботі приймача й т.д.) містять циклічні фазові стрибки. Сьогодні основним методом вирішення задач точного позиціонування в цей час є диференціальний/відносний режим координатних визначень, що є різновидом інтерферометричного методу. Однак щоб виконати точне й швидке диференціальне/відносне позиціонування із зазначеною точністю, необхідно надійно усунути фазові стрибки й розв'язати фазову неоднозначність (РФН).

У реальних умовах спостережень (для більшості практичних випадків) виникають часткові або повні втрати спостереження за супутниками тривалістю до 20 сек, які й обумовлюють появу фазових стрибків. Через це відбувається дроблення спостережень на окремі ділянки/інтервали, для кожного з яких може бути своє значення початкових фазових неоднозначностей. Це, у свою чергу, істотно ускладнює й зменшує надійність розв'язання фазової неоднозначності. Проте як показав аналіз, у доступних відкритих закордонних і вітчизняних науково-технічних джерелах немає надійних, адаптованих до умов реального часу способів усунення циклічних фазових стрибків в умовах часткових або повних втрат двочастотних і/або одночастотних фазових ГНСС-спостережень. Це обумовлює актуальність пошуку надійного рішення задачі усунення циклічних фазових стрибків в умовах часткових або повних втрат спостережень за супутниками як у режимі післясеансної обробки спостережень, так і в режимі обробки в реальному часі.

Розв'язання початкової (на інтервалі безперервних спостережень) цілочисельної фазової неоднозначності (за умови, якщо однозначне цілочисельне рішення взагалі досягне) характеризуються високою складністю реалізації й не завжди високою надійністю спільної оцінки континуальних і дискретних параметрів. Властивість цілочисельності фазових неоднозначностей є позитивним додатковим обмеженням і дозволяє за певних умов виконати РФН, увести цілочисельні корекції у фазові спостереження та, в остаточному підсумку, виконати точні координатні визначення, використовуючи однозначні фазові псевдовідстані (або їхні лінійні комбінації). Принциповими питаннями є досягнення максимальної надійності РФН, тобто максимальної ймовірності правильного оцінювання цілочисельних початкових фазових неоднозначностей, виявлення умов досягнення кращого вирішення й перевірки його якості – верифікації. Існуючі відомі підходи до вирішення задачі РФН і верифікації рішення припускають функціонування в певних умовах у припущенні стандартних статистичних характеристик погрішностей (нормальний закон розподілу, стаціонарність часових рядів та ін.) фазових ГНСС-спостережень. Однак зі збільшенням базових відстаней, в умовах збурювань середовища

поширення навігаційних сигналів збільшуються залишкові систематичні й повільно мінливі складові: іоносферні, тропосферні, ефемеридні й інші погрішності. Ці складові переважають порівняно із шумовими погрішностями й характеризуються нестандартними законами розподілу й тимчасовою нестаціонарністю. Це, своєю чергою, призводить до порушення основних припущень про статистичні характеристики погрішностей, порушенню оптимальності відомих алгоритмів обробки спостережень і, відповідно, до зменшення ймовірності або навіть неможливості цілочисельного рішення задачі РФН, а, виходить, і досягнення високої точності позиціонування.

У цих умовах є актуальною задача підвищення надійності розв'язання неоднозначності та усунення стрибків фазових ГНСС-спостережень шляхом вдосконалення відомих і створенню нових методів і алгоритмів обробки фазових і кодових спостережень, включаючи методи верифікації фазових рішень, одночастотних і двочастотних ГНСС-приймачів.

Таким чином, тематика розглянутої дисертаційної роботи є актуальною й перспективною з погляду розвитку як теорії методів обробки ГНСС-спостережень, так і важливою з погляду практичної реалізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційні дослідження пов'язані з планами науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки, Головної астрономічної обсерваторії НАН України (Київ) та Інституту радіофізики та електроніки ім. А.Я. Усікова НАН України (Харків), зокрема:

– НДР «Дослідження потенційних можливостей використання спостережень сигналів ГНСС і низькоорбітальних супутникових угруповань у задачах координатно-часового забезпечення й моніторингу стану іоносфери й тропосфери» (2011-2013 рр., № ДР 0111U002903);

– НДР інноваційного 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» (2010 р., № ДР 0110U000984);

– НДР «Створення системи збору, обробки та аналізу наземних і бортових космічних GPS/ГЛОНАСС спостережень для моніторингу, досліджень й моделювання повного електронного вмісту іоносфери у рамках міжнародного проекту «Іоносат-Мікро» (2013 р., № ДР 0113U002710);

– НДР «Розроблення методів та технологій зниження впливу умов поширення радіохвиль на точність визначення координат приймачами систем глобальної навігації» (НДР «Тропосфера», 2012 р., № ДР 01111U005998);

– НДР «Кут» - 2013-2015 рр. (за Договором Д№/467-2011 з Держінформнаукою) відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012-2016 рр., розпорядження Президії НАН України від 01.02.2013 р. № 56;

– НДР «Дослідження та визначення задач, способів і засобів технічної та метрологічної підтримки розгортання та експлуатації української частини наземного сегменту систем EGNOS і GALILEO», у межах 7-ої міжнародної рамочної європейської програми FP7 PROJECT «EGNOS EXTENSION TO EASTERN EUROPE: APPLICATIONS» (EEGS2), Grant Agreement №287179 (2012-2013 рр., № ДР 0112U006084).

У перерахованих роботах здобувач був виконавцем.

Мета роботи

Мета роботи полягає в удосконаленні, дослідженні й експериментальному тестуванні методів, алгоритмів і процедур усунення циклічних фазових стрибків, цілочисельного РФН і верифікації фазових рішень у задачах високоточного статичного й кінематичного диференціального/відносного позиціонування з використанням двочастотних або одночастотних ГНСС-спостережень на різних базових відстанях.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі **задачі**:

1) пошук і розробка методу й алгоритмів відновлення в реальному часі безперервності (усунення циклічних фазових стрибків) одночастотних і двочастотних ГНСС-спостережень для умов часткових або повних пропусків спостережень;

2) розробка нових більш ефективних методу й алгоритмів розв'язання початкової (на інтервалі безперервних спостережень) фазової неоднозначності (РФН) одночастотних і двочастотних диференціальних ГНСС-спостережень на малих (включаючи відносні координатні визначення), середніх (до 200 км) і великих (до 1000 км) базових відстанях;

3) розробка нових критеріїв, методу й алгоритмів верифікації фазових рішень – правильності лагодження фазових стрибків і рішення задачі РФН у різних умовах і режимах вимірювань, а також вироблення рекомендацій для підвищення надійності обробки фазових спостережень;

4) проведення натурних експериментів з використанням ГНСС-спостережень і тестування теоретичних результатів дисертаційної роботи.

Об'єкт дослідження – процес обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень.

Предмет дослідження – методи й алгоритми усунення фазових стрибків і розв'язання фазової неоднозначності (РФН) у задачах високоточних статичних і кінематичних координатних визначень (позиціонування) за одночастотними і двочастотними сигналами глобальних навігаційних супутникових систем, методи підвищення надійності РФН і точності позиціонування.

Методи дослідження: статистична теорія оцінювання параметрів, теорія супутникових радіонавігаційних систем, методи математичного аналізу, теорія матриць, метод математичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Отримав подальший розвиток метод відновлення безперервності фазових ГНСС-спостережень, який ґрунтується на спільній обробці прирощень за часом фазових спостережень і координат, а також на спеціальній процедурі МНК-оцінювання, що дозволяє, на відміну від існуючих методів, забезпечити надійне рішення (~ 100%) в реальному часі на малих вибірках прирощень на інтервалах з пропусками спостережень до 20 сек, навіть за наявності частих пропусків даних.

2. Отримали подальший розвиток метод розв'язання початкової неоднозначності фазових ГНСС-спостережень і його модифікації для різних базових відстаней та умов вимірювань, який ґрунтується на спільній обробці одинарних та подвійних різниць фазових спостережень (та їх лінійних комбінацій) спеціальними процедурами МНК- оцінювання і верифікації рішення, що дозволяє надійно виконувати розв'язання фазової неоднозначності ГНСС-спостережень та потім – позиціонування на сантиметровому рівні точності.

