

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

**Безсонов Євген Андрійович**

**УДК 621.396.98**

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ОЦІНКИ  
ТА УРАХУВАННЯ ІОНОСФЕРНИХ І ТРОПОСФЕРНИХ ЗАТРИМОК  
СИГНАЛІВ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ  
СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ ТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ**

05.12.17 – радіотехнічні і телевізійні системи

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2015

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,**

провідний науковий співробітник науково-навчального центру кафедри основ радіотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки «ХНУРЕ»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України

**Деденок Віктор Петрович,**

провідний науковий співробітник Харківського університету Повітряних Сил ім. І.М. Кожедуба

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

**Горб Олександр Іванович,**

доцент кафедри виробництва радіоелектронних систем літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 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 «\_\_» «\_\_\_\_\_» 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Навігація, точне позиціонування і моніторинг навколишнього середовища із використанням глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) знаходять широке застосування в таких галузях, як транспортні додатки, геодезія, картографія, аерофотознімання, геодинаміка, точне землеробство, прогноз погоди тощо. Рішення цих завдань неможливе без точного урахування впливу середовища поширення сигналів ГНСС – іоносфери і тропосфери, які на сучасному етапі розвитку ГНСС-технологій є переважаючими джерелами похибок спостережень.

У дослідження іоносфери і тропосфери для різних ГНСС-додатків значний внесок внесли ряд провідних університетів і дослідницьких інститутів США, Канади, Іспанії, Нідерландів, Російської Федерації та інших країн. В Україні, зокрема, великий внесок у вивчення іоносфери і тропосфери внесли Інститут іоносфери НАНУ і МОН України, Радіоастрономічний інститут НАН України, Інститут космічних досліджень НАНУ–ДКАУ, Інститут радіофізики і електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України. В умовах постійно зростаючих вимог до точності навігації та позиціонування продовжують удосконалюватися відомі та створюються нові методи і алгоритми оцінювання і урахування іоносферних і тропосферних затримок радіосигналів.

Затримки сигналів ГНСС (діапазон частот  $\sim 1\div 1,6$  ГГц) в іоносфері умовно можна представити у вигляді трендової (повільно змінної) складової (відповідні зміни відстаней можуть сягати  $\sim 10\div 50$  м) і варіаційної ( $\sim 0,5\div 1,5$  м) складової. Зазначені величини іоносферних затримок є значними і, з урахуванням сучасних вимог до точності координатно-часових ГНСС-визначень, повинні бути оцінені та враховані з максимально можливою точністю. Компенсувати обидві складові іоносферних затримок дозволяє двохчастотне ГНСС-обладнання з використанням т.зв. «безіоносферної» (Ionosphere Free) лінійної комбінації спостережень двох частот. Однак така компенсація іоносферних похибок, як відомо, суттєво збільшує похибки, обумовлені шумами та багатопроміневістю, «безіоносферних» (Ionosphere Free) комбінацій спостережень. При цьому залишкові похибки псевдодальномірного кодового рішення можуть сягати  $\sim 5\div 10$  м та більше, що неприйнятно для багатьох додатків. Виконати координатно-часові визначення із сантиметровою точністю дозволяє використання фазових ГНСС-спостережень, однак двохчастотна компенсація іоносферних затримок можлива тільки у випадку надійного розв'язання фазових неоднозначностей (РФН) на обох несучих частотах. При виконанні РФН на першому етапі (одержання попереднього рішення), як правило, для корекції спостережень використовуються глобальні або регіональні іоносферні моделі – Klobuchar, GIM IONEX (IGS), моделі широкозонних диференціальних систем SBAS (Space Based Augmentation Systems) та ін. Чим точніше використовувані моделі, тим, в остаточному підсумку, вище ймовірність правильної оцінки целочисельних фазових неоднозначностей і, відповідно, вище надійність точного позиціонування. У випадку широко використовуваного на практиці одночастотного ГНСС-позиціонування задача точної компенсації іоносферних похибок є критичною і може бути вирішена тільки із використанням додаткової інформації – диференціальних корекцій і іоносферних моделей. Як показує практика, при рішенні низки завдань позиціонування точність формування іоносферних корекцій з ви-

користанням відомих широко використовуваних трендових моделей зазвичай недостатня. Наприклад, похибки корекцій по моделі GIM IONEX (IGS) можуть сягати  $\sim 0,3 \div 1,5$  м і виконання цілочисельного РФН із необхідною надійністю може бути суттєво ускладнене.

Варіаційна компонента іоносферних затримок практично не піддається моделюванню і має невеликий радіус просторово-часової кореляції, що накладає обмеження на використання традиційних (однобазових) диференціальних корекцій. Так, ефективна компенсація іоносферних варіацій у диференціальному режимі одночастотних координатних визначень досягається на базових відстанях до  $\sim 10 \div 15$  км. Зі збільшенням базової відстані між приймачами ефективність компенсації варіацій іоносферних затримок помітно зменшується.

Таким чином, значний теоретичний і практичний інтерес представляють дослідження можливостей підвищення точності оцінювання і моделювання просторово-часового розподілу ПЕВ іоносфери за рахунок використання високоточних фазових спостережень мережі ГНСС-станцій і вдосконалення методів і алгоритмів обробки спостережень. Це відкриває додаткові можливості рішення моніторингових завдань і прогнозування процесів, що протікають в іоносфері.

Величина тропосферних затримок сигналів ГНСС також вимагає точного урахування. У більшості випадків для корекції спостережень використовують апробовані моделі (наприклад, MOPS, Saatasmoinen, Hopfield та ін.), точність яких у багатьох випадках недостатня, тому що вони не враховують можливі локальні неоднорідності, атмосферні фронти тощо. Суттєво точніше врахувати тропосферні затримки сигналів дозволяє їхнє оцінювання. Як показала світова практика, при диференціальному позиціонуванні оцінювання тропосферних затримок рекомендується виконувати на міжбазових відстанях від  $\sim 500$  км і більше, тому що на менших базових відстанях суттєво погіршується обумовленість системи рівнянь спостережень при спільному оцінюванні інформаційних параметрів і параметрів моделі тропосфери. Тому пошук нових ефективних методів і алгоритмів оцінювання тропосферних затримок без використання додаткової інформації або застосування математичної регуляризації рішення є важливим науково-практичним завданням. Також становить інтерес дослідження можливості формування мережевих тропосферних корекцій для рухливих споживачів у зоні покриття мережі.

Виходячи з викладеного, тема дисертаційної роботи є актуальною та спрямована на розвиток вітчизняних технологій точного оцінювання та урахування іоносферних і тропосферних затримок сигналів ГНСС та може бути застосована для точного позиціонування, моніторингу і прогнозування зміни параметрів середовища поширення радіосигналів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження пов'язані із проведенням планових науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки, Головної астрономічної обсерваторії НАН України (м. Київ) та Інституту радіофізики і електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (м. Харків), серед яких:

– 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 «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 «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 «Визначення орієнтації, координат, взаємного положення та параметрів руху об'єктів у космосі з використанням ГНСС технологій» (НДР «Кут», 2013 р., № ДР 0113U002977);

– 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 (2011–2013 рр., № ДР 0112U006084).

У перерахованих роботах здобувач був виконавцем.

**Мета роботи** полягає в удосконаленні, дослідженні і експериментальному тестуванні методів, алгоритмів і процедур оцінки та урахування іоносферних і тропосферних затримок для досягнення сантиметрової точності позиціонування з використанням фазових спостережень перманентних референціальних ГНСС-станцій.

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

1) створення, оптимізації та верифікації нових більш ефективних методів і алгоритмів моделювання повного електронного вмісту (ПЕВ) іоносфери в регіональній області простору, що дозволяють коректувати ГНСС-спостереження і виконувати позиціонування з більшою точністю;

2) дослідження характеристик варіаційної складової іоносферних затримок та її впливу на точність диференціального ГНСС-позиціонування на середніх міжбазових відстанях (~50÷200 км); дослідження порівняльної ефективності компенсації варіацій ПЕВ іоносфери при реалізації традиційного (однобазового) і мережевого диференціальних методів позиціонування;

3) удосконалення і експериментальної верифікації методу і алгоритмів оцінки та урахування ЗТЗ сигналів ГНСС із використанням диференціального методу на середніх базових відстанях, порівняльної оцінки точності тропосферних корекцій ГНСС-спостережень у різні пори року при оцінюванні ЗТЗ і при використанні стандартних моделей, а також дослідження можливості і точності мережевої корекції тропосферних похибок двохчастотних і одночастотних ГНСС-спостережень рухомих об'єктів з використанням оцінок ЗТЗ референціальних станцій.

