

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Желанов Олексій Олександрович



УДК 621.396.98

РОЗВИТОК МЕТОДУ ТА АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ ФАЗОВИХ  
СПОСТЕРЕЖЕНЬ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ  
СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ ВИСОКОТОЧНОГО КІНЕМАТИЧНОГО  
ПОЗИЦІОНУВАННЯ

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у 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  
кафедри основ радіотехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,  
професор  
Кортунов В'ячеслав Іванович,  
Національний аерокосмічний університет  
ім. М.С. Жуковського «ХАІ»,  
професор кафедри прийому, передачі і обробки  
сигналів

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
Пісарьонко Георгій Георгійович,  
Центральне казенне  
конструкторське бюро «Протон»,  
провідний інженер

Захист відбудеться "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2011 р. о \_\_ 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 "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми

В даний час існує багато практичних задач, що потребують високоточного визначення місцеположення (позиціонування) рухомих об'єктів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС). Вирішення ряду задач потребує досягнення субдециметрової і сантиметрової точності визначення координат об'єктів. Досягнення вказаного рівня точності координатних визначень при використанні кодових ГНСС-спостережень неможливе через відносно високий рівень шумів (середньоквадратична похибка складає  $\sim 0,5 \div 1$  м) і багатопроменевості. Використання фазових ГНСС-спостережень дозволяє досягти сантиметрового/міліметрового рівня точності, оскільки шумова складова похибки вимірів фази несучої частоти, як правило, складає декілька міліметрів.

При обробці фазових спостережень існує дві принципові проблеми: усунення фазових циклічних/напівциклічних стрибків і розрізнення так званих початкових фазових невизначеностей. Задача розрізнення фазових невизначеностей (РФН) полягає у визначенні цілої кількості циклів  $N$  для усіх ділянок спостережень кожного супутника з виключеними фазовими стрибками. Поява фазових стрибків обумовлена зривами стеження за фазою несучої частоти сигналу. При цьому відлік безперервної фази починається наново із новим початковим значенням. Тому рішення задачі РФН є принципово важливим при обробці фазових спостережень і актуальним для усіх ГНСС. У даній роботі розглядається розв'язання задачі РФН з використанням моделі спостережень повністю функціонуючої ГНСС – GPS (США). Запропоновані в роботі метод і алгоритми РФН можуть бути застосовані до моделей спостережень інших ГНСС, зокрема, при спільній обробці сигналів декількох ГНСС.

Детальний огляд науково-технічних досягнень в області обробки фазових спостережень показує, що в загальному випадку задача РФН зводиться до пошуку оптимального рішення задачі спільного оцінювання континуальних параметрів і дискретних величин фазових невизначеностей. При цьому здійснюється пошук такої множини невизначеностей, яка забезпечує мінімум сумарного середнього відхилення фазових спостережень від прийнятої моделі. Існуючі підходи до вирішування цієї задачі не мають єдиного досконалого математичного апарату, який дозволяє однозначно гарантувати отримання найкращого рішення для сукупності континуальних і цілочисельних параметрів. Відомі методи РФН, наприклад LAMBDA (Least-squared AMBiguity Decorrelation Adjustment) і AFM (Ambiguity Function Method) та ряд інших, передбачають пошук екстремуму певної функції. У випадку наявності декількох екстремумів, близьких до глобального, можливе невірне розрізнення фазових невизначеностей. Тому визначення умов надійного розрізнення фазових невизначеностей має вирішальне значення.

Через складність вирішування задачі РФН на несучих частотах у світовій практиці використовують лінійне комбінування спостережень, що дозволяє перейти до вимірів різницевої частоти, так званої лінійної комбінації (ЛК) спостережень Wide Lane (WL). Довжина хвилі комбінації WL ( $\lambda_w = 0,86$  м) приблизно в чотири рази перевищує довжини хвиль на несучих частотах L1 і L2

GPS ( $\lambda_1 = 0,19$  м,  $\lambda_2 = 0,24$  м), що дозволяє застосувати до розв'язання задачі РФН WL підхід, заснований на комбінуванні фазових і однозначних кодових спостережень. Рішення задачі РФН для WL-спостережень можна розглядати як проміжний результат, який дозволяє істотно обмежити область допустимих значень невизначеності L1/L2 GPS-спостережень. У разі неможливості отримання цілочисельного розв'язку задачі РФН L1/L2 в практиці використовують або WL-рішення, або так зване "плаваюче" рішення (float), яке вимагає накопичення спостережень протягом тривалих інтервалів часу. Крім того, відомо, що float-рішення є в більшості випадків менш точним, ніж WL-рішення.

Тому актуальними є задачі визначення і реалізації умов досягнення високої надійності РФН спостережень різницевої частоти і досягненні субдециметрової/сантиметрової точності координатних визначень за рахунок розвитку методу РФН WL і нових алгоритмів обробки фазових спостережень різницевої частоти.

Виходячи з вищесказаного, актуальною є тема дисертаційної роботи, спрямована на розвиток вітчизняних технологій у сфері високоточного місцевизначення, що неможливо без створення методичного, алгоритмічного і програмного забезпечення обробки ГНСС-спостережень.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційні дослідження пов'язані з планами науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки і Головної астрономічної обсерваторії НАН України, зокрема: НДР "Розробка та дослідження підсистеми збору і автоматизованої післясеансної обробки GNSS спостережень користувачів з використанням зональних VRS-корекцій та підсистеми розповсюдження диференціальних DGPS/RTK корекцій в реальному часі з використанням технології NTRIP" (2007, № ДР 0107U008721); НДР "Разработка алгоритмического обеспечения предварительной послесеансной обработки наблюдений ГЛОНАСС, включая контроль качества и целостности наблюдений" (2007-2008, № ДР 0107U008720); інноваційного науково-технічного проекту "Інформаційно-вимірвальна GNSS система та мережна VRS-технологія забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок у Закарпатті та Чернігівщині" (2007, № ДР 0107U006821); інноваційного науково-технічного проекту "Інформаційно-вимірвальна GNSS система та мережна VRS-технологія забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок у Києві та Київській області" (2008, № ДР 0108U003130); 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, № ДР 0110U000984). У перелічених роботах здобувач був виконавцем.

**Мета роботи** полягає в розробці, дослідженні і експериментальному тестуванні процедур високоточного кінематичного позиціонування на основі вдосконалення існуючих і створення нових однобазових і багатобазових методів і алгоритмів обробки фазових і кодових спостережень двочастотних ГНСС-приймачів.

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

1) пошук і розробка алгоритмів РФН WL-спостережень з використанням кодово-фазової комбінації спостережень, яка називається комбінацією Melbourne-Wübbena (MW) на честь дослідників, які запропонували її, в

однобазовому та багатобазовому режимах вимірів й алгоритмів подальшої верифікації результатів РФН із застосуванням декількох незалежних способів;

2) пошук і розробка алгоритмів підвищення точності позиціонування, а саме: алгоритми розв'язання навігаційної задачі визначення координатно-часових і швидкісних параметрів з апріорною оцінкою точності отриманого результату, оцінки і урахування фазових характеристик GPS/ГНСС-антен, використання іоносферних моделей Klobuchar і GIM IONEX при визначенні координат;

3) розробка методики підтвердження достовірності отриманих теоретичних результатів дисертації з використанням реальної вимірювальної інформації.

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

**Предмет дослідження** – методи і алгоритми розрізнення фазових невизначеностей спостережень різницевої частоти і оцінки достовірності отриманого результату, методи підвищення надійності РФН і точності координатних визначень.

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

#### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Запропоновані нова модифікація методу та нові алгоритми розрізнення фазових невизначеностей й високоточного позиціонування з використанням фазових GPS-спостережень різницевої частоти. Вдосконалений метод, на відміну від відомих, має ряд істотних переваг.