3. Вперше запропонований багатокритеріальний підхід та алгоритми верифікації правильності оцінки циклічних фазових стрибків і розв'язання фазових неоднозначностей, які відрізняються від існуючих рішень відсутністю необхідності точного знання законів розподілу похибок і простотою вибору значення порогу прийняття рішення.

Практичне значення отриманих результатів

1. Виконано експериментальне тестування й проведено дослідження удосконалених методів й алгоритмів РФН та відновлення безперервності фазових ГНСС-спостережень із використанням реальної вимірювальної інформації, отриманої в різних умовах вимірювань. Узагальнений аналіз потенційних можливостей запропонованих алгоритмів РФН і позиціонування показав можливість одержання цілочисельного рішення і подальшу можливість досягнення сантиметрової точності для всіх досліджуваних режимів позиціонування та різних базових відстаней.

2. Запропоновано й апробовано нові методи, алгоритми та програмні процедури верифікації правильності фіксації цілочисельних фазових неоднозначностей для різних умов проведення вимірювань у розглянутих задачах. Вироблені практичні рекомендації щодо підвищення надійності процедур розв'язання фазової неоднозначності й верифікації РФН.

3. Розроблено та експериментально верифіковано комплекс алгоритмів і програмних модулів, які реалізують удосконалені методи розв'язання неоднозначності й відновлення безперервності фазових ГНСС-спостережень, може бути вбудований у відповідні оброблювальні комплекси для рішення широкого кола задач точного позиціонування й навігації.

4. Результати дисертаційної роботи впроваджені при виконанні НДР «Створення системи збору, обробки та аналізу наземних і бортових космічних GPS/ГЛОНАСС спостережень для моніторингу, досліджень й моделювання повного електронного вмісту іоносфери у рамках міжнародного проекту «Іоносат-Мікро» та «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» (ГАО НАНУ), при виконанні НДР «Розроблення методів та технологій зниження впливу умов поширення радіохвиль на точність визначення координат приймачами систем глобальної навігації» і «Кут» (ІРЕ ім. О.Я.Усікова НАНУ), при виконанні НДР «Дослідження потенційних можливостей використання спостережень сигналів ГНСС і низькоорбітальних супутникових угруповань у задачах координатно-часового забезпечення й моніторингу стану іоносфери й тропосфери» (ХНУРЕ). Практичне використання результатів дисертаційної роботи підтверджується 3 актами впровадження.

Особистий внесок здобувача

Автором самостійно отримано основні результати дисертаційної роботи, які опубліковані в роботах [1-9]. У роботах, виконаних у співавторстві, авторові належать такі результати.

У роботах [2, 3] було модифіковано, реалізовано та виконана верифікація на реальних ГНСС-спостереженнях нового методу усунення стрибків фази кінематичних двочастотних ГНСС-спостережень при зриву стеження за частиною або усіма супутниками робочого сузір'я.

У роботі [4] запропоновано реалізацію та виконано верифікацію на реальній вимірювальній інформації методу розв'язання фазової неоднозначності двочастотних диференціальних ГНСС-спостережень для

режимів статичного та кінематичного позиціонування на базових відстанях 100÷200 км. Автором також виконана програмна реалізація алгоритмів та математичне моделювання, проведені розрахунки та аналіз чисельних результатів та їх сумісна з співавтором інтерпретація.

У роботах [5, 6] отримав подальший розвиток метод, описаний у роботах [2, 3], адаптований для роботи в умовах обробки одночастотних вимірювань, виконана його верифікація. Автором визначено умови застосування методів, описаних у роботах [2, 3, 5, 6], виконана програмна реалізація алгоритмів, математичне моделювання та сумісна з співавтором інтерпретація отриманих результатів.

У роботах [7, 8] знайшли відображення реалізовані автором алгоритми та програмні процедури розв'язання фазової неоднозначності та точного позиціонування, проведені розрахунки і сумісний з співавторами аналіз чисельних результатів.

У роботі [9] реалізовано, адаптовано для реальних умов вимірювань і перевірено на реальній вимірювальній інформації метод сумісної оцінки координат, розходжень шкал часу та зенітних тропосферних затримок ГНСС мережі.

Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи обговорювалися на наступних міжнародних конференціях [10-22], матеріали яких були включені до дисертації:

- 6-та Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ-2010» (м. Севастополь, 2010 р.);
- Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених і студентів «Проблеми навігації та управління рухом», (м. Київ, 2010 р.);
- 15-й, 18-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті» (м. Харків, 2011 р, 2014 р);
- 4-й Міжнародний Радіоелектронний Форум (МРФ-2011) «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (м. Харків, 2011 р)
- 8-ма Міжнародна науково-практична конференція (МНТК) «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – європейський досвід» (м. Чернігів, 2012 р.);
- XI-а Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2013» (м. Київ, 2013 р.);
- Матеріали міжнародної конференції «Україна–Росія–Сколково» (м. Київ, 2013 р.);
- International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» TCSET'2014 (м. Львів, 2014 р.).

Публікації

По тематиці дисертації всього опубліковано 22 наукові праці, зокрема 9 статей у провідних наукових фахових виданнях, з яких 6 затверджено ВАК України і 3 опубліковані за кордоном, а також 13 праць наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (130 найменувань), 5 додатків. Загальний обсяг роботи – 206 стор. (з них основний текст – 149 стор., список використаних джерел – 16 стор., рисунки та таблиці на сторінку – 4 стор., додатки – 37 стор., 34 рисунка, 10 таблиць).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РАБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та визначено мету роботи, коло розв'язуваних задач, відзначено практичну спрямованість, наукову новизну, описано структуру роботи і коротко викладено зміст її розділів. Наведено дані про впровадження роботи, особистий внесок автора й публікації.

У **першому розділі** дисертаційної роботи розглянуто тенденції й шляхи розвитку методів та алгоритмів обробки ГНСС-спостережень. Показано, що для забезпечення сучасних вимог по надійності й точності координатних визначень на сантиметровому/міліметровому рівні необхідно використовувати фазові ГНСС-спостереження, що вимагає рішення двох принципово важливих і складних задач: відновлення безперервності фазових спостережень і розв'язання фазової неоднозначності. Наявні методи мають ряд обмежень і застосовуються до конкретних умов проведення вимірювань. Тому однією з важливих задач є пошук нових універсальних методів і алгоритмів рішення зазначених двох принципових задач в умовах зростаючих потреб споживача в точності й надійності координатних визначень. Також у першому розділі наводяться рівняння ГНСС-спостережень та дається аналіз основних джерел похибок.

У **другому розділі** вирішена одна із сформульованих задач досліджень – пошук і розробка методу та алгоритмів відновлення безперервності (у значенні усунення циклічних фазових стрибків) одночастотних і двочастотних спостережень, верифікація рішення задачі з використанням моделювання й реальних ГНСС-спостережень.

Для виділення фазових стрибків і зменшення залишкових погрешностей тропосферних і іоносферних затримок, для обробки використовуються приращення за часом кодових і фазових спостережень. Це дозволяє усунути інструментальні затримки в передавальних трактах супутників і прийомному тракті приймача, випадкову початкову фазу опорного генератора на супутниках та початкові фазові неоднозначності. Вихідна математична модель рівнянь спостережень:

$$\begin{cases} \Delta \hat{\mathbf{S}}_{1,2i}^j = \Delta \mathbf{F}^j + k_{1,2} \cdot \Delta \mathbf{I}^j + \delta \Delta \mathbf{S}_{1,2i}^j \\ \Delta \hat{\mathbf{L}}_{1,2i}^j = \Delta \mathbf{F}^j - k_{1,2} \cdot \Delta \mathbf{I}^j - \nabla \Delta \mathbf{N}_{1,2}^{jr} \cdot \lambda_{1,2} + \Delta \varphi_0 \cdot \lambda_{1,2} + \delta \Delta \mathbf{L}_{1,2i}^j \end{cases}, \quad (1)$$