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

**Предмет дослідження** – методи і алгоритми оцінки та урахування параметрів іоносферних і тропосферних затримок радіонавігаційних сигналів ГНСС

у локальній і регіональній мережових інформаційно-вимірювальних системах точного позиціонування і супутникової навігації з урахуванням особливостей реальної вимірювальної інформації.

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

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Уперше запропоновано метод і алгоритми побудови регіональної моделі ПЕВ іоносфери, відмінною особливістю яких є використання однозначних різностей «безгеометричних» лінійних комбінацій фазових ГНСС-спостережень і спільному МНК-оцінюванні параметрів моделі ПЕВ іоносфери і невідомих параметрів, що заважають (фазових констант, які включають міжчастотні апаратні затримки, випадкові початкові фази годинників приймачів і фазові неоднозначності), це дало можливість підвищити точність моделювання ПЕВ іоносфери і корекції іоносферних похибок при виконанні позиціонування на  $\sim 65\div 80\%$ , що підтверджено експериментальними результатами.

2. Запропонована оригінальна методика і проведено оцінювання просторово-часових характеристик трендової і варіаційної складових диференціальних іоносферних затримок на середніх міжбазових відстанях ( $\sim 50\div 200$  км) у різних сезони року. Запропоновано новий, більш ефективний алгоритм розділу трендової і варіаційної компонент іоносферних затримок. Визначені обмеження традиційного (однобазового) диференціального режиму координатних визначень і показано, що використання подвійної (мережевої) диференціальної корекції дозволяє істотно ефективніше (на  $\sim 30\div 40\%$ ) компенсувати іоносферні затримки сигналів ГНСС.

3. Одержав подальший розвиток метод оцінювання зенітних тропосферних затримок (ЗТЗ) з використанням диференціальних фазових ГНСС-спостережень, відмінною особливістю якого є нове подання моделі тропосферних затримок, що дало можливість оцінювати ЗТЗ із сантиметровою точністю не тільки на базових відстанях понад  $\sim 500$  км, але і на менших міжбазових відстанях  $\sim 50\div 200$  км. Запропонований метод оцінки ЗТЗ дозволив істотно (на  $\sim 20\div 90\%$  залежно від сезону) підвищити точність визначення висотної координати у порівнянні з використанням тропосферної моделі MOPS, застосовуваної в сучасних супутникових системах широкозонної диференціальної навігації.

4. Уперше запропоновано метод мережевої корекції тропосферних похибок двохчастотних і одночастотних ГНСС-спостережень рухомих об'єктів, що використовує оцінки ЗТЗ референцних станцій з міжбазовими відстанями  $\sim 50\div 100$  км і враховує різниці висот прийомних антен станцій і об'єктів що позиціонуються.

### **Практичне значення отриманих результатів**

1. Розроблений комплекс алгоритмів і програмних модулів, що реалізують удосконалені методи оцінки та урахування іоносферних і тропосферних затримок, може бути використаний у складі радіовимірювальних та інформаційних систем для рішення широкого кола завдань точного позиціонування, навігації, високоточного моніторингу і прогнозування параметрів середовища поширення радіосигналів.

2. Виконано експериментальні дослідження розроблених і удосконалених методів і алгоритмів моделювання ПЕВ іоносфери з використанням реальної

вимірювальної інформації, отриманої в різні сезони року. Аналіз можливостей запропонованої моделі ПЕВ дозволяє рекомендувати її для високоточних навігаційних визначень з використанням багатопозиційних систем широкозонної диференціальної (Wide Area Differential) ГНСС-навігації типу EGNOS, удосконалити реалізацію технології PPP (Precise Point Positioning - точного автономного позиціонування) з використанням двох- і одночастотного ГНСС-обладнання, а також вирішувати завдання високоточного моніторингу процесів, що відбуваються в іоносфері.

3. Удосконалений метод оцінювання і формування корекцій тропосферних затримок може бути використаний для підвищення точності та надійності мережевого диференціального позиціонування рухомих об'єктів у реальному часі (RTK - Real Time Kinematic) за рахунок інтерполяції оцінок ЗТЗ референцних станцій і урахування різниць висот прийомних антен станцій та об'єктів, що позиціонуються.

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» (ГАО НАНУ), НДР «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» (ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАНУ), НДР «Визначення орієнтації, координат, взаємного положення та параметрів руху об'єктів у космосі з використанням ГНСС технологій» (ІРЕ ім. О.Я. Усикова 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 отримані основні результати дисертаційної роботи, які опубліковані в роботах [1–6]. У роботах, виконаних у співавторстві, авторові належать наступні результати.

У роботі [1] запропонований алгоритм розрахунку іоносферних корекцій із використанням даних глобальної трендової моделі GIM IONEX, а у роботі [2] запропонований підхід усунення систематичних стрибків та зламів, що виникають у моделі GIM IONEX.

У роботі [3, 4] реалізований алгоритм формування мережевих диференціальних іоносферних корекцій на місцеположення споживача, виконана оцінка точності компенсації іоносферних затримок з використанням мережевих корекцій на різних базових відстанях.

У роботі [5] запропоновані та реалізовані вдосконалений метод і алгоритми оцінки ЗТЗ для мережі базових станцій, також запропоновані метод і алгоритм інтерполяції ЗТЗ базових станцій на поточне місце розташування рухомих споживачів з урахуванням різниць висот між приймачами.

У роботі [6] описані метод і алгоритми побудови регіональної моделі ПЕВ іоносфери, представлені основні результати моделювання, виконаного в рамках міжнародного проекту «Іоносат-Мікро».

#### **Апробація результатів дисертації**

– Основні положення дисертаційної роботи обговорені на наступних міжнародних конференціях [7-19], 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 та 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 «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 19 наукових праць, з яких 5 статей у провідних наукових професійних видавництвах МОН України, 1 стаття опублікована за кордоном, а також 13 праць наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (135 найменувань), 11 додатків. Загальний обсяг роботи – 290 стор. (з них основний текст – 133 стор., список використаних джерел – 18 стор., рисунки та таблиці на сторінку – 40 стор., додатки – 99 стор., 113 рисунків, 43 таблиці).

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РАБОТИ**

У **вступі** обґрунтована актуальність, визначені мета і завдання дисертаційної роботи, представлені наукова новизна та практична значимість отриманих результатів, коротко описана структура роботи, зміст розділів. Наведено дані про впровадження результатів, особистий внесок автора і публікації.

У **першому розділі** виконаний аналіз сучасних вимог до точності координатних визначень, які пред'являються до різних класів споживачів, наведені рівняння ГНСС-спостережень, їх кодові та фазові лінійні комбінації, даний аналіз основних джерел і величин похибок. Виконано огляд відомих методів оцінки та урахування іоносферних і тропосферних затримок. Показано, що на сучасному етапі розвитку ГНСС-технологій в умовах постійно зростаючих вимог до точності навігації та позиціонування стоїть задача вдосконалення відомих і створення нових методів і алгоритмів оцінювання і урахування іоносферних і



тропосферних затримок радіонавігаційних сигналів, як головних джерел похибок спостережень та, відповідно, координатно-часових визначень. Сформульовані та обґрунтовані завдання досліджень.

**Другий розділ** дисертаційної роботи присвячений удосконаленню методу і алгоритмів моделювання повного електронного вмісту (ПЕВ) іоносфери, а також оптимізації та експериментальній верифікації регіональної моделі з використанням реальних спостережень мережі ГНСС-станцій України [6, 18, 19].