Передусім, модифікований метод відрізняється тим, що уперше запропоноване використання **трьохетапної процедури РФН WL-спостережень**, яка включає: **універсальний алгоритм РФН** в однобазовому та багатобазовому (мережевому) режимах з використанням ЛК Melbourne-Wübbena, як для статичних, так і для кінематичних спостережень, з формуванням т.з. "віртуальних" подвійних різниць спостережень. Оцінка надійності і верифікація вирішення задачі РФН проводиться з використанням автокореляційного аналізу часових рядів спостережень; **алгоритм РФН WL-спостережень**, для яких на попередньому етапі обробки ЛК MW не досягнуте надійне рішення задачі РФН (метод використовує фазові WL-спостереження і ґрунтується на спільній оцінці континуальних і дискретних параметрів); **мережевий алгоритм верифікації** оцінок цілочисельних фазових невизначеностей (зрівнювання цілочисельних невизначеностей шляхом замикання контурів наземної конфігурації станцій і/або поточного супутникового сузір'я). Залежно від умов проведення спостережень та їх якості виконується 2 або 3 етапи при вирішенні задачі РФН. Застосування трьохетапної процедури РФН WL при обробці реальних спостережень дозволило досягти надійне повне розв'язання задачі РФН.

2. Запропонована і верифікована модель похибок WL-спостережень, що враховує основні похибки ГНСС-спостережень. Застосування моделі дозволило отримати зважене оптимальне розв'язання навігаційної задачі (НЗ) по методу найменших квадратів (МНК) з використанням фазових спостережень і виконати апріорну оцінку точності координатно-часових визначень (КЧВ). Порівняння апріорної і апостеріорної оцінок точності позиціонування з використанням модифікованого методу та алгоритмів обробки фазових спостережень показало,

що апріорна оцінка точності КЧВ може служити внутрішнім надійним індикатором точності позиціонування.

3. Для урахування похибок при рішенні задачі координатно-часових визначень створені нові алгоритми. Зокрема, запропоновані алгоритми дозволяють використовувати для компенсації іоносферної похибки спостережень не лише стандартну модель Klobuchar, але і GIM IONEX (IGS). Запропоновано новий спосіб верифікації фазових характеристик GPS/ГНСС-антен в конкретних умовах експлуатації і реалізовано алгоритм перерахунку спостережень на частоті L2 GPS на положення фазового центру на частоті L1 GPS. Застосування комплексу запропонованих алгоритмів дозволило підвищити точність координатних визначень для рухомих і статичних об'єктів.

#### **Практичне значення отриманих результатів**

1. Вперше (серед вітчизняних дослідників) розроблено алгоритмічно-програмний комплекс високоточного позиціонування з використанням фазових GPS-спостережень різницевої частоти.

2. Виконано експериментальне тестування і проведені дослідження запропонованої трьохетапної процедури РФН з використанням реальної вимірювальної інформації. Узагальнений аналіз потенційних можливостей запропонованого методу позиціонування показав, що при використанні фазових WL-спостережень стійко досягається повне розрізнення фазових невизначеностей. Для кінематичних спостережень, залежно від умов проведення вимірів, досягається субдециметровая точність позиціонування (нев'язки відносно еталонних оцінок склали  $3\div 5$  см по планових координатах і  $5\div 7$  см по висоті) на віддаленостях до 200 км. Для статичного режиму зйомки досягається субдециметрова/сантиметрова точність місцевизначення на базових відстанях до 200 км (типове максимальне відхилення від еталонних оцінок склало  $4\div 5$  см по усіх координатах).

3. Запропоновано і апробовано спосіб верифікації фазових характеристик (ФХ) GPS/ГНСС-антен в конкретних умовах експлуатації на основі натурних експериментів. Спосіб припускає використання опорного пункту з точними оцінками координат і відомими ФХ антени і дозволяє провести оцінку ФХ досліджуваної антени і їх вплив на точність місцевизначення.

4. Результати дисертаційної роботи впроваджені при створенні 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" (ГАО НАНУ), при виконанні НДР за замовленням ВАТ "АТ НДІРВ", при виконанні НДР по держзамовленню. Практичне використання результатів дисертаційної роботи підтверджується 2 актами впровадження.

#### **Особистий внесок здобувача**

Автором самостійно отримано основні результати дисертаційної роботи. У роботах, виконаних у співавторстві, авторові належать наступні результати. У роботі [1] запропоновано алгоритм оцінки та верифікації фазових невизначеностей подвійних різниць ЛК MW GPS-спостережень. У роботі [2] представлено комплекс алгоритмів для розв'язання задач РФН без явного формування подвійних різниць спостережень, оцінки координатно-часових параметрів об'єктів, апріорної оцінки точності. У роботах [10, 11] було запропоновано, а у роботах [3, 4] отримала подальший розвиток методика оцінки якості калібровок фазових характеристик GPS/ГНСС-антен.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення дисертаційної роботи обговорювалися на наступних міжнародних конференціях: 4-а, 6-а Міжнародна науково-практична конференція (МНТК) «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – європейський досвід» (м. Чернігів, 2008, 2010 р.р.); дев'ята МНТК «Сучасні інформаційні і електронні технології» м. Одеса, 2008 р.); III-я МНК «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ-2007» (м. Севастополь, 2007 р.); 11-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті» (м. Харків, 2007); третій Міжнародний Радіоелектронний Форум (МРФ-2008) «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (м. Харків).

### **Публікації**

По тематиці дисертації всього опубліковано 17 наукових праць, зокрема, 10 статей у провідних наукових фахових виданнях, затверджених ВАК України, а також 7 праць наукових конференцій.

### **Структура та обсяг дисертації**

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (127 найменувань), 4 додатків. Загальний обсяг роботи – 157 стор. (з них основний текст – 130 стор., додатки – 27 стор., 59 рисунків, 15 таблиць).

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

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 приведені загальний опис і перспективи розвитку ГНСС, таких як GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), Galileo (ЄС), COMPASS/BeiDou (Китай). При аналізі сучасних вимог до точності і надійності КЧВ визначені групи користувачів, які потребують досягнення субдециметрового рівня точності координатних визначень. Показано, що досягнення вказаної точності позиціонування можливе лише при використанні фазових ГНСС-спостережень.

За результатами огляду науково-технічних досягнень в області обробки фазових спостережень показано, що вирішення задачі РФН безпосередньо на несучих частотах GPS є дуже складною задачею. Показано, що одним з принципово важливих завдань є пошук нових методів і алгоритмів РФН і визначення умов надійного розв'язання задачі РФН.

Показано, що сформульована мета і задачі досліджень є актуальними не лише для України, але і для інших країн.

У **другому розділі** дисертаційної роботи наведено математичну модель спостережень, яка використовувалась при дослідженнях, перераховані і описані основні джерела похибок і лінійні комбінації спостережень.

