

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОНДРАТЮК ВАСИЛЬ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 528.2: 629.78

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ І АЛГОРИТМИ ПРЕЦИЗІЙНОГО ВИЗНАЧЕННЯ
МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА СИГНАЛАМИ
ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ**

05.22.13 – Навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ В. М. Кондратюк

Науковий керівник

ХАРЧЕНКО Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Кондратюк В.М. Методи і алгоритми прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем. - Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 «Навігація та управління рухом» - Національний авіаційний університет, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена застосуванню глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) для вирішення актуальних наукових завдань: прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за допомогою обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень без ускладненої процедури розв'язання фазової неоднозначності.

В дисертації вирішено науково-технічну задачу розробки методів і алгоритмів прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за допомогою обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень без ускладненої процедури розв'язання фазової неоднозначності.

Метою дисертаційної роботи є розробка, дослідження та експериментальна верифікація нових та удосконалених методів і алгоритмів прецизійного визначення місцеположення (позиціонування) рухомих об'єктів на основі більш ефективної сумісної обробки диференціальних кодових і фазових ГНСС-спостережень без застосування ускладнених процедур розв'язання фазової неоднозначності.

Проведений аналіз публікацій показує інтерес зі сторони світової наукової спільноти до питань дециметрового рівня точності визначення місцеположення рухомих об'єктів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем. Подібні технології активно використовуються для вирішення завдань управління наземним транспортом, БПЛА, точного землеробства, геоінформатики та інших задач. Навігаційні характеристики, дециметрового рівня точності, для значної частини користувачів неможливо забезпечити без впровадження сучасних методів спільної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень без ускладненої процедури

розв'язання фазової неоднозначності, особливо для одночастотного ГНСС-обладнання.

Одним з ключових елементів розглянутих технологій є одночастотна апаратура споживача, яка є невід'ємною частиною ГНСС. Розроблення та реалізація методів і алгоритмів які зможуть забезпечити дециметровий рівень точності в апаратурі споживача є пріоритетним при визначені місцеположення рухомих об'єктів.

В дисертаційній роботі запропоновано удосконалений метод обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу згладжування/фільтрації кодових спостережень з використанням безперервних фазових спостережень в режимі кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих, враховує вплив накручування фази несучої («wind-up»-ефект), що проявляється при зміні напрямку руху, еволюціях, обертаннях об'єктів. Даний метод використовує представлення рівнянь спостережень у вигляді «віртуальних подвійних різниць», що дає можливість використовувати діагональні кореляційні матриці похибок диференціальних кодових та фазових спостережень та виконати їх оптимальну статистичну обробку. Урахування та парировання впливу «wind-up»-ефекту фазових вимірювань при виконанні згладжування кодових спостережень з використанням фазових дозволяє суттєво зменшити багатопроміневість і шумові складові кодових спостережень та у підсумку підвищити точність кінематичного позиціонування.

У даній роботі також представлено розроблений метод комбінованого диференціального кодового і фазового так званого «плаваючого» (float) рішення. Відмінною особливістю даного методу, в порівнянні з попереднім, є те, що в обробку спільно включаються кодові і фазові спостереження, без безпосереднього здійснення операцій згладжування/фільтрації. Оцінка «рівня» фазових спостережень щодо кодових здійснюється спільно з оцінкою координатно-часових параметрів. Даний метод реалізує обробку фазових спостережень, при якому дискретні цілочисельні фазові неоднозначності трактуються як континуальні невідомі параметри, оцінка яких здійснюється спільно з залишковими

систематичними похибками подвійних різниць фазових спостережень. В процесі обробки кодовим і фазовим спостереженням надаються відповідні вагові коефіцієнти. Метод передбачає, що у використовуваних спостереженнях виключені аномалії (пропуски, фазові циклічні скачки) і відновлена безперервність фазових спостережень. Особливу увагу приділено обробці спостережень ГНСС з частотним розподілом спектрів випромінюваних сигналів, тому даний метод комбінованого диференціального кодового і фазового рішення є найбільш ефективним для спільної обробки спостережень GPS+ГЛОНАСС, так як він враховує особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів ГЛОНАСС та забезпечує дециметровий рівень точності кінематичного позиціонування.

В роботі також запропоновано метод сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу точного кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих методів, дозволяє усунути варіаційні складові похибки рішення і виключає стрибки координат, що викликані зміною робочого сузір'я супутників. Метод заснований на використанні оцінок зміни безперервних фазових ГНСС-спостережень (прирощень/збільшень) за часом. Результати дослідження показали, що запропонований метод дозволяє в середньому у ~ 2 рази зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженого» рішення і в $\sim 3-4$ рази по відношенню до диференціальних кодових DGPS-рішень.

Запропонована модель похибок ГНСС-спостережень, як інструмент оцінки точності отриманого рішення - індикатор якості позиціонування. Дана модель враховує внесок основних джерел похибок спостережень, де для кожної складової були прийняті оцінки середньоквадратичних похибок (СКП), які обрані, ґрунтуючись на результатах зарубіжних і власних досліджень.

Представлено методику апостеріорної оцінки точності запропонованих методів обробки ГНСС-спостережень та позиціонування з використанням диференціальної корегувальної інформації. Оцінка фактичної точності координатних визначень проводиться для двох режимів роботи користувальницького ГНСС-устаткування: для нерухомого приймача – статичний режим; для мобільного приймача – кінематичний режим.

Критеріями якості проведених розробок і досліджень – точності координатних визначень з використанням розроблених методів, алгоритмів і експериментального ПАЗ обробки ГНСС-спостережень є:

– статистичні характеристики відхилень отриманих рішень від еталонних і їх відповідність світовим аналогам;

– статистичні характеристики залишків – різниць між вимірюваними параметрами і обчисленими за оцінками рішення навігаційної задачі.

Представлені результати натурних координатних визначень з використанням статичних і кінематичних вимірювань і порівняльний аналіз результатів використання розроблених методів обробки ГНСС - спостережень.

Результати обробки кінематичних спостережень з використанням запропонованих методів і алгоритмів і їх порівняльний аналіз із зарубіжними аналогами показали наступне:

1) обробка ГНСС-спостережень з використанням запропонованих методів дозволяє отримати точність (СКП) кінематичних координатних визначень ~10–15 см по плановим координатам і ~10–20 см по висоті;

2) метод отримання комбінованого кодово-фазового (float) рішення найбільш підходить для обробки спостережень ГЛОНАСС (або GPS+ГЛОНАСС), тому що дозволяє врахувати особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів; цей метод показав дещо гірші результати у порівнянні з методом підбору рівня при кодово-фазовому згладжуванні на інтервалах часу менше ~15–30 хв. та на базових віддаленнях більше ~50 км; при інтервалах спостережень ~30–60 хв. і більше результати обробки спостережень згаданими методами практично не відрізняються;

3) результати позиціонування з використанням спільних спостережень GPS та ГЛОНАСС показали, що вже на коротких проміжках часу (~5–15 хв.) досягається точність (СКП) позиціонування ~10–15 см і вище, а на інтервалах 30 хв. і вище точність позиціонування становить ~7–12 см по всіх координатах;

4) «згладжені» координатні рішення в значній мірі звужують область пошуку дискретних цілочисельних оцінок (розв’язання) фазових неоднозначностей, тобто є

важливою і необхідною складовою обробки для отримання надійного диференціального позиціонування найвищої точності;

5) вперше запропоновано метод сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень дозволяє практично повністю усунути варіаційні складові похибки рішення і стрибки координат, що викликані змінною робочого сузір'я супутників; використання даного методу дозволяє в середньому у ~ 2 рази зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженого» рішення і в $\sim 3-4$ рази по відношенню до стандартних DGPS рішень.

Запропоновані методи точного позиціонування в цілому дозволяють отримати координатні рішення з більшою точністю у порівнянні з рішеннями провідних світових виробників. Це дозволяє говорити про те, що подальший розвиток запропонованих методів і алгоритмів та їх практичне впровадження дозволить створити конкурентоспроможні додатки для вирішення різноманітних задач прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалений метод обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу згладжування/фільтрації кодових спостережень з використанням безперервних фазових спостережень в режимі кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих, враховує вплив накручування фази несучої («wind-up»-ефект), який проявляється при зміні напрямку руху, еволюціях, обертаннях об'єктів. Даний метод забезпечує підвищення точності оцінки координат рухомих об'єктів до дециметрового рівня.

2. Отримав розвиток метод комбінованого диференціального сумісного кодово-фазового рішення навігаційної задачі з одночасною оцінкою початкових фазових неоднозначностей (як континуальних змінних) та без безпосереднього здійснення операцій згладжування/фільтрації. Метод є найбільш ефективним для спільної обробки спостережень GPS+ГЛОНАСС так як враховує особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів ГЛОНАСС, що забезпечує дециметровий рівень точності.

3. Вперше розроблено метод сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу точного кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих методів, дозволяє усунути варіаційні складові похибки рішення, суттєво зменшення вплив стрибків оцінок кодово-фазових рішень, обумовлених зміною робочого сузір'я супутників ГНСС, а також дозволяє зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженого» та диференціального рішень.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропоновані нові та удосконалені методи і алгоритми обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень в режимі кінематичного позиціонування є відносно простими та ефективними для реалізації в апаратурі підвищеної точності, призначеної для позиціонування рухомих об'єктів.

2. Розроблений експериментальний зразок ГНСС-апаратури реалізує створені та протестовані методи і алгоритми обробки ГНСС-спостережень. Це забезпечує суттєве (до кілька разів) підвищення точності диференціального позиціонування рухомих об'єктів і може використовуватись в системах управління рухомими об'єктами, а також верифікації автопілотів БПЛА.

3. Запропонована модель похибок ГНСС-спостережень для координатно-часових визначень в диференціальному режимі, може бути застосована для оцінки характеристик точності бюджетної апаратури підвищення точності.

4. Методика оцінки фактичної точності координатних визначень з використанням диференціальної коригувальної інформації, рекомендується для верифікації ГНСС-обладнання користувача для статичного і кінематичного (рухомий об'єкт) режимів позиціонування.

Результати досліджень впроваджено в розробках: Державного підприємства «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», Державного підприємства «Оризон-Навігація» та Товариство з обмеженою відповідальністю «Є.П.С.»

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи, диференціальна навігація, точність, надійність, спостереження, похибка.

ABSTRACT

Kondratiuk V.M. Methods and algorithms of precision position determination of moving objects using signals of global navigation satellite systems. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.22.13 "Navigation and Traffic Management" - National Aviation University, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the application of global navigation satellite systems (GNSS) to solve relevant scientific problems: precision position determination of moving objects by processing the carrier-phase and code GNSS observations without a complicated procedure of the carrier-phase ambiguity resolution.

The dissertation solves the scientific and technical problem of developing methods and algorithms for precision position determination of moving objects by processing the carrier-phase and code GNSS observations without a complicated procedure of the carrier-phase ambiguity resolution.

The aim of the dissertation is to develop, research and experimentally test new and improved methods and algorithms for accurate position determination of moving objects on the basis of more effective joint processing of differential carrier-phase and code GNSS observations without implementation a complicated procedure of the carrier-phase ambiguity resolution.

The analysis of publications shows the interest of the world scientific community in the issues of moving objects localization with decimeter level of accuracy using signals of global navigation satellite systems. Such technologies are actively used to solve control problems of ground vehicles, UAVs, in precision agriculture, geoinformatics and many other tasks. Navigational characteristics of decimeter level of accuracy, for a large number of users can not be provided without introduction of modern methods of joint processing of phase and code GNSS observations without a complicated procedure for solving a carrier-phase ambiguity, especially for a single-frequency GNSS equipment.

One of the key elements of the considered technologies is single-frequency consumer equipment, which is an integral part of GNSS. The development and

implementation of methods and algorithms that can provide a decimeter level of accuracy in consumer equipment is a priority in position determining of moving objects.

The dissertation proposes an improved method of processing code and carrier-phase GNSS observations, which solves the problem of smoothing / filtering code observations using continuous carrier-phase observations in the mode of kinematic positioning, which, in contrast to the known, takes into account the influence of “winding-up” effect of the carrier-phase), which is manifested by changes in the direction of motion, evolution, rotation of objects. This method uses the representation of observation equations in the form of "virtual double differences", which makes it possible to use diagonal correlation matrices of errors of differential code and carrier-phase observations and perform their optimal statistical processing. Taking into account and parrying the "wind-up" effect of carrier-phase measurements when performing smoothing of code observations using carrier-phase can significantly reduce the multipath and noise components of code observations and ultimately increase the accuracy of kinematic positioning.

This manuscript also presents the developed method of combined differential code and carrier-phase so-called "float" solution. A distinctive feature of this method, compared to the previous one, is that the processing jointly includes code and carrier-phase observations, without the direct implementation of smoothing / filtering operations. Estimation of "level" of carrier-phase observations concerning the code ones is carried out together with an estimation of coordinate-time parameters. This method implements the processing of carrier-phase observations, in which discrete integer phase ambiguities are treated as continuous unknown parameters, which are estimated together with the residual systematic errors of double differences of phase observations. Appropriate weights are provided for the code and carrier-phase observations during processing. The method assumes that anomalies (gaps, phase cyclic jumps) are excluded in the used observations and the continuity of carrier-phase observations is restored. Particular attention is paid to the processing of GNSS observations with frequency distribution of spectrums of emitted signals, so this method of combined differential code and carrier-phase solution is the most effective for joint processing of GPS + GLONASS observations, as it takes into account

the frequency distribution of spectrums of emitted GLONAS signals and ensures decimeter level of accuracy for the kinematic positioning.

The paper also proposes a method of joint processing of code and carrier-phase GNSS observations, which solves the problem of accurate kinematic positioning, which, in contrast to known methods, eliminates variational components of the solution error and eliminates coordinate jumps caused by changes in the working constellation of satellites. The method is based on the use of estimates of changes in continuous carrier-phase GNSS observations (increases) over time. The results of the study showed that the proposed method allows, on average, 2 times reducing the positioning errors with regard to the "smoothed" solution and 3-4 times with regard to DGPS solutions.

The model of errors of GNSS-observations as the tool of an estimation of accuracy of the received decision, i.e. the quality indicator of positioning, is offered. This model takes into account the contribution of the main sources of observation errors, where for each component were accepted estimates of standard deviations / root mean square error (RMS), which are selected based on the results of foreign and domestic research.

The method of a posteriori accuracy estimation of the offered processing methods of GNSS-observations and positioning with the use of differential corrective information is presented. Estimation of the actual accuracy of coordinate determinations is carried out for two modes of operation of user GNSS equipment: for the stationary receiver – a static mode; for mobile receiver – a kinematic mode.

Criteria for the quality of development and research, i.e. the accuracy of coordinate determinations using the developed methods, algorithms and experimental hardware and software means of processing GNSS observations are:

- statistical characteristics of deviations of the received decisions from the reference and their correspondence to the world analogues;
- statistical characteristics of the residuals, i.e. the differences between the measured parameters and calculated according to the estimates of the solution of the navigation task.

