

Голові спеціалізованої вченої ради Д 26.052.03
Харківського національного університету
радіоелектроніки,
професору Карташову В.М.

61166, м. Харків, пр. Науки, 14

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Яковченка Олександра Івановича**
«Розвиток методів високоточного визначення параметрів руху
низькоорбітальних космічних апаратів по бортовим спостереженням
сигналів глобальних навігаційних супутникових систем», представлену
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.12.17 - радіотехнічні та телевізійні системи

Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі розробки вдосконалених та нових методів, алгоритмів і процедур високоточного визначення параметрів руху космічних апаратів та позиціонування навколосемних об'єктів з сантиметровою/дециметровою точністю у автономному (недиференціальному) режимі PPP (Precise Point Positioning) по бортовим двохчастотним фазовим і кодовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС).

Важливість вирішення сформульованої задачі обумовлена наступним.

На сьогоднішній день сфера використання даних від ГНСС для знаходження місця розташування, навігації та точного визначення часу (PNT – Positioning Navigation and Timing) охоплює не лише земну поверхню, а й розповсюджується на навколосемний простір. Збільшується кількість задач, для яких необхідним є визначення координат об'єктів на орбіті. В якості об'єктів виступають космічні апарати широкого спектру призначення. І якщо прийом сигналів ГНСС для космічного простору вище 3000 км ускладнений специфікою формування радіонавігаційного поля, то діапазон низьких орбіт (до 2000 км над землею поверхнею) знаходиться в межах Terrestrial Space Volume з характеристиками доступності до сигналів навігаційних супутників на рівні однаковому з тим, що забезпечується для земної поверхні. В Україні є розробники і експлуатанти космічного обладнання, які зацікавлені в пошуку нових і розвитку існуючих рішень високоточного координатно-часового забезпечення для навколосемних космічних апаратів. Останнє

підтверджується Загальнодержавною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2021-2025 роки, в якій передбачено виведення на орбіту семи вітчизняних супутників дистанційного зондування Землі різної роздільної здатності. Підтримка їх функціонування на орбіті і успішне виконання поставлених задач потребуватиме визначення параметрів руху за спостереженнями сигналів ГНСС як єдиного засобу вимірювань, або в комбінації з даними від інших сенсорів. Необхідний високий рівень точності вимірювань можливий лише з використанням фазових вимірювань і відповідно вибору методу розв'язання задачі фазової неоднозначності. Вибір і апробація конкретного рішення, яке задовольняє і висунутим вимогам по точності, і умовам, в яких має бути одержане, є важливою задачею, яка містить наукову і практичну складову і спрямована на розвиток вітчизняних технологій високоточного визначення параметрів руху космічних апаратів на низьких навколоземних орбітах.

Додаткове підтвердження актуальності теми полягає в тому, що дисертаційні дослідження пов'язані із проведенням ряду планових науково-дослідних робіт (14 тем з відповідним номером державної реєстрації), у яких автор був виконавцем.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

На підставі глибокого науково-аналітичного огляду було визначено автономний (недиференціальний) режим точного позиціонування Precise Point Positioning (PPP) метод як основний спосіб використання сигналів ГНСС для високоточного визначення параметрів руху КА з визначенням тих особливостей, які матимуть місце при використанні доступних при цьому алгоритмів «плаваючого» (float) і дискретного/цілочисельного (fixed) розв'язання фазової неоднозначності (РФН) бортових двохчастотних фазових ГНСС-спостережень.

Зокрема, на початковому етапі досліджень при визначенні параметрів руху КА було отримано стійке і надійне float-рішення в режимі PPP, досягнуто розв'язання фазової неоднозначності (РФН) WL-спостережень різницевої частоти з використанням фазових поправок французького космічного агентства CNES, що однак не дозволило розв'язати фазову неоднозначність безіоносферних ІF-спостережень і отримати дискретне/цілочисельне PPP-рішення,

В ході подальшого виконання дослідження у автора виникла

необхідність реалізації (статичного та кінематичного) методу PPP для точного позиціонування навколоземних об'єктів. Було обґрунтовано показано, що метод PPP для навколоземних об'єктів має свої особливості та відмінності, головною з яких є необхідність введення поправок на геодинаміку, а також оцінки та введення тропосферних поправок (за умови компенсації іоносферних затримок сигналів ГНСС двохчастотним методом, який і розглядався як основний).