У роботі використовується узагальнена математична модель рівнянь спостережень кодових  $\hat{S}_{(c,p)i}^j(t_k)$  і фазових  $\hat{L}_{(1,2)i}^j(t_k)$  псевдовідстаней ( $i$  – індекс приймача;  $j$  – індекс супутника;  $t_k$  – момент формування вимірів в приймачі):

$$\hat{\mathbf{S}}_{(c,p)i}^j(t_k) = \mathbf{F}_i^j(t_k) + k_{1,2} \cdot \mathbf{I}_i^j(t_k) + (b_{(c,p)i} - B_{(c,p)}^j) + [\Delta\tilde{\rho}_{pcv(1,2)i}(t_k)] + \delta\mathbf{S}_{(c,p)i}^j(t_k), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{L}}_{(1,2)i}^j(t_k) = & \mathbf{F}_i^j(t_k) - k_{1,2} \cdot \mathbf{I}_i^j(t_k) + (b_{\varphi(1,2)i} - B_{\varphi(1,2)}^i) - \mathbf{M}_{(1,2)i}^j \cdot \lambda_{1,2} + \\ & + [\Delta\tilde{\rho}_{pcv(1,2)i}(t_k)] + \phi_{wp}(t_k) + \delta\mathbf{L}_{(1,2)i}^j(t_k), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\mathbf{F}_i^j(t_k) = \mathbf{R}_i^j(t_k) + [\Delta_i^{GPS} - \Delta_k^{j,GPS}] + \mathbf{Tr}_i^j(t_k)$ ;  $\mathbf{M}_{1,2i}^j = \mathbf{N}_{1,2i}^j + (\phi_{0i} - \phi_0^j)$ ;

$\mathbf{R}_i^j(t_k) = \sqrt{[x_i(t_k) - \hat{X}_{j(i)}(t_k(t_i^T))]^2 + [y_i(t_k) - \hat{Y}_{j(i)}(t_k(t_i^T))]^2 + [z_i(t_k) - \hat{Z}_{j(i)}(t_k(t_i^T))]^2}$ ;  
 $k_1 = 1; k_2 = \gamma^2 = \lambda_2^2 / \lambda_1^2$ ;  $\mathbf{F}_i^j(t_k)$  – функція змінних, які не залежать від частоти;  
 $\mathbf{R}_i^j(t_k)$  – геометрична відстань між фазовим центром (ФЦ) антени  $i$ -го приймача і ФЦ антени  $j$ -го супутника;  $\mathbf{Tr}_i^j(t_k)$  – абсолютна величина тропосферної затримки в спостереженнях;  $\Delta_i^{GPS}$  – похибка, обумовлена розбіжністю шкали часу  $i$ -го приймача і GPS;  $\Delta_k^{j,GPS}$  – похибка, обумовлена розбіжністю шкали часу  $j$ -го супутника і GPS;  $\mathbf{I}_i^j(t_k)$  – абсолютна величина іоносферної затримки в спостереженнях на частоті L1 GPS;  $x_i, y_i, z_i$  – оцінки поточних координат ФЦ антени  $i$ -го приймача в грінвічській системі координат (ГСК);  $\hat{X}_{j(i)}, \hat{Y}_{j(i)}, \hat{Z}_{j(i)}$  – оцінки координат  $j$ -го супутника (ГСК), визначені на момент випромінювання сигналу відносно  $i$ -го приймача;  $b_{(c,p)i}, B_{(c,p)}^i, b_{\varphi(1,2)i}, B_{\varphi(1,2)}^i$  – кодові і фазові інструментальні затримки в тракті приймачів (b) і супутників (B);  $\Delta\tilde{\rho}_{pcv(1,2)i}(t_k)$  – варіації положення ФЦ GPS/ГНСС-антен;  $\mathbf{N}_{1,2i}^j$  – невизначеності фазових спостережень на частотах L1 і L2 GPS;  $\phi_{wp}(t_k)$  – "wind-up" ефект;  $(\phi_{0i} - \phi_0^j)$  – різниця початкових фаз генераторів  $j$ -го супутника і  $i$ -го приймача;  $\delta\mathbf{S}_{(c,p)}, \delta\mathbf{L}_{(1,2)}$  – флуктуаційні похибки кодових і фазових спостережень, обумовлені шумами і багатопрореністю поширення навігаційних сигналів.

Запропонована модель не враховує похибки, обумовлені дією твердих приливів та ін. На основі цієї загальновідомої моделі спостережень наведені основні лінійні комбінації, які використовуються в практиці. Показано їх призначення, переваги та недоліки.

Показано, що у світовій практиці обробки спостережень при розв'язанні задачі РФН використовують виміри різницевої частоти WL з довжиною хвилі  $\lambda_w = 0,86$  м. Використання WL-спостережень дозволяє застосувати до розв'язання задачі РФН підхід, заснований на комбінуванні фазових і однозначних кодових спостережень, – ЛК Melbourne-Wübbena. Переваги цієї комбінації полягають у тому, що вона являється "безгеометричною", не містить ефемеридно-часових, тропосферних і іоносферних складових похибок спостережень, а подвійні різниці ЛК MW містять фазову невизначеність WL у присутності багатопрореністі і шумів кодових спостережень. Тому усереднювання подвійної різниці ЛК MW за часом дозволяє оцінити цілочисельну невизначеність як континуальну величину, а потім округлити її до найближчого цілого значення. На жаль, в літературі відсутній опис підходів, методів, що дозволяють не лише отримати оцінки невизначеностей, але і гарантувати надійність їх отримання.



В ході досліджень можливостей використання ЛК MW був запропонований надійний алгоритм РФН і процедура верифікації оцінки цілочисельних невизначеностей подвійних різниць фазових спостережень. Обмеженням запропонованого підходу є те, що формування і обробка таких різниць призводить до часткової втрати інформації, оскільки ділянки спільної радіовидимості супутників, як правило, мають меншу протяжність, ніж кожна з ділянок окремо. Крім того, відомі описи алгоритмів РФН з використанням ЛК MW не включають способи верифікації отриманих оцінок. Запропонований підхід до оцінки фазових невизначеностей припускає розрахунок граничних похибок оцінок з урахуванням кореляційних властивостей багатопроменевої і шумової складових спостережень. При цьому оцінка вірогідності ухвалення правильного результату з урахуванням прийнятих допущень складає не менше  $P = 0,997$ .

Враховуючи обмеження при використанні подвійних різниць фазових спостережень, була запропонована **трьохетапна процедура РФН WL**, яка включає наступні алгоритми РФН: **універсальний алгоритм РФН** в однобазовому та мережевому режимах спостережень з використанням ЛК MW; **алгоритм РФН WL-спостережень**, для яких на попередніх етапах обробки ЛК MW не досягнуте надійне вирішення задачі РФН; **мережевий алгоритм верифікації** оцінок цілочисельних фазових невизначеностей.

Запропонований **універсальний алгоритм РФН** засновано на переформатуванні системи рівнянь і формуванні так званих "віртуальних" подвійних різниць. Алгоритм РФН WL-спостережень, що є **першим етапом** обробки спостережень, включає наступні дії. Формуємо, використовуючи спрощений запис моделі спостережень (1, 2), ЛК WL  $\hat{\mathbf{L}}_{Wk}^j(t)$  (3) фазових спостережень, Narrow Lane (NL)  $\hat{\mathbf{S}}_{Nk}^j(t)$  (3) кодових спостережень і потім комбінацію Melbourne-Wübbena  $\hat{\boldsymbol{\mu}}_k^j(t)$  (4) на трасі "супутник-приймач":

$$\hat{\mathbf{L}}_{Wk}^j(t) = \mathbf{F}_k^j + \gamma \cdot \mathbf{I}_k^j - \mathbf{N}_{Wk}^j \cdot \lambda_W + \Delta c_W + \delta \mathbf{L}_{Wk}^j, \quad \hat{\mathbf{S}}_{Nk}^j(t) = \mathbf{F}_{Nk}^j + \gamma \cdot \mathbf{I}_k^j + \Delta c_N + \delta \mathbf{S}_{Nk}^j, \quad (3)$$

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}_k^j(t) = \hat{\mathbf{L}}_{Wk}^j(t) - \hat{\mathbf{S}}_{Nk}^j(t) = \mathbf{N}_{Wk}^j \cdot \lambda_W + \Delta c_\mu + \delta \hat{\boldsymbol{\mu}}_{NMPk}^j, \quad (4)$$

де  $\mathbf{N}_{Wk}^j$  – початкові невизначеності 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;  $\delta \mathbf{L}_{Wk}^j, \delta \mathbf{S}_{Nk}^j, \delta \hat{\boldsymbol{\mu}}_{NMPk}^j$  – похибки, обумовлені багатопроменевою поширенням навігаційних сигналів і шумами спостережень.