The results of experimental coordinate determinations are presented with the use of static and kinematic measurements together with the comparative analysis of the results of the use of the developed methods of GNSS observations processing.

The results of processing kinematic observations using the proposed methods and algorithms and their comparative analysis with foreign counterparts showed the following:

1) processing of GNSS observations using the proposed methods allows obtaining the accuracy (root mean square errors) of kinematic coordinate determinations up to ~ 10-15 cm in the horizontal plane and up to ~ 10-20 cm in height;

2) the method of obtaining a combined code-phase (float) solution is the most suitable for processing GLONASS observations (or GPS + GLONASS), because it allows taking into account the peculiarities of the frequency distribution of emitted signals' spectrums; this method showed slightly worse results in comparison with the method of level selection during code-phase smoothing for time intervals less than ~ 15–30 min and at base distances more than ~ 50 km; for observation intervals ~ 30-60 minutes and more the results of observations processing by the mentioned methods practically do not differ from each other;

3) the results of positioning using joint observations of GPS and GLONASS showed that already at short intervals (~ 5–15 min) the positioning accuracy (RMS) of ~ 10–15 cm and higher is achieved, and at intervals of 30 min and above the positioning accuracy is ~ 7-12 cm for all coordinates;

4) the "smoothed" coordinate solutions significantly narrow the scope of the search for discrete integer estimates (solutions) of phase ambiguities, i.e. is an important and necessary component of processing to obtain a reliable differential positioning of the highest accuracy;

5) for the first time presented method of joint processing of code and carrier-phase GNSS observations allows completely eliminate the variational components of the solution error and coordinate jumps caused by change of the working constellation of satellites; the use of this method allows on average ~2 times to reduce positioning errors in relation to the "smoothed" solution and ~3-4 times in relation to standard DGPS solutions.

The proposed methods of precise positioning in general allow to obtain coordinate solutions with greater accuracy compared to the solutions of the world's leading manufacturers. This suggests that the further development of the proposed methods and

algorithms and their practical implementation will create competitive applications to solve various problems of precise location of moving objects.

Scientific novelty of the obtained results.

1. An improved method of processing code and carrier-phase GNSS observations, which solves the problem of smoothing / filtering code observations using continuous carrier-phase observations in the mode of kinematic positioning, which, in contrast to the known methods, takes into account the influence of "wind-up" effect of carrier-phase, which is manifested by changes in the direction of motion, evolution and rotation of objects. This method improves the accuracy of moving objects' coordinates estimates up to decimeter level.

2. The method of the combined differential code-phase solution of the navigation problem with simultaneous estimation of initial carrier-phase ambiguities (as continuous variables) and without direct implementation of smoothing / filtering operations has been developed. The method is the most effective for the joint processing of GPS + GLONASS observations as it takes into account the peculiarities of the frequency distribution of the spectrums of emitted GLONASS signals, which provides a decimeter level of accuracy.

3. For the first time a method of joint processing of code and carrier-phase GNSS observations was developed, which solves the problem of accurate kinematic positioning, which, unlike known methods, eliminates variational components of solution error, significantly reducing the impact of estimates of code-phase solutions due to changing of GNSS satellites working constellation, and also allows reducing positioning errors in relation to the "smoothed" and differential solutions.

The practical significance of obtained results.

1. The proposed new and improved methods and algorithms for processing carrier-phase and code GNSS observations in the mode of kinematic positioning are relatively simple and effective for implementation in high-precision equipment designed for moving objects positioning.

2. The developed experimental sample of GNSS equipment implements the created and tested methods and algorithms for processing GNSS observations. This provides a significant (up to several times) increase in the accuracy of differential positioning of

moving objects and can be used in control systems of moving objects, as well as for verification of UAV autopilots.

3. The proposed model of GNSS observation errors for coordinate-temporal determinations in the differential mode can be used to assess the accuracy characteristics of the budget equipment to increase accuracy.

4. The method of estimating the actual accuracy of coordinate determinations using differential correction information is recommended for verification of user GNSS equipment for static and kinematic (moving object) positioning modes.

The results of the research were implemented in the developments of: the State Enterprise "Central Research Institute of Navigation and Control", the State Enterprise "Orizon-Navigation" and the Limited Liability Company "EPS".

Key words: global navigation satellite systems, differential navigation, accuracy, reliability, observation, error.

Список публікацій здобувача

Список публікацій у фахових наукових виданнях України

1. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Трикоз В. П., Вишнякова Є. В., Газнюк М. О. Впровадження супутникових навігаційних технологій та зв'язку в систему моніторингу та управління рухомими об'єктами. Научно-технический журнал. Технологические системы. № 3, К. : 2006. – С. 45–47. ISSN: *друковане* –2074-0603.

2. Скорик Є. Т., Кондратюк В. М. Супутникові технології навігації та зв'язку для автотранспортної галузі, «Наука та інновації» 2007, 3 (1): 67–83.

3. Скорик Є. Т., Пасічник Л. П., Кондратюк В. М. Супутникові технології радіонавігації та радіозв'язку на залізничному транспорті «Наука та інновації» 2007, 3 (1): 90–105.

4. Жаліло О., Желанов О., Шелковєнков Д., Шокало В., Кондратюк В., Литвин М, Флерко С., Черевко В. Результати експериментальних досліджень реалізації DGPS/RTK режиму супутникового позиціонування з використанням NTRIP-технології. Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК

«Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва», 2008. – Вип. 1(15). Львів. – С. 125–132. *SSN*: 1819-1339.

5. Яцків Я. С., Харченко В. П., Шокало В. М., Терещук О. І., Жаліло О. О., Кондратюк В. М., Куценко О. В., Лук'янов О. М., Литвин М. О., Шелковенков Д. О., Желанов О. О., Грінченко О. В., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В. Практика створення в Україні інформаційно-вимірювальної GNSS-системи та мережної VRS-технології забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок. Наука та інновації, Т. 5, № 2. – С. 5–22, Видавничий дім «Академперіодика», Київ, 2009. *ISSN*: *друковане* – 2409–9066, 1815–2066 *електронне* – 2413–4996, 2413–497X.

6. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Застосування диференціальних методів глобальних навігаційних супутникових систем у визначеннях поточних координат рухомих об'єктів. Вісник Національного авіаційного університету. – К., 2010. – № 2(43). – С. 46–52. *ISSN*: *друковане* – 1813–1166 *електронне* – 2306–1472.

7. Кондратюк В. М. Усовершенствованный метод сглаживания дифференциальных кинематических кодовых ГНСС-наблюдений. Системи управління, навігації та зв'язку – 2011. – № 3(19). – С. 8–13. *ISSN*: *друковане* – 2073-7394.

8. Кондратюк В. М. Сравнительный анализ методов и алгоритмов кодово-фазового ГНСС-позиционирования. Вісник інженерної академії – 2012. – № 1. – С. 57–61.

9. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М. Інформаційне забезпечення автоматизованого керування літальним апаратом з використанням системи GNSS. Вісник Національного авіаційного університету Київ, 2013. – № 2 (55). – С. 40–43.

10. Кондратюк В. М. Желанов А. А., Дицкий И. В., Бессонов Е. А. Модифицированный алгоритм сглаживания/фильтрации дифференциальных гнсс наблюдений в режиме кинематического позиционирования. Вестник НАУ. – 2014. – № 4. – С. 56–64.

11. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M. RPAS ADS-B Trajectory Control Data Transmission via Satellite. Proceedings of the NAU, 2017, v. 3, pp. 26–32.

12. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M., Ermakov A. U., Chernyuk E. O. Influence of Transmitter Nonlinearities on Data Transmission from Remotely Piloted Air System. Proceedings of the NAU, 2017, v. 3, pp. 33–41.

13. Kondratiuk V., Konin V., Kutsenko O., Ilynska S. Testing Static and Kinematic Modes of Precise Point Positioning Service in Ukraine. Radioelectronics and Communications Systems, 2019, 62(10). – С. 530–540. (**Scopus**).

14. Kondratiuk V. M., Konin V. V., Ilynska S. I., Kutsenko O. V. Zhuliany Airport as a Possible Candidate for Ranging and Integrity Monitoring Station placement in Kyiv region ISSN 1990-5548 Electronics and Control Systems 2019. N 4 (62): 16–23. ISSN: *друковане* – 1990–5548.

Список публікацій у міжнародних фахових журналах за кордоном

15. Жалило А. А., Кондратюк В. М., Куценко А. В., Конин В. В., Сушко В. Г., Харченко В. П., Шелковенков Д. А., Шокало В. М. GPS-навигация и геодезическая съемка – результаты экспериментальной верификации технологии OMNISTAR. Научный Вестник ГосНИИ «Аэронавигация», № 7. – М. : 2007. – С. 27–35.

16. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Ільницька С. І. Исследование работоспособности дифференциального сервиса на территории Украины. Научный вестник. Секция технических наук – г. Желм, Польша, № 1/2009. – С. 51–61.

17. Kharchenko V., Kondratiuk V. Aerospace Navigation Technologies in Logistic. "Logistics and Transport" Journal, ISSN: 1734-2015. No 2 (2015). – P. 5–10.

18. Kharchenko V., Grekhov A., Kondratiuk V., Nagorna K. ADS-B Satellite Communication Channel Based on IEEE 802.16 Standard. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2017. ISSN 2255-9876 (online) ISSN 2255-968X (print) December 2017, vol. 5, pp. 18–27.

19. Kondratiuk V., Kovalevskiy E., Ilynska S. Determination of Space Debris Coordinates by Means of a Space Service Vehicle. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2017. Mar 2017, vol. 3, pp. 31–37.

20. Kondratiuk V., Kovalevskiy E., Ilynska S. Integrated Positioning System With Restricted Access to Navigation Satellite Signals. Transport and Aerospace Engineering.

RTU Press. Riga 2017. ISSN 2255-9876 (online) ISSN 2255-968X (print) December 2017, vol. 5, pp. 60–66.

21. Grekhov A., Kondratiuk V., Ilnitska S. RPAS Satellite Communication Channel Based on IEEE 802.11 b Standard. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2019, 7 (1), 32–40.

22. Grekhov A., Kondratiuk V., Ilnitska S. RPAS communication channels based on WCDMA 3GPP standard. Aviation, 2020, 24(1). – С. 42–49. (**Scopus**).

23. Ilnitska S. I., Li F., Grekhov A., Kondratiuk V. Loss Estimation for Network-Connected UAV/RPAS Communications. IEEE Access, 2020, 8, стр. 137702–137710, 9149599. (**Scopus**).

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

24. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Способы и средства оценки тактико-технических характеристик широкозонных функциональных дополнений GPS (GNSS). Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.17–21.23.

25. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Методики экспериментальной оценки навигационных характеристик широкозонных функциональных дополнений GPS(GNSS). Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.10–21.16.

26. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Зарубежный опыт создания и применения систем FIS (Fight Inspection Systems) для контроля характеристик и сертификации авионики и аэронавигационного обеспечения воздушных судов с использованием DGPS (DGNSS) подсистем. Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.1–21.9.

27. Жалило А. А., Кондратюк В. М. Спутниковый высокоточный дифференциальный VBS&HP-сервис компании FUGRO/OMNISTAR BV: технологии GPS-местопределения и их характеристики. Сборник трудов

2-го Международного радиоэлектронный Форума (МРФ-2005) «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Международная конференция по системам локации и навигации (МКЛСН-2005), г. Харьков, ХНУРЭ, 19–23 сентября 2005 г., – Т. 2. – С. 516–519.

28. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Трикоз В. П., Вишнякова С. В., Газнюк М. О. Впровадження супутникових навігаційних технологій та зв'язку у систему моніторингу та управління рухомими об'єктами. 5-ий міжнародний авіакосмічний салон «Авіасвіт–XXI», 2006 р.

29. Харченко В. П., Кондратюк В. М. Аспекты создания и практической реализации интегрированных систем GIS, GPS и беспроводной связи. Материалы II Международной конференции GIS и GPS в практике. – г. Хелм, Польша, 19–20 апреля 2007 г. – С. 55–61.

30. Кондратюк В. М., Мелкумян В. Г. Оцінка якості навігаційного забезпечення супутникових радіонавігаційних систем з використанням диференціальної коригувальної інформації. Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції “АВІА-2009”. – Т. 1. – К. : НАУ, 2009. – С. 7.45–7.48.

31. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Тунік А. А., Ільницька С. І., Куценко О. В., Вишнякова С. В. Розробка інтегрованої навігаційної системи для безпілотного літального апарата. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2011», Київ, 19–21 квіт. 2011 р. – К., 2011. – Т. 2. – С. 8.14–8.17.

32. Кондратюк В. М., Желанов А. А. Высокоточное позиционирование движущихся объектов с использованием усовершенствованного метода сглаживания кодовых дифференциальных ГНСС-наблюдений. Сборник научных трудов 4-го международного радиоэлектронного форума (МРФ) «Прикладная электроника. Состояние и перспективы развития». 2011. – Т. 1, ч. 2. – С. 79–82.

33. Kharchenko V., Kondratyuk V., Kutsenko O. Experimental validation of small integrated navigation system. Proceedings of the Fifth World Congress “Aviation in the XXI-st century”: “Safety in Aviation and Space Technologies”. Vol. 2. Kyiv 2012. – P. 3.2.30–3.2.35.

34. Харченко В. П., Кондратюк В. М. Навігаційні технології в автотранспортній галузі. Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «ABIA-2013». – Т. 2. – К. : НАУ, 2013. – С. 7.42–7.46.

35. Kharchenko, V., Kondratyuk, V., Ilnytska, S., Kutsenko, O., Larin, V. Urgent problems of UAV navigation system development and practical implementation. 2013 IEEE 2nd International Conference on Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments, APUAVD 2013 – Proceedings, 2013. – С. 157–160, 6705313. **(Scopus)**.

36. Kharchenko V. P., Kondratyuk V. M., Ilnytska S. I., Kutsenko O. V. Recommendations to UAV navigation system test validation and some practical results. 2014 IEEE 3rd International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC 2014 – Proceedings, 2014. – С. 31–34, 6979723. **(Scopus)**.

37. Kharchenko V., Kondratyuk V., Kutsenko O., Vyshnyakova E., Ismael A. Some practical results of integrated navigation system flight testing. Proceedings of the Sixth World Congress “Aviation in the XXI-st century”: “Safety in Aviation and Space Technologies”. September 23–25, 2014. Vol. 2. Kyiv 2014. – P. 3.2.30–3.3.1.

38. Kharchenko V., Konin V., Kondratyuk V., Ilnytska S., Kutsenko O., Vyshnyakova E., Shmelyov T., Shyshkov F. Acceleration of GNSS applications development and facilitation of their broad acceptance in Ukraine through international cooperation and own experience Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції «ABIA–2015». – К. : НАУ, 2015. – С. 8.89–8.101.

39. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M., Nagorna K. N. Nonlinearities Impact on RPAS Data Transmission. 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2017 – Proceedings, 2018, January, c. 188–191. **(Scopus)**.

40. Kutsenko O. V., Ilnytska S. I., Kondratyuk V. M., Konin V. V. Unmanned Aerial Vehicle Position Determination in GNSS Landing System. 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2017 – Proceedings, 2018, January, c. 79–83 **(Scopus)**.