Для моделювання ПЕВ іоносфери використовують т.зв. «безгеометричні» (Geometry-Free – «GF») лінійні комбінації кодових ( $\hat{S}_{GF,i}^j$ ) та/чи фазових ( $\hat{L}_{GF,i}^j$ ) псевдодальностей двох частот, які дозволяють виділити інформацію про іоносферні затримки (виражених в метрах) сигналів ГНСС на трасах «супутники - приймачі»:

$$\hat{S}_{GF,i}^j(t_k) = \hat{S}_{1,i}^j(t_k) - \hat{S}_{2,i}^j(t_k) = -[\gamma^2 - 1] \cdot I_i^j(t_k) + [DCB_i + DCB^j] + \delta S_{GF,i}^j(t_k), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \hat{L}_{GF,i}^j(t_k) = \hat{L}_{1,i}^j(t_k) - \hat{L}_{2,i}^j(t_k) = & [\gamma^2 - 1] \cdot I_i^j(t_k) + [b_{\varphi_{GF,i}} - B_{\varphi_{GF}}^j] - \\ & - \left[ (\mathbf{N}_{1,i}^j \cdot \lambda_1 - \mathbf{N}_{2,i}^j \cdot \lambda_2) + (\varphi_{0i} - \varphi_0^j) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) \right] + \phi_{wpGF}^j(t_k) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) + \delta L_{GF,i}^j(t_k), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\hat{S}_{(1,2),i}^j, \hat{L}_{(1,2),i}^j$  – виміряні кодові та фазові псевдодальності ( $i$  – індекс приймача;  $j$  – індекс супутника;  $t_k$  – поточний момент часу);

$I_i^j(t_k)$  – похилі іоносферні затримки на трасах «супутники-приймачі» на частоті L1; затримки  $I_i^j(t_k)$  (в метрах) можуть бути представлені в еквівалентних значеннях ПЕВ ( $TEC$ ) в одиницях  $TECU$  через відомі співвідношення;

$$\gamma = f_{L1}/f_{L2} = \lambda_2/\lambda_1, \quad \lambda_1, \lambda_2 - \text{довжини хвиль несучих сигналів};$$

$DCB_i$  – кодові міжчастотні різниці затримок в трактах приймачів станцій мереж IGS/EPN, а  $DCB^j$  – кодові міжчастотні різниці затримок в трактах супутників (оцінки цих параметрів формують і надають споживачам міжнародні центри IGS/EPN);

$b_{\varphi_{GF,i}}, B_{\varphi_{GF,i}}^j$  – міжчастотні фазові затримки в трактах приймачів ( $b$ ) і супутників ( $B$ );

$\mathbf{N}_{(1,2),i}^j$  – цілочисельні фазові неоднозначності,  $\varphi_{0i}$  – випадкові початкові (в циклах) фази опорних генераторів приймачів, а  $\varphi_0^j$  – супутників;

$\phi_{wpGF}^j(t_k)$  – т.зв. «wind-up» ефекти фазових набігів, обумовлених обертанням антен супутників (моделюються з високою точністю);

$\delta S_{GF,i}^j(t_k), \delta L_{GF,i}^j(t_k)$  – шуми і багатопроміневість кодових і фазових GF-спостережень відповідно. Вважаємо відомими (оцінюються з необхідною точністю) статистичні характеристики шумових і багатопроміневих похибок GF-спостережень - середні значення (дорівнюють нулю) та кореляційні матриці. Вважаємо також відомими часові інтервали кореляції похибок (через багатопроміневість) GF-спостережень.

При оцінці параметрів ПЕВ іоносфери використано відоме представлення розподілу ПЕВ у вигляді «тонкого шару», який знаходиться на висоті максимуму електронної концентрації в інтервалі висот  $\sim 300 \div 450$  км (висота «тонкого шару» вибирається апріорі або оцінюється). Моделювання розподілу ПЕВ ви-

конувалося для регіональної області простору (сектор сфери - «шапка»), розмір якої вибирався виходячи з конфігурації мережі ГНСС-станцій України. Параметрами моделі є координати  $\Theta_{C(i,r)}, \lambda_{C(i,r)}$  т.зв. «подіоносферних» точок (див. рис. 1), які визначаються по точках проколу «тонкого шару» іоносфери променями «спутники - приймачі».

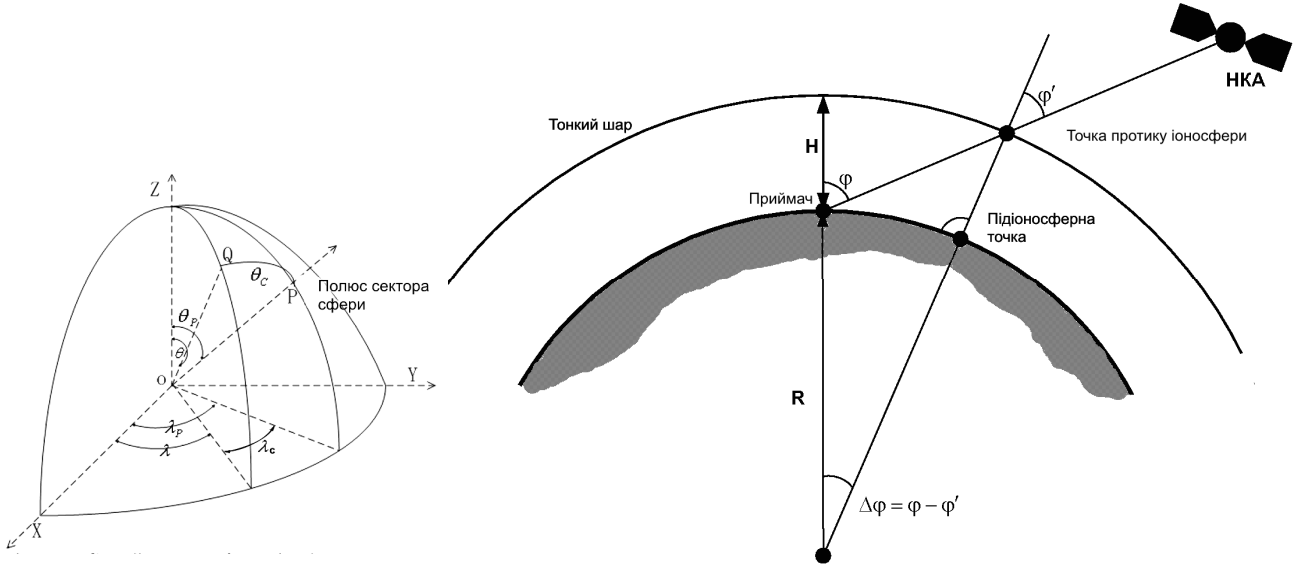


Рис. 1 – Пояснюючі рисунки до опису моделі ПЕВ іоносфери

Для моделювання регіонального просторово-часового розподілу ПЕВ іоносфери використано відоме представлення розкладання ПЕВ по сферичним функціям (3):

$$I_{(i,r)}^j(t_k) = STEC_{(i,r)}^j(t_k) = \cos[\varphi'_{(i,r)}(t_k)]^{-1} \cdot I_{V(i,r)}^j(t_k) = \cos[\varphi'_{(i,r)}(t_k)]^{-1} \cdot \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos(\Theta_{C(i,r)})) \cdot [A_n^m \cdot \cos(m\lambda_{C(i,r)}) + B_n^m \cdot \sin(m\lambda_{C(i,r)})], \quad (3)$$

$$I_{V(i,r)}^j(t_k) = VTEC_{(i,r)}^j(t_k) = VTEC[\Theta_{C(i,r)}^j(t_k), \lambda_{C(i,r)}^j(t_k), A_n^m, B_n^m],$$

де  $\cos[\varphi'_{(i,r)}(t_k)]^{-1}$  – функції відображення, що зв'язують вертикальні іоносферні затримки  $I_{V_i}^j(t_k)$  (чи  $VTEC_{(i,r)}^j(t_k)$ ) і похилі затримки  $I_i^j(t_k)$  (чи  $STEC_{(i,r)}^j(t_k)$ ) в «точках проколу»;

$P_n^m(\cos(\Theta_{C(i,r)}))$  – приєднані поліноми Лежандра;

$A_n^m, B_n^m$  – коефіцієнти сферичного розкладання;

індекс  $r$  відповідає референційній станції; індекс  $i$  – другим станціям мережі; параметри  $A_n^m, B_n^m$  розглянутої моделі оцінюються на окремих равнодискретних інтервалах часу, де ПЕВ іоносфери умовно вважається «замороженим».