Оцінюємо зважене середнє значення  $\hat{\boldsymbol{\mu}}_k^j(t)$  для кожної траси "супутник-приймач" із застосуванням алгоритмів оцінки і верифікації, що враховують автокореляційні властивості кожної послідовності.

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}_k^j = \langle \hat{\boldsymbol{\mu}}_k^j \rangle = \frac{1}{\sum \mathbf{p}_k^2} \cdot \sum \mathbf{p}_k^2 \cdot \hat{\boldsymbol{\mu}}_k^j(t),$$

где  $\mathbf{p}_k$  – вагові коефіцієнти;  $\langle \bullet \rangle$  – знак оцінки середнього значення.

Для верифікації отриманого розв'язання, відповідно, надійності РФН, розраховуємо дисперсію  $\sigma_{\mu_k}^2$  уточненого середнього значення. Відомо, що

розрахунок  $\sigma_\mu^2$  справедливий за умови незалежності відліків функції середньоквадратичного відхилення. Для визначення необхідної кількості незалежних відліків визначаються інтервали кореляції  $t_{corr}$  для кожної з послідовностей. Вибірка значень  $\mathbf{p}_k$  через інтервал кореляції дозволяє вважати ці величини некорельованими. Згідно цього  $\sigma_\mu^2 = \left[ \sum \mathbf{p}_k^2(t_{corr}) \right]^{-1}$ . Після розрахунку дисперсії визначаємо максимальну похибку  $\hat{\mu}_k^j$  як  $\Pi_\mu = 3 \cdot \sigma_\mu$  і, порівнюючи розраховану похибку зі встановленим порогом  $(5/12) \cdot \lambda_W$ , приймаємо рішення про достовірність отриманої оцінки.

Після отримання набору оцінок  $\hat{\mu}_k^j$  і їх похибок  $\Pi_\mu$  переходимо до алгоритму формування "віртуальних" подвійних різниць. Вибираємо референційний (опорний) супутник (ділянку) і відносно нього трансформуємо систему рівнянь таким чином:

$$\vec{f} = \begin{pmatrix} \hat{\mu}_k^{(j)} \\ \hat{\mu}_k^{(j)} \\ \hat{\mu}_k^{(j)} \\ \hat{\mu}_k^{(j)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\omega}_1^{(1)} + \nabla \hat{\beta}_1^{(j,1)} + \Delta \hat{\alpha}_{k1}^{(1)} + \nabla \Delta \mathbf{N}_{k1}^{(j,1)} \cdot \lambda_W \\ \hat{\omega}_1^{(1)} \\ \hat{\omega}_1^{(1)} + \Delta \hat{\alpha}_{k1}^{(1)} \\ \hat{\omega}_1^{(1)} + \nabla \hat{\beta}_1^{(j,1)} \end{pmatrix} \begin{matrix} k = \overline{2, m}; j = \overline{2, n}; \\ k = 1; j = 1; \\ k = \overline{2, m}; j = 1; \\ k = 1; j = \overline{2, n}; \end{matrix}, \quad (5)$$

де  $\hat{\omega}_1^{(1)} = \mathbf{N}_{W1}^{(1)} \cdot \lambda_W + \Delta \mathbf{c}_{\mu 1}^{(1)}$ ,  $\Delta \hat{\alpha}_{k1}^{(1)} = \Delta \mathbf{N}_{W21}^{(1)} \cdot \lambda_W + \Delta \mathbf{c}_{\mu 21}$ ,

$\nabla \hat{\beta}_1^{(j,1)} = \mathbf{N}_{W1}^{(j)} \cdot \lambda_W - \mathbf{N}_{W1}^{(j)} \cdot \lambda_W - \Delta \mathbf{c}_{\mu}^{(j)} + \Delta \mathbf{c}_{\mu}^{(1)}$ ,  $\nabla \Delta \mathbf{N}_{W21}^{(j,1)} = [\mathbf{N}_{W2}^{(j)} - \mathbf{N}_{W1}^{(j)}] - [\mathbf{N}_{W2}^{(1)} - \mathbf{N}_{W1}^{(1)}]$ .

Формуємо вектор вхідних параметрів для процедури РФН. Для однобазового режиму він записується в наступному вигляді:

$$\left\langle \begin{matrix} \vec{\mu} \\ [2:n] \end{matrix} \right\rangle = \vec{\mathbf{F}} \left\{ \begin{matrix} \omega_1, & \Delta \alpha_{21}, & \nabla \vec{\beta}, & \nabla \Delta \vec{\mathbf{N}} \\ [1] & [1] & [n-1] & [n-1] \end{matrix} \right\} + \delta \vec{\mu}, \quad \mathbf{K}_\mu = \text{diag} \left\{ \sigma_{\mu_1}^2, \sigma_{\mu_2}^2, \dots, \sigma_{\mu_n}^2 \right\},$$

де  $\mathbf{K}_\mu$  – кореляційна матриця вхідних параметрів;  $\langle \bullet \rangle$  – знак оцінки середнього значення.

Формуємо МНК-оцінку вихідних параметрів:

$$\hat{\theta} = [\mathbf{A}^T \mathbf{K}_\mu^{-1} \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{K}_\mu^{-1} \langle \vec{\mu} \rangle, \quad \mathbf{A} = \frac{\partial \vec{f}}{\partial \theta},$$

$$\hat{\theta} = \left\| \widehat{\omega}_1 \quad \widehat{\Delta \alpha_{21}} \quad \widehat{\nabla \beta^{(2,1)}} \quad \dots \quad \widehat{\nabla \beta^{(n,1)}} \quad \widehat{\nabla \Delta \mathbf{N}_{21}^{(2,1)}} \quad \dots \quad \widehat{\nabla \Delta \mathbf{N}_{21}^{(n,1)}} \right\|^T, \quad \mathbf{K}_\theta = [\mathbf{A}^T \mathbf{K}_\mu^{-1} \mathbf{A}]^{-1},$$

де  $\mathbf{A}$  – матриця часткових похідних;  $\hat{\theta}$  – вектор вихідних параметрів;  $\mathbf{K}_\theta$  – кореляційна матриця похибок вихідних параметрів.

Для отриманих оцінок  $\widehat{\nabla \Delta \mathbf{N}_{21}^{(n,1)}}$  обчислюємо максимальну похибку згідно з алгоритмом верифікації, описаним вище, з урахуванням залишку від округлення до найближчого цілого числа. У разі достовірності результату, оцінка  $\widehat{\nabla \Delta \mathbf{N}_{21}^{(n,1)}}$  округляється до цілого числа і враховується в (5), після цього формуємо новий вектор  $\vec{\mu}$ , при цьому матриця  $\mathbf{K}_\mu$  залишається незмінною.

Результати експериментальних досліджень підтвердили працездатність і ефективність алгоритму РФН і довели, що використання "віртуальних"

подвійних різниць дозволяє підвищити надійність РФН у порівнянні з традиційним підходом.

За результатами оцінки вектора  $\hat{\theta}$  згідно з виразом (5) формується вектор поправок в WL-спостереження  $\hat{\mu}_{cor}$ . У випадку, якщо застосування алгоритму, описаного вище, не дозволило отримати усі достовірні оцінки  $\widehat{\nabla\Delta\mathbf{N}}_{21}^{(n,1)}$ , то вони включаються в число оцінюваних параметрів при подальшій обробці.