41. Ilnytska S. I., Kondratyuk V. M., Vyshnyakova Ye. V., Tunik A. A. Experimental Investigation of Multi-GNSS in Static Mode. 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC 2018 – Proceedings, 2018, с. 132–134, 8576271. **(Scopus)**.

42. Ilnytska S., Kondratiuk V., Kutsenko O., Konin V. Potential Possibilities of Highly Accurate Satellite Navigation Use for Landing Operations of Unmanned Aerial Systems. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2019 – Proceedings, 2019, с. 174–177, 8943873. **(Scopus)**.

43. Grekhov A., Kondratiuk V., Ilnytska S., Vyshnyakova E., Kondratiuk M., Trykoz V. Satellite Traffic Simulation for RPAS Swarms. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2019 – Proceedings, 2019, с. 265–269, 8943881. **(Scopus)**.

Патенти

44. Баранов Г. Л., Беляєвський Л. С., Дмитриченко М. Ф., Дмитрієв М. М., Кошовий А. А., Кондратюк В. М., Левковець П. Р., Топольськов Є. О. Система диспетчерського керування рухомими об'єктами з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації. Патент на винахід № 75709 Бюл. № 5, 2006 р.

45. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Погурельський О. С. Система диспетчерського керування рухомими біологічними об'єктами з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації: пат. № 39917 Україна: МПК G01S 5/14; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.

46. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Ільницька С. І. Апаратно-програмний комплекс моніторингу та управління рухомими об'єктами : пат. № 50277 Україна, МПК G01S 5/14; опубл. 25.05.10, Бюл. № 10.

47. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Харченко В. П. Спосіб придушення ширококутних завад в аеронавігації: пат. № 75978 Україна, МПК H01Q 21/06; опубл. 25.12.2012, Бюл № 24.

48. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Ільницька С. І., Кондратюк М. В., Васильєв І. В., Савченко О. В. Система високоточного визначення координат на основі супутникових радіонавігаційних систем: пат. Україна: МПК (2006.01) G01S 5/14. № 78185; заявл. 10.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.

49. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Харченко В. П. Комбінований спосіб пеленгації джерела випромінювання радіосигналу: пат. № 129990 Україна; опубл. 26.11.2018, бюл. № 22.

50. Харченко В. П., Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Кондратюк М. В. Комбінований спосіб визначення координат радіовипромінюючих об'єктів: пат. № 139423 Україна; опубл. 10.01.2020, бюл. № 1.

Звіти з НДР

51. «Розроблення та впровадження апаратно-програмного комплексу моніторингу та управління спеціальними рухомими об'єктами» (№ держреєстрації 0106U011430).

52. «Теоретичні засади високоточних визначень координат в реальному часі на основі супутникових радіонавігаційних систем» (№ держреєстрації 0108U004005).

53. «Дослідження шляхів сертифікації системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України (СКНЗУ) щодо якості надання послуг та забезпечення безпеки їх використання споживачами сигналів глобальних навігаційних супутникових систем», шифр «Безпека» (№ держреєстрації 0107U006891).

54. «Навігація» Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем». («Навігація-Сертифікат». Сертифікація системи). шифр «Навігація-Сертифікат» (№ держреєстрації 0108U008542).

55. «Розробка та дослідження апаратно-програмних засобів споживача для обміну даними з центром обробки спостережень» (№ держреєстрації 0107U000153).

56. «Розроблення апаратно-програмних засобів інтегрованої інерційно-супутникової навігаційної системи для безпілотних літальних апаратів (БПЛА)» (№ держреєстрації 0111U000173).

57. «Мультизадачний комплекс автоматичного управління на базі інтегрованої інерційно-супутникової системи для БПЛА» (№ держреєстрації 0115U002467).

58. Горизонт 2020. Грантова угода № 641517 UKRAINE «Відтворення обізнаності та інновацій в Україні на основі ЄГНСС» ("UKraine Replication, Awareness and INnovation based on EGNSS").

59. «Система моніторингу доступності радіонавігаційного поля при заходах на посадку літальних апаратів за сигналами GNSS» (№ держреєстрації 0117U002371).

60. «Розроблення інтегрованої системи наведення, навігації та управління польотом дрона» (№ держреєстрації 0119U100629).

61. «Структурно-параметричний синтез розроблення технології побудови геліоенергетичних стратосферних платформ з адаптивно-нейронним керуванням» (№ держреєстрації 0120U101989).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	24
ВСТУП	27
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАСОБАМИ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ.....	35
1.1 Розвиток глобальних навігаційних супутникових систем	35
1.2 Вимоги користувачів ГНСС	40
1.3 Методи підвищення точності визначення місцеположення із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем	44
Висновки до розділу 1	57
2 РОЗВИТОК МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ КОДОВИХ І ФАЗОВИХ ГНСС-СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ	59
2.1 Рівняння ГНСС- спостережень та їх лінійні комбінації	59
2.2 Розробка та вдосконалення методів і алгоритмів використання високоточних кодів і фазових спостережень для підвищення точності координатних визначень.....	65
2.2.1 Удосконалений метод обробки ГНСС- спостережень згладжування/фільтрація кодів спостережень з використанням безперервних фазових спостережень в режимі кінематичної зйомки.....	65
2.2.2 Метод комбінованого диференційного кодового і фазового рішення.....	73
2.2.3 Розроблення методу сумісної обробки кодів і фазових ГНСС- спостережень.....	76
2.3 Алгоритми вирішення задачі координатно-часових визначень	79
2.4 Модель похибок ГНСС-спостережень та апріорна оцінка точності навігаційних визначень	80
Висновки до розділу 2	82
3 МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТОЧНОСТІ КООРДИНАТНИХ ВИЗНАЧЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ГНСС ДАНИХ	84

3.1. Загальна структура та основні положення оцінки точності координатних визначень за даними ГНСС	84
3.2. Методика аналізу і оцінки якості вимірювальної ГНСС-інформації.....	91
3.2.1 Короткий опис використаного вітчизняного комплексу програмно-алгоритмічного забезпечення OSTA VA обробки GPS спостережень.....	93
3.3 Методика аналізу і оцінки точності позиціонування з використанням еталонних значень оцінюваних інформаційних параметрів	96
3.4 Вихідні дані і формування еталонних значень оцінюваних параметрів.....	98
Висновки до розділу 3	101
4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ТА ЇХ ВЕРИФІКАЦІЯ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕАЛЬНИХ ДАНИХ	102
4.1 Обробка статичних вимірювань.....	102
4.2 Обробка кінематичних вимірювань.....	106
4.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень	114
4.4 Обробка результатів досліджень із застосуванням розробленого нового методу 3.....	119
4.5 Обробка результатів експериментальних досліджень в аеропорту Жуляни відповідно до запропонованої методики.....	130
4.6 Порівняльний аналіз отриманих результатів із зарубіжними аналогами	136
4.7 Рекомендації з практичного застосування запропонованих рішень та подальший напрям досліджень	138
Висновки до розділу 4	138
ВИСНОВКИ.....	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	142
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації	158
Додаток Б. Акти про реалізацію результатів наукових досліджень	167

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АС	– апаратура споживача;
БС	– базова станція;
ПС	– повітряне судно;
ГЛОНАСС	– глобальна навігаційна спутникова система Росії;
ГНСС	– глобальна навігаційна спутникова система;
ДР	– диференціальний режим вимірювань;
КЧВ	– координатно-часові визначення;
МНК	– метод найменших квадратів;
МСК	– місцева система координат
ПК	– програмний комплекс;
ПЗ	– програмне забезпечення;
РФН	– рішення фазової неоднозначності;
СКВ	– середньоквадратичне відхилення;
СКП	– середньоквадратична похибка;
ARP	– Antenna Reference Point (референсна точка антени);
Sn	– псевдодальномірні ГНСС-спостереження, отримані шляхом вимірювання затримки поширення сигналу з порядковим номером несучої частоти n ;
DGPS	– Differential Global Positioning System (диференціальна GPS, традиційний спосіб диференціальної корекції ГНСС-спостережень; зазвичай має на увазі систему, що забезпечує метровий або субметровий рівень точності навігаційних визначень місцеположення)
EGNOS	– European Geostationary Navigation Overlay Service (європейська система функціонального диференціального доповнення до ГНСС, що використовує геостаціонарні супутники для передачі диференціальної корегуючої інформації);

- EPN – EUREF Permanent Network (європейська мережа перманентних базових ГНСС-станцій);
- GIM – Global Ionospheric Map (глобальна іоносферних карта);
- GNSS – Global Navigation Satellite System (глобальна навігаційна супутникова система);
- GPS – Global Positioning System (глобальна навігаційна супутникова система NAVSTAR США);
- ICAO – International Civil Aviation Organization (міжнародна організація цивільної авіації);
- IGS – International GNSS Service (міжнародна організація надання послуг в інтересах геодинаміки та інших фундаментальних наук на основі глобальної мережі ГНСС-станцій);
- IONEX – IONosphere map Exchange format (стандарт надання карт оцінок іоносферної концентрації електронів в VTEC одиницях);
- ITRF – International Terrestrial Reference Frame (Міжнародна земна система координат);
- L_n – псевдодальномірні ГНСС-спостереження, отримані шляхом вимірювання різниці фаз сигналу з порядковим номером несучої частоти n і опорного генератора ГНСС-приймача;
- MSAS – Multi-functional Satellite Augmentation System (широкозонна система диференціального доповнення ГНСС Японії, яка використовує для передачі диференціальної коректує інформації геостаціонарні супутники зв'язку);

- RINEX – Receiver Independent Exchange Format (стандарт обміну вимірювальної ГНСС-інформацією не залежить від приймача);
- SBAS – Satellite Based Augmentation System (система диференціального доповнення до ГНСС, що використовує для передачі диференціальної коректує інформації геостаціонарні супутники зв'язку);
- UTC – Universal Time Coordinated (всесвітній координований час);
- WAAS – Wide Area Augmentation System (широкозонна система диференціального доповнення ГНСС США, що використовує для передачі диференціальної коректує інформації геостаціонарні супутники зв'язку);
- WGS-84 – World Geodetic System (всесвітня геодезична система координат, яка використовується в системі GPS).

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Технології й апаратура глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo та їх функціональних доповнень, а також регіональної Японської квазізенітної супутникової системи (Quazi-Zenith Satellite System – QZSS) та Індійської супутникової системи (Indian Regional Navigation Satellite System – IRNSS) все більш масово застосовуються в різних галузях народного господарства та військового призначення, особливо там, де необхідно забезпечити точне позиціонування, навігацію і керування рухомими об'єктами, моніторинг споруджень, різних об'єктів і процесів. ГНСС та їх функціональні доповнення разом з наземними і космічними бортовими системами стають основними засобами навігації й керування рухом й у такому вимогливому до безпеки виду цивільного транспорту як авіація.

Принциповою особливістю ринку ГНСС найближчого майбутнього, є те, що значну його частку становлять цільові диференціальні інформаційні послуги користувачам, які підвищують продуктивність праці, ефективність, точність і безпека всіляких транспортних додатків супутникових технологій, послуги, якими зможе скористатися не вузьке коло професійно орієнтованих організацій, а широке коло користувачів без спеціальної підготовки.

Одним із основних соціотехнічних користувачів навігаційних супутникових систем є авіація та її відповідні служби аеронавігації. Це виражено в принципово новій концепції CNS/ATM, Глобальному Аеронавігаційному Плані до 2030 року (Global AiR Navigation Plan 2016–2030) ІКАО, Європейському плані організації повітряного руху Євроконтролю (European ATM Master Plan), впровадження яких дасть значні можливості розвитку, підвищення безпеки польотів, збільшення авіаперевезень пасажирів і вантажів з високою економічною ефективністю. Самим масовим користувачем супутникових навігаційних технологій стає наземний транспорт, але все більшу популярність набирає використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Мініатюризація електронних засобів, зокрема мультікоптерів, як одного з видів БПЛА де основним засобом навігації є ГНСС,

отримують широку сферу застосування (військова сфера, галузь надзвичайних ситуацій, геодезичні застосування, сільське господарство, тощо). Завдяки цим новим і ефективним в реалізації й обслуговуванні технологіям з'явилася й досить швидко розвивається індустрія автоматизованих диспетчерських систем, що дозволяють здійснювати контроль і керування всіма видами транспорту, охорону транспортних засобів і оперативний автоматизований обмін інформацією й повідомленнями між користувачами й диспетчерськими пунктами. Значну роль у забезпеченні навігаційних послуг тут грають, особливо при місцевизначенні в умовах великих міст, диференціальні функціональні доповнення ГНСС. Ця індустрія приносить швидкий і постійно зростаючий економічний ефект у всіх розвинених країнах світу, великий інтерес комерційних організацій обумовлює тенденцію до зниження вартості обладнання користувачів.

Аналіз сучасних супутникових навігаційних технологій і їх потреб на світовому ринку послуг позиціонування показує, що при вимогах дециметрового рівня точності позиціонування використання методів спільної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень без рішення складного завдання розв'язання фазової неоднозначності набуває широкого застосування, головним чином, для одночастотного бюджетного ГНСС-обладнання. Подібні технології активно використовуються для вирішення завдань управління наземним транспортом та БПЛА, точного землеробства, геоінформатики та багато інших додатків. Основні проблемні питання при підвищенні точності позиціонування зосереджені в області обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень, експериментальній верифікації процедур високоточного кінематичного позиціонування (навігації), реалізації процедур розв'язання фазової неоднозначності.

Таким чином, *науково-технічна задача розробки методів і алгоритмів прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за допомогою обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень без ускладненої процедури розв'язання фазової неоднозначності* має важливе промислове значення, є надзвичайно актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Робота виконана в науково-навчальному центрі «Аерокосмічний центр» та кафедрі аеронавігаційних систем факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету.

Дослідження, що представлено в дисертаційній роботі пов'язано з виконанням науково-дослідних робіт і міжнародних грантів в яких здобувач був відповідальним виконавцем: «Розроблення та впровадження апаратно-програмного комплексу моніторингу та управління спеціальними рухомими об'єктами» (№ держреєстрації 0106U011430); «Теоретичні засади високоточних визначень координат в реальному часі на основі супутникових радіонавігаційних систем» (№ держреєстрації 0108U004005), «Дослідження шляхів сертифікації системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України (СКНЗУ) щодо якості надання послуг та забезпечення безпеки їх використання споживачами сигналів глобальних навігаційних супутникових систем», шифр «Безпека» (№ держреєстрації 0107U006891); «Навігація» Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем. («Навігація-Сертифікат». Сертифікація системи). шифр «Навігація-Сертифікат» (№ держреєстрації 0108U008542); «Розробка та дослідження апаратно-програмних засобів споживача для обміну даними з центром обробки спостережень» (№ держреєстрації 0107U000153); «Розроблення апаратно-програмних засобів інтегрованої інерційно-супутникової навігаційної системи для безпілотних літальних апаратів (БПЛА)» (№ держреєстрації 0111U000173); «Мультизадачний комплекс автоматичного управління на базі інтегрованої інерційно-супутникової системи для БПЛА» (№ держреєстрації 0115U002467); Грантова угода № 641517 Горизонт 2020 UKRAINE «Відтворення обізнаності та інновацій в Україні на основі ЄГНСС» (“UKraine Replication, Awareness and INnovation based on EGNSS”); Система моніторингу доступності радіонавігаційного поля при заходах на посадку літальних апаратів за сигналами GNSS (№ держреєстрації 0117U002371); «Розроблення інтегрованої системи наведення, навігації та управління польотом дрона» (№ держреєстрації

0119U100629). В НДР «Структурно-параметричний синтез розроблення технології побудови геліоенергетичних стратосферних платформ з адаптивно-нейронним керуванням» (№ держреєстрації 0120U101989), (виконавець за напрямом).