Реалізація наземного режиму PPP дозволила встановити та дослідити фактори, що впливають на точність, час збіжності та надійність, встановити причину початкової невдачі досягнення дискретного/цілочисельного РФН безіоносферних IF-спостережень для НКА.

Результатом проведеної роботи стала розробка методу, алгоритму та експериментального програмного забезпечення формування власних фазових поправок (фазових затримок сигналів на борту супутників ГНСС(GPS)) з використанням спостережень наземної регіональної мережі перманентних референціальних ГНСС-станцій України.

З використанням власних поправок вдалося досягти достатньо надійного РФН як WL-спостережень, так і безіоносферних IF-спостережень та реалізувати дискретний/цілочисельний метод PPP для навколоземних споживачів. Після отримання позитивних результатів розроблені методи були адаптовані і застосовані для обробки бортових спостережень КА.

Можна впевнено констатувати, що в результаті виконання дисертаційного дослідження отримав розвиток метод високоточного визначення параметрів руху як низькоорбітальних космічних апаратів (на висотах ~250–1300 км), так і навколоземних/наземних (на висотах до ~10–15 км) статичних і рухомих об'єктів з досягненням надійного fixed-методу РФН недиференціальних фазових спостережень, що, у свою чергу, дозволило визначати параметри руху НКА і виконувати позиціонування навколоземних об'єктів з сантиметровою точністю і, тим самим, досягти поставленої мети дослідження.

Достовірність наукових результатів

Достовірність отриманих в дисертаційній роботі наукових результатів підтверджується:

1. Коректною постановкою задачі.
2. Використанням світового досвіду у формі детального аналітичного огляду наукових публікацій за тематикою дослідження.

3. Коректним застосуванням математичного апарату для перетворення системи рівнянь ГНСС-спостережень для реалізації float- та fixed-методу PPP для статичного і кінематичного режимів позиціонування. А також під час розробки алгоритму оцінки параметрів руху космічних апаратів float-методом PPP по бортовим GPS-спостереженням і апіорної оцінки точності траєкторних визначень НКА.

4. Проведенням експериментального відпрацювання та тестування створеного програмно-математичного забезпечення обробки GPS-спостережень float-методом PPP з використанням добових спостережень 35 станцій ГНСС-мережі перманентних референціальних станцій України.

5. Тестуванням розроблених алгоритмів отримання fixed PPP-рішень з використанням реальних двохчастотних спостережень супутника GRACE-A.

Новизна одержаних результатів

Найбільш істотними новими науковими результатами дисертації є

- розвиток методів та алгоритмів реалізації високоточних автономних (недиференціальних) координатних PPP-рішень, включаючи розв'язання початкових неоднозначностей фазових ГНСС-спостережень шляхом отримання «плаваючого» (float) та/або дискретного/цілочисельного (fixed) рішень і їхніх модифікацій;

- новий метод використання «віртуальних» одинарних різниць недиференціальних ГНСС-спостережень зі зручною репараметризацією оцінюваних параметрів, який дозволяє поєднати переваги обробки недиференціальних та різницевих спостережень, підвищити надійність реалізації РФН та точного PPP-позиціонування у порівнянні з відомими підходами;

- нова оригінальна реалізація дискретного/цілочисельного РФН недиференціальних фазових ГНСС-спостережень для наземних та космічних умов вимірювань, яка дозволяє більш надійно виконувати РФН;

- нові методи та алгоритми PPP-рішень, які в ході РФН в якості проміжного рішення використовують, на відміну від відомих підходів, не «безіоносферні» кодові псевдовідстані низької точності, а більш точне (у кілька разів) нове комбіноване кодово-фазове координатне рішення (на основі спільної обробки кодових спостережень першої частоти ГНСС і двохчастотних неоднозначних фазових «безгеометричних» ГНСС-спостережень;

- розроблений алгоритм РФН спостережень різницевої частоти «Wide-Lane» (WL) з використанням лінійної комбінації спостережень Melbourne-Wübbena. Новий підхід до формування порогових значень з метою більш надійної верифікації WL-рішень, який дозволяє надійно виконувати РФН за 8÷10 хвилин;

- нова реалізація метода і алгоритмів оцінювання інструментальних фазових затримок в апаратурі супутників ГНСС (GPS), які можуть формуватися по спостереженням не тільки глобальних, а й регіональних мереж ГНСС-станцій.