**Другим етапом** РФН WL є обробка одинарних різниць WL-спостережень і отримання спільної оцінки континуальних параметрів, а також невизначеностей  $\widehat{\nabla\Delta\mathbf{N}}_{21}^{(n,1)}$ , що не були розрізнені. При цьому отримані континуальні МНК-оцінки невизначеностей округляються і також підлягають верифікації на достовірність.

Для верифікації отриманих оцінок  $\widehat{\nabla\Delta\mathbf{N}}_{21}^{(n,1)}$  на **третьому етапі** використовується зрівнювання цілочисельних невизначеностей 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:

$$\mathbf{N}_{ji} + \mathbf{N}_{kj} + \mathbf{N}_{ik} = 0.$$

Цей спосіб дозволяє перевірити "замикання" усіх трикутників і визначити нев'язки після РФН WL. У випадку якщо які-небудь нев'язки не дорівнюють нулю – знайти і виправити зміщення в оцінках  $\widehat{\nabla\Delta\mathbf{N}}_{21}^{(n,1)}$  сторін. Після цього вони враховуються в (5) і вектор  $\hat{\mu}_{cor}$  уточнюється.

В результаті застосування трьохетапної процедури РФН WL при обробці реальних спостережень було досягнуто надійне повне розв'язання задачі РФН.

Після опису алгоритмів РФН WL в розділі наведено аналіз потенційних можливостей використання універсального алгоритму РФН WL з використанням ЛК MW для спостережень мережі приймачів. Показано, що при спільній оцінці спостережень мережі приймачів точність оцінки параметрів вектора  $\hat{\theta}$  і надійність РФН  $\widehat{\nabla\Delta\mathbf{N}}_{21}^{(n,1)}$  підвищується до 20÷30%.

**Третій розділ** дисертаційної роботи присвячений алгоритмам високоточного позиціонування та алгоритмам урахування похибок ГНСС-спостережень.

Для розв'язання задачі КЧВ об'єктів використовується традиційна процедура зваженого ітераційного МНК-рішення НЗ з використанням диференціальних однозначних фазових спостережень.

$$\hat{\theta}_{(L+1)} = \hat{\theta}_{(L)} + \Delta\hat{\theta}_{(L+1)}, \quad \Delta\hat{\theta}_{(L+1)} = \left[ \mathbf{A}_{(L)}^T \mathbf{W} \mathbf{A}_{(L)} \right]^{-1} \mathbf{A}_{(L)}^T \mathbf{W} \left[ \hat{\mathbf{Q}} - \mathbf{F}(\hat{\theta}_{(L)}) \right],$$

де  $\hat{\theta}$  – вектор оцінюваних параметрів;  $\hat{\mathbf{Q}}$  – вектор результатів вимірів;  $\mathbf{A}$  – матриця частних похідних;  $L$  – номер ітерації;  $\mathbf{W}$  – вагова матриця вимірних параметрів, де  $\mathbf{W} = \mathbf{K}^{-1}$ ;  $\mathbf{K}$  – кореляційна матриця вимірних параметрів, де  $\mathbf{K} = \text{diag} \{ \sigma_1^2(t), \sigma_2^2(t), \dots, \sigma_n^2(t) \}$ .

Для оцінки точності координатних визначень запропоновано модель похибок спостережень, яка враховує ефемеридні похибки, похибки, обумовлені затримками сигналів в іоносфері і тропосфері, шумами і багатопроблемністю

спостережень, неточним урахуванням ФХ GPS/ГНСС-антен та похибки координатної прив'язки антени базової станції. Цю модель похибок було запропоновано для оцінки апріорної точності КЧВ при обробці однозначних фазових WL-спостережень, де для основних джерел похибок спостережень були прийняті наступні величини СКП:  $\sigma_{\text{еф}}(t) = 0,015 \text{ м}$ ,  $\sigma_{\text{ш/бп}}(t) = 0,025 \text{ м}$ ,  $\sigma_{\text{ФХ}}(t) = 0,01 \text{ м}$ ,  $\sigma_{\text{БС}}(t) = 0,01 \text{ м}$ . Для оцінки СКП похибок, обумовлених тропосферною та іоносферною затримками сигналів, були підібрані відсоткові долі від диференціальних корекцій, розрахованих за моделями:  $\sigma_{\Delta Tr}(t) = k_{Tr} \cdot \Delta Tr$ ,  $\sigma_{\Delta I}(t) = k_{ION} \cdot \Delta I$ , де  $k_{Tr}, k_{ION}$  – коефіцієнти, які підібрані до використовуваних моделей згідно їх характеристик ( $k_{Tr} = 0,1$ ;  $k_{ION} = 0,3 (0,5)$ ). У результаті для кожного супутника розраховується сумарна дисперсія похибок спостережень:

$$\sigma_n^2(t) = \sigma_{\text{еф}}^2(t) + \sigma_{\text{ш/бп}}^2(t) + \sigma_{\text{ФХ}}^2(t) + \sigma_{\text{БС}}^2(t) + \sigma_{\Delta I}^2(t) + \sigma_{\Delta Tr}^2(t).$$

Після визначення координат об'єкту здійснюється оцінка складових вектора швидкості з використанням псевдошвидкісних вимірів. Показано, що при оцінці швидкісних параметрів рухомого об'єкта відхилення отриманого рішення від еталонних оцінок швидкостей не перевищили 5 см/с.

В режимі післясеансної обробки спостережень для компенсації основних джерел похибок доцільно використовувати дані, що надаються міжнародними ГНСС-центрами: точні оцінки координат супутників, розбіжності шкал часу супутників відносно системної шкали часу, глобальні карти електронної концентрації в іоносферному шарі GIM IONEX та ін. На

жаль, в літературі наводяться лише загальні підходи до використання моделі GIM IONEX. Тому для роботи з даними у форматі IONEX було розроблено алгоритми, що здійснюють читання-збереження даних і розрахунок похилої іоносферної затримки з використанням лінійної інтерполяції за простором і часом.

У дисертаційній роботі наведено порівняльний аналіз координатно-часових визначень з використанням моделей Klobuchar і GIM IONEX для базових відстаней 70÷200 км. Показано, що використання моделі GIM IONEX при обробці спостережень прийнятніше, оскільки ця модель дозволяє

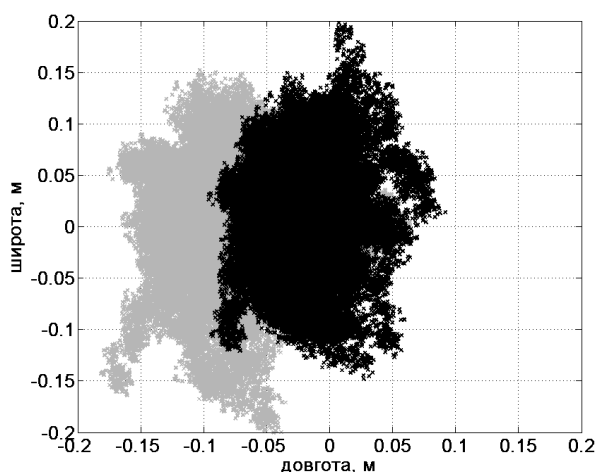


Рис. 1. Відхилення оцінок координат відносно еталону (0;0) з використанням при обробці моделей Klobuchar (сірий) і GIM IONEX (чорний)

точніше компенсувати іоносферні варіації (рис. 1).