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка, дослідження та експериментальна верифікація нових та удосконалених методів і алгоритмів прецизійного визначення місцеположення (позиціонування) рухомих об'єктів на основі більш ефективної сумісної обробки диференціальних кодових і фазових ГНСС-спостережень без застосування ускладнених процедур розв'язання фазової неоднозначності.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

1. Аналіз та розвиток методів і алгоритмів спільної обробки диференціальних кодових і фазових ГНСС-спостережень для цілей високоточного кінематичного позиціонування дециметрової точності без застосування ускладнених процедур розв'язання фазової неоднозначності, включаючи:

– розробку метода і алгоритмів згладжування/фільтрації кодових спостережень з використанням фазових, який враховує вплив накручування фази несучої (так званий “wind-up” ефект), що обумовлене еволюціями, обертаннями об'єктів, що рухаються;

– розробку метода і алгоритмів отримання комбінованого диференціального сумісного кодово-фазового рішення навігаційної задачі з оцінкою початкових фазових неоднозначностей (як континуальних змінних) та без використання операцій згладжування;

– розробку метода і алгоритмів сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що дозволять значимо підвищити точність позиціонування рухомих об'єктів шляхом суттєвого зменшення впливу стрибків оцінок кодово-фазових рішень, обумовлених зміною робочого сузір'я супутників ГНСС.

2. Розробити методику оцінки точності кодово-фазових координатних визначень з використанням диференціальної коригувальної інформації.

3. Провести експериментальне дослідження, для підтвердження ефективності розроблених методів і алгоритмів точного позиціонування.

Об'єкт дослідження – технології і процеси обробки вимірювальної інформації та точного позиціонування по сигналах ГНСС.

Предмет дослідження – методи і алгоритми обробки кінематичних фазових і кодових ГНСС-спостережень.

Методи дослідження. Для розробки методів і алгоритмів сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень використовувалися методи математичного аналізу, теорії супутникових радіонавігаційних систем, статистичної теорії оцінювання параметрів, метод математичного моделювання. Функціональність розроблених математичних моделей методів обробки ГНСС-спостережень без реалізації складних процедур розв'язання фазової неоднозначності перевірялась за допомогою комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень в натурних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Удосконалений метод обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу згладжування/фільтрації кодових спостережень з використанням безперервних фазових спостережень в режимі кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих, враховує вплив накручування фази несучої ("wind-up"-ефект), який проявляється при зміні напрямку руху, еволюціях, обертаннях об'єктів. Даний метод забезпечує підвищення точності оцінки координат рухомих об'єктів до дециметрового рівня.

2. Отримав розвиток метод комбінованого диференціального сумісного кодово-фазового рішення навігаційної задачі з одночасною оцінкою початкових фазових неоднозначностей (як континуальних змінних) та без безпосереднього здійснення операцій згладжування/фільтрації. Метод є найбільш ефективним для спільної обробки спостережень GPS+ГЛОНАСС так як враховує особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів ГЛОНАСС, що забезпечує дециметровий рівень точності.

3. Вперше розроблено метод сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу точного кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих методів, дозволяє усунути варіаційні складові похибки рішення,

суттєво зменшення вплив стрибків оцінок кодово-фазових рішень, обумовлених зміною робочого сузір'я супутників ГНСС, а також дозволяє зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженого» та диференціальних рішень.

Практичне значення отриманих результатів

1. Запропоновані нові та удосконалені методи і алгоритми обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень в режимі кінематичного позиціонування є відносно простими та ефективними для реалізації в апаратурі підвищеної точності, призначеної для позиціонування рухомих об'єктів.

2. Розроблений експериментальний зразок ГНСС-апаратури реалізує створені та протестовані методи і алгоритми обробки ГНСС-спостережень.

Це забезпечує суттєве (до кілька разів) підвищення точності диференціального позиціонування рухомих об'єктів і може використовуватись в системах управління рухомими об'єктами, а також верифікації автопілотів БПЛА.

3. Запропонована модель похибок ГНСС-спостережень для координатно-часових визначень в диференціальному режимі, може бути застосована для оцінки характеристик точності бюджетної апаратури підвищення точності.

4. Методика оцінки фактичної точності координатних визначень з використанням диференціальної коригувальної інформації, рекомендується для верифікації ГНСС-обладнання користувача для статичного і кінематичного (рухомий об'єкт) режимів позиціонування.

Результати досліджень впроваджено в розробках: Державного підприємства «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», Державного підприємства «Оризон-Навігація» та Товариство з обмеженою відповідальністю «Є.П.С.»

Особистий внесок

Основні результати дисертаційної роботи, що отримані автором як самостійно та в співавторстві з іншими вченими, опубліковано в фахових виданнях. Зокрема, в публікаціях [1] авторові належить схему інтеграції ГНСС технологій та зв'язку для моніторингу та управління рухомими об'єктами; в роботі [2] автором обґрунтовано принципи побудови автотранспортних диспетчерських систем управління на базі

ГНСС технологій та зв'язку; в [3] автором обґрунтовано вимоги застосування ГНСС технологій та зв'язку в залізничній галузі; в роботі [4] автором розроблено схему експериментального дослідження та участь в обробці даних; в роботі [5] автором запропоновано схему реалізації DGPS/RTK режиму з використанням NTRIP-технології; у роботі [6] автором виконано постановку задачі та обробку даних ГНСС; у роботі [7] автором розроблено схемо-технічного рішення апаратури споживача та участь в обробці даних ГНСС; в роботі [8] автором розроблено алгоритм реалізації Differential Global Positioning System (DGPS) методу для визначення поточних координат рухомих об'єктів; в [7] проведено дослідження доступності диференціального сервісу на території України; в роботах [9, 10] автором самостійно розроблений метод згладжування диференціальних кінематичних кодових ГНСС-спостережень, проведено аналіз методів і алгоритмів кодово-фазового ГНСС-позиціонування та проведено математичне моделювання; в [11] автором запропоновано модель автоматизованого керування літальним апаратом з використанням навігаційних даних супутникових радіонавігаційних системи; в [12] автором запропоновано метод згладжування/фільтрації диференціальних ГНСС спостережень в режимі кінематичного позиціонування.; в [13] автором запропоновано спосіб реалізації супутникових технологій в транспортній логістиці; в [14] автором описана модель передачі даних та вплив нелінійності в каналах; в [15] автором запропоновано метод визначення координат космічного сміття; в [16] автором запропоновано алгоритм позиціонування з обмеженим доступом сигналів ГНСС; в роботах [17, 18, 21, 22] автором розрахована модель передачі даних в супутникових каналах передачі даних для різних стандартів; в [19] автором розроблено методику тестування ГНСС обладнання, постановка експериментального дослідження; в [20] автором розроблено методику верифікації ГНСС обладнання та участь в обробці даних ГНСС; в [23] автором запропоновано модель розрахунку втрат в каналах зв'язку.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації та основні положення, отримані в роботі, представлялися та пройшли апробацію на 23 вітчизняних та міжнародних НТК: VI Міжнародної науково-технічної конференції

«АВІА-2004», «АВІА-2006», «АВІА-2009», «АВІА-2011», «АВІА-2013», «АВІА-2015» НАУ, м. Київ; Міжнародна конференція з систем локації і навігації (МКЛСН-2005), м. Харків, ХНУРЕ, 19–23 вересня, 2005 р.; 5-ий міжнародний авіакосмічний салон «Авіасвіт–XXI», м. Київ, 2006 р; II Міжнародної конференції GIS и GPS на практиці, м. Хелм, Польща, 19–20 квітня 2007 р.; 4-го Міжнародний радіоелектронний форум (МРФ) «Прикладна електроніка. Стан та перспективи розвитку». 2011; Всесвітній конгрес «Авіація в XXI столітті», м. Київ, 2012, 2014; Міжнародні конференції IEEE: «Актуальні проблеми розвитку безпілотних літальних апаратів» 2013, «Методи та системи навігації та управління», жовтень 14–17, 2014, «Актуальні проблеми розробки безпілотних літальних апаратів», 2017, «Методи та системи навігації та управління рухом», 2018, «Актуальні проблеми розробки безпілотних літальних апаратів», 2019 м. Київ, Україна.

Публікації. За темою дисертації опублікована 61 наукова праця, у тому числі 13 статей у фахових наукових виданнях України (2 статті без співавторів), 1 стаття в міжнародних фаховому журналі, що включено до міжнародної наукометричної бази **Scopus**, 7 статей в міжнародних фахових журналах за кордоном, 2 статті в міжнародних фахових журналах за кордоном, що включено до міжнародної наукометричної бази **Scopus**, 1 патент на винахід, 6 патентів на корисну модель, 20 робіт у збірниках матеріалів і праць міжнародних конференцій, 10 у звітах з науково-дослідних робіт та 1 звіт за міжнародною грантовою Угодою Горизонт 2020. Сторінка автора в міжнародній наукометричній реферативній базі Scopus (authorId=57215328010) містить 10 наукових праць (Цитування: 36; Індекс Хірша: 3). Унікальний ідентифікатор науковця (Open Researcher and Contributor ID–ORCID): 0000-0002-5690-8873.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 2-х додатків. Загальний обсяг дисертації складає 169 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 141 сторінок. Робота містить 51 рисунок та 31 таблицю. Список використаних літературних джерел складається з 132 найменувань.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАСОБАМИ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ

1.1 Розвиток глобальних навігаційних супутникових систем

Глобальні навігаційні супутникові системи GPS (США) [1-4], ГЛОНАСС (Російська Федерація (РФ)) [5-11], Galileo (Європейський союз (ЄС) [12-16], Beidou (BDS) (Китай) [17 - 19] це всепогодні супутникові радіонавігаційні системи (СРНС), які базуються на космічних орбітах і дозволяють у глобальних масштабах визначати поточні місця розташування рухомих об'єктів, їх швидкість та здійснювати точне визначення часу. Диференційні функціональні доповнення до систем GPS и ГЛОНАСС: WAAS (США), EGNOS (ЄС), СДКМ (РФ) [10-12], а також регіональні супутникові системи, Японська квазізенітна супутникова система (Quazi-Zenith Satellite System - QZSS) та Індійська (Indian Regional Navigation Satellite System - IRNSS) [20-23] спрямовані на розвиток навігаційних послуг ГНСС та підвищення точності як статичних так і рухомих об'єктів. ГНСС знаходить застосування практично у всіх галузях діяльності людства, навігація й керування рухомими об'єктами, моніторинг різних об'єктів і процесів, сільське господарство, земельний кадастр, геодезія і картографія, а також військова сфера.

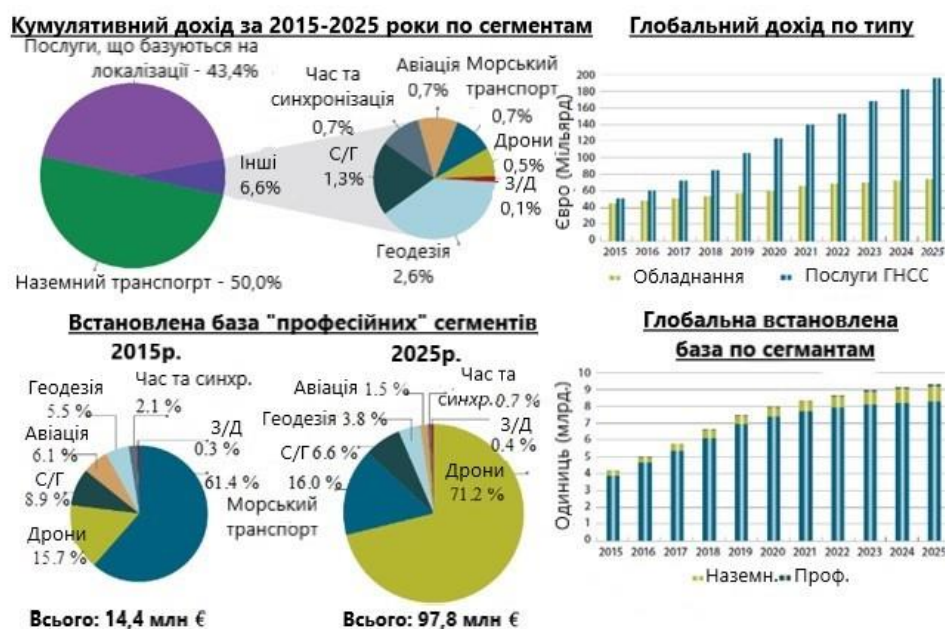


Рисунок 1.1 Прогнозовані темпи зростання витрат на ГНСС

На рис. 1.1 показано, відповідно до маркетингових досліджень, прогнозовані темпи зростання фінансових витрат з розподілом за сегментами користувачів, як видно з даного графіка загальний обсяг витрат на ГНСС обладнання постійно зростає і в 2025 році зросте до 195 мільярдів Євро [72,86].

Розглянемо основний принцип дії ГНСС як високотехнологічної інформаційної системи, що складається з п'яти основних сегментів[8]:



Рисунок 1.2 Структура супутникової радіонавігаційної системи

Космічний сегмент включає навігаційні та геостаціонарні супутники, які по кругових орбітах обертаються навколо Землі. Супутники розбиті на групи і рухаються на орбітальних площинах на фіксованій відстані від поверхні Землі, а сузір'я супутників утворюють умовну "сітку". Над горизонтом завжди можна забезпечити щонайменше чотири супутники, але як правило робоче в наявності не менше шести. Керування супутниками здійснюється з наземної станції управління і у виняткових випадках по команді можуть бути перегруповані. Кожен супутник на своєму борту має декілька еталонів часу і частоти – «високоточні атомні годинники».

Сегмент користувачів необмежений ГНСС, а залежить від кількості супутникових навігаційних приймачів. Апаратура споживачів, розташована на стаціонарних, або рухомих об'єктах, через антенний пристрій приймає інформаційні сигнали від СРНС, які в спеціальному апаратно-програмному пристрої обробляються, і в реальному часі дозволяють вимірювати затримки

(псевдозатримки) навігаційних сигналів, різниці фаз коливань, що приймаються, відносно опорних коливань приймача, доплерівські зсуви несівних частот, амплітуди сигналів, а в результаті обробки вимірювальної інформації апаратно-програмний пристрій (СРНС-приймач) визначає координати, час, складові вектору швидкості об'єкту.