Традиційно для побудови моделі ПЕВ іоносфери використовують кодові GF-спостереження, які, на відміну від фазових, є однозначними. Міжчастотні різниці затримок  $DCB^j$  і  $DCB_i$  враховуються з використанням оцінок центрів обробки IGS/EPN. Використання спостережень станцій тільки мереж IGS/EPN накладає істотне обмеження і не дозволяє збільшити склад робочої мережі для підвищення точності моделювання – в іншому випадку необхідно додатково

оцінювати параметри  $DCB_i$ . Рівень похибок через шуми і багатопроміневість кодових спостережень зменшують шляхом згладжування кодових спостережень з використанням фазових. Однак похибки згладжування (зміщення) можуть досягати декількох дециметрів, що також обмежує точність моделювання. Використання ж фазових GF-спостережень дозволяє виключити зазначені недоліки кодових спостережень. Але в цьому випадку параметри іоносферної моделі потрібно спільно оцінювати параметрами, що заважають - невідомими фазовими константами (див. (4)). Щоб істотно зменшити число оцінюваних параметрів, запропоновано використовувати однозначні диференціальні GF-спостереження (необхідно виконати РФН на всіх базових лініях мережі). У цьому випадку лінійне комбінування GF-спостережень референцної станції і однозначних диференціальних GF-спостережень мережі дає фінальну систему рівнянь, яка з урахуванням (1) – (3) має вигляд:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{F}}_r^j(t_k) = \cos[\varphi_{(i,r)}^{j'}(t_k)]^{-1} \cdot \mathbf{I}_{V_r}^j(t_k) + \mathbf{C}_r^j + \delta \mathbf{F}_r^j(t_k) \\ \hat{\mathbf{F}}_i^j(t_k) = \cos[\varphi_{(i,r)}^{j'}(t_k)]^{-1} \cdot \mathbf{I}_{V_i}^j(t_k) + \mathbf{C}_r^j + \mathbf{D}_{i-r} + \delta \mathbf{F}_i^j(t_k), \end{cases} \quad (4)$$

де  $\hat{\mathbf{F}}_{(i,r)}^j(t_k) = (\gamma^2 - 1)^{-1} \cdot [\hat{\mathbf{L}}_{GF, (i,r)}^j(t_k) - \hat{\phi}_{wup(i,r)}^j(t_k) \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)]$ ;

$\mathbf{C}_r^j = (\gamma^2 - 1)^{-1} \cdot [(b_{\varphi_{GF,r}} - B_{\varphi_{GF}}^j) - (\varphi_{0,r} - \varphi_0^j) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) - (\mathbf{N}_{1,r}^j \cdot \lambda_1 - \mathbf{N}_{2,r}^j \cdot \lambda_2)]$ ;

$\mathbf{D}_{i-r} = (\gamma^2 - 1)^{-1} \cdot \Delta b_{i-r}$ ;

$\Delta b_{i-r}$  – невідомі, що прийняті постійними на добовому інтервалі спостережень параметри для кожної базової лінії « $i-r$ » мережі станцій, які не залежать від супутників, що включають міжчастотні апаратурні затримки, випадкові початкові фази годинників приймачів і залишкові (після виконання РФН) фазові неоднозначності спостережень референцного супутника.

МНК-рішення системи рівнянь (4) передбачає спільне оцінювання параметрів розподілу ПЕВ іоносфери (на кожному підінтервалі «замороження» іоносфери) і параметрів, що заважають  $\mathbf{C}_r^j$  і  $\mathbf{D}_{i-r}$ . При цьому коефіцієнти  $\mathbf{C}_r^j$  є «унікальними» для кожного проходу кожного супутника і загальними для всіх станцій мережі, а коефіцієнти  $\mathbf{D}_{i-r}$  оцінюються для кожної базової лінії на всьому інтервалі спостережень.

На прикладі обробки спостережень  $\sim 40$  станцій, отриманих взимку (10 січня) і влітку (19 червня) 2013 р., показано, що значення оцінюваних параметрів в значній мірі варіюються залежно від обраних параметрів моделі ПЕВ іоносфери (підінтервала «замороження» іоносфери і ступеня і порядку системи апроксимуючих сферичних функцій). Тому одним з основних завдань моделювання стала оптимізація параметрів моделі, виходячи з «фізичності» моделі і точності апроксимації у вузлах (точках «проколу» іоносфери). В результаті оптимізації показано (див. рис. 2, 3 і табл. 1), що найкраще рішення досягається при використанні сферичного розкладання 2-го ступеня і порядку на підінтервалі «замороження» іоносфери 30 хв. Приклади порівняння недиференціальних GF-спостережень, одинарних різниць GF-спостережень, а також відповідних оцінок іоносферних затримок, обчислених з використанням різних моделей, включаючи запропоновану модель SCHM, представлені на рис. 4, 5.

Таблиця 1

Статистичні характеристики нев'язок «нульових» різниць GF-спостережень та їх оцінок, отриманих з використанням різних іоносферних моделей

Нев'язки	Кут маскування					
	25 град			10 град		
	Середнє, М	СКВ, М	Розкид, М	Середнє, М	СКВ, М	Розкид, М
GF – SCHM	0	0,18	0,18	0	0,21	0,21
GF – GIM IONEX	-0,49	0,34	0,59	-0,56	0,45	0,72
GIM IONEX – SCHM	0,49	0,27	0,56	0,56	0,40	0,69

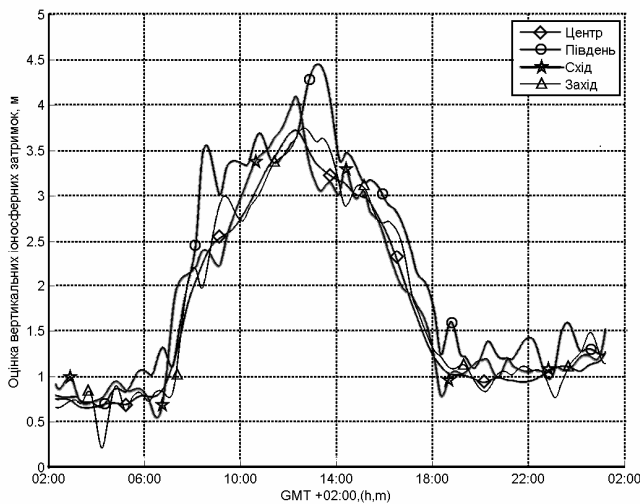


Рис. 2 – Приклад добових вертикальних іоносферних затримок, розрахованих для віртуальних ГНСС-станцій в центрі і крайніх точках мережі

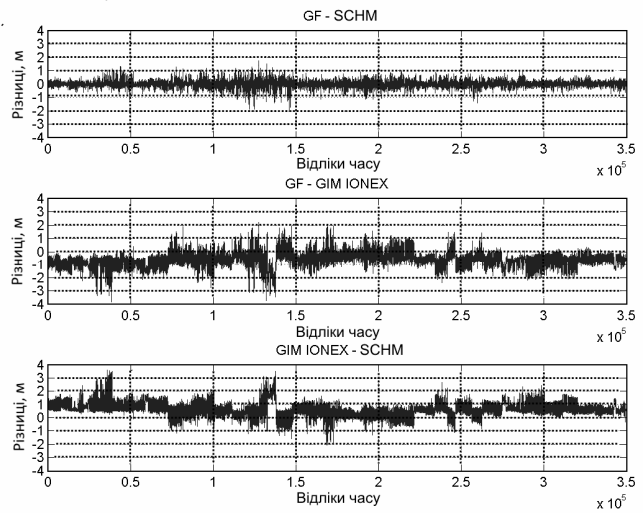


Рис. 3 – Приклади різниць GF-спостережень і іоносферних затримок, розрахованих з використанням моделей SCHM і GIM IONEX

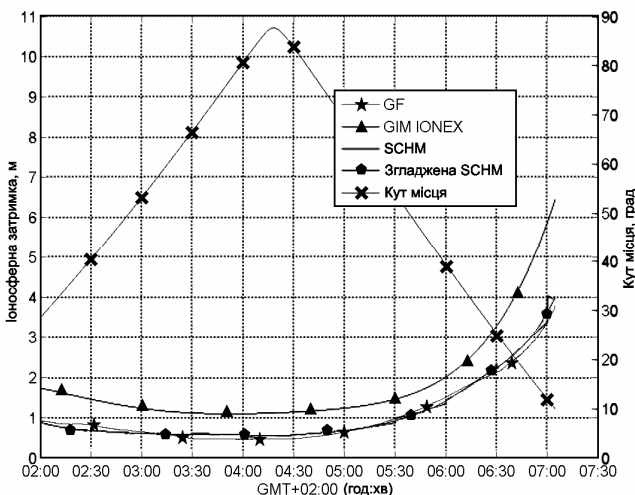


Рис. 4 – Приклад іоносферних затримок на трасі «супутник SV25–станція «GLSV»