Для роз'язання задачі оцінки і урахування ФХ GPS/ГНСС-антен запропоновано простий в реалізації спосіб, який дозволяє без додаткових матеріальних витрат і спеціалізованого устаткування провести оцінку фазових

калібровок GPS/ГНСС-антен для конкретних умов експлуатації. Важливо підкреслити, що при обробці спостережень на частотах L1, L2 GPS необхідно враховувати, що для кожної з частот положення і варіації фазових центрів (ФЦ), відрізняються і при лінійному комбінуванні величина похибки може досягати 10÷12 см. З метою урахування відхилень між ФЦ наведено алгоритм розрахунку корекцій для спостережень на частоті L2 GPS, який дозволяє в подальшій обробці використовувати положення тільки ФЦ на частоті L1 GPS.

У **четвертому розділі** розглянуто питання, що пов'язані з практичним застосуванням розробленого методу та комплексу алгоритмів обробки фазових WL-спостережень.

Даними для апробації комплексу алгоритмів WL-обробки послужили спостереження мережі перманентних станцій України, мережі станцій Ordnance Survey (Великобританія), кінематичні спостереження при проведенні аерофотозйомки і наземних геодезичних робіт. Еталонні оцінки координат для набору даних отримані з використанням апробованого зарубіжного забезпечення "GrafNet/GrafNet" (NovAtel/Waypoint Inc., Канада).

Описано методику проведення порівняльного аналізу і оцінки точності координатних визначень з використанням вищеописаних методу та алгоритмів з еталонними оцінками координатно-часових параметрів.

Наведено результати КЧВ з використанням комплексу алгоритмів WL-обробки для спостережень мережі станцій України і кінематичних спостережень. Представлено результати порівняння апіорної і апостеріорної оцінок точності позиціонування. Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів.

Показано, що нев'язки отриманих WL-рішень відносно еталону для кінематичних спостережень (висота польоту  $H=800\div3000$  м) за плановими координатами в середньому складають 3÷5 см, а за висотою 5÷7 см (рис. 2, 3).

Викиди понад 10 см обумовлено зміною геометричної конфігурації супутникового сузір'я і зростанням флуктуацій іоносферної складової похибки. Слід зазначити, що погіршення точності визначення висоти (при  $H\sim3000$  м) істотно збільшується за причиною неточного урахування тропосферної похибки моделлю через значний перепад висот між приймачами.

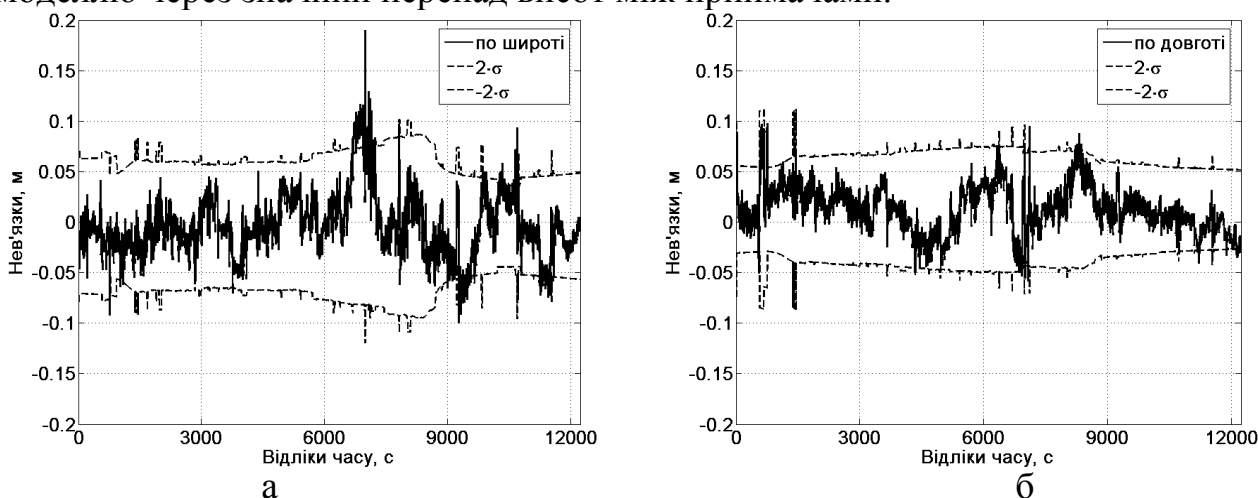


Рис. 2. Нев'язки планових оцінок координат відносно еталонних значень при обробці кінематичних спостережень. Нев'язки за широтою (а) і довготою (б) з оцінкою точності отриманого розв'язання.

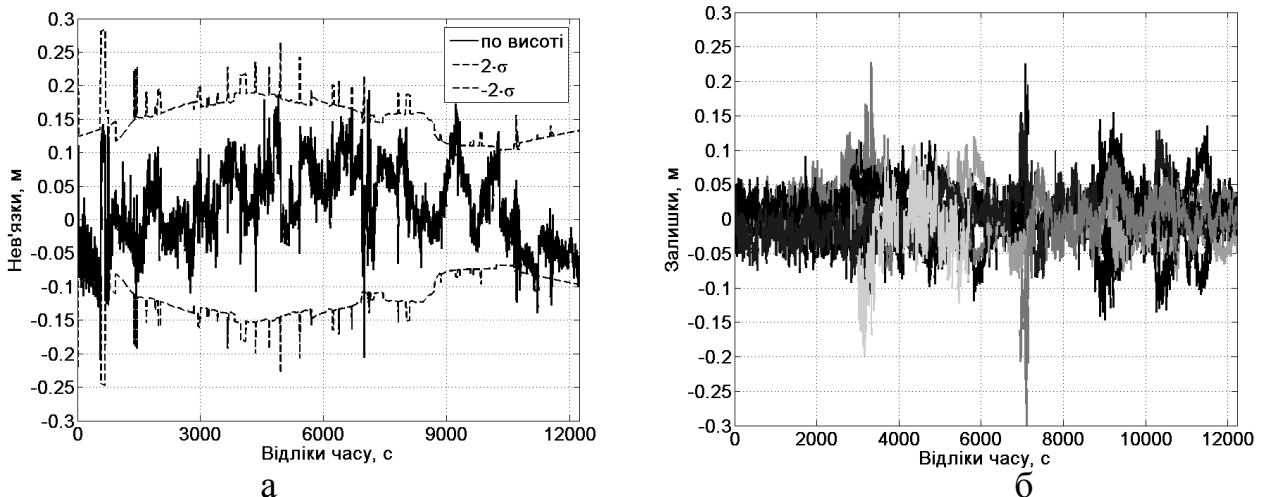


Рис. 3. Нев'язки координат за висотою (а) з оцінкою точності отриманого розв'язання відносно еталонних значень при обробці кінематичних спостережень. Залишки між реальними даними і моделлю (б).

Результати аналізу оцінок відносних координат на наземних базових лініях до 200 км показали наступне. При використанні моделі Klobuchar нев'язки отриманих оцінок від еталонних значень за плановими координатами не перевищили 5 см, а за висотою – 9 см. При використанні моделі GIM IONEX нев'язки оцінок за усіма координатами не перевищують 4÷5 см.

Порівняння апріорної і апостеріорної оцінок точності позиціонування з використанням модифікованого методу і алгоритмів обробки фазових спостережень показало, що апріорна оцінка точності КЧВ може служити внутрішнім надійним індикатором точності позиціонування.

У кінці розділу сформульовані пропозиції по напрямках подальших досліджень методів високоточного позиціонування.

## ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, яка полягає в розробці, дослідженні і експериментальному тестуванні процедур високоточного кінематичного позиціонування на основі вдосконалення існуючих і створення нових однобазових і багатобазових методів та алгоритмів обробки фазових і кодових спостережень двочастотних ГНСС-приймачів. При цьому було досягнуто субдециметрової/сантиметрової точності визначення місцеположення для кінематичного і статичного режиму зйомки на базових відстанях 150÷200 км. При виконанні дисертаційної роботи були отримані наступні нові теоретичні і практичні результати.