Наземні і космічні функціональні доповнення представляють собою апаратно-програмні комплекси, які забезпечують підвищену точність навігаційних визначень, цілісність, безперервність обслуговування, оцінку доступності та експлуатаційну готовність системи.

Таблиця 1.1

Системи функціональних доповнень

Параметри	Системи функціональних доповнень			
	Локальні диференціальні системи	Регіональні диференціальні системи	Широкозонні системи диференційної корекції	Глобальні системи диференційної корекції
Склад	одна або декілька станцій збору вимірювань канал передачі даних	мережа станцій вимірювань канали передачі даних обчислювальний центр	регіональна мережа станцій вимірювань канали передачі даних обчислювальний центр наземний комплекс управління	глобальна мережа станцій вимірювань канали передачі даних обчислювальний центр наземний комплекс управління
Коригувальна інформація	поправки до навігаційних параметрах, що вимірюється споживачем інформація про цілісність системи	поправки до навігаційних параметрів, що вимірюються споживачем інформація про цілісність системи	поправки до ефемеридно-часової інформації поправки до навігаційних параметрів, що вимірюється споживачем інформація про цілісність системи	поправки до ефемеридно-часової інформації поправки для виключення атмосферних спотворень сигналу поправки до навігаційних параметрів, що вимірюються споживачем інформація про цілісність системи
Канали передачі	наземні лінії передачі даних	наземні лінії передачі даних	космічні апарати зв'язку і ретрансляції	космічні апарати зв'язку і ретрансляції
Зона дії	50 - 200км	400 – 2000 км	2000 – 5000 км	глобальне покриття

Задача обчислення власних координат на місцевості є досить складною і вона вирішується у приймальній апаратурі користувача [104, 107, 124]. Для оперативного обчислення та зменшення обчислювального навантаження на апаратуру користувача, більшість обчислень покладено на наземний комплекс управління, в якому прораховується прогноз параметрів орбіти у фіксовані моменти часу, а під час сеансів зв'язку передаються на борт супутника. Прогнозовані параметри орбіти і їх похідні називаються - ефемеридами. Вся інформація про поточний стан навігаційної системи в цілому, включаючи "загублені" ефемериди, називаються альманахом. Бортові передавачі в безперервному режимі на високій частоті передають навігаційні повідомлення, що містять ефемериди з мітками часу і альманахом. В апаратурі користувача приймаються відповідні повідомлення і спиваючись на закладений в пам'яті попередній альманах, максимально швидко і точно визначає власні координати.

Геометрично роботу супутникової навігаційної системи можна продемонструвати таким чином (див. рис. 1.3): користувач знаходиться в точці пересічення декількох сфер, центрами яких є видимі супутники. Радіуси сфер дорівнюють дальності до кожного з супутників. Для визначення широти і довготи приймачу необхідно приймати сигнали як мінімум від трьох супутників, а сигнал від четвертого супутника дозволяє визначити і висоту об'єкту над поверхнею. Одночасно (по вимірюванням 4-х псевдовідстаней) оцінюються поточні розбіжності шкал часу користувача/приймача та ГНСС).

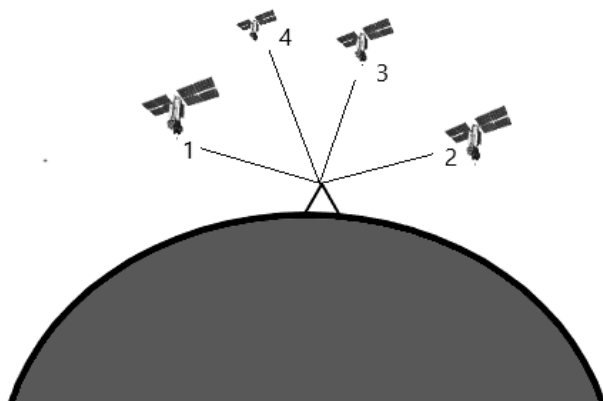


Рисунок 1.3 Визначення координат користувача

При розрахунку координат об'єкту виникають похибки, пов'язані з впливом іоносфери та тропосфери (кожен чинник вносить похибки і в результаті це може досягати до 30 м). Ефемеридні похибки складають від 1 до 5 м, інтерференція теж вносить похибки. Сумарна похибка може досягати 100 м.

Основний принцип використання системи - визначення місцеположення шляхом вимірювання псевдовідстаней [1–8] до об'єкта від точок з відомими координатами – супутників та вирішення задачі оцінки координат та часу об'єкта. . Псевдовідстані обчислюються за часом затримки розповсюдження сигналу від посилки його супутником до прийому антеною ГНСС-приймача. Тобто, для визначення тривимірних координат ГНСС-приймачу та часу потрібно знати псевдо відчитані, щонайменше, до чотирьох супутників.

Таблиця 1.2

Характеристики існуючих систем ГНСС [6- 9, 15, 24-25]

ГНСС	GPS	ГЛОНАСС	Galileo	Beidou
Власник	США	Росія	Євросоюз	Китай
Штатне угруповання супутників / реальний стан	32/32	24/23	27/24	39/49
Висота орбіт, км	19100	20200	23200	21500
Орбітальні площини	6	3	3	3
Нахил орбіт, град	55	64,8	56	55,2
Несуча частота, МГц	L1:1575.42 L2:1227.60 L5:1176.45	01:1602 02:1246	E1:1575.42 E5a:1176.45 E5b:1207.14 E6:1278.75	B1-2:1589.74 B1:1561.10 B2:1207.14 B3:1268.52
Кодування	CDMA	FDMA/ CDMA	CDMA	CDMA
Система координат	WGS - 84	PZ – 90, PZ – 95	GTRF	Beijing - 1954

Створення нових ГНСС-систем забезпечує збільшенню кількості одночасно спостерігаємих сузір'я супутників, що позитивно впливає на фактори точності та надійності навігаційних визначень.

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика геометричного фактору точності (DOP) [1–5]
при різних сценаріях використання ГНСС [6-9,17]

Кут маскування 10^0	Кількість одночасно спостеріг. супутників [мін - макс]	HDOP [мін - макс]	VDOP [мін - макс]	GDOP [мін - макс]
GPS	8 – 10	0,82 - 1,13	1,53 - 1,85	1,96 - 2,76
ГЛОНАСС	8 – 10	0,91 - 1,09	1,59 - 1,96	2,09 - 2,60
GPS/ ГЛОНАСС	11 – 17	0,75 - 1,03	1,33 - 1,80	1,74 - 2,35
GPS/ГЛОНАСС/Galileo	23 – 25	0,50 - 0,58	0,85 - 0,99	1,13 - 1,29

Враховуючи переваги ГНСС не можна не згадати і про недоліки. На обчислення координат впливають похибки [8, 75, 76]:

- обумовлені режимом селективного доступу, які може застосовувати власник ГНСС-систем;
- пов'язані з поширенням радіохвиль в іоносфері;
- поширенням радіохвиль в тропосфері;
- ефемеридні похибки;
- відходу шкали часу супутника викликана розбіжністю шкал часу різних супутників;
- шумові та багатопроміневі.

1.2 Вимоги користувачів ГНСС

Вимоги до користувачів [73, 74, 75]

Таблиця 1.4

Вимоги повітряних споживачів при заходженні на посадку по категоріях ІСАО

Категорія посадки	Висота над злітно-посадочною смугою для перевірки, м	Точність виміру координат (СКП)		Доступність	Цілісність
		Бічна помилка, м	Вертикальна помилка, м	Імовірність	Імовірність (термін)
I	30,0	4,5...8,5	1,5...2,0	0,999999	0,99999 (6с)
II	15,0	2,3...2,6	0,7...0,85	0,9999999	0,999999 (2с)
III	2,4	2,0	0,2...0,3	0,9999999	0,9999999995 (1с)

Таблиця 1.5

Вимоги повітряних споживачів залежно від завдань та районів (зон)

(окрім заходження та посадки по категоріях ІСАО)

Задачі, які вирішуються	Зони польоту	Точність виміру координат (СКП), м	Доступність	Цілісність
Політ повітряного судна: а) політ за маршрутом	1. Над океаном (місцевість без орієнтирів)	5800	0,999	0,999 (10 с)
	2. Повітряні траси шириною 20 км	2500		
	3. Повітряні траси шириною 10 км	1250		
	4. Місцеві повітряні лінії: II категорії	250		
	5. Повітряні траси при використанні методу зональної навігації	230		
б) політ у зоні літовища		200	0,9999	0,999 (10 с)
в) позакатегорійне заходження на посадку		50	0,99999	0,9999 (10 с)
г) спеціальні польоти, у т. ч. для розвідки корисних копалин, пошукових та рятувальних робіт, аерофотозйомки та інші		1...10	0,999999	0,9999 (10 с)

Таблиця 1.6

Вимоги морських і річкових користувачів до системи GNSS

Вимоги	Точність планових координат, м		доступність системи, %	інтервал вимірювань координат, с (число вимірювань)	Імовірність вирішення неоднозначності, %
	прогнозна	періодична			
Внутрішні водні шляхи					
Безпека навігації: великих суден і буксирів	2...5	2...5	99.9.	1...2 . (2)	99.9
Безпека навігації прогулянкових теплоходів і малих суден	5...10	5...10	99.9.	5...10 . (2)	99.9
Проектні роботи на річці	0.1...5	0.1...5	99.0.	1...2 (2...3)	99.9
Підхід до гавані вхід в гавань					
Безпека навігації: великі кораблі і буксири	8...20	заявляється користувачем	99.7.	6...10 (2)	99.9
Безпека навігації: малі суду	8...20	8..20	99.9	Залежить від гавані	99.9
вишукувальні роботи	1...5	1...5	99.0.	1 . (2)	99.9
Проектні та інженерні роботи в гавані	0.1...5	0.1...5	99.0	1...2 (2...3)	99.9
Безпека навігації всіх судів	460	користувачем	99.7	120 (2)	99.9
Безпека навігації: приватні і малі судна	460...3600	заявляється користувачем	99.0	300 (2)	99.9
Безпека навігації всіх судів	3700...7400 0 (мінімум) 1850...3700 0 бажано	заявляється користувачем	99.9 протягом 12 годин	2 годин бажано 15 хвилин (2)	99.9

Таблиця 1.7

Вимоги до навігаційного забезпечення наземних споживачів

№ п/п	Задачі, які вирішуються	Характеристики			
		Покриття (дальність)	Точність виміру координат (СКП)	Доступність	Цілісність
1	Управління рухом транспортних засобів:				
	– по довільних маршрутах	Регіональне, локальне	10...1000 м	Не визнач.	Не визнач.
	– по встановлених маршрутах	Регіональне, локальне	20...100 м	Не визнач.	Не визнач.
	– для вирішення спеціальних завдань	Локальне	5...15 м	Не визнач.	Не визнач.
2	Геологорозвідка й добування корисних копалин	Регіональне, локальне	1...5 м	0,95	Не визнач.
3	Прив'язка маяків, опорних станцій РНС	Регіональне, локальне	10...15 см		
4	Картографія, геодезія, землеустрій	Глобальне, регіональне, локальне	0,25...5,0 м	Не визнач.	Не визнач.

Слід зазначити, що необхідна точність навігаційних визначень гарантується інтерфейсними контрольними документами (ІКД) для систем ГНСС/GNSS на поверхні землі і в навколоземному просторі при виконанні всіх умов ІКД, в іншому випадку користувач застосовує сигнали ГНСС на свій страх і ризик.

Проведений аналіз літератури [1-9, 14-26] показав, що існуючі і перспективні ГНСС постійно розвиваються, і це пов'язано з тим, що системи супутникової радіонавігації і їх функціональні доповнення в даний час і в майбутньому є ключовими елементами засобів координатно-часового та навігаційного забезпечення.

1.3 Методи підвищення точності визначення місцеположення із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем

Диференціальний режим GPS. Найбільш ефективним засобом виключення систематичних (повільно змінюючихся) похибок вимірів (ефемеридних, часових, іоносферних і тропосферних) є диференціальний спосіб спостережень - DGPS (Differential GPS). Його суть складається у виконанні вимірів двома приймачами: один устанавлюється в обумовленій точці, а іншої - у точці з відомими координатами – референцної (або базової) станції [77, 78, 79, 100]

Диференціальний метод навігації по сигналам ГНСС заснований на властивостях просторово-часової кореляції значимих похибки навігаційних визначень у просторово рознесених точках. Це дозволяє здійснити порівняння вимірюваних споживачем навігаційних параметрів (псевдовідстань, псевдошвидкість) або параметрів навігаційних визначень з відповідними еталонними значеннями, які розраховуються в обраних опорних точках, де встановлюються базові станції (БС). Координати фазових центрів прийомних антен БС відомі апріорно з високою точністю. За результатами порівняння обмірюваних і розрахункових значень відповідних параметрів визначається вектор диференціальних виправлень, що передається споживачеві для використання в процесі рішення навігаційної задачі. До складу вектора диференціальних виправлень також входять характеристики цілісності супутників робочого сузір'я БС, що визначають вірогідність переданих навігаційних сигналів. Таким чином, споживач, крім поліпшення точності рішення навігаційної задачі, одержує можливість виключення в реальному часу з робочого сузір'я супутника, що має відмови, у функціонуванні бортової апаратури.

Переваги диференціального методу навігаційних визначень можна сформулювати в такий спосіб:

- ◆ можливість у реальному масштабі часу автоматичної корекції результатів вимірів поточних навігаційних параметрів в апаратурі споживачів, що істотно підвищує точність навігаційних визначень;

◆ досягнення високої надійності вимірів, тому що супутники з недостовірними навігаційними повідомленнями оперативно виключаються з рішення навігаційної задачі споживача;

◆ відносна простота реалізації диференціального режиму вимірів і можливість швидкого розгортання диференціальних підсистем ГНСС.

Оскільки відстані від супутників ГНСС до приймачів значно більше відстані між самими приймачами, то вважають, що умови прийому сигналів обома приймачами практично однакові, отже, величини похибок також будуть близькі. Звичайно, це справедливо при обмеженні базових відстаней умовами майже лінійної декореляції в просторі ефемеридних, іоносферних і тропосферних складових похибок. Частотно-часові погрішності через відходи годин супутників у диференціальному режимі практично повністю компенсуються при будь-яких базових відстанях.

У режимі DGPS вимірюють не абсолютні координати першого приймача, а його положення щодо базового (вектор бази). Використання диференціального режиму дозволяє практично повністю виключити вплив режиму селективного доступу SA і довести точність кодових визначень до десятків сантиметрів, а фазових - до одиниць міліметрів.

Найкращі показники мають фазові двохчастотні приймачі. Вони відрізняються від фазових одночастотних більше високою точністю, більше широким діапазоном вимірюваних векторів баз і більшою швидкістю й стійкістю вимірів. Однак сучасні технологічні досягнення дозволяють одночастотним фазовим приймачам по характеристиках наблизитися до двохчастотним.