де $\Delta \hat{\mathbf{S}}_{1,2i}^j$ – приращення за часом кодової псевдовідстані між сусідніми часовими епохами (між j -им супутником і i -им приймачем) на 1 -ій і на 2 -ій частотах відповідно; $\Delta \hat{\mathbf{L}}_{1,2i}^j$ – приращення фазової псевдовідстані між сусідніми часовими епохами (між j -им супутником і i -им приймачем) на 1 -ій і на 2 -ій частотах відповідно; $\Delta \mathbf{F}^{j*} = \Delta \mathbf{R}_i^j + [\Delta \Delta_i^{GPS} - \Delta \Delta^{j,GPS}] + \Delta \mathbf{T}_i^j - \Delta \mathbf{N}_{1,2}^r \cdot \lambda_{1,2}$; $\Delta \mathbf{N}_{1,2}^r$ – фазовий стрибок у спостереженнях референцного супутника (при оцінці подвійних різниць фазових стрибків величина $\Delta \mathbf{N}_{1,2}^r$ йде в оцінку розбіжностей годинників); $\Delta \mathbf{R}_i^j$ – приращення за часом геометричної відстані між i -им приймачем і j -им супутником; $\Delta \Delta_i^{GPS}$ – приращення відхилень шкали часу годинників приймача від системного часу; $\Delta \Delta^{j,GPS}$ – приращення відхилень

шкали часу годин супутника від системного часу; $\Delta \mathbf{T}_i^j$ – приращення тропосферної затримки сигналу; $\Delta \mathbf{I}^j$ – приращення іоносферної затримки сигналу; $k_1=1$; $k_2=\gamma^2 = (\lambda_2/\lambda_1)^2$; $\lambda_{1,2}$ – довжина хвилі на 1-й і на 2-й частотах відповідно; $\delta \Delta \mathbf{S}_{1,2i}^j$, $\delta \Delta \mathbf{L}_{1,2i}^j$ – шуми й багатопроміневість приращень кодів і фазових спостережень відповідно; $\nabla \Delta \mathbf{N}_{1,2}^{jr}$ – подвійні різниці (j -го та r -го супутників робочого сузір'я) цілочисельних фазових стрибків; $\nabla \Delta \mathbf{N}_{1,2}^{jr} = 0$, якщо стрибки відсутні.

Система рівнянь (1) лінеаризується з урахуванням стандартних кодів рішень для часових епох t_{k+1} , t_k щодо координат і відхилень шкали часу годинників приймача від системного часу. Рівняння (1) в загальному випадку включають невідому цілочисельну неоднозначність $\Delta \mathbf{N}^j$. Невизначеність виражається в можливості одночасного варіювання величин $\Delta \mathbf{N}^j$ й Δ_Δ при збереженні однієї і тієї самої величини їхньої алгебраїчної суми. Через це виконується перехід до подвійних різниць цілочисельних змінних $\nabla \Delta \mathbf{N}^{jr}$ без явного формування різниць рівнянь – так звані «віртуальні подвійні різниці».

Є два можливих випадки наявності фазових стрибків. Так, можливий граничний випадок, коли між моментами часу t_{k+1} , t_k є розрив всіх спостережень і існує апіорна невизначеність щодо можливих стрибків фази всього поточного робочого (на інтервалі спостережень) сузір'я супутників. Але найбільш ймовірна ситуація, коли є розрив спостережень (а виходить, можливо, і виникнення стрибків) для одного або декількох супутників, але не всіх супутників поточного робочого сузір'я.

У випадку обробки двочастотних спостережень для підвищення надійності рішення задачі усунення стрибків формуються проміжні лінійні комбінації фази різницевої частоти Wide Lane (WL) з довжиною хвилі $\lambda_{WL} \approx 86$ см. У цьому випадку задача полягає в оцінці вектора $\nabla \Delta \vec{\mathbf{N}}_{WL} = \nabla \Delta \vec{\mathbf{N}}_{L1} - \nabla \Delta \vec{\mathbf{N}}_{L2}$ фазових неоднозначностей для WL-комбінацій. Більш детально, на першому етапі знаходиться рішення задачі оцінки цілочисельних фазових стрибків для подвійних різниць $\nabla \Delta \vec{\mathbf{N}}_{WL}$. Після оцінки вектора $\nabla \Delta \vec{\mathbf{N}}_{WL}$ й урахування його в лінеаризованих рівняннях спостережень (1) різниці фазових псевдовідстаней між спостереженнями до розриву й відповідними їм спостереженнями після розриву, стають однаковими (рис. 1 – приклад повного розриву спостережень). Однак, на цьому етапі задача оцінки цілочисельних фазових неоднозначностей WL-спостережень ще повністю не вирішена, оскільки необхідно ще знайти невідому константу $\Delta \mathbf{N}_{WL}^r = \Delta \vec{\mathbf{N}}_{L1}^r - \Delta \vec{\mathbf{N}}_{L2}^r$ (стрибок у спостереженнях референсного супутника, див. рис. 1 б). Для цього WL-спостереження корегуються на величину $\nabla \Delta \hat{\vec{\mathbf{N}}}_{WL}$ й далі формується нове МНК-рішення щодо тільки одного невідомого – $\Delta \mathbf{N}_{WL}^r$.

На наступному етапі після урахування в (1) оцінок векторів $\nabla \Delta \hat{\vec{\mathbf{N}}}_{WL}$, $\Delta \mathbf{N}_{WL}^r$ система рівнянь перетворюється (з використанням також відомої

безіоносферної лінійної комбінації Iono Free (IF)) так, що новими шуканими невідомими становляться вектори цілочисельних фазових стрибків $\nabla\Delta\vec{N}_{L1}$, $\Delta\vec{N}_{L1}$, які також послідовно оцінюються. Оцінивши $\nabla\Delta\vec{N}_{L1}$, $\Delta\vec{N}_{L1}$, можна визначити фазові стрибки й на другій частоті - $\nabla\Delta\hat{N}_{L2}$, $\Delta\hat{N}_{L2}$, використавши WL-оцінки $\nabla\Delta\hat{N}_{WL}$ і $\Delta\hat{N}_{WL}^r$, які отримані на попередньому етапі.

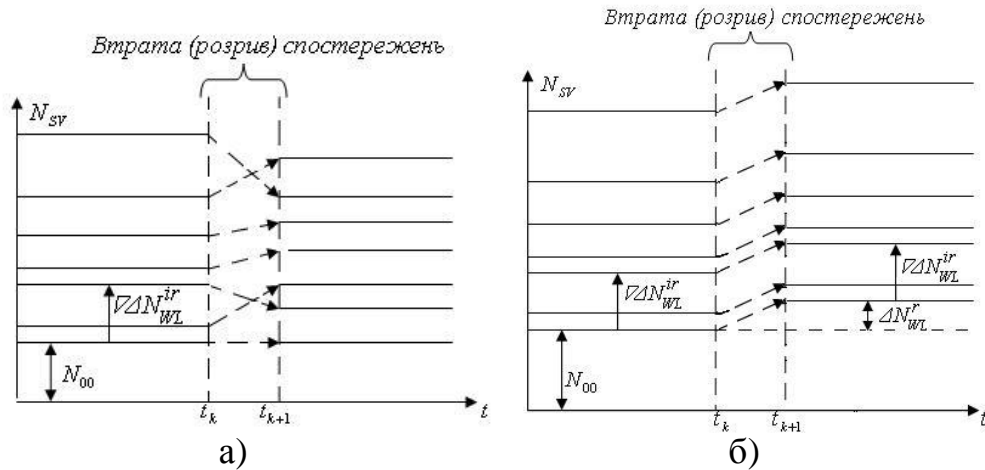


Рис. 1 – Діаграма стрибків фаз при повній втраті спостережень на інтервалі $t \in [t_k, t_{k+1}]$: а) до урахування вектора $\nabla\Delta\hat{N}_{WL}$, б) після урахування вектора $\nabla\Delta\hat{N}_{WL}$

У загальному випадку рішення задачі оцінки цілочисельних векторів $\nabla\Delta\vec{N}_{WL}$, $\nabla\Delta\vec{N}_{L1}$ зводиться до наступних дій:

- після перетворень (декореляції й приведення до компактної форми) вихідних лінеаризованих рівнянь (1) знаходиться МНК-оцінка цілочисельного вектора шуканих фазових стрибків як континуальних змінних (так звана, float-оцінка);

- отримані оцінки стрибків округляються до найближчого цілого й результат округлення приймається за початкове наближення шуканого вектора фазових стрибків;

- виходячи з МНК-оцінки кореляційної матриці float-оцінки стрибків, визначається діапазон цілочисельного перебору елементів вектора стрибків в межах float-оцінки;

- здійснюється пошук оптимального цілочисельного рішення шляхом мінімізації цільової функції (суми квадратів нев'язань перетвореного вектора спостережень і функції, що добирається).