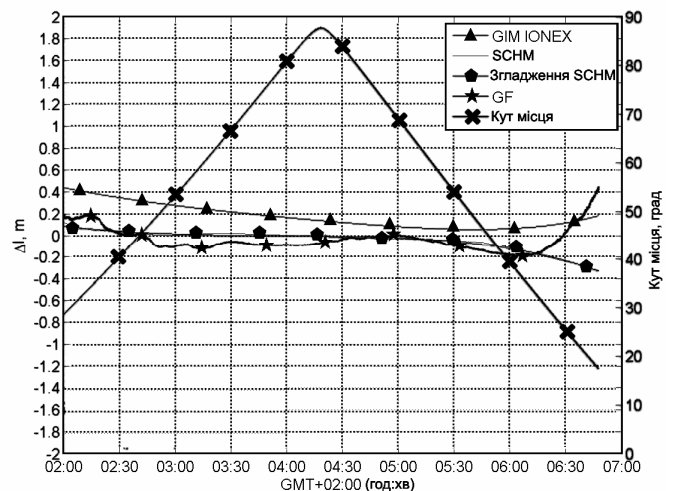


Рис. 5 – Приклад одинарних різниць ( $\Delta I$ ) іоносферних затримок для супутника SV25 на базовій лінії «ALCI-GLSV» (~ 645 км)

Верифікація запропонованої моделі виконана з використанням диференціальних та недиференціальних кодових і фазових координатних визначень, отриманих з використанням різних іоносферних моделей, і їх порівнянням з еталонними координатами. Еталонні координати були отримані з використанням апробованих закордонних програмних продуктів «GrafNav/GrafNet» (NovAtel/Waypoint Inc., Канада), «Bernese» (Швейцарія). Крім того, були використані координатні рішення для перманентних референціальних ГНСС-станцій, які входять до складу мереж IGS/EPN. Інтегральні статистичні характеристики нев'язок координат для станцій мережі України представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Інтегральна оцінка точності кодових координатних визначень, отриманих з використанням різних іоносферних моделей

Модель іоносфери	Середнє, м	Розкид (p=0,68), м	Розкид (p=0,95), м	Розкид (p=0,997), м
Klobuchar	2,01	2,85	4,66	5,85
GIM IONEX	0,20	0,54	1,14	1,88
SCHM	0,03	0,58	1,12	1,79

В цілому, дослідження показали, що використання запропонованої регіональної моделі SCHM дозволяє істотно зменшити: зміщення (до ~ 65% взимку і до ~ 80% влітку) і СКВ координат (до ~ 10% взимку і до ~ 25% влітку) порівняно з глобальною іоносферною моделлю GIM IONEX. При цьому в диференціальному режимі позиціонування на базових відстанях ~ 700 км вигреш в точності склав: по зміщенню до ~50÷80% взимку і до ~20÷30% влітку і по СКВ – до ~30% взимку і до ~ 15% влітку [6, 18, 19].

У **третьому розділі** дисертаційної роботи представлені результати досліджень мінливості іоносферних затримок і порівняльної ефективності їх компенсації з використанням мережевого диференціального метода ГНСС-позиціонування в різні пори року. Показано, що в восени та взимку залишкові іоносферні затримки в 2-3 рази більше, ніж навесні та взимку. Використання додаткової мережевої диференціальної корекції ГНСС-спостережень дозволяє значною мірою зменшити залишкові іоносферні похибки і підвищити точність позиціонування [3, 4, 7, 10, 13, 14, 16, 17].

Для оцінювання сезонно-добової мінливості інтенсивності іоносферних варіацій запропонована методика і проведені відповідні дослідження з використанням вимірювальної інформації української та англійської мереж ГНСС-станцій. В рамках запропонованої методики розроблено новий алгоритм розділу («детрендингу») трендової і варіаційної компонент іоносферних затримок. Приклади безтрендових «нульових» різниць GF-спостережень в зимовий (10 січня 2008 р.) і літній (1 липня 2007 р.) сезони (див. рис. 6 і рис 7 відповідно) [7, 10].

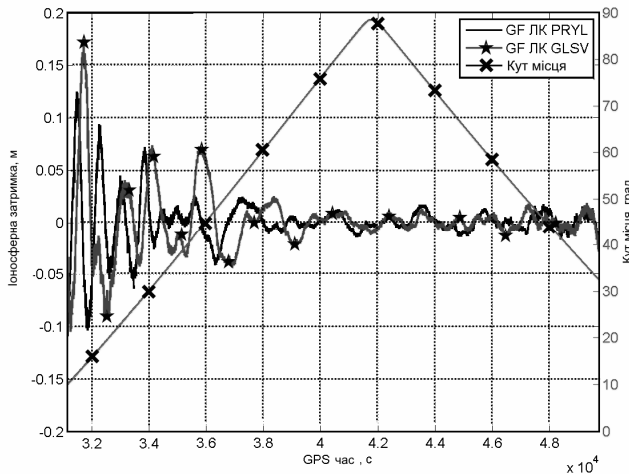


Рис. 6 – Приклад безтрендових диференціальних GF-спостережень станцій «GLSV» і «PRYL» (базова відстань ~140 км); SV21

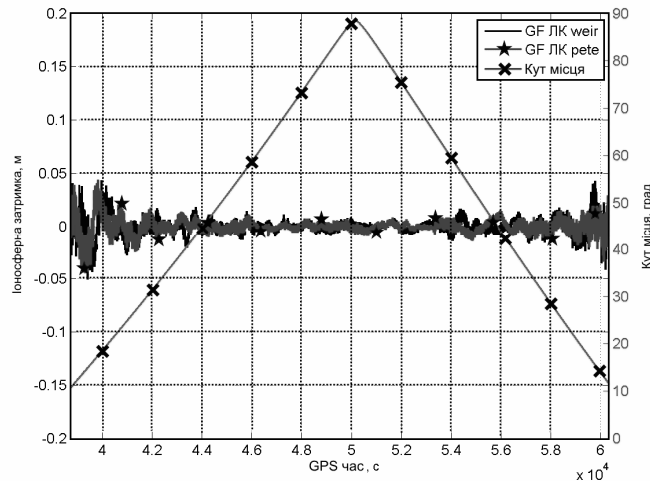


Рис. 7 – Приклад безтрендових диференціальних GF-спостережень станцій «PETE» і «WEIR» (базова відстань ~170 км); SV29

Порівняльний аналіз отриманих результатів показав, що рівень варіацій іоносферних затримок в різні сезони, як і слід було очікувати, істотно відрізняється. Восени та взимку максимальний рівень варіацій становить ~0,3 м на базових відстанях до ~35 км і досягає ~0,9 м на базових відстанях до ~200 км. Навесні та влітку рівень варіацій значно (в 2-3 рази) менше. При цьому варіації іоносферних затримок через значну просторово-часову декореляцію на базових відстанях понад ~30÷50 км не тільки не компенсуються при традиційному (однобазовому) диференціальному режимі позиціонування, але й можуть збільшитися, що накладає обмеження на використання традиційних диференціальних корекцій [7, 10].

На прикладі обробки та аналізу ГНСС-спостережень (2011-2012 рр.) мережі дванадцяти перманентних референціальних станцій в Харківській області було показано, що досягнення сантиметрової точності координатних визначень в режимі одночастотного кінематичного позиціонування на базових відстанях ~70÷150 км можливе тільки з використанням методу додаткової (мережевої) диференціальної корекції іоносферних затримок. Порівняння традиційної (однобазової) і мережевої диференціальної компенсації іоносферних затримок для різних базових відстаней (~50÷100 км) показало, що мережеві корекції дозволяють на ~30÷40% зменшити іоносферні варіації ГНСС-спостережень. При цьому, для надійного рішення фазової неоднозначності в режимі кінематичного позиціонування (без чого неможливе досягнення сантиметрової точності) для базових відстаней понад ~100 км потрібно ~30÷40 хв. безперервних спостережень для подолання впливу залишкових варіацій іоносферних затримок, в той час як для базових відстаней до ~35 км достатньо ~5÷10 хв. [3, 13, 14, 17].