Однією з особливостей режиму DGPS є необхідність передачі диференціальних виправлень від базового приймача до обумовленого. При цьому розрізняють, головним чином, два методи корегування інформації:

1) Метод корекції координат, коли на станції й в обумовленій точці спостерігають ті самі супутники ГНСС, а потім як диференціальні виправлення з базової станції передають добавки до обмірюваних в обумовленому пункті координатам. Недоліком цього методу є те, що приймачі базового й обумовленого

пунктів повинні працювати по одному робочому сузір'ю. Це незручно, оскільки всі споживачі, що використовують диференціальні виправлення повинні працювати по тим самим супутникам ГНСС. У цьому випадку не забезпечується найкраще значення PDOP у всіх обумовлених пунктах.

2) Метод корекції навігаційних параметрів, при використанні якого на базовій станції визначаються виправлення до вимірюваних параметрів (наприклад, псевдовідстаней) для всіх супутників, які потенційно можуть бути використані споживачами. Ці виправлення передаються на обумовлені пункти, де вже безпосередньо в GPS-приймачі обчислюються виправлення до координат. Недоліком цього методу є підвищення складності апаратури споживачів.

Метод DGPS може бути використаний подвійно. Якщо необхідно обчислювати координати в режимі реального часу, то необхідно надійний радіоканал для передачі диференціальних виправлень, а до складу ГНСС-приймача повинен входити радіомодем. Якщо ж передача виправлень не виконується, то можна використовувати режим післясеансної обробки (постобробки). У цьому випадку результати вимірів обох приймачів записуються на пристрої пам'яті приймачів, а після припинення вимірів накопичена інформація обробляється спеціальним ПО й обчислюється точне значення вектора бази.

Передача диференціальних поправок по радіоканалах може виконуватися по виділених частотних лініях, на частотах аматорських радіостанцій, по системах супутникового зв'язку (наприклад, INMARSAT), а також з використанням технології передачі цифрових даних RDS (Radio Data System) на частотах FM – радіостанцій, а також з використанням GSM каналів але вони обмежені по висоті. На сучасному етапі розвитку радіоелектронних засобів зв'язку розглядаються нові моделі передачі даних [83, 84, 85, 91, 94, 95, 96, 112, 116], які можуть застосовуватись для передачі ГНСС даних.

Не завжди є необхідність мати ГНСС-приймач на базовій станції, оскільки в багатьох країнах уже діє розвинена мережа DGPS-станцій, що постійно транслює виправлення на певну територію. Подібні мережі станцій діють на територіях США, Канади, Європейських країн, Китаю, України та ін. країн.

При визначенні координат у режимі постобробки може бути досягнута сантиметрова та навіть, міліметрова точність. При цьому тривалість вимірів двочастотним приймачем повинна бути не менш двох годин. Взагалі, точність вимірів залежить від тривалості вимірів, розміру базової лінії, типу приймача й антени, а також програмного забезпечення, використовуваного для обробки даних. Наприклад, при використанні одностотного фазового приймача й типового комерційного програмного комплексу типу Trimble Geomatic Office, GrafNav/GrafNet, Pinnacle і ін. можна одержати сантиметрову точність результатів при тривалості вимірів порядку 1–2 годин на видаленнях у середньому до ~10-15 км. При використанні двочастотних приймачів можна одержати ту ж точність на видаленнях до 50–60 км, навіть, в т.зв. кінематичному режимі вимірювань та при камеральній (післясеансній) обробці супутникових спостережень.

Досить перспективним напрямком підвищення точності й надійності навігаційних визначень є використання мереж інформаційно об'єднаних локальних базових станцій (БС). Використання локальних мереж БС із довжиною вимірювальних баз від декількох десятків до сотень кілометрів дозволяє істотно підвищити точність і інформаційну надійність диференціальної корекції, включаючи підвищення надійності обробки фазових спостережень в т.зв. RTK-режимі із сантиметровою точністю координатних визначень у реальному часі на видаленнях приймача від найближчої станції мережі до ~50–100 км.

Відомі два принципово відмінних способи реалізації мереж диференціальної навігації - широкозонний з роздільним оцінюванням найбільш значимих похибки вимірів і мультиреференсний.

Широкозонний спосіб, що використовує принцип роздільного оцінювання основних повільнозмінюючихся складових похибки спостережень (ефемеридних, часових і атмосферних), реалізується в таких масштабних системах, як WAAS, EGNOS, СДКМ і MSAS. При цьому сформована коригувальна інформація досить компактна (стандарт RTCA MOPS DO-229 C,D), а для її передачі достатні канали із пропускнуою здатністю 250...500 біт/с. Крім того, більшою зручністю використання широкозонної коригувальної інформації є її просте перетворення у формати RTCM

SC-104. Недоліком таких систем є досить складна організація збору, обробки вимірювальної інформації мережі контрольних станцій і доставки коригувальної інформації на великі території.

Мультиреференсний спосіб диференціальної корекції реалізований у таких регіональних системах, як Starfix (Fugro), у проекті Eurofix (TU Delft), OmniSTAR (Fugro), а також Terrastar-NovAtel, Trimble. Цей підхід припускає передачу спостережень базових станцій мережі в центри збору й контролю якості вимірювальної інформації, закування повідомлень про корекції всіх БС мережі в один потік і передачу його через зв'язні геостаціонарні супутники користувачам. При цьому інформація може передаватися й на пункти прийому, виділення й ретрансляції коригувальної інформації найближчої з безлічі БС по УКВ або СДВ радіоканалах. Користувачі, оснащені відповідною апаратурою прийому коригувальних повідомлень, можуть скористатися даними найближчої із БС або здійснити розрахунок більше точних зважених корекцій по RTCM-інформації всіх або частини БС мережі. Такі комерційні організації, як Fugro (OmniSTAR, STARFI, SeaSTAR), Terrastar-NovAtel, Trimble і ін., які з успіхом пропонують комерційний сервіс для додатків з високими вимогами до точності й надійності координатних визначень, становлять цілком серйозну конкуренцію національним системам навігаційно-геодезичного сервісу [86, 88].

3) Проаналізуємо більш детально основні джерела похибок при використанні прямого (абсолютного) і диференціального режимів позиціонування в режимах навігаційних визначень за кодovими спостереженнями.

Відомо, що похибки навігаційних визначень споживачів при прямому (абсолютному) режимі вимірів з використанням сигналів GPS/GNSS залежать від похибки, внесених самими системами, обумовлених поширенням радіосигналів в атмосфері, а також від похибки результатів вимірів в апаратурі споживачів.

Похибки вимірів поточних навігаційних параметрів (ПНП) (псевдовідстаней і псевдошвидкостей) умовно розділяються на дві групи: повільнозмінні й швидкозмінні (флуктуаційні). Розглянемо основні джерела й складові похибки вимірів ПНП у розглянутих групах, аналізу яких присвячена велика література.

Дані, що стосуються балансу складових похибки навігаційних вимірів, різні й значення кожного виду погрішності залежать від безлічі факторів (класу апаратури споживачів, виду вимірюваних параметрів, часу доби й року й т.п.). У табл. 1.8 представлені основні джерела й бюджет похибки вимірів ПНП одночастотної апаратури споживачів при використанні прямого режиму вимірів.

Таблиця 1.8

Баланс складових похибки вимірів

Джерела похибки		Середньоквадратична похибка (СКП) похибки вимірювань ПНП*	
		псевдовідстань, м	псевдошвидкість, см/с
відходи часу супутників		3,0	0,03÷0,1
ефемериди		6÷20	0,25÷0,3
регулярна іоносфера		5,0÷9,0	0,3
регулярна тропосфера		2,0	0,1÷0,2
багатопроміневість		1,0	0,1÷0,3
шуми приймача		1,0	0,1
інші джерела		0,1	0,15
Сумарна похибка ПНП (1σ)**		31,2÷34,9 (8,7÷17,9)	15,0÷15,1 (0,45÷0,59)
СКП визначення координат швидкості***	і планарне	46,8÷52,4 (13,1÷26,8)	22,5÷22,65 (0,68÷0,89)
	і вертикальне	68,6÷76,8 (19,1÷39,4)	33,0÷33,2 (0,99÷1,3)

* - у дужках зазначені значення похибки при відсутності режиму S/A;

** - сумарна похибка вимірів ПНП визначається згідно виразу $\sigma_{\text{сум}} = \sqrt{\sum \sigma_i^2}$, де σ_i - складові від різних джерел. У дужках зазначені значення похибок вимірів псевдо швидкості при відсутності впливу режиму SA GPS;

*** - визначається добутком значення $\sigma_{\text{сум}}$ на значення геометричного фактору (ГФ) точності планарного або тривимірного (з вертикальною складовою)

визначення координат (у цьому випадку прийняте значення $\Gamma\Phi = 1,5$ для планарних визначень і $\Gamma\Phi = 2,2$ для тривимірних визначень).

Дані табл. 1.8 свідчать про те, що основний внесок у похибка вимірів ПНП вносить група повільнозмінюючихся похибки (ефемеридні, атмосферні складові), без компенсації яких неможливе задоволення вимоги великого класу споживачів по точності координатно-часового забезпечення.

Внесок шумів приймача навігаційних сигналів у кодові виміри ПНП зменшують шляхом збільшення інтервалів усереднення спостережень із використанням фази несучої. Звичайно обмежують тривалість інтервалу усереднення кодових спостережень величиною $T_u = 15\text{--}60$ с для нерухомих споживачів або об'єктів з "малою" динамікою, а для об'єктів з "високою" динамікою - $T_u = 1\text{--}2$ с. Сумарні шумові погрішності можуть становити $\sim 1,0$ м при кодових вимірах і $1,0\text{--}1,5$ мм при фазових вимірах псевдовідстаней і $0,1\text{--}0,5$ см/с при вимірах псевдошвидкостей.

До інших джерел (табл. 1.8) ставляться погрішності, викликані: необліком ефектів спеціальної й загальної теорії відносності, які можуть досягати досить значимих величин, однак, дані погрішності можуть бути скомпенсовані з кожної наперед заданою точністю, впливом "тремтіння" фазового центру прийомної антени - характерно для об'єктів, що рухаються (вібрації корпусу об'єкта), в основному позначається при вимірах псевдо швидкості (частки й одиниці міліметрів у секунду); внеском випадкових складових показників переломлення іоносфери й тропосфери, що не перевищує одиниць сантиметрів у вимірах псевдовідстані й одиниць міліметрів у секунду у вимірах псевдо швидкості для наземних об'єктів з обмеженнями по швидкості.

Традиційний диференціальний метод вимірів по сигналах ГНСС дозволяє значно підвищити точність навігаційних визначень споживачів за рахунок компенсації повільнозмінюючихся похибки вимірів ПНП, які мають значну просторово-тимчасову кореляцію [92, 93, 102, 106, 120, 121, 122, 123].

У табл. 1.9 представлений баланс складових похибки споживача в прямому й диференціальному режимі при використанні кодових вимірів ПНП (споживач перебуває від БС на видаленні не більше 50 км).

Таблиця 1.9

Баланс складових похибки у прямому й диференціальному режимах при використанні в споживача кодових вимірів ПНП*

Джерела похибки	Середньоквадратична похибка (СКП) похибки вимірювань ПНП**			
	прямий режим		диференціальний	
	S, м	\dot{S} , см/с	S, м	\dot{S} , см/с
відходи часу супутників	3,0	0,03÷0,1	0,0	0,0
ефемериди	6÷15	0,25÷0,3	0,03÷0,1	0,15÷0,2
регулярна іоносфера	5,0÷9,0	0,3	0,1	0,3
регулярна тропосфера	2,0	0,1÷0,2	0,15	0,1÷0,2
багатопроміневість	1,0	0,1÷0,3	1,1÷1,2	0,11÷0,3
шуми приймача	1,0	0,1	1,1	0,11
прив'язка БС	-	-	0,01÷0,35	-
інші джерела	0,1	0,15	0,1	0,15
Сумарна похибка ПНП:				
- с режимом СД	31,2÷34,9	15÷15,1	1,6÷1,7	0,4÷0,5
- без режиму СД	8,7÷17,9	0,5÷0,6	1,6÷1,7	0,4÷0,5

* - представлені дані характерні для споживача, швидкість якого не перевищує значень 1 км/с;

** - "S" означає псевдовідстань, а " \dot{S} " - псевдошвидкість.

Дані, представлені у табл. 1.9, свідчать про високу ефективність використання традиційного диференціального режиму навігаційних визначень. Зокрема, повністю компенсуються погрішності у вимірах ПНП, обумовлені впливом відходів шкал часу супутників системи GPS, у значимому ступені компенсуються (зменшуються на порядок і більше) внески ефемеридних похибки супутників і атмосферних похибки у виміри псевдовідстані. Застосування диференціального режиму вимірів не приводить до компенсації впливу атмосферних похибки і слабо компенсує вплив похибки ефемерид супутників у вимірах псевдо швидкості. Збільшення шумових похибки і похибки вимірів за рахунок багатопроміневості поширення

навігаційних сигналів пов'язане із внеском похибки власних вимірів БС у виміри споживача (час усереднення $T_u = 2$ с).

Порівняльний аналіз прямого й диференціального режимів вимірів (з урахуванням відповідного розміщення споживача від БС) показує, що сумарні погрішності вимірів псевдовідстаней першого в 8-10 разів більше сумарних похибки другого навіть при відсутності режиму SA GPS. При вимірах псевдошвидкостей не спостерігається такого великого виграшу по точності диференціального режиму (відмінність усього на 1 мм/с від прямого режиму). Ефективність традиційного диференціального методу зменшується в міру видалення споживача від БС. Це пов'язане з тим, що відповідні погрішності в споживача й на БС при збільшенні відстані між ними стають усе менш і менш корельованими.

У табл. 1.10 наведений баланс складових похибки для традиційного диференціального режиму вимірів псевдовідстані при різній відстані, споживач - БС.

Таблиця 1.10

Баланс похибки для традиційного диференціального методу

Джерела Похибки		Середньоквадратична похибка (1σ), м, при різних відстанях від БС			
		0 км	180 км	1000 км	2500 км
відходи часу супутників		0	0	0	0
ефемериди		0	0,1 - 0,3	0,35-0,75	0,76-2,0
регулярна іоносфера		0	2,2	4,9	7,5
регулярна тропосфера		0	2,0	2,0	2,0
багатопроміневість		1,1	1,1	1,1	1,1
шуми приймача		1,1-1,2	1,1 - 1,2	1,1-1,2	1,1 -1,2
прив'язка БС		0,01-0,35	0,01-0,35	0,01-0,35	0,01-0,35
інші джерела		0,1	0,1	0,1	0,1
сумарна похибка		1,6-1,7	3,3-3,4	5,5-5,6	8,0-8,2
СКП визначення координат*	планарне	2,4-2,6	4,9-5,1	8,3-8,4	12,0-12,3
	вертикальне	3,5-3,7	7,3-7,5	12,1-12,3	17,6-18

* - значення геометричного фактора (ГФ) приймалося рівним $\text{ГФ} = 1,5$ і $\text{ГФ} = 2,2$ для планових координат і вертикальної координати визначення відповідно.