Під час обробки одночастотних спостережень немає можливості сформулювати проміжну вимірювальну WL-шкалу для підвищення надійності рішення задачі. Тому процедура відновлення безперервності одночастотних спостережень, з одного боку, спрощується, а з другого – немає можливості використовувати високоточну додаткову інформацію (WL-спостереження). Очевидно, що варто очікувати зниження надійності виявлення й оцінки цілочисельних стрибків спостережень на частоті L1 у порівнянні із двочастотним випадком.

Для підвищення надійності виявлення, оцінки й усунення фазових циклічних L1 стрибків були запропоновані й проаналізовані наступні шляхи:

- ◆ використання декількох прирощень спостережень, припускаючи, що між епохами до розриву спостережень немає стрибків фази;
- ◆ використання диференціального режиму координатних визначень;
- ◆ використання згладженого кодово-фазового рішення навігаційної задачі дециметрового (20÷40 см) рівня точності.

Запропонований підхід до рішення задачі відновлення безперервності кінематичних супутникових спостережень практично без змін може бути застосований до спостережень не тільки супутників GPS, але й інших ГНСС – ГЛОНАСС, Galileo, Compass/Beidou.

Відмінними рисами й перевагами розроблених методу й алгоритмів оцінки фазових стрибків від існуючих є наступні.

1) Реалізовано вдосконалений метод спільної оцінки дискретних і континуальних параметрів, який припускає «стиск» системи рівнянь, що дозволяє істотно знизити часові витрати під час виконання перебору цілочисельних фазових параметрів (стрибків) у разі одержання цілочисельного рішення.

2) Для підвищення надійності рішення виконується спільна обробка прирощень за часом кодових і фазових спостережень. Із метою зменшення кількості оцінюваних параметрів замість прирощень кодових спостережень використовуються прирощення координат, що отримані по кодовому рішенню.

3) Оцінка фазових стрибків виконується одночасно по спостереженням всього поточного робочого сузір'я супутників для поточної епохи й не вимагає значних інтервалів спостережень, що є недоліком багатьох існуючих методів. Для виявлення, оцінки та усунення фазових стрибків досить одного прирощення спостережень. Алгоритм вирішення задачі реалізований для використання в реальному часі.

4) Для підвищення надійності оцінки фазових стрибків використовується група до п'яти збільшень спостережень (якщо є можливість їх сформулювати для епохи, яка аналізується).

5) Алгоритми усунення фазових стрибків включають новий метод верифікації з використанням комбінованого підходу, заснованого на аналізі залишків рішення навігаційної задачі по збільшенням спостережень.

Також у другому розділі описуються розроблені алгоритми, які дозволяють виявити наявність і верифікувати правильність усунення фазових стрибків. Для цього розраховуються залишки рішення навігаційної задачі по прирощенням фазових спостережень. Рішення навігаційної задачі здійснюється стандартним способом з використанням МНК-рішення лінійної системи рівнянь. Потім виконується порівняння залишків із евристично підібраним порогом. При перевищенні максимального значення модуля залишків заданого порогу приймається рішення про наявність фазових стрибків для даної епохи:

$$\max\left(|\vec{\Theta}|\right) = \Delta = \begin{cases} \Delta > \varepsilon \Rightarrow \text{Стрибки виявлені} \\ \Delta < \varepsilon \Rightarrow \text{Стрибки відсутні} \end{cases}, \quad (2)$$

де $|\vec{\Theta}|$ – модуль вектора залишків рішення навігаційної задачі (різниці між вимірювальними й оціненими значеннями);

ε – поріг ухвалення рішення про наявність фазових стрибків.

На рис. 2 наведені приклади, які ілюструють можливість виявлення фазових стрибків зазначеним способом. На малюнку відображені залишки рішення – різниці між вимірювальними й оціненими значеннями.

У ході досліджень була виконана адаптація розробленого алгоритму виявлення, оцінки й усунення циклічних фазових стрибків для умов роботи в реальному часі. Виконана його верифікація на реальній кінематичній вимірювальній інформації, що

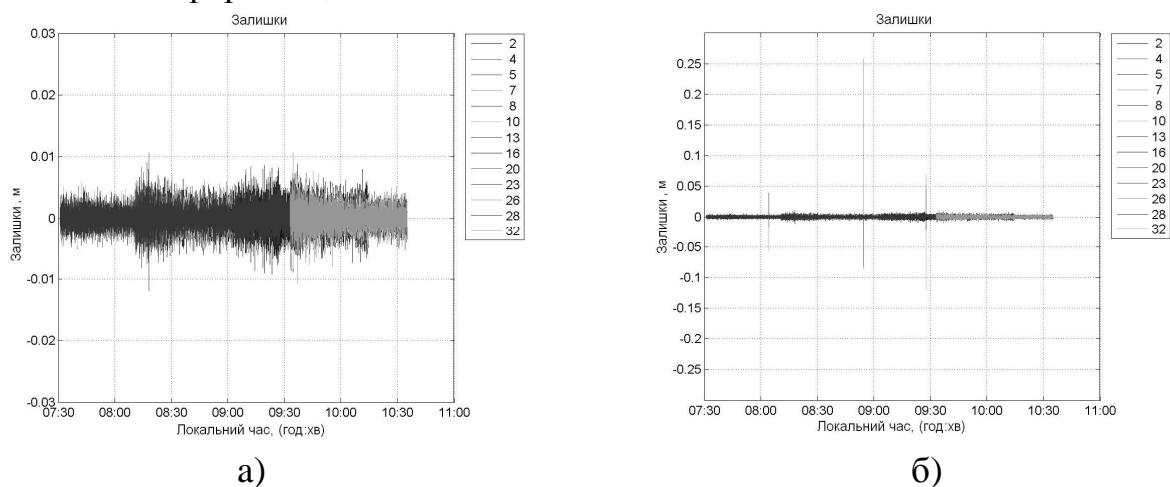


Рис. 2 – Залишки рішення координатної задачі: а) за відсутності фазових стрибків, б) за наявності фазових стрибків на трьох епохах спостережень

містить високу динаміку. В результаті експериментів було показано, що запропоновані алгоритми дозволяють забезпечити надійне рішення із статистичною частотою ~98–100 % на вибірках від одного до п'яти прирощень за часом на інтервалах із пропусками спостережень до 20 сек.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений розробці й удосконаленню методу й алгоритмів розв'язання фазової неоднозначності для різних умов проведення вимірювань. Дослідження проводилися по наступних напрямках.

1. Диференціальне позиціонування на базових відстанях до 200 км

У результаті реалізації вироблених рекомендацій відмінна стратегія рішення поставленої задачі побудована з урахуванням таких положень.

– Алгоритми розв'язання фазової неоднозначності двочастотних фазових ГНСС-спостережень повинні виконувати поетапну спільну обробку всіх спостережень вибірки лінійних комбінацій фазових спостережень, включаючи однозначне згладжене кодово-фазове рішення (замість рівнянь кодових псевдовідстаней). При цьому доцільно використовувати традиційні фазові лінійні комбінації різницевої частоти Wide-Lane (WL) і т. зв. «безіоносферну» комбінацію Iono-Free (IF).

– З метою підвищення надійності цілочисельного фазового WL-рішення різницевої частоти необхідно використовувати додаткову інформацію, яка міститься у згладженому кодово-фазовому рішенні й рівняннях IF-спостережень. При цьому для зменшення впливу іоносферних варіацій одночастотного WL-рішення на надійність РФН «безіоносферної» комбінації IF доцільно виділити зі спостережень неоднозначних фазових т.зв. «безгеометричних» Geometry-Free (GF) лінійних комбінацій і внести відповідні корекції в WL-рішення.