**Четвертий розділ** дисертаційної роботи містить опис результатів розвитку методів і алгоритмів точної оцінки та урахування тропосферних затримок навігаційних сигналів ГНСС [5, 6, 16].

Затримку сигналів ГНСС в тропосфері на трасах «супутники-приймачі» прийнято представляти сумою гідростатичної та вологої компонент:

$$Tr(t) = Z_h(t) \cdot mf_h(t) + Z_w(t) \cdot mf_w(t), \quad (5)$$

де  $Tr(t_k)$  – сумарна похила тропосферна затримка;

$Z_h(t)$  – гідростатична («суха») компонента зенітної тропосферного затримки;

$Z_w(t)$  – волога компонента зенітної тропосферного затримки;

$mf_h(t)$ ,  $mf_w(t)$  – функції відображення, що зв'язують зенітні і похилі затримки; в цій роботі використані досить відомі і найбільш поширені функції відображення Niell, що характеризуються високою точністю.

Як показала світова практика, при диференціальному позиціонуванні оцінювання ЗТЗ рознесених приймачів/станцій рекомендують виконувати на міжбазових відстанях від ~500 км і вище, так як на менших базових відстанях суттєво погіршується обумовленість системи рівнянь спостережень (особливо при спільному оцінюванні інформаційних параметрів і параметрів моделі тропосфери – ЗТЗ). Для оцінювання тропосферних затримок на середніх міжбазових відстанях ~50÷200 км (для поширених мереж станцій) без використання додаткової інформації чи застосуванні математичної регуляризації рішення запропоновано альтернативний підхід.

По-перше, на основі малості відмінностей функцій відображення  $mf_h(t)$  і  $mf_w(t)$  гідростатичної і вологої компонент запропоновано використовувати наступну модифіковану модель:

$$Tr(t) = Z_{\Sigma}(t) \cdot mf_h(t) - [\hat{Z}_w(t) \cdot \Delta mf_{hw}(t)], \quad (6)$$

де  $Z_{\Sigma}(t) = Z_h(t) + Z_w(t)$ ;

$\Delta mf_{hw}(t) = mf_h(t) - mf_w(t)$ ,  $\hat{Z}_w(t)$  – оцінка величини вологої компоненти ЗТЗ, яку запропоновано розраховувати з використанням відомих моделей, наприклад, моделі MOPS, при цьому похибка корекції другого доданка в (6) не перевищує декількох міліметрів.

По-друге, при виконанні диференціального позиціонування модель різницевої тропосферної затримки (на кінцях вимірювальної бази) з урахуванням (6) може бути представлена у вигляді:

$$\Delta T_{i-r}^j(t) = \Delta Z_{\Sigma,i-r}(t) \cdot mf_{h,i}^j(t) + Z_{\Sigma,r}(t) \cdot [mf_{h,i}^j(t) - mf_{h,r}^j(t)] - \hat{\Theta}_{i-r}^j, \quad (7)$$

де залишок  $\hat{\Theta}_{i-r}^j = \hat{Z}_{w,i}(t) \cdot [mf_{h,i}^j(t) - mf_{w,i}^j(t)] - \hat{Z}_{w,r}(t) \cdot [mf_{h,r}^j(t) - mf_{w,r}^j(t)]$  – оцінюється за моделлю MOPS і вилучається з (7) з максимальною похибкою, яка не перевищує ~ 4 мм;

$\Delta Z_{\Sigma,i-r}(t) = Z_{\Sigma,i}(t) - Z_{\Sigma,r}(t)$ ; індекс  $r$  відповідає референційній станції; індекс  $i$  – іншим станціям/приймачам.

Таким чином, у ході диференціального позиціонування з урахуванням (6) і (7) оцінюваними тропосферними параметрами тепер є ЗТЗ референційної станції  $Z_{\Sigma,r}(t)$  і різниці  $\Delta Z_{\Sigma,i-r}(t)$  ЗТЗ інших приймачів/станцій щодо референційної станції. При цьому в ході позиціонування (як і в ході РФН) спільно оцінюються координати цих приймачів/станцій, розбіжності годинників приймачів, двочастотні іоносферні затримки і зазначені вище параметри тропосферної моделі (7).

Запропонований підхід дозволяє уникнути проблеми поганої обумовленості системи рівнянь спостережень і дає можливість для оцінювання (чи уточнення) ЗТЗ референційної станції  $Z_{\Sigma,r}(t)$  використовувати додаткову незалежну інфо-

рмацію (наприклад, спостереження датчиків метеопараметрів), при цьому оцінка параметрів  $\Delta Z_{\Sigma, i-r}(t)$  буде виконуватися точніше.

У ході досліджень (см. [5, 6, 16]) встановлено, що для досягнення сантиметрової точності оцінювання ЗТЗ інтервал накопичення спостережень повинен становити 1÷2 години, що підтверджується і закордонними дослідженнями. Приклад порівняння оцінок ЗТЗ і ЗТЗ за моделлю MOPS за добу 27.07.2011 р. представлений на рис. 8. З використанням оцінок ЗТЗ і ЗТЗ за моделлю MOPS були виконані координатні визначення і розраховані нев'язки щодо еталонних координат. Приклади таких нев'язок для порівняння різних методів урахування тропо-сферних похибок (для 27.07.2011 р.) представлені на рис. 9, 10.

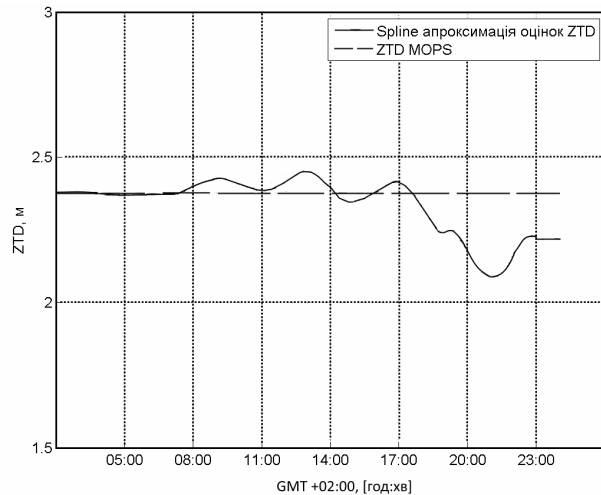


Рис. 8 – Приклад оцінок ЗТЗ для станції м. Золочів Харківської обл.

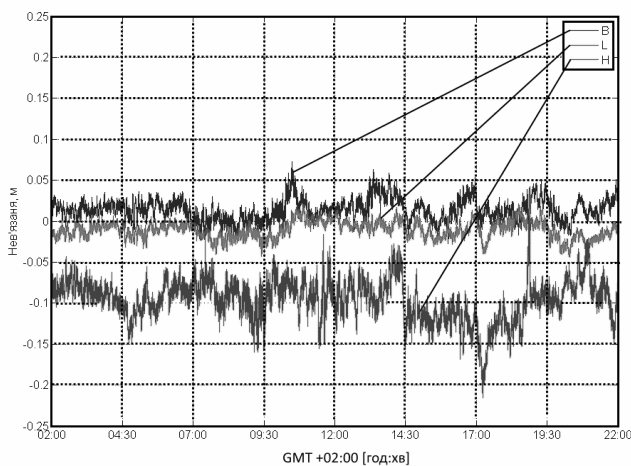


Рис. 9 – Нев'язки планових координат (B, L) і висоти (H) для станції м. Золочів Харківської обл. (використана модель MOPS)

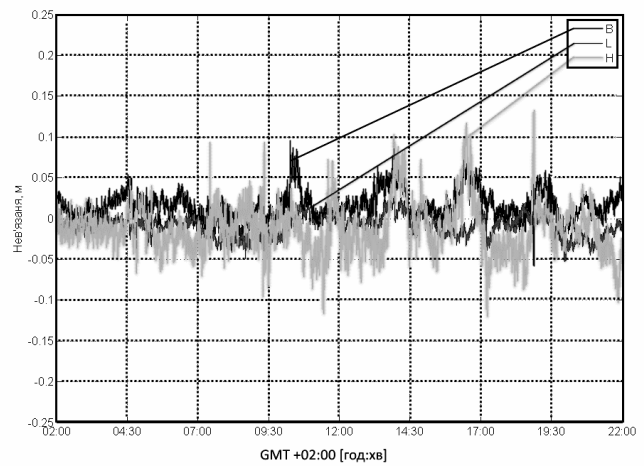


Рис. 10 – Нев'язки планових координат (B, L) і висоти (H) для станції м. Золочів Харківської обл. (використані оцінки ЗТЗ)

В цілому, дослідження показали, що оцінювання ЗТЗ дозволяє істотно підвищити точність визначення, головним чином, висотної координати – до  $\sim 20\div 90\%$  в залежності від сезону і атмосферних ефектів. Такий вигреш пояснюється тим, що модель MOPS враховує тільки середньодобові значення ЗТЗ і не враховує можливі варіації ЗТЗ, рівень яких може змінюватися в межах  $\sim 20\div 25$  см.