Дані, представлені в табл. 1.10, свідчать про те, що незважаючи на значне збільшення точності навігаційних визначень споживачів при використанні традиційного диференціального методу, досить значимим є зниження точності при збільшенні відстаней від споживача до БС. Це зв'язано, насамперед, з ростом атмосферних і ефемеридних складових похибки вимірів. Збільшення останньої пояснюється розходженням проєкцій ефемеридних похибки супутників на напрямки "супутники - БС" і "супутники - споживач". Зниження кореляційної залежності між атмосферними (іоносферними й тропосферними) погрішностями вимірів БС і споживача при збільшенні відстаней "БС - споживач" зв'язується з неоднорідністю складу атмосфери на напрямках її перетинання сигналом від того й самого супутника до БС і споживача.

У цей час у світі діє безліч диференціальних мережних підсистем реального часу, які надають (за допомогою державних національних або за допомогою комерційних провайдерів (операторів)) інформаційні послуги (диференціальні корекції) для забезпечення точних і надійних визначень. Точність таких визначень, як правило, для двохчастотного ГНСС-устаткування зараз становить рівень менш, ніж ~ 1 м (95%), а для певних варіантів реалізації диференціального режиму $\sim 2-3$ дм (95%) у реальному часі на базових видаленнях у сотні кілометрів.

З викладеного випливає, що в даний час не існує однозначного рішення про застосування тієї чи іншої технології для високоточних навігаційних рішень.

Одним з ключових елементів розглянутих технологій є апаратура споживача, яка є невід'ємною частиною GNSS. Тому при виборі того чи іншого науково-технічного рішення необхідно орієнтуватися на апаратні засоби, які пройшли польові випробування не тільки у виробника, а й у споживача в його умовах застосування [117, 118, 119, 124, 128, 129, 130].

Для точного визначення місця розташування (позиціювання) рухомих об'єктів за сигналами ГНСС в диференціальному режимі для підвищення точності координатних визначень (досягнення дециметрової точності) використовують

методи спільної обробки кодових і високоточних фазових спостережень - фільтрацію/згладжування кодових спостережень з використанням фазових спостережень, обумовлено відносною простотою і надійністю такого підходу [1–8]. Подібні методи обробки дозволяють ефективно зменшити найбільш значущі похибки диференціальних кодових спостережень – похибки, обумовлені багатопроменевістю і шумами. Найбільша ефективність згладжування досягається при відсутності фазових циклічних стрибків на інтервалі спостережень і збільшенні цього інтервалу до 15 хв і більше [1-8]. У загальному випадку, завдання полягає в отриманні оптимальної оцінки рівня неоднозначних високоточних фазових спостережень щодо однозначних, але зашумлених і обтяжених багатопроменевістю кодових спостережень, після чого виконується «заміна» кодових спостережень фазовими шляхом корекції рівня фазових спостережень. Перші детальні дослідження, присвячені принципам і алгоритмам згладжування кодових псевдодальностей з використанням фазових, представлені в роботах R.Hatch [27] ще на початку 80-х років, тому, такі алгоритми згладжування в літературі отримали назву «Hatch-фільтри». Ідея робіт полягала в ефективному згладжуванні кодових спостережень, використовуючи операцію "підбір рівня". Дана операція ґрунтується на використанні властивості практично однаковою динаміки зміни кодових і фазових спостережень (або їх лінійних комбінацій) з різницею в рівнях цих функцій. Принцип такого згладжування полягає в оптимальній оцінці різниці кодових і фазових псевдодальностей (або їх лінійних комбінацій (ЛК)) з подальшою заміною кодових спостережень (або їх ЛК) фазовими, скоригованими на величину оціненої різниці.

Однак, на практиці існують чинники, які в значній мірі обмежують потенційну точність згладжування одночастотних кодових спостережень з використанням фазових.

1. Різні знаки іоносферної затримки в кодових і фазових спостереженнях; тому при згладжуванні одночастотних спостережень існує обмеження на тривалість оброблюваної вибірки, тому що зміна кодової псевдодальності може неточно відображати зміни фазового (цей ефект називається іоносферною розбіжністю). Для

компенсації іоносферної похибки використовують двочастотні спостереження, шляхом формування лінійної комбінації «Iono-Free» [1-7, 30, 31] або комбінації «Divergence-Free» [30-32], яка дозволяє виключити невідповідність знаків іоносферної затримки сигналів. У разі використання одночастотної апаратури іоносферна складова похибки є переважаючою.

2. При фільтрації в реальному часі є проблема подолання впливу фазових циклічних стрибків.

3. Корельованість у часі багатопроменевої складової кодових псевдовідстаней; тому, при згладжуванні одночастотних спостережень обмежують інтервал згладжування на рівні 20–100 секунд і реалізують рекурсивні зважені фільтри, що відображають скачки фазових спостережень [33-34].

4. Перерви зв'язку, які призводять до необхідності «рестарту» фільтра.

У сукупності ці фактори можуть суттєво зменшити ефективність фільтрації / згладжування.

Подальші удосконалення і різновиди таких алгоритмів були запропоновані в роботах [28, 29, 35, 36]. Запропоновані удосконалення спрямовані на пошук оптимальних постійних часу фільтрів, подолання впливу фазових циклічних стрибків

Інший підхід використання фазових спостережень для згладжування / фільтрації був запропонований в роботах [37]. Згідно з цим алгоритмом отримуємо зміни фази, наприклад, визначенням інтегральним доплеровским зрушенням між епохами. Дані зміни фази нечутливі до стрибків фази і згладжена кодова псевдодальностей на довільну епоху може бути записана наступним чином:

$$\bar{S}(t_i) = S(t_1)_m + \Delta L(t_i, t_1),$$

$$\text{де } S(t_1)_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S(t_1)_i.$$

Ще кілька алгоритмів обробки ГНСС-спостережень запропоновано й описано в роботах [29, 38]. Це так звані алгоритми «Phase-Connected» і «Phase-Adjusted». У матричній формі «Phase-Connected» алгоритм на довільну епоху можна представити таким чином:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_k \\ \delta \mathbf{L}_{k,k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{A}_k \\ -\mathbf{A}_{k-1} & \mathbf{A}_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ x_k \end{bmatrix},$$

где \mathbf{S}_k – кодові вимірювання;

$\delta \mathbf{L}_{k,k-1}$ – збільшення фазових спостережень за часом;

\mathbf{A}_k – матриця направляючих косинусів;

x_k – вектор искомых параметрів.

Алгоритм «Phase-Adjusted» передбачає включення в модель спостережень одночасно кодових і фазових спостережень і визначення невідомих параметрів методом найменших квадратів [39]. У матричній формі «Phase-Adjusted» алгоритм на довільну епоху можна представити таким чином:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_k \\ \mathbf{L}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_k & 0 \\ \mathbf{A}_k & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ \nabla \end{bmatrix},$$

где \mathbf{A}_k – матриця направляючих косинусів;

x_k – вектор искомых параметрів,

∇ – вектор фазовых неоднозначностей.

Аналіз сучасних супутникових навігаційних технологій і їх затребуваності на світовому ринку послуг позиціонування показує, що при вимогах досягнення дециметрового рівня точності позиціонування використання методів спільної обробки кодово-фазових спостережень без рішення складного завдання розв'язання фазової неоднозначності набуло широкого застосування, головним чином, для одночастотного недорогого ГНСС-обладнання. Подібні технології активно використовуються для вирішення завдань управління БПЛА, транспортом, точного землеробства, геоінформатики та безлічі інших додатків.

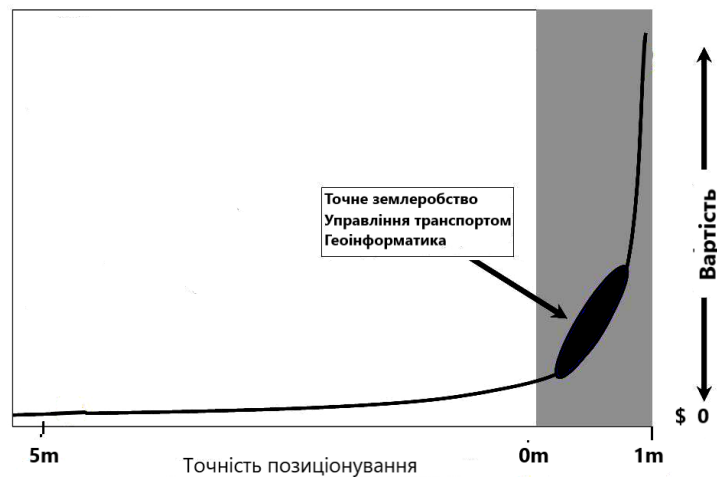


Рисунок 1.4 Сегментація ринку супутникових навігаційних технологій

На рис. 1.4 показано пріоритетність ринку ГНСС технологій, для провідних світових виробників, зокрема, NovAtel, Leica, Hemisphere, Trimble та інші компанії приділяють особливу увагу даному сегменту ринку.

Тому пошук і розробка нових, більш досконалих методів і алгоритмів кодово-фазового позиціонування є актуальним і затребуваним напрямком, що підтверджується значною кількістю сучасних публікацій з даного напрямку [19–22].

Аналіз літературних джерел [28, 29, 35–38, 40–43] свідчить про те, що існує зацікавленість зарубіжних науково-дослідних організацій і комерційних компаній в розробці нових, більш досконалих методів і алгоритмів кодово-фазового позиціонування.

Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз публікацій показує значний інтерес наукової спільноти і комерційних компаній до вирішення задач підвищення точності координатних визначень (досягнення дециметрової точності) використовувачи методи спільної обробки кодових і високоточних фазових спостережень – фільтрацію/згладжування кодових спостережень з використанням фазових спостережень для визначення місця розташування (позиціонування) рухомих об'єктів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем.

2. Розглянуті підходи розвиваються зарубіжними компаніями, але багато аспектів пов'язаних з практичною реалізацією даних підходів, методів і алгоритмів точного позиціонування не має у відкритому доступі, що ускладнює їх реалізацію.

3. Зарубіжні дослідники часто розглядають і рекомендують використання двочастотних спостережень з метою зменшення або зниження впливу іоносферної похибки, але двочастотне обладнання ГНСС занадто дороге для користувачів.

4. Розглянуті доступні методи і алгоритми не враховують вплив додаткових джерел похибок, властивих тільки фазовим спостереженнями – накручування фази («wind-up» ефект) [44, 45], який проявляється при кінематичних вимірах в процесі поворотів рухомих об'єктів.

5. Відомі методи і алгоритми обробки спостережень, як правило, спираються на використання тільки системи GPS і не передбачають додаткової можливості використання спільної обробки спостережень декількох ГНСС, зокрема, GPS+ГЛОНАСС+Galileo+BeiDou, що представляє собою науковий і практичний інтерес і підкреслює актуальність даної задачі.

2 РОЗВИТОК МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ КОДОВИХ І ФАЗОВИХ ГНСС-СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

У даному розділі розглянуто задачу визначення і реалізації умов досягнення дециметрової точності координатних визначень на основі вдосконалення існуючих і створення нових методів і алгоритмів обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень без реалізації складних процедур вирішення фазової неоднозначності.

2.1 Рівняння ГНСС- спостережень та їх лінійні комбінації

Рівняння спостережень – функціональні залежності між вимірюваними та оцінюються параметрами в присутності систематичних, повільно змінюючихся і флуктуаційних похибок спостережень. Вимірюваними параметрами сигналу з довжиною хвилі λ для ГНСС-приймачів є:

- псевдозатримки поширення сигналу $\hat{\tau}_{\lambda_i}^j$ на трасі «навігаційний космічний апарат (НКА) - приймач», вимірювані з використанням кореляційного методу прийому псевдовипадкових послідовностей, що модулюють несівну (несучу) сигналу;

- різниці фаз несівної прийнятого навігаційного сигналу і сигналу опорного генератора приймача $\hat{\Phi}_{\lambda_i}^j$, як інтеграла псевдодоплерівського зсуву несівної частоти сигналу з невідомим цілим числом циклів – з невідомою початковою фазовою неоднозначністю;

- псевдодоплерівський зсув несівної частоти сигналу $\hat{D}_{\lambda_i}^j$.

Приставка «псевдо» застосовується до результатів вимірювань внаслідок того, що годинник приймача і супутника не синхронізовані і між їх показаннями в один і той же момент часу існує ненульова різниця – відносна поправка годин. Вона входить в результат визначення відстані. Тому в даному випадку відстань (дальність) називають псевдовідстанню. Поправку годин приймача щодо годин

супутника на момент спостережень визначають як невідому величину з обробки результатів цих спостережень.

Геометричні аналоги вимірювальних параметрів – кодові і фазові псевдовідстані:

$$\hat{S}_{\lambda_i}^j(t_r) = \hat{\tau}_{\lambda_i}^j(t_r) \cdot c \quad (2.1)$$

$$\hat{L}_{\lambda_i}^j(t_r) = -\hat{O}_{\lambda_i}^j(t_r) \cdot \lambda_i \quad (2.2)$$

де c – швидкість світла, прийнята для систем ГНСС (рівна 299792458 м/с), i – номер частоти (для GPS $i=1$ або $i=2$, для ГЛОНАСС $i=1_k, 2_k$, где k – номер піднесівної), j – номер супутника, t_r – час приймання сигналу у шкалі часу приймача. Відзначимо, що в ході рішення навігаційної задачі (НЗ) обчислюється розбіжність шкал часу приймача і ГНСС, і всі спостереження (кодові і фазові) інтерполюються на найближчу цілу секунду шкали ГНСС.