– Для мінімізації розмірності рівнянь спостережень і формування цільових функцій пошуку цілочисельних рішень для будь-яких наборів спостережень і режимів позиціонування (статичного і кінематичного) доцільно використовувати спеціально розроблену універсальну статистично коректну методику спільного оцінювання сукупності інформаційних і неінформаційних

«заважаючих» (для того або іншого етапу обробки) параметрів. При цьому важливо точно враховувати на всіх етапах обробки статистичні характеристики погрішностей ГНСС-спостережень та їхніх лінійних комбінацій, включаючи кореляційні зв'язки, що значимо впливають на результуючі характеристики якості РФН.

– На етапі позиціонування (після завершення РФН і його верифікації) доцільно використовувати «безіоносферні» фазові спостереження першої частоти L1 замість ІF-спостережень, рівень шумів і багатопроміновості яких приблизно в три рази вищий, ніж вихідних L1-спостережень. Іоносферна складова погрішності L1-спостережень усувається з використанням згладжених однозначних фазових GF лінійних комбінацій.

Реалізація наведених положень дозволила поліпшити характеристики надійності РФН і досягти ГНСС-позиціонування сантиметрової точності на базових відстанях до ~200 км у статичному й кінематичному режимах вимірювань: погрішності статичних визначень на базових лініях до 200 км у середньому лежать у межах **1÷4 мм** (СКП) по планових координатах і **7÷11 мм** (СКП) по висотній складовій на інтервалах спостережень від 1 до 24 годин. Аналіз результатів обробки кінематичних сесій показав, що погрішності координатних визначень на відстанях між пунктами до ~100 км не перевищують **5÷15 мм** (СКП) по планових координатах і **15÷25 мм** (СКП) по висотній складовій.

У випадку одночастотного позиціонування немає можливості сформувати проміжні вимірювальні шкали для підвищення надійності рішення задачі РФН, тому оцінка фазових неоднозначностей виконується відразу на несучій частоті з використанням уточненого значення початкових координат, отриманих по згладженим кодовим вимірюванням. У такому випадку надійне рішення задачі РФН можливо на менших базових відстанях. При кінематичному позиціонуванні в зоні мережі з міжбазовими відстанями ~100 км (видалення «ровера» від найближчої станції не перевищує ~50 км) погрішності позиціонування склали ~ **1÷2 см** (СКП) у плані й ~ **3÷4 см** (СКП) по вертикалі. При статичних координатних визначеннях одержувана точність порівнянна з точністю двочастотного рішення. На базових відстанях до 10÷15 км (унаслідок майже повної компенсації іоносферної затримки при використанні диференціального режиму із-за сильної кореляції іоносферної затримки між двома пунктами) точність одночастотного кінематичного та статичного позиціонування відповідає точності двочастотного позиціонування.

2. Двочастотне диференціальне статичне позиціонування на базових відстанях до 1000 км

Для можливості надійного рішення задачі РФН на великих базових відстанях була виконана модифікація й адаптація методу та алгоритмів РФН для випадку середніх базових відстаней (до 200 км). Основні відмінні риси полягають у наступному.

– Необхідність обліку точних продуктів центрів IGS (International GNSS Service) – точних ефемерид супутників (з перерахуванням на фазовий центр випромінювальної антени); точних корегувань бортових годинників супутників; геодинамічних виправлень (тверді, океанічні й полярні припливи); варіацій фазових центрів антен і розходжень між фазовими центрами для двох частот (L1 і L2).

– Через наявність великих залишкових модельних іоносферних погрішностей і неможливості їхнього виключення зі спостережень, на етапі

WL-рішення використовується кодово-фазова лінійна комбінація Melbourne-Wubben (MW), подвійні різниці якої є тільки функцією початкових фазових неоднозначностей.

– Для більш точного урахування тропосферних затримок на етапі «безіоносферного» IF-рішення зенітні тропосферні затримки (ЗТЗ) оцінюються/дооцінюються разом з іншими параметрами (координатами, розбіжностями шкал годинників й початковими фазовими неоднозначностями).

Зазначені особливості модифікованого методу дозволили одержати надійне цілочисельне рішення задачі розв'язання фазової неоднозначності на інтервалах тривалістю не менш однієї години й виконувати координатні визначення на міліметровому рівні. Одержувана точність координатних визначень порівнянна за точністю із широко розповсюдженим у світовій практиці програмним комплексом «Bernese 5.1», що є одним із визнаних у світі еталонних комплексів і використовується, зокрема, в IGS/EPN центрах обробки ГНСС-спостережень.

3. Одночастотне відносне позиціонування (включаючи режим «moving base» – «рухлива база») на малих базових відстанях (до 15 км)

Запропонований алгоритм РФН використовує одинарні/подвійні різниці фазових ГНСС- спостережень. На дуже малих базових відстанях (сотні метрів) різниці іоносферних і тропосферних затримок (у силу їхньої сильної кореляції на даних базових відстанях) будуть становити частки міліметрів. Тому для таких баз ефемеридними, тропосферними та іоносферними погрішностями можна знехтувати.

Одна з основних відмінностей відносного режиму позиціонування від диференціального полягає в тому, що опорний приймач не обов'язково повинен бути статичним, а може рухатися. У цьому випадку головним є не визначення абсолютних координат «роверного» пункту, а зміни вектору бази між «ровером» та рухомим опорним приймачем. При відносному позиціонуванні не має необхідності знати абсолютні поточні координати опорного приймача з високою точністю. Достатньо визначити його координати з погрішностями в кілька метрів. При цьому досягається визначення поточного вектору бази з погрішностями у кілька міліметрів.

Ще одна відмінна риса для даного випадку полягає у спрощенні розрахунку матриці направляючих косинусів. На відміну від диференціального режиму направляючі косинуси $\mathbf{a}^{(j)}(t)$ для режиму відносних визначень («moving base») розраховуються в такий спосіб:

$$\|\tilde{\mathbf{a}}^{(j)}(t)\| = \left\| \frac{\tilde{\mathbf{x}}_r(t) - \tilde{\mathbf{X}}_r^{(j)}(t)}{\mathbf{R}_r^{(j)}(t)} \right\|, \quad (3)$$

де $\tilde{\mathbf{x}}_r(t)$ – координати антени опорного приймача (на відміну від координат «роверного» пункту як при диференціальному режимі); $\tilde{\mathbf{X}}_r^{(j)}(t)$ – ефемериди супутників; $\mathbf{R}_r^{(j)}(t)$ – геометрична відстань між опорною антеною й «j-м» супутником.

Якщо антени жорстко закріплені між собою (наприклад, у задачах визначення параметрів кутової орієнтації об'єктів), має місце умова інваріантності довжини бази до зміни положення платформи з антенами. У цьому випадку всі рішення різниць координат фазових центрів антен повинні перебувати в сфері радіуса, рівного довжині бази. Ця умова дає

можливість накласти обмеження на рішення під час пошуку оптимального цілочисельного рішення РФН шляхом мінімізації цільової функції. А це, у випадку використання одночастотних спостережень, дозволяє істотно підвищити надійність рішення, відкинувши більшу частину комбінацій цілочисельних фазових неоднозначностей, що відповідають помилковим мінімумам цільової функції.

Як показали дослідження (натурні експерименти), у випадку використання двочастотних спостережень задача РФН надійно (~100%) вирішується для кожної окремої епохи на базах до кількох сотень метрів. У разі використання одночастотних кінематичних спостережень для цього потрібно до $\sim 7 \div 10$ хвилин без використання обмежувальних умов по базових відстанях і до 1 хвилини при використанні обмежуючих умов. Під час рішення задачі відносних кінематичних визначень/навігації об'єктів, які зближаються (режим вимірювань «moving base»), погрішності позиціонування (СКП) не перевищують 10 мм.

Для всіх зазначених вище режимів позиціонування принципово важливою є задача верифікації рішення задачі РФН, яка є невід'ємною і обов'язковою частиною будь-якого алгоритму РФН, що дозволяє, своєю чергою, підвищити надійність виконання РФН та точність позиціонування.