Для вирішення завдань кінематичного позиціонування запропонований метод і алгоритм лінійної інтерполяції (формування мережових корекцій) оцінок ЗТЗ, отриманих для розташування перманентних референцних ГНСС-станцій, для високоточної корекції спостережень рухомих в зоні покриття мережі споживачів з урахуванням перепадів висот приймачів станцій і споживачів. Експериментальні результати показали, що інтерполяція ЗТЗ дає практично той же результат, що і у випадку оцінки параметрів ЗТЗ референцних станцій. Однак якщо в робочій зоні мережі присутні локальні градієнти тропосфери, інтерполяція ЗТЗ не дає істотного виграшу в точності компенсації тропосферних затримок в порівнянні з моделями [5].

## ВИСНОВКИ

У даній дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу підвищення точності оцінки та урахування затримок сигналів ГНСС в іоносфері та тропосфері шляхом удосконалення відомих і створення нових методів і алгоритмів обробки фазових ГНСС-спостережень, що дозволяє виконувати позиціонування із сантиметровим рівнем точності. Проведена достатня кількість експериментів (близько 380 сесій статичних і кінематичних спостережень в 2007-2013 рр.) по обробці реальних спостережень мереж перманентних станцій, статичних і кінематичних даних, отриманих при виконанні геодезичних робіт, що підтверджує високий рівень достовірності отриманих теоретичних результатів. При цьому отримані такі результати.

### **В області теоретичних досліджень:**

1. Запропоновано метод побудови регіональної моделі ПЕВ іоносфери, що ґрунтується на використанні однозначних різниць фазових спостережень і спільній МНК-оцінці параметрів моделі ПЕВ і невідомих параметрів, що заважають, - фазових констант, що включають міжчастотні апаратурні затримки та залишкові недиференціальні неоднозначності.

2. Запропонована методика і проведено оцінювання сезонно-добової мінливості інтенсивності іоносферних варіацій з використанням алгоритму розділу трендової і варіаційної компонент іоносферних затримок. Визначені обмеження традиційного (однобазового) диференціального режиму координатних визначень і показано, що використання подвійної (мережевої) диференціальної корекції дозволяє істотно ефективніше компенсувати залишкові іоносферні затримки сигналів ГНСС.

3. Удосконалений метод і запропонований алгоритм оцінки зенітних тропосферних затримок по диференціальним фазовим ГНСС-спостереженням, що за рахунок модифікації моделі тропосферних затримок дозволяє виконати оцінювання ЗТЗ із сантиметровою точністю не тільки на базових лініях  $\sim 500$  км і більше, але й на середніх міжбазових відстанях ( $\sim 50 \div 200$  км) без додаткової вимірювальної інформації (датчиків температури, тиску, вологості на станціях) або математичної регуляризації рішення. Для рішення завдань кінематичного позиціонування запропоновані метод і алгоритм лінійної інтерполяції (формування мережових корекцій) оцінок ЗТЗ, отриманих для місця розташування перманентних референцних ГНСС-станцій, для високоточної корекції спостережень рухомих об'єктів в зоні покриття мережі споживачів з урахуванням перепадів висот приймачів станцій і споживачів.

### **В області експериментальних досліджень:**

1. Розроблений комплекс алгоритмів і програмних модулів, що реалізують удосконалені методи оцінки та урахування іоносферних і тропосферних затримок, може бути використаний у складі радіовимірювальних та інформаційних систем для рішення широкого кола завдань точного позиціонування, навігації, високоточного моніторингу і прогнозування параметрів середовища поширення радіосигналів.

2. Запропонована регіональна модель ПЕВ іоносфери яка за рахунок більш точної оцінки та урахування іоносферних затримок сигналів ГНСС у порівнянні із широко розповсюдженою трендовою іоносферною моделлю GIM IONEX (IGS) дозволяє на 65÷80% точніше виконати абсолютне і диференціальне позиціонування. Модель може бути використана в багатопозиційних системах SBAS широкозонної (Wide Area Differential) диференціальної ГНСС-навігації та, крім того, дозволяє вдосконалити реалізацію технології PPP (точного автономного позиціонування).

3. Проведене оцінювання сезонно-добової мінливості іоносферних варіацій показало, що рівень похибок диференціальних спостережень через іоносферні варіації досягає найбільших значень восени та взимку (~30÷90 см на базових лініях ~35÷150 км), у той час як навесні та влітку зазначені похибки значно (в 2-3 рази) зменшуються. Подвійна (мережева) диференціальна корекція іоносферних похибок дозволяє на ~30÷40 % зменшити рівень іоносферних варіацій (на базових лініях ~35÷200 км), що дає можливість здійснити одночастотне позиціонування із сантиметровою точністю.

4. Удосконалений метод оцінювання ЗТЗ (у порівнянні з використанням відомих моделей) дозволяє на 20÷90% (в залежності від сезону) підвищити точність визначення висотної координати. Запропонований метод формування мережевих тропосферних корекцій спостережень рухомих споживачів дозволяє врахувати перепади висот приймачів станцій і споживачів та досягти сантиметрової точності позиціонування.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Желанов А.А. Использование глобальных ионосферных карт IGS в задачах высокоточного ГНСС-позиционирования / А.А. Желанов, Е.А. Бессонов // журнал «Прикладная радиоэлектроника». – 2011 г. – Т.10 №3. – С. 302-306.

2. Бессонов Е.А. Аппроксимация гладкими функциями расчетных ионосферных коррекций в задачах точного ГНСС-позиционирования / Е.А. Бессонов // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». – 2011 г. – №165. – С. 69–74.

3. Жалило А.А. Повышение точности дифференциального одночастотного ГНСС-позиционирования путём сетевой коррекции ионосферных погрешностей / А.А. Жалило, Е.А. Бессонов // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника» 2012 г. – № 169. – С. 302-314.

4. 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.В. Дицкий, Е.А. Бессонов // Ежемесячный научно-технический и производст-

венный журнал «Геодезия и картография». – Москва, 2012. – № 12, спецвыпуск. – С.38-50.

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

6. Экспериментальная отработка программно-математического инструментария обработки наблюдений сети наземных перманентных референционных ГНСС станций Украины для оценки и моделирования полного электронного содержания ионосферы в рамках международного проекта «Ионосат-Микро» (С.200-209) / А.А. Жалило, А.А. Желанов, Е.А. Бессонов, И.В. Дицкий // Космический проект «Ионосат-Микро»: монография / Под общ. ред. С.А. Засухи, О.П. Фёдорова. — К.: Академперіодика, 2013 г. — 218с., 22 с. ил.

7. Жалило А.А., Бессонов Е.А. Пространственно-временные свойства ионосферной задержки в задачах точного ГНСС-позиционирования по одночастотным наблюдениям / А.А. Жалило, Е.А. Бессонов // Труды Всеукраинской научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Проблемы навигации и управления движением», 23–24 ноября 2010 г.: тезисы докл. – Киев, Украина. – С. 39.

8. Бессонов Е.А. Анализ алгоритмов расчета ионосферных коррекций одночастотных ГНСС наблюдений с использованием данных IGS /Е.А. Бессонов // Труды 6-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010»: междунар. науч.-техн. конф., 19–24 апреля 2010 г.: тезисы докл. – Севастополь, Украина. – С. 76.

9. Бессонов Е.А. Постобработка трендовых ионосферных моделей в задачах точного ГНСС позиционирования одночастотных пользователей/ Е.А. Бессонов // Труды 15 Международного молодёжного форума «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке», 18 – 20 апреля 2011 г.: тезисы докл. – г. Харьков, Украина. – С. 227-228.