1. Уперше (серед вітчизняних дослідників) розроблено алгоритмічно-програмний комплекс високоточного позиціонування з використанням фазових GPS-спостережень різницевої частоти.

2. У галузі теорії запропоновані нова ефективна модифікація методу і нові алгоритми РФН і високоточного позиціонування з використанням фазових GPS-спостережень різницевої частоти. Розроблені алгоритми об'єднані в трьохетапну процедуру РФН WL, які мають ряд істотних відмітних особливостей:

- запропоновано універсальний алгоритм РФН в однобазовому і мережевому режимах з використанням ЛК MW з формуванням "віртуальних" подвійних різниць спостережень;

- запропоновано підхід до розрахунку граничних похибок оцінок фазових невизначеностей за рахунок аналізу кореляційних властивостей багатопроменевої і шумової складових MW-спостережень;

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

- запропоновано алгоритм верифікації оцінок цілочисельних фазових невизначеностей, що базується на застосуванні зрівнювання цілочисельних невизначеностей шляхом замикання контурів наземної конфігурації станцій і/або поточного супутникового сузір'я.

Для оцінки точності координатних визначень запропонована модель похибок спостережень.

Для вирішення задачі урахування фазових характеристик GPS/ГНСС-антен на основі експериментальних досліджень запропоновано простий в реалізації спосіб, що дозволяє провести оцінку фазових калібровок GPS/ГНСС-антен для конкретних умов експлуатації.

### 3. У галузі експериментальних досліджень:

- проведено достатню кількість експериментів по обробці спостережень, виконаних на території України та інших країн, з метою оцінки точності фазових методів реалізації високоточного кінематичного позиціонування з використанням реальних спостережень двочастотних ГНСС-приймачів. Показано, що при використанні розробленого комплексу алгоритмів досягнуто повне розрізнення фазових невизначеностей і субдециметрового/сантиметрового точність визначення місцеположення для кінематичного і статичного режиму зйомки на базових відстанях 150÷200 км;

- проведено порівняння апріорної і апостеріорної оцінок точності позиціонування з використанням модифікованого методу та алгоритмів обробки фазових спостережень. Показано, що апріорна оцінка точності координатно-часових визначень може служити внутрішнім надійним індикатором точності позиціонування.

- проведені експериментальні дослідження з метою оцінки точності фазових методів високоточного позиціонування з використанням моделей іоносфери Klobuchar і GIM IONEX. Показано, що використання моделі GIM IONEX при обробці спостережень забезпечує точність координатних визначень на базових відстанях 70÷200 км в два рази і більшу тієї, що забезпечує модель Klobuchar;

- проведені дослідження фазових характеристик GPS/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 урахування фазових характеристик GPS/ГНСС-антен для задач високоточного позиціонування.

4. Напрями подальших досліджень запропонованої методики високоточного позиціонування, на думку автора, полягають в наступному:

- розробка і дослідження методів та алгоритмів РФН ГНСС-спостережень на частоті L1 і L2 GPS з використанням однозначних фазових WL-спостережень;

- дослідження шляхів підвищення точності моделей іоносфери і тропосфери для досягнення субдециметрової точності координатних визначень на базових відстанях 400÷2000 км.

5. Результати дисертаційної роботи впроваджено при створенні 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" (ГАО НАНУ), при виконанні НДР за замовленням ВАТ "АТ НДІРВ" і виконанні НДР по держзамовленню.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Желанов А.А. Алгоритм и процедура верификации оценки целочисленных неоднозначностей фазовых GPS наблюдений разностной частоты / А. Желанов // Всеукраинский научно-технический сборник «Радиотехника». – 2009. – № 158. – С. 43-52.

2. Желанов А.А. Дифференциальный метод и алгоритмы высокоточного позиционирования с использованием фазовых GPS наблюдений разностной частоты / А.А. Желанов, А.А. Жалило, В.М. Шокало // Всеукраинский научно-технический сборник «Радиотехника». – 2010. – № 161. – С. 72-81.

3. Желанов А.А. Разработка методики оценки качества фазовых калибровок GPS-антенн геодезического класса. Предварительные результаты экспериментальных исследований / А.А. Жалило, А.А. Желанов, Д.А. Шелковенков, В.М. Шокало // Всеукраинский научно-технический сборник «Радиотехника». – 2007. – № 148. – С. 186-198.

4. Желанов А.А. Оценка точности калибровки положения и вариаций фазовых центров приемных GPS/GNSS антенн / А.А. Жалило, А.А. Желанов, Д.А. Шелковенков, В.М. Шокало // Космічна наука і технологія. – 2008. – №4. – С. 39-52.

5. Желанов А.А. Результаты експериментальних досліджень реалізації DGPS/RTK режиму супутникового позиціонування з використанням NTRIP-технології / Д. Шелковенков, О. Желанов, В. Шокало, В. Кондратюк, М. Литвин, С. Флерко, В. Черевко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК. – 2008 г. – №. 1(15). – С. 125-132.

6. Желанов А.А. Экспериментальная оценка возможности выполнения автоматизированного GNSS – мониторинга динамики подвижек техногенно – опасных объектов. результаты предварительных исследований / А.А. Жалило, А.А. Желанов, Д.А. Шелковенков, В.М. Шокало // Вісник Державного університету інформаційно – комунікаційних технологій. – 2008. – Т. 6, № 3. – С. 223-229.

7. Желанов О.О. Результаты експериментальних досліджень точності траєкторних GPS/GNSS вимірювань при виконанні аерофотозйомки з використанням програмних комплексів «ОСТАВА» та «GRAFNAV/GRAFNET™» / Д.О. Шелковенков, О.О. Желанов, О.О. Жалило // Всеукраинский научно-технический сборник «Радиотехника». – 2008. – № 152. – С. 172-184.



8. Желанов А.А. Анализ характеристик реализации режима точного позиционирования PPP в программном комплексе «GRAFNAV/ GRAFNET™». Предварительные результаты / А. Желанов, Д. Шелковенков, А. Жалило, В. Шокало, С. Флерко, В. Черевко // Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – Т. 8, №2. – С. 131-138.
9. Желанов А.А. Спутниковые сетевые технологии высокоточного местоопределения / А.А. Жалило, А.А. Желанов, Д.А. Шелковенков, В.М. Шокало // Всеукраинский научно-технический сборник «Радиотехника». – 2010. – № 160. – С. 208-212.
10. Желанов А.А. Оценка качества фазовых калибровок GPS-антенн геодезического класса / А.А. Желанов // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2007: междунар. науч.-техн. конф., 16-21 квіт. 2007 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2007. – С. 133.
11. Желанов А.А. Методика проверки качества фазовых калибровок GPS-антенн в конкретных условиях эксплуатации / А.А. Желанов // Радиотехника и молодежь в XXI веке: 11-й междунар. форум, 10-12 квіт. 2007 р.: – Х.: тезисы докл. – Х., 2007. – С. 50.
12. Желанов А.А. Обоснование и верификация способов высокоточного определения координат и эллипсоидальной высоты с использованием ГНСС-технологий в задаче создания гравиметрических пунктов / А.А. Желанов // Сучасні інформаційні та електронні технології: міжн. наук.-практ. конф., 19-23 травня 2008 р.: тезисы докл. – Одеса, 2008. – С. 228.
13. Желанов А.А. Інформаційно-вимірювальна GNSS система та мережна VRS технологія забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок / А.А. Желанов // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – європейський досвід: міжнар. нак.-практ. конф., 21-23 травня 2008 р.: тези доп. – Чернігів, 2008. – С. 5-24.
14. Желанов А.А. Точностные характеристики реализации режима точного позиционирования PPP в программном комплексе «GRAFNAV/ GRAFNET™». Предварительные результаты / А.А. Желанов // Сучасні та перспективні системи, радіолокації, радіоастрономії та супутникової навігації: міжн. наук.-практ. конф., 22-24 жовтня 2008 р.: тези доп. – Х., 2008. – С. 362-365.
15. Желанов А.А. Практика створення в Україні інформаційно-вимірювальної GNSS-системи та мережної VRS-технології забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок / Я.С. Яцків, В.П. Харченко, В.М. Шокало, О.І. Терещук, О.О. Жалило, О.О. Желанов та ін. // Наука та інновації. – Т.5, №2. – С. 5-22.
16. Желанов А.А. Оценка возможностей высокоточного кинематического позиционирования для целей аэрофотограмметрии с использованием фазовых GPS-наблюдений разностной частоты/ А.А. Жалило, А.А. Желанов // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – європейський досвід: міжнар. нак.-практ. конф., 25-27 травня 2010 р.: тези доп. – Чернігів, 2010. – С. 18-20.
17. Желанов А.А. Исследование точностных характеристик реализации DGPS-позиционирования с фильтрацией координатного решения в одночастотной аппаратуре NovAtel Inc. / Д.А. Шелковенков, С.Н. Флерко, А.А. Желанов // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – європейський досвід: міжнар. нак.-практ. конф., 25-27 травня 2010 р.: тези доп. – Чернігів, 2010. – С. 31-24.