Аргументація і критичне оцінювання науково-технічних рішень, наведених в дисертації

В дисертаційному дослідженні продемонстровано перевагу запропонованих нових науково-технічних рішень, а саме методів і алгоритмів реалізації високоточних автономних PPP-рішень із застосуванням нових підходів до одержання необхідних наборів даних над існуючими методами в області скорочення часу збіжності рішення на зазначеному рівні точності оцінки просторових координат, що має високу вагу при реалізації в застосуваннях, пов'язаних із оцінкою параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів.

Практичне значення дисертаційної роботи

Основні результати роботи складають науково-методологічну основу для покращення навігаційного забезпечення, яке здійснює оцінку параметрів руху як об'єктів на земній поверхні та в повітрі (авіаційні користувачі), так і для визначення параметрів руху космічних апаратів, які розташовані на низьких навколоземних орбітах. Вважаю такий результат цінним і практично вагомим як для українських, так і міжнародних наукових колективів, задіяних в реалізації проектів досліджень Землі з використанням космічних апаратів.

Практичне значення мають наступні основні результати:

1. В роботі автором запропоновано при реалізації метода PPP використовувати не кодові «безіоносферні» спостереження, а результати визначення координат, що отримані із комбінованого кодово-фазового двохчастотного рішення. Даний підхід показав суттєві переваги, зокрема, простішу реалізацію PPP-рішення, через відсутність необхідності спільної оцінки «кодового» та «фазового» годинників (розбіжностей шкал часу приймача та ГНСС). Дослідженнями було

- показано, що такий підхід дає суттєве (на $\sim 20\div 30\%$) збільшення надійності РФН та зменшення інтервалу його досягнення (ініціалізації/збіжності PPP-рішення).
2. Автором в процесі визначення параметрів руху споживача на етапі стандартного рішення використання різниць спостережень між усіма спостереженнями та референцного супутника запропоновано використовувати не фізичні різниці спостережень, а так звані «віртуальні» різниці, що одержуються шляхом реконфігурації невідомих, які підлягають оцінюванню. Цей метод автор адаптував під свою задачу на етапі експериментального дослідження, довів перевагу. На відміну від традиційного методу формування різниць спостережень, при даному методі врахування кореляції похибок різницевого спостережень не потрібно, а зміна референцного супутника не була проблемою.
 3. Робота містить експериментальну складову, під час якої виконано експериментальне тестування й проведення дослідження нових та удосконалених методів, алгоритмів і програмних модулів для вирішення завдань точного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів на прикладах НКА FORMOSAT-3/COSMIC (США, Тайвань) та GRACE (США, ФРН). А розроблений прототип програмного забезпечення обробки ГНСС-спостережень та позиціонування методом PPP може бути використаний для точного визначення параметрів руху НКА, включаючи супутники дистанційного зондування Землі, супутники радіолокаційної інтерферометрії SAR/InSAR, вітчизняні супутники типу «Січ» та супутники проекту «Іоносат».
 4. Практичну цінність одержаних автором результатів підтверджують акти їх впроваджені у ДП «ЗАО НДІРВ» (м. Харків), Головної астрономічної обсерваторії НАН України (3 акти, наведені в Додатку Б).

Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому, відповідність оформлення дисертації вимогам, затвердженим МОН України

Дисертація містить анотацію українською та англійською мовами, список публікацій здобувача (34 публ.), в яких опубліковані основні наукові результати дисертації. З них 9 статей, які входять до переліку видань, дозволених МОН України для публікацій результатів досліджень з технічних

наук (одна стаття індексована у міжнародних наукометричних базах SCOPUS, Index COPERNICUS та PИHЦ), 25 праць наукових конференцій.

Основна частина роботи містить вступ, чотири розділи, список використаних джерел, три додатки.

Висновки, наукові та практичні результати дисертації в повній мірі відображують характер виконаних досліджень.

Робота достатньо проілюстрована графіками й рисунками, а стиль викладу матеріалів досліджень, наукових положень, висновків забезпечує доступність їх сприйняття.

Автореферат та основні положення дисертації за змістом є ідентичними.