Для розглянутих режимів та умов вимірювань були виконані розробка та тестування нових критеріїв, методу й алгоритмів верифікації фазових рішень. Так, запропонований комплексний підхід до верифікації РФН містить у собі перевірки рішень з використанням трьох альтернативних критеріїв верифікації (залежно від типу даних та умов проведення вимірів).

Верифікація з використанням подвійних різниць спостережень

Ідея цього критерію верифікації ґрунтується на порівнянні середнього значення нев'язань подвійних різниць однозначних спостережень із заданим фіксованим порогом. Перевірка може виконуватися як для вихідних фазових спостережень обох несучих частот, так і їхніх лінійних комбінацій. У разі обробки двочастотних спостережень для підвищення надійності критерію верифікації РФН пропонується виконувати верифікацію в кілька етапів: спочатку для фази різницевої частоти Wide Lane, а потім для GF-комбінації для спостережень супутників із тривалістю, яка достатня для надійної роботи критерію. На останньому етапі виконуються координатні визначення за спостереженнями супутників, які пройшли верифікацію з використанням GF-комбінації. Після виконання координатних визначень здійснюється розрахунок уточнених геометричних відстаней і виконується верифікація з використанням додаткової IF-комбінації для супутників, тривалість спостережень яких менша, ніж необхідна для надійної роботи критерію верифікації з використанням подвійних різниць GF-комбінацій. Такий комбінований підхід дозволяє використати переваги кожної із зазначених лінійних комбінацій.

Верифікація за референцними ділянками

Принцип роботи цього критерію верифікації ґрунтується на порівнянні двох наборів оцінок фазових неоднозначностей, отриманих незалежно на суміжних референцних ділянках спостережень. Порівняння виконується для спільних спостережень супутників на обох суміжних референцних ділянках.

Замикання неоднозначностей по контуру

Цей критерій ґрунтується на тому, що замикання початкових фазових неоднозначностей по контуру, створеному декількома (більше двох) базовими лініями, дорівнює нулю (завдяки цілочисельній природі фазових неоднозначностей).

Запропонований багатокритеріальний підхід може використовуватися як для одностотних, так і для двочастотних статичних і кінематичних вимірювань різної тривалості. Застосування запропонованого багатокритеріального підходу для верифікації фазових неоднозначностей дозволяє з високою ймовірністю перевірити правильність рішення задачі РФН. При цьому відсутня необхідність знання з високою точністю моделі погрешностей, закону розподілу й складності вибору критичного значення, що є обов'язковим у всіх широко відомих критеріях верифікації й істотно знижують їхню надійність.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи розглянуті питання, які пов'язані із експериментальним натурним тестуванням і практичним застосуванням запропонованих методів обробки ГНСС-спостережень і розробленого комплексу алгоритмів та програмних модулів відновлення безперервності й розв'язання неоднозначності фазових ГНСС-спостережень.

Даними для апробації розробленого комплексу алгоритмів використано близько 360 реальних сеансів спостережень мережі перманентних станцій України, статичних та кінематичних даних, отриманих під час виконання наземних геодезичних робіт, ряду кінематичних спостережень, отриманих під час аерознімання.

Описано методику, виконано порівняльний аналіз та оцінку точності отриманих результатів з використанням еталонних оцінок координатних параметрів. Еталонні оцінки координат були отримані з використанням апробованого закордонного програмного забезпечення «GrafNav/GrafNet» (Канада), «Bernese» (Швейцарія). Окрім того, були використані еталонні координати перманентних референсних ГНСС-станцій, які входять до складу мереж міжнародних служб IGS, EPN.

Показано, що в задачах усунення фазових стрибків розроблені алгоритми дозволяють забезпечити надійне рішення (~98-100%) на вибірках до п'яти прирощень на інтервалах із пропусками спостережень до 20 сек, що є важливим під час виконання обробки в реальному часі й рішенні наступної принципової задачі – РФН.

У задачах розв'язання фазової неоднозначності розроблені алгоритми дозволяють забезпечити надійне рішення (~100%) за таких інтервалах збіжності, наведених в табл. 1:

Таблиця 1

Мінімальні інтервали збіжності необхідні для надійного рішення задачі РФН

| База | L1-спостереження | | База | L1&L2-спостереження | |
|-------------|------------------|------------|-------------|---------------------|------------|
| | Статика | Кінематика | | Статика | Кінематика |
| до 10÷15 км | 1÷7 хв | | до 10÷15 км | 1 епоха | |
| до 50 км | 30÷40 хв | 50÷60 хв | до 200 км | 15 сек | 1 хв |
| | – | | до 1000 км | 60 хв | – |

Порівняння надійності РФН запропонованим удосконаленим методом із закордонною відомою й широко застосовуваною технологією позиціонування RTK (Real Time Kinematic) показало істотний вииграш по надійності виконання РФН. Відомо, наприклад, що у випадку двочастотного RTK позиціонування при інтервалах спостережень дві-три хвилини надійність РФН на базових видаленнях до 100 км не перевищує 85 % (статистична частота правильно розв'язання неоднозначності). Запропонований удосконалений метод РФН на

тій же базовій відстані дозволяє одержати надійне рішення (~100%) на інтервалах спостережень, що не перевищують одну хвилину.

Таке поліпшення надійності досягається шляхом використання вдосконаленого методу й алгоритмів виконання РФН, а також розробленого нового багатокритеріального підходу верифікації фазових рішень.

Надійне рішення задачі РФН на несучих частотах дозволяє надалі виконати позиціонування на сантиметровому/міліметровому рівні точності.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення надійності розв'язання неоднозначності та усунення стрибків фазових ГНСС-спостережень шляхом вдосконалення відомих і створення нових методів і алгоритмів обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень, включаючи нові методи верифікації фазових рішень, що дозволяє виконувати позиціонування на сантиметровому/міліметровому рівні точності. Проведена велика кількість експериментів (близько 360 сесій статичних і кінематичних спостережень тривалістю до 24 годин, отриманих у період з 2008 по 2013 рр.) з обробки реальних спостережень мережі перманентних станцій України, статичних і кінематичних даних, отриманих під час виконання наземних геодезичних робіт, під час аерознімання та льотних експериментів у межах міжнародного проекту EEGS2 у складі європейської програми FP7 (грант № 287179). Це підтверджує високий рівень вірогідності отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи.

В області теоретичних досліджень:

1. Отримав подальший розвиток метод, запропоновані та верифіковані нові алгоритми відновлення безперервності фазових спостережень (для умов часткових або повних пропусків спостережень), що реалізують спеціальну процедуру спільного МНК-оцінювання сукупності інформаційних (прирощення за часом координат і розбіжностей годинників приймача) і неінформаційних (циклічних фазових стрибків) параметрів з використанням сукупності прирощень за часом фазових та кодових ГНСС-спостережень робочого сузір'я супутників. Оцінювання циклічних фазових стрибків здійснюється шляхом прямого перебору в попередньо визначеній області пошуку. Реалізація алгоритмів була виконана для умов реального часу.

2. Отримав подальший розвиток метод розв'язання неоднозначності фазових ГНСС-спостережень, на основі якого розроблено й досліджено комплекс алгоритмів РФН одночастотних і двочастотних фазових ГНСС-спостережень для режимів статичного й кінематичного позиціонування на базових відстанях до 200 км. Проведено модифікацію й адаптацію методу й алгоритмів РФН для можливості надійної роботи на базових відстанях до 1000 км і під час виконання відносних координатних визначень об'єктів, що рухаються (включаючи режим «Moving Base») на базових відстанях до 15 км.

3. Запропоновано новий багатокритеріальний підхід і розроблений відповідний комплекс алгоритмів верифікації правильності оцінки циклічних фазових стрибків і розв'язання початкових фазових неоднозначностей.

В області експериментальних досліджень:

1. Розроблено комплекс алгоритмів і програмних модулів, що реалізують удосконалені методи розв'язання неоднозначності й відновлення безперервності фазових ГНСС-спостережень, може бути вбудований у

відповідні обробні комплекси для рішення широкого кола задач точного позиціонування й навігації.