## АНОТАЦІЯ

**Желанов О.О. Развитие метода та алгоритмів обробки фазових спостережень глобальних навігаційних супутникових систем в задачах високоточного кінематичного позиціонування.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2010.

У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу високоточного кінематичного позиціонування шляхом подальшого вдосконалення існуючих і створення нових однобазових і мережевих методів і алгоритмів обробки фазових і кодових спостережень двочастотних GPS/ГНСС-приймачів. При цьому було досягнуто субдециметрової/сантиметрової точності визначення місцеположення для кінематичного ( $3 \div 7$  см (СКВ)) і статичного ( $2 \div 5$  см (СКВ)) режиму зйомки на базових відстанях  $150 \div 200$  км.

Достовірність наукових результатів і висновків, сформульованих у дисертації доведено, насамперед, експериментальною перевіркою основних наукових положень роботи.

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи, спостереження, розрізнення фазових невизначеностей, алгоритм, різницева частота, кодово-фазова комбінація, точність, надійність, верифікація, Wide Lane, Melbourne-Wübbena.

## АННОТАЦИЯ

**Желанов А.А. Развитие метода и алгоритмов обработки фазовых наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем в задачах высокоточного кинематического позиционирования.** – Рукопись.

В диссертации решена актуальная научно-прикладная задача высокоточного кинематического позиционирования путем дальнейшего совершенствования существующих и создания новых однобазовых и многобазовых методов и алгоритмов обработки фазовых и кодовых наблюдений двухчастотных GPS/ГНСС-приемников. При этом достигнута субдециметровая/сантиметровая точность позиционирования для кинематического и статического режима съемки на базовых расстояниях  $150 \div 200$  км.

В диссертационной работе предложены новая модификация метода и новые алгоритмы РФН и высокоточного позиционирования с использованием фазовых GPS-наблюдений разностной частоты. Усовершенствованный метод имеет ряд существенных особенностей.

Модифицированный метод отличается тем, что впервые предложено использование трехэтапной процедуры РФН WL-наблюдений, которая включает в себя: универсальный алгоритм РФН в однобазовом и многобазовом (сетевом) режимах с использованием ЛК MW, как для статических, так и для

кинематических наблюдений, с формированием т.н. «виртуальных» двойных разностей наблюдений. Оценка надежности и верификация решения задачи РФН проводится с использованием автокорреляционного анализа временных рядов наблюдений; алгоритм РФН WL-наблюдений, для которых на предыдущем этапе обработки ЛК MW не достигнуто надежное решение задачи РФН (метод использует фазовые WL-наблюдения и основывается на совместной оценке континуальных и дискретных параметров); сетевой алгоритм верификации оценок целочисленной фазовой неоднозначности (уравнивание целочисленных неоднозначностей путем замыкания контуров наземной конфигурации станций и/или текущего спутникового созвездия).

Предложена и верифицирована модель погрешностей WL-наблюдений, что позволило получить взвешенное оптимальное МНК-решение навигационной задачи с использованием фазовых наблюдений и выполнить априорную оценку точности координатно-временных определений.

Для учета погрешностей при решении задачи координатно-временных определений созданы новые алгоритмы. В частности, предложено использование для компенсации ионосферной погрешности наблюдений не только стандартной модели Klobuchar, но и GIM IONEX (IGS), а также новый способ верификации фазовых характеристик GPS/ГНСС-антенн в конкретных условиях эксплуатации и алгоритм пересчета наблюдений на частоте L2 GPS на положение фазового центра на частоте L1 GPS.

Выполнено экспериментальное тестирование и проведены исследования предложенной трехэтапной процедуры РФН с использованием реальной измерительной информации. Обобщающий анализ потенциальных возможностей предложенного метода позиционирования показал, что при использовании фазовых WL-наблюдений устойчиво достигается полное разрешение фазовой неоднозначности. Для кинематических наблюдений, в зависимости от условий проведения измерений, достигается субдециметровая точность позиционирования (невязки относительно эталонных оценок составили  $3\div 5$  см по плановым координатам и  $5\div 7$  см по высоте) на удалениях до 200 км. Для статического режима съемки достигается субдециметровая/сантиметровая точность местоопределения на базовых расстояниях до 200 км (невязки относительно эталонных оценок составили  $4\div 5$  см по всем координатам).

Достоверность научных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, доказана, прежде всего, экспериментальной проверкой основных научных положений работы.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, наблюдения, разрешение фазовой неоднозначности, алгоритм, разностная частота, кодово-фазовая комбинация, точность, надёжность, верификация, Wide Lane, Melbourne-Wübbena.

**ABSTRACT**

Zhelanov A.A. "Development of method and algorithms of processing of phase measurements of GNSS in problems of high-precision kinematic positioning". – a Manuscript.

Thesis for the candidate's degree by speciality 05.12.17 – Radio Engineering and Television systems, Kharkov National University of Radio Electronics (KhNURE), 2010

In the dissertation the actual scientific and applied problem of high-precision kinematic positioning is solved. The problem decision is based on modernization and development of single-base and multibase methods and algorithms of processing of phase and code observations of dual-frequency GPS/GNSS-receivers.

The idea of dissertation consists in the following:

- definition and realization of conditions of achievement of high reliability of phase ambiguity resolution (AR) of Wide Lane observations;
- development of AR WL method and creations of new algorithms of processing of processing of phase difference frequency measurements.
- achievement of subdecimeter/centimetric accuracy of positioning.

The reached accuracy of positioning (RMS) on baselines 150÷200 km:

- for a kinematic mode of 3-7 centimetres;
- for a static mode of 2-5 centimetres.

Validity of scientific results and conclusions formulated in the dissertation is proved, first of all, by experimental check of basic scientific positions of the work.

The Keywords: global navigation satellite systems, observations, phase ambiguity resolution, algorithm, difference frequency, code-phase combination, accuracy, reliability, verification, Wide Lane, Melbourne-Wübbena.

Підп. до друку 22.02. 11  
Умов. друк. арк. 1,2.  
Зам. № 2-172.

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Ціна договірна.

Спосіб друку – ризографія  
Тираж 100 прим.

---

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---

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