Дисертація є завершеною науковою працею, оформленою відповідно до вимог, затвердженим МОН України.

Оцінка дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота пройшла перевірку на унікальність тестового наповнення, яка засвідчила її відповідність принципам академічної доброчесності. Всі посилання на використані джерела оформлені коректно.

Оцінка мови та стилю викладення дисертації і автореферату

Мова та стиль дисертації та автореферату відповідають вимогам МОН України. Сформульовані у дисертаційній роботі основні положення, висновки та рекомендації викладені у логічній послідовності, і підтверджуються експериментальними даними, які порівнюються з еталонними значеннями. Викладення матеріалу дозволяє відслідковувати всі етапи постановки і проведення дослідження. Всі розділи дисертації мають внутрішню єдність і завершеність. Змістове наповнення підрозділів роботи відповідає змісту визначених розділів.

Отримані підсумкові результати дисертації співпадають із загальною метою і конкретними науковими завданнями, сформульованими у вступі. В цілому, дисертаційна робота сприймається як закінчена наукова праця, що містить нові наукові результати.

Підтвердження повноти викладу основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях

Наукова новизна достатня для кандидатської дисертації. По тематиці дисертації всього опубліковано 34 наукових роботи, з яких 9 статей, які

входять до переліку видань, дозволених МОН України для публікацій результатів досліджень з технічних наук (одна стаття індексована у міжнародних наукометричних базах SCOPUS, Index COPERNICUS та PИHЦ).

Структура і обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (154 найменування), трьох додатків.

Загальний обсяг роботи – 249 стор. (з них основний текст – 155 стор., список використаних джерел – 19 стор., рисунки та таблиці на сторінку – 23 стор., додатки – 30 стор., 136 рисунків, 6 таблиць).

Апробація результатів дисертації

Результати дослідження пройшли апробацію на міжнародних науково-технічних конференціях, що відображено в збірниках тез і матеріалах 25 конференцій.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації і дає повне уявлення про отримані результати дослідження та їх наукову новизну та практичну значимість.

В авторефераті і дисертації відображений внесок здобувача в наукові роботи, виконані у співавторстві.

Стиль викладу дисертації і автореферату науковий. Назва дисертації відповідає змісту і паспорту спеціальності 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. З тексту дисертаційної роботи не зрозуміло який ефект матиме використання запропонованих методів при багатосистемній обробці даних від супутників різних навігаційних систем.

2. В розділі 4.6 приведені графіки геометричних факторів, на яких є лінії XDOP, YDOP, ZDOP, NSV (наприклад рис. 4.31). При цьому пояснення до їх розшифровки в тексті роботи не знайдені.

3. Четвертий розділ роботи містить значну кількість результатів експериментальних досліджень у формі графіків. Доцільним видається розміщення таких результатів в Додатку.

4. На стор. 126 міститься посилання на табл. 4.2.1, якою очевидно є табл. 3.5.

Зазначені зауваження в цілому не знижують високий рівень дисертаційної роботи і одержаних автором результатів.

Висновок

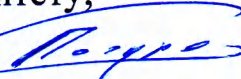
Дисертація Яковченка О. І. «Розвиток методів визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів по бортовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем» є закінченою науковою працею, у якій вирішено актуальну наукову задачу розробки вдосконалених та нових методів, алгоритмів і процедур високоточного визначення параметрів руху космічних апаратів та позиціонування навколоземних об'єктів з сантиметровою/дециметровою точністю у автономному (недиференціальному) режимі PPP (Precise Point Positioning) по бортовим двохчастотним фазовим і кодовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем, що має теоретичне та практичне значення, виконана із дотриманням принципів академічної доброчесності, повністю відповідає паспорту спеціальності 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи та вимогам п. 10 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Яковченко Олександр Іванович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи.

Офіційний опонент

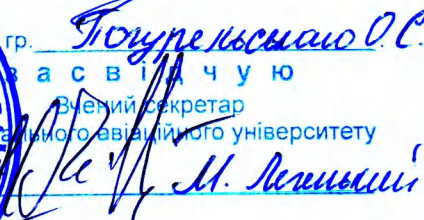
доцент кафедри аеронавігаційних систем

Національного авіаційного університету,

кандидат технічних наук

 О. С. Погурельський




М. Леміш
Вчений секретар
Національного авіаційного університету