2. У задачах усунення фазових стрибків запропоновані метод і алгоритми дозволяють забезпечити надійне рішення із статистичною частотою $\sim 98 \div 100$ % на вибірках до п'яти прирощень за часом на інтервалах із пропусками спостережень до 20 сек, що є важливим для виконання обробки в реальному часі й рішення наступної принципової задачі – РФН.

3. У задачах розв'язання фазової неоднозначності розроблений та експериментально верифікований комплекс алгоритмів і програмних модулів РФН дозволяє забезпечити надійне рішення (до $\sim 100\%$ у разі менших інтервалах збіжності ніж у відомих закордонних аналогах). Надійне рішення задачі РФН на несучих частотах дозволяє надалі виконати позиціонування на сантиметровому/міліметровому рівні точності.

Напрямки подальших досліджень полягають у наступному:

– адаптація розроблених алгоритмів до роботи в умовах мультисистемності (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou-Compass) з метою підвищення надійності й точності позиціонування;

– адаптація розроблених алгоритмів до роботи в умовах реального часу;

– дослідження можливостей використання представлених в даній дисертації вдосконалених методів та алгоритмів обробки диференціальних фазових спостережень для розробки недиференціальної технології РФН і позиціонування PPP (Precise Point Positioning).

Результати дисертаційної роботи впроваджені під час виконання НДР «Створення системи збору, обробки та аналізу наземних і бортових космічних GPS/ГЛОНАСС спостережень для моніторингу, досліджень й моделювання повного електронного вмісту іоносфери в межах міжнародного проекту «Іоносат-Мікро» і «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» (ГАО НАН України), під час виконання НДР «Розроблення методів та технологій зниження впливу умов поширення радіохвиль на точність визначення координат приймачами систем глобальної навігації» і НДР «Кут» (ІРЕ ім. А.Я. Усікова НАН України), під час виконання держбюджетної НДР «Дослідження потенційних можливостей використання спостережень сигналів ГНСС і низькоорбітальних супутникових угруповань у задачах координатно-часового забезпечення й моніторингу стану іоносфери й тропосфери» (ХНУРЕ).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дицкий И.В. О линеаризации уравнений наблюдений в задачах высокоточного ГНСС – позиционирования / И.В. Дицкий // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». – 2011. – №165. – С. 63–68.

2. Жалило А.А. Новый эффективный метод – устранение циклических фазовых скачков двухчастотных кинематических ГНСС – наблюдений / А.А. Жалило, И.В. Дицкий // «Известия вузов. Радиоэлектроника». – Киев, 2011. – т.54, №8. – С. 18–28.

3. Zhalilo A.A. New Effective Method of Eliminating Cyclic Phase Slips during Double-Frequency Kinematic GNSS Observations / A.A. Zhalilo, I.V. Ditskiy

// Allerton Press, Inc RADIOELECTRONICS AND COMMUNICATIONS SYSTEMS. – USA, 2011. –VOL. 54, №8. – pp. 415–425.

4. Жалило А.А. Усовершенствованный метод разрешения фазовой неоднозначности двухчастотных дифференциальных фазовых ГНСС-наблюдений / А.А. Жалило, И.В. Дицкий // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». – 2012. – №169. – С. 277–301

5. Жалило А.А. Устранение циклических фазовых скачков одночастотных кинематических ГНСС-наблюдений / А.А. Жалило, И.В. Дицкий // «Известия вузов. Радиоэлектроника». – Киев, 2012. – т.55, №7. – С. 40–52.

6. Zhalilo A.A. Elimination of Cyclic Phase Slips of Single-Frequency Kinematic GNSS Observations / A.A. Zhalilo, I.V. Ditskiy // Allerton Press, Inc RADIOELECTRONICS AND COMMUNICATIONS SYSTEMS. – USA, 2012. –VOL. 55, №7. – pp. 321–331.

7. Основные результаты разработок исследовательской группы ХНУРЭ/ГАО НАНУ в области высокоточного ГНСС-позиционирования в период с 2002-2011 гг. / А.А.Жалило, А.А. Желанов, Д.А. Шелковенков и др. // Ежемесячный научно-технический и производственный журнал «Геодезия и картография». – Москва, 2012. – №12, спецвыпуск. – С. 38–50.

8. Экспериментальная отработка программно-математического инструментария для оценки и моделирования полного электронного содержания ионосферы по данным сети наземных перманентных референчных ГНСС станций Украины/ А.А.Жалило, А.А. Желанов, И.В. Дицкий и др. (С. 200–209) // Космический проект «Ионосат-Микро»: монография / Под общ. ред. С.А. Засухи, О.П. Фёдорова. – К.: Академперіодика, 2013 г. – 218 с., 22 с., ил.

9. Бессонов Е.А. Оценка и интерполяция зенитных тропосферных задержек с использованием ГНСС-наблюдений сети референчных станций / Е.А. Бессонов, И.В. Дицкий // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». – 2013. – №173. – С. 145–152.

10. Дицкий И.В. Исследование свойств целевой функции дискретного аргумента в задачах разрешения неоднозначности фазовых ГНСС-наблюдений / И.В. Дицкий // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010: междунар. науч.-техн. конф., 19–24 апреля. 2010 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2010. – С. 72.

11. Дицкий И.В. Новый эффективный подход к решению задачи устранения циклических фазовых скачков в режиме кинематической съемки / И.В. Дицкий // Труды Всеукраинской научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Проблемы навигации и управления движением», 23 – 24 ноября 2010 г.: тезисы докл. – Киев. – С. 40.

12. Дицкий И.В. Восстановление непрерывности двухчастотных фазовых GPS-наблюдений в задачах высокоточного кинематического позиционирования / И.В. Дицкий // Труды 15 Международного молодёжного форума «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке», 18 – 20 апреля 2011 г.: тезисы докл. – Харьков. – С. 225–226.

13. Жалило А.А. Новый эффективный метод восстановления непрерывности кинематических фазовых ГНСС-наблюдений в условиях полной либо частичной кратковременной потери слежения за спутниками / А.А. Жалило, И.В. Дицкий // Труды 4-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», 18-21 октября 2011 г.: тезисы докл. – Харьков. – С. 105–108.

14. Совместные текущие разработки и исследования ХНУРЭ и ГАО НАН Украины в области точного ГНСС-позиционирования / А.А. Жалило, А.А. Желанов, И.В. Дицкий и др. // Труды 4-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», 18–21 октября 2011 г.: тезисы докл. – Харьков. – С. 18–20.

15. О возможности использования отечественных разработок для реализации технологий точного спутникового позиционирования RTK-позиционирования на длинных базовых линиях / И.В. Дицкий, А.А. Жалило, А.А. Желанов и др. // 8-а Міжнародна науково-практична конференція «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід»: міжнар. наук.-практ. конф., випуск 8, 2012 р.: тези. доп. – Чернігів. – С. 64–66.

16. Сетевая коррекция ионосферных погрешностей ГНСС-позиционирования и ее характеристики в разреженных сетях референцных станций / Е.А. Бессонов, А.А. Жалило, А.А. Желанов и др. // 8-а Міжнародна науково-практична конференція «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування - Європейський досвід»: міжнар. наук.-практ. конф., випуск 8, 2012 р.: тези. доп. – Чернігів. – С. 76–79.

17. International project «EEGS2» – «EGNOS extension to eastern Europe: applications»/ Ya. S. Yatskiv, A. I. Dohov, A. M. Lukyanov at al. // 8-а Міжнародна науково-практична конференція «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування - Європейський досвід»: міжнар. наук.-практ. конф., випуск 8, 2012 р.: тези. доп. – Чернігів. – С. 16–18.

18. International project «EEGS2 Extension to Eastern Europe: Applications». Current activity and development / Ya. S. Yatskiv, A. I. Dohov, A. A. Zhalilo at al. // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Авіа-2013». – Т.2. – 21-23 апреля 2013 г.: тезисы докл. – Киев – С. 7.30–7.33.