10. Жалило А.А., Бессонов Е.А. О проблеме учета ионосферной задержки навигационных сигналов в задачах точного ГНСС–позиционирования/ А.А. Жалило, Е.А. Бессонов // Труды 4-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», 18-21 октября 2011 г.: тезисы докл. – г. Харьков, Украина. – Т.1 ч.2. – С. 62–65.

11. Совместные текущие разработки и исследования ХНУРЭ и ГАО НАН Украины в области точного ГНСС-позиционирования/ А.А. Жалило, А.А. Желанов, Д.А. Шелковенков, И.В. Дицкий, Е.А. Бессонов // Труды 4-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», 18-21 октября 2011 г.: тезисы докл. – г. Харьков, Украина. – Т.1 ч.2. – С. 18–20.

12. International project «EEGS2» – «EGNOS extension to eastern Europe: application»/ Ya.S. Yatskiv, A.I. Dohov, A.M. Lukyanov и др. // 8-а Міжнародна науково-практична конференція «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід»: між нар. наук.-практ. конф., випуск 8, 2012 р.: тези доп. – м. Чернігів, Україна. – С. 16-18.

13. О возможности использования отечественных разработок для реализации технологий точного спутникового РТК-позиционирования на длинных

базовых линиях / И.В. Дицкий, Е.А. Бессонов, А.А. Жалило, А.А. Желанов // 8-а Міжнародна науково-практична конференція «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід»: між нар. наук.-практ. конф., випуск 8, 2012 р.: тези доп. – м. Чернігів, Україна. – С. 64–66.

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

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

16. 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, Е.А. Бессонов // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Авіа – 2013». – Т.2. – 21-23 апреля 2013 г.: тезисы докл. – г. Киев, Украина. – С. 7.38–7.41.

17. 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, Е.А. Бессонов // Материалы международной конференции «Украина – Россия – Сколково», 22–23 мая 2013 г.: тезисы докл. – С.80–81.

18. Бессонов Е.А. Моделирование ПЭС ионосферы по наблюдениям сети украинских ГНСС станций / Е.А. Бессонов // Труды XVIII Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», ХНУРЭ. – Т.3 – 14–16 апреля 2014 г.: тезисы докл. – г. Харьков, Украина. – С.101–102.

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

## АНОТАЦІЯ

**Бессонов Є.А. Удосконалення мережевих методів та алгоритмів оцінки та урахування іоносферних і тропосферних затримок сигналів глобальних навігаційних супутникових систем в задачах точного позиціонування.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.12.17 – Радіотехнічні й телевізійні системи. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2015.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу підвищення точності оцінки та урахування затримок сигналів ГНСС в іоносфері і тропосфері шляхом удосконалення відомих і створення нових методів і алгоритмів обробки фазових спостережень, що дозволяє виконувати позиціонування на сантиметровому рівні точності.

Викладені результати удосконалення методу побудови, оптимізації і верифікації регіональної моделі повного електронного вмісту іоносфери, яка ви-

користує однозначні фазові спостереження мережі перманентних референцних ГНСС-станцій і дозволяє істотно підвищити точність позиціонування в порівнянні з відомими моделями та може бути застосована у багатопозиційних системах широкозонної диференціальної навігації, точного позиціонування, високоточного моніторингу іоносферних процесів.

Проведено оцінювання просторово-часових характеристик трендової і варіаційної складових диференціальних іоносферних затримок для міжбазових відстаней  $\sim 50\div 200$  км в різні сезони року. Визначені обмеження однобазового диференціального режиму координатних визначень і показано, що використання подвійної (мережевої) диференціальної корекції дозволяє на  $\sim 30\div 40$  % ефективніше компенсувати іоносферні затримки сигналів ГНСС.

Вдосконалено метод оцінювання та урахування зенітних тропосферних затримок з використанням диференціальних фазових спостережень, який дозволяє визначати тропосферні затримки з сантиметровою точністю на міжбазових відстанях  $\sim 50\div 200$  км і дає можливість підвищити точність визначення висоти на  $20\div 90\%$  (залежно від сезону).

**Ключові слова:** глобальні навігаційні супутникові системи, моделювання, повний електронний вміст іоносфери, іоносферні варіації, зенітні тропосферні затримки, мережеві диференціальні корекції.

## АННОТАЦИЯ

**Бессонов Е. А. Усовершенствование сетевых методов оценки и учета ионосферных и тропосферных задержек сигналов ГНСС в задачах точного позиционирования.** – Рукопись.

Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2015.

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача повышения точности оценки и учета задержек сигналов ГНСС в ионосфере и тропосфере путем усовершенствования известных и создания новых методов и алгоритмов обработки фазовых наблюдений, что позволяет выполнять позиционирование на сантиметровом уровне точности.

Изложены результаты усовершенствования метода построения, оптимизации и верификации региональной двумерной модели полного электронного содержания ионосферы, которая использует однозначные фазовые наблюдения сети перманентных референцных ГНСС-станций и позволяет существенно повысить точность позиционирования по сравнению с известными моделями и может быть использована в многопозиционных системах широкозонной дифференциальной навигации, точного позиционирования, високоточного мониторинга ионосферных процессов.

Проведено оценивание пространственно-временных характеристик трендовой и вариационной составляющих дифференциальных ионосферных задержек для межбазовых расстояний  $\sim 50\div 200$  км в различные сезоны года. Определены ограничения однобазового дифференциального режима координатных определений и показано, что использование двойной (сетевой) дифференциальной коррекции позволяет на  $\sim 30\div 40\%$  эффективнее компенсировать ионосферные задержки сигналов ГНСС.

Усовершенствован метод оценивания зенитных тропосферных задержек с использованием дифференциальных фазовых наблюдений, который позволяет определять тропосферные задержки с сантиметровой точностью на межбазовых расстояниях  $\sim 50\div 200$  км и дает возможность повысить точность определения высоты на  $20\div 90\%$  (в зависимости от сезона).

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, моделирование, полное электронное содержание ионосферы, ионосферные вариации, зенитные тропосферные задержки, сетевые дифференциальные коррекции.

## ABSTRACT

**Bessonov E.A. Improvement of network methods of estimation and accounting of ionospheric and tropospheric delays of GNSS-signals in the tasks of precision positioning.** – 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), 2015.

This thesis solves the scientific and practical task on improving the accuracy of estimation and accounting of GNSS signals delays in ionosphere and troposphere by updating of the known methods and creating of new methods and algorithms of carrier-phase observations processing, which allows to perform positioning at centimeter-level accuracy.

The results of development of the method of formation, optimization and verification of the regional two-dimensional model of the ionospheric total electron content (TEC), which uses unambiguous carrier-phase observations of the permanent reference GNSS stations network and allows to increase considerably the accuracy of positioning as compared with the known models are stated. The modelling is performed by joint least-squares estimation of the ionospheric TEC parameters and unknown nuisance parameters. The proposed model can be recommended for applying in the multiposition systems of wide area differential navigation, high precision positioning and monitoring of ionospheric processes.

A new original technique is developed and estimation of spatial-time characteristics of the trend and variation components of differential ionosphere delays for baseline distances of  $\sim 50\div 200$  km at different seasons is performed. The limitations of a single-base differential mode of coordinate determinations are discovered, and it is shown that using of double (network) differential corrections allows to compensate by  $\sim 30\div 40\%$  more effective the ionospheric delays of GNSS signals.

The method of zenith tropospheric delays estimation by use of differential carrier-phase observations, which allows to determine the tropospheric delays with centimetric accuracy at baseline distances of  $\sim 50\div 200$  km and enables to increase the accuracy of height determination by  $20\div 90\%$  (depending on the season) is improved. For solving the tasks of kinematic positioning it is proposed the method and algorithm of linear interpolation (network corrections formation) of zenith tropospheric delays estimations for high-precision correction of observations of the customers moving in the network coverage zone taking into account the altitude differences of stations and customers receivers.

**Keywords:** global navigation satellite systems, modelling, ionospheric total electron content, ionospheric variations, zenith tropospheric delays, network differential corrections.

Підп. до друку 20.05.15.      Формат 60x84 <sup>1/16</sup>.      Спосіб друку – ризографія.  
Умов. друк. арк. 1,2.      Зам. №. 2-357      Тираж 100 прим.  
Ціна договірна.

---

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---

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