19. Экспериментальная оценка характеристик новой сетевой технологии одночастотного ГНСС-позиционирования сантиметровой точности с использованием наблюдений разреженных сетей референцных станций / А.А. Жалило, А.А. Желанов, И.В. Дицкий и др. // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Авіа-2013». – Т.2. – 21-23 апреля 2013 г.: тезисы докл. – Киев – С. 7.38–7.41.

20. Достижение сантиметровой точности сетевого ГНСС-позиционирования с использованием одночастотного оборудования на базовых расстояниях до 100 км / А.А. Жалило, А.А. Желанов, И.В. Дицкий и др. // Матеріали міжнародної конференції «Україна-Росія-Сколково», 22-23 мая 2013 г.: тезисы докл. – Киев – С.80–81.

21. Mapping the Regional Ionospheric TEC using Observations of GNSS Stations of Ukraine / E. A. Bessonov, I.V. Ditskiy, A.A. Zhelanov at al. // TCSET'2014, 25 February – 1 March 2014: thesis. – Lviv– p.792.

22. Дицкий И.В. Дифференциальное GPS-позиционирование миллиметрового уровня точности на длинных базовых линиях / И.В. Дицкий // Труды 18-го Международного молодёжного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Т3. – 14 – 16 апреля 2014 г.: тезисы докл. – Харьков. – С. 119–120.

АНОТАЦІЯ

Діцький І. В. Розвиток методів та алгоритмів розв'язання неоднозначності та усунення стрибків фазових вимірювань у задачах точного позиціонування по сигналах глобальних навігаційних супутникових систем. – Рукопис.

Дисертація на одержання ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.12.17 – Радіотехнічні й телевізійні системи. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2014.

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення надійності розв'язання неоднозначності та усунення стрибків фазових ГНСС-спостережень шляхом вдосконалення відомих і створення нових методів і алгоритмів обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень, включаючи нові методи верифікації фазових рішень, що дозволяє виконувати позиціонування на сантиметровому/міліметровому рівні точності.

Викладено результати розвитку й верифікації методів і алгоритмів відновлення безперервності фазових спостережень і розв'язання фазової неоднозначності (РФН), під час спільної обробки кодових і фазових (і їхніх лінійних комбінацій) спостережень глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС). При цьому використовується спеціальна процедура спільного МНК-оцінювання сукупності інформаційних (координат, розбіжностей годинників тощо) і неінформаційних параметрів (циклічних фазових стрибків, початкових фазових неоднозначностей). Оцінювання циклічних фазових стрибків і початкових фазових неоднозначностей здійснюється шляхом прямого перебору в попередньо визначеній області пошуку.

Запропоновано й апробовано новий метод верифікації (валідації) правильності фіксації початкових фазових неоднозначностей для різних умов проведення вимірювань. Метод припускає використання подвійних різниць спостережень та їхніх лінійних комбінацій для виконання верифікації РФН. Розроблений метод верифікації підходить як для одночастотних, так і для двочастотних статичних і кінематичних вимірювань різної тривалості під час обробки в однобазовому або мережному режимах вимірювань і дозволяє з високою ймовірністю перевірити правильність рішення задачі РФН. При цьому немає необхідності знання з високою точністю моделі погрішностей, закону розподілу погрішностей.

Вірогідність наукових результатів і висновків, сформульованих у дисертації, доведена, насамперед, експериментальною перевіркою основних викладених наукових положень на безлічі реальних сесій ГНСС спостережень.

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи, усунення циклічних фазових стрибків, розв'язання фазової неоднозначності, диференціальний режим, алгоритм, точність, надійність, верифікація.

АННОТАЦИЯ

Дицкий И. В. Развитие методов и алгоритмов разрешения неоднозначности и устранения скачков фазовых измерений в задачах точного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем. – Рукопись.

Диссертация на получение степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2014.

В диссертационной работе решена научно-практическая задача повышения надежности разрешения неоднозначности и устранения скачков фазовых ГНСС-наблюдений путем усовершенствования известных и созданию новых методов и алгоритмов обработки фазовых и кодовых ГНСС-наблюдений, включая новые методы верификации фазовых решений, что позволяет выполнять позиционирование на сантиметровом/миллиметровом уровне точности.

Изложены результаты развития и верификации методов и алгоритмов восстановления непрерывности фазовых наблюдений и разрешения фазовой неоднозначности (РФН) в ходе совместной обработки кодовых и фазовых (и их линейных комбинаций) наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). При этом используется специальная процедура совместного МНК-оценивания совокупности информационных (координат, расхождений часов и др.) и неинформационных параметров (циклических фазовых скачков, начальных фазовых неоднозначностей). Оценивание циклических фазовых скачков и начальных фазовых неоднозначностей осуществляется путем прямого перебора в предварительно определённой области поиска.

Предложенные и исследованные алгоритмы РФН предполагают использование многоэтапной процедуры обработки, где на каждом из этапов выполняется уточнение решения. Это позволяет получить надежное (~100 %) целочисленное решение задачи РФН в различных условиях проведения измерений.

Предложен и апробирован новый метод верификации (валидации) правильности фиксации начальных фазовых неоднозначностей для различных условий проведения измерений. Метод предполагает использование двойных разностей наблюдений и их линейных комбинаций для выполнения верификации РФН. Разработанный метод верификации подходит как для одночастотных, так и для двухчастотных статических и кинематических измерений различной длительности при обработке в однобазовом или сетевом режимах измерений и позволяет с высокой вероятностью проверить правильность решения задачи РФН. При этом отсутствует необходимость знания с высокой точностью модели погрешностей, закона распределения погрешностей.

Достоверность научных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, доказана, прежде всего, экспериментальной проверкой основных изложенных научных положений на множестве реальных сессий ГНСС наблюдений.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, устранение циклических фазовых скачков, разрешение фазовой неоднозначности, дифференциальный режим, алгоритм, точность, надежность, верификация.

ABSTRACT

Ditskiy I.V. Development of methods and algorithms for ambiguity resolution and cycle slips repair of carrier-phase measurements in tasks of high precision positioning using signals of global navigation satellite systems – a Manuscript.

Thesis for taking degree of candidate of technical sciences by speciality 05.12.17 – Radio Engineering and Television Systems, Kharkov National University of Radio Electronics (KhNURE), 2014.

This thesis solves the scientific and practical task on improving reliability ambiguity resolution and slips repair carrier-phase GNSS observations by improving the known and the development of new methods and algorithms for processing carrier-phase and code GNSS observations, including new methods of verification phase solutions, allowing for positioning cm / millimeter-level accuracy.

The results of development and verification of methods and algorithms for carrier-phase observations continuity recover and carrier phase ambiguity resolution (CPAR) in the course of the joint processing of code and carrier-phase (and their linear combinations) observations of global navigation satellite systems (GNSS) are stated. Along this it is uses a special procedure for the joint LSM-estimation of the whole set of information (coordinates, clock divergence etc.) and non-informative parameters (cyclic carrier-phase slips, initial carrier-phase ambiguities). The estimation of cyclic carrier phase slips and the initial carrier phase ambiguities is carried out by direct enumeration in the preliminary determined search area.

A new method of verification (validation) of correct fixing of the initial carrier-phase ambiguities for different conditions of measuring is proposed and tested. The method implies using double-differences of observations and their linear combinations for carrying out carrier-phase ambiguity verification. The developed verification method is suitable for both single-frequency and dual-frequency static and kinematic measurements of different duration while processing in single base and network measuring modes and allows a high probability verification of correctness of the task of carrier-phase ambiguity resolution. Thus, there is no need for high accuracy knowledge of error models, the distribution law of errors.

The validity of scientific results and conclusions is proved, first of all, by experimental testing of the stated basic scientific principles using a set of real GNSS observations sessions.

The Keywords: global navigation satellite systems, cyclic carrier-phase slips repair, carrier-phase ambiguity resolution, differential mode, algorithm, accuracy, reliability, verification.

Підп. до друку 17.11.14.

Умов.друк.арк. 1,4.

Ціна договірна

Формат 60x84 ¹/₁₆.

Облік. вид.арк. 1,3

Зам №2-911

Спосіб друку – ризографія.

Тираж 100 прим.

ХНУРЕ. Україна. 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
61166, Харків, просп. Леніна, 14