Запишемо і розглянемо відому математичну модель [1-7, 31] кодових і фазових псевдовідстаней ГНСС-спостережень двох частот (для приймача з порядковим індексом i та моментом часу приймання t_k , тобто моментом формування вимірів в приймачі в шкалі часу ГНСС; супутника з порядковим індексом j):

$$\hat{S}_{ci}^j(t_k) = F_i^j(t_k) + I_i^j(t_k) + (b_{ci} - B_c^j) + [\Delta\tilde{\rho}_{pcv1i}(t_k)] + \delta S_{ci}^j(t_k), \quad (2.3)$$

$$\hat{S}_{pi}^j(t_k) = F_i^j(t_k) + \gamma^2 \cdot I_i^j(t_k) + (b_{pi} - B_p^j) + \Delta\tilde{\rho}_{pcv2i}^j(t_k) + \delta S_{pi}^j(t_k), \quad (2.4)$$

$$\hat{L}_{1i}^j(t_k) = F_i^j(t_k) - I_i^j(t_k) + (b_{\delta 1i} - B_{\delta 1}^i) - M_{1i}^j \cdot \lambda_{1i} + \Delta\tilde{\rho}_{pcv1i}(t_k) + \lambda_{1i} \cdot \phi_{wp}(t_k) + \delta \tilde{L}_{1i}^j(t_k), \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \hat{L}_{2i}^j(t_k) = & F_i^j(t_k) - \gamma^2 \cdot I_i^j(t_k) + (b_{\delta 2i} - B_{\delta 2}^i) - M_{2i}^j \cdot \lambda_{2i} + \Delta\tilde{\rho}_{pcv2i}^j(t_k) + \\ & + \lambda_{2i} \cdot \phi_{wp}(t_k) + \delta \tilde{L}_{2i}^j(t_k), \end{aligned} \quad (2.6)$$

де $F_i^j(t_k) = R_i^j(t_k) + [\Delta_i^{GHCC}(t_k) - \Delta^{j, GHCC}(t_k)] + Tr_i^j(t_k)$;

$$R_i^j(t_k) = \sqrt{\left[x_i(t_k) - \hat{X}_{j(i)}(t_k(t_i^T)) \right]^2 + \left[y_i(t_k) - \hat{Y}_{j(i)}(t_k(t_i^T)) \right]^2 + \left[z_i(t_k) - \hat{Z}_{j(i)}(t_k(t_i^T)) \right]^2};$$

$F_i^j(t_k)$ – функція, що включає в себе частотно-незалежні змінні (орбіти супутників, координати приймача, годинник приймача, похибка, обумовлена затримкою сигналу в тропосфері);

$R_i^j(t_k)$ – геометрична відстань (дальність) між фазовим центром антени i -го приймача і фазовим центром антени j -го супутника;

$Tr_i^j(t_k)$ – абсолютна величина тропосферної затримки в спостереженнях;

x_i, y_i, z_i – невідомі (які підлягають оцінці) поточні координати фазового центру прийомної антени i -го приймача в грінвічській системі координат (ГСК);

$\hat{X}_{j(i)}, \hat{Y}_{j(i)}, \hat{Z}_{j(i)}$ – розрахункові значення координат (ефемериди) j -го супутника (у ГСК), обчислені на момент випромінювання сигналу щодо i -го приймача. Тут вважаємо, що на етапі попередньої обробки були враховані поправки за рахунок ефекту обертання Землі за час поширення сигналу «супутник - приймач»;

Δ_i^{GHCC} – невідома (підлягає оцінці) величина, пропорційна розбіжності шкали часу i -го приймача і системної шкали часу ГНСС;

$\Delta^{j, GHCC}$ – величина, пропорційна залишкової похибки корекції шкали часу j -го супутника щодо системної шкали часу ГНСС супутника відносно системної шкали часу ГНСС;

$I_i^j(t_k)$ – абсолютна величина частотнозалежної іоносферної затримки в спостереженнях на частоті L1 GPS. Іоносферна затримка в спостереженнях GPS на частоті L2 GPS виражається через масштабуючий коефіцієнт:

$$\gamma^2 = \left(\frac{f_{L1GPS}}{f_{L2GPS}} \right)^2.$$

Для спостережень НКА ГЛОНАСС масштабуючий коефіцієнт дорівнює:

$$\gamma^2 = \left(\frac{f_{L1GPS}}{f_{k1,2 ГЛО}} \right)^2;$$

$b_{ci}, B_c^i, b_{pi}, B_p^i, b_{\phi 1i}, B_{\phi 1}^i, b_{\phi 2i}, B_{\phi 2}^i$ – кодові і фазові інструментальні (апаратні) затримки в тракці приймачів (b) і супутників (B);

$\Delta\tilde{\rho}_{pcv(1,2)i}(t_k)$ – варіації положення фазових центрів ГНСС-антен для кожної з несівних частот;

$\phi_{wp}(t_k)$ – «wind-up» ефект; даний ефект характеризується додатковим набігом фаз спостережень за рахунок обертання супутників відносно прийомної антени приймача і / або обертання антени об'єкта навколо своєї геометричної вісі [44, 45]; ефект, обумовлений обертанням супутників ГНСС навколо своєї вісі для кращої орієнтації сонячних батарей, з високою точністю компенсується з використанням відомих алгоритмів і в диференціальному режимі залишкові похибки є пренебрежимо малими; обертання ж антени приймача в ході його руху призводить до відповідних набігам фаз несівних частот, які компенсуються тільки в подвійних різницях фазових спостережень; потрібно відзначити, що в групових затримках і в фазі різницевої частоти даний ефект відсутній;

$$M_{1,2i}^j = N_{1,2i}^j + (\phi_{0i} - \phi_0^j);$$

$N_{1,2i}^j$ – неоднозначності фазових спостережень на частотах L1 и L2 ГНСС;

$(\phi_{0i} - \phi_0^j)$ – різниці початкових фаз генераторів j -го супутника та i -го приймача;

$\delta S_{c,p}$, $\delta L_{1,2}$ – флуктуаційні похибки кодових і фазових спостережень, обумовлені шумами і багатопроміневістю поширення навігаційних сигналів.

Зауважимо, що в системі рівнянь (2.3–2.6) оцінюються інформаційними параметрами є координати антени приймача x_i, y_i, z_i і невідоме відхилення (похибка попередньої грубої синхронізації) часу приймача щодо системної шкали часу ГНСС $\Delta_i^{ГНСС}$. Запропонована модель спостережень не враховує похибки, обумовлені геодинамічними ефектами. Тут в даному поданні вважаємо, що величини корекцій на геодинамічні ефекти, ефект накручування фаз за рахунок обертання супутників розраховані за відомими співвідношеннями [44, 45, 48, 49] і враховані на етапі пре-процесінга (попередньої обробки).

У практиці обробки ГНСС-спостережень застосовується їх лінійне комбінування з метою спрощення моделі спостережень, усунення фазових стрибків і розв'язання фазових неоднозначностей [1-7, 50-54]. При цьому формуються

різниці лінійних комбінацій спостережень. Нижче наведено опис способів формування різниць спостережень, лінійні комбінації і їх особливості з використанням спрощеної моделі рівнянь фазових псевдовідстаней на частоті L1 GPS. За аналогією представлені вирази можуть бути застосовані для спостережень на частоті L2 GPS і для спостережень ГЛОНАСС.

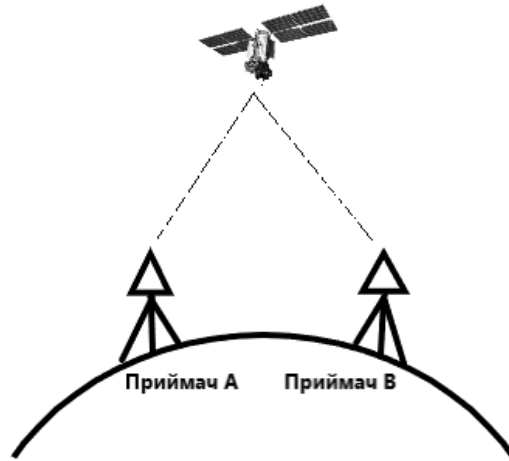


Рисунок 2.1 Формування одинарної різниці спостережень

Розглянемо два пункти спостережень і один супутник (рис. 2.1). Позначимо пункти як A і B , а супутник – j , використовуючи спрощену форму записи фазових псевдовідстаней на частоті L1 (2.5); для ГНСС GPS, запишемо:

$$\hat{L}_{1A}^j(t) = F_A^j(t) - I_A^j(t) + (b_{\hat{\phi}_{1A}} - B_{\hat{\phi}_1}^j) - N_{1A}^j \cdot \lambda_1 + (\phi_{0A} - \phi_0^j) \cdot \lambda_1 + \delta L_{1A}^j(t), \quad (2.7)$$

$$\hat{L}_{1B}^j(t) = F_B^j(t) - I_B^j(t) + (b_{\hat{\phi}_{1B}} - B_{\hat{\phi}_1}^j) - N_{1B}^j \cdot \lambda_1 + (\phi_{0B} - \phi_0^j) \cdot \lambda_1 + \delta L_{1B}^j(t). \quad (2.8)$$

Сформуємо різницю між виразами (2.7) і (2.8) і отримаємо такий вираз (2.9):

$$\Delta L_{AB}^j(t) = F_{AB}^j(t) - I_{AB}^j(t) + b_{\phi_{1AB}} - N_{1AB}^j \cdot \lambda_1 + \phi_{0AB} + \delta L_{1AB}^j(t), \quad (2.9)$$

де Δ – оператор різниці між приймачами.

Вираз (2.9) являє собою одинарну різницю спостережень. Формування цієї різниці дозволяє усунути похибки, пов'язані з відхиленням шкали часу супутника від системної шкали ГНСС.

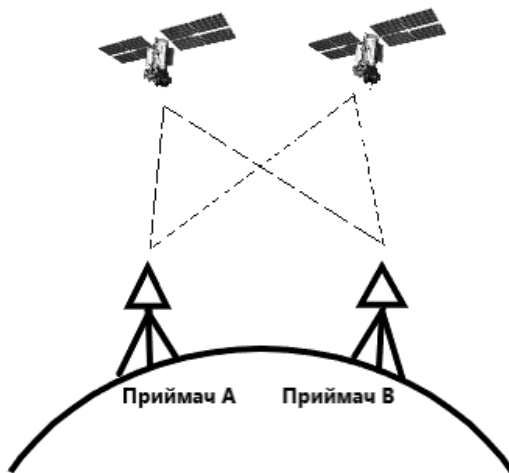


Рисунок 2.2 Формування подвійний різниці спостережень

Розглянемо випадок, коли маємо два пункти вимірювань, A і B , і два супутники – i , j (рис. 2.2). Запишемо одинарні різниці для кожного супутника:

$$\Delta L_{AB}^i(t) = F_{AB}^i(t) - I_{AB}^i(t) + b_{\phi_{1AB}} - N_{1AB}^i \cdot \lambda_1 + \phi_{0AB} + \delta L_{1AB}^i(t), \quad (2.10)$$

$$\Delta L_{AB}^j(t) = F_{AB}^j(t) - I_{AB}^j(t) + b_{\phi_{1AB}} - N_{1AB}^j \cdot \lambda_1 + \phi_{0AB} + \delta L_{1AB}^j(t). \quad (2.11)$$

Для формування подвійних різниць спостережень, необхідно сформулювати одинарні різниці між собою, в результаті чого отримаємо вираз (2.12):

$$\nabla \Delta L_{AB}^{ij}(t) = \Delta L_{AB}^i(t) - \Delta L_{AB}^j(t) = \left[L_A^i(t) - L_B^i(t) \right] - \left[L_A^j(t) - L_B^j(t) \right], \quad (2.12)$$

де ∇ – оператор різниці між НКА.

Формування подвійних різниць спостережень дозволяє виключити похибки, пов'язані із зсувом шкал часу як на борту НКА, так і в приймачі, щодо системної шкали ГНСС.

На практиці обробки спостережень, крім формування одинарних, подвійних різниць спостережень також застосовують комбінації спостережень, які дозволяють виділити або усунути ту чи іншу складову моделі спостережень.

Розглянемо основні лінійні комбінації ГНСС-спостережень. У загальному вигляді лінійну комбінацію (ЛК) фазових L_x і кодових S_x спостережень можна представити таким чином [1-7]:

$$L_x = k_{1,x} \cdot L_1 + k_{2,x} \cdot L_2, \quad (2.13)$$

$$S_x = k_{1,x} \cdot S_1 + k_{2,x} \cdot S_2, \quad (2.14)$$

де $k_{1,x}, k_{2,x}$ – довільні числа.

Таблиця 2.1

Найменування ЛК спостережень і їх коефіцієнти

Найменування ЛК спостережень	k_1	k_2	Довжина хвилі ЛК, м
«Безгеометрична» або «Geometry-Free»	1	-1	-
«Безіоносферна» або «Ionosphere-Free»	$\frac{\lambda_{2i}^2}{\lambda_{2i}^2 - \lambda_{1i}^2}$	$-\frac{\lambda_{1i}^2}{\lambda_{2i}^2 - \lambda_{1i}^2}$	0,107
«Вузькополосна» або «Narrow Lane»	$\frac{\lambda_{2i}}{\lambda_{2i} + \lambda_{1i}}$	$\frac{\lambda_{1i}}{\lambda_{2i} + \lambda_{1i}}$	0,107
«Широкополосна» або «Wide Lane»	$\frac{\lambda_{2i}}{\lambda_{2i} - \lambda_{1i}}$	$-\frac{\lambda_{1i}}{\lambda_{2i} - \lambda_{1i}}$	0,864

2.2 Розробка та вдосконалення методів і алгоритмів використання високоточних кодових і фазових спостережень для підвищення точності координатних визначень

2.2.1 Удосконалений метод обробки ГНСС- спостережень згладжування/фільтрація кодових спостережень з використанням безперервних фазових спостережень в режимі кінематичної зйомки

Результати досліджень показали, що при згладжуванні/фільтрації кодових спостережень, особливо для кінематичних спостережень, обов'язково необхідно враховувати вплив ефекту накручування фази («wind-up»-ефект) [44, 45] який проявляється при зміні напрямку руху, еволюціях, обертаннях об'єктів. Даний метод (умовно назвемо методом 1) використовує представлення рівнянь спостережень у вигляді «віртуальних подвійних різниць», що дає можливість використовувати діагональні кореляційні матриці похибок диференціальних

кодових та фазових спостережень та виконати їх оптимальну статистичну обробку. Урахування та парирування впливу «wind-up»-ефекту фазових вимірювань при виконанні згладжування кодових спостережень з використанням фазових дозволяє суттєво зменшити багатопроміневість і шумові складові кодових спостережень та у підсумку – підвищити точність кінематичного позиціонування в порівнянні з аналогами [27-29].

Розроблений підхід був побудований з урахуванням наступних обмежень [80]:

- в кодових і фазових спостереженнях виключені аномалії;
- в фазових спостереженнях виключені циклічні скачки («сліпи») і відновлена безперервність спостережень.

Нижче наведена вихідна система рівнянь спостережень, яка використовувалася при розробці методу обробки.

Ґрунтуючись на рівняннях (2.3, 2.5, 2.9), запишемо вихідну систему рівнянь

$$\begin{cases} \Delta \hat{S}_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \underbrace{\Delta_{AB}(t_k) + \Delta b_{cAB}}_{\eta_s} + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) + \Delta I_{AB}^j(t_k) + \delta \Delta S_{AB}^j(t_k) \\ \Delta \hat{L}_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \underbrace{\Delta_{AB}(t_k) + \Delta b_{\phi AB}}_{\eta_L} + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) - \Delta I_{AB}^j(t_k) - \Delta N_{AB}^j \cdot \lambda_1 + \\ + \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^j(t_k) \end{cases} \quad (2.15)$$

де $\Delta \hat{S}_{AB}^j(t_k)$, $\Delta \hat{L}_{AB}^j(t_k)$ – одинарні різниці кодових і фазових спостережень;

$\Delta R_{AB}^j(t_k)$ – одинарна різниця відстаней;

η_s , η_L – змінні, що включають в себе розбіжності шкал часу між прийомними пунктами і різниці затримок в трактах приймачів;

$\Delta Tr_{AB}^j(t_k)$ – різниці тропосферних затримок;

$\Delta I_{AB}^j(t_k)$ – різниці іоносферних затримок;

ΔN_{AB}^j – одинарна різниця фазових неоднозначностей;

$\phi_{wp}(t_k)$ – «wind-up» ефект;

$\delta \Delta S_{AB}^j(t_k)$, $\delta \Delta L_{AB}^j(t_k)$ – багатопроміневі і шумові складові похибок.

Вводимо корекції на затримки сигналів в тропосфері. Враховуємо

$$\hat{R}_{BC}^j(t_k) = \sqrt{(X^j - x_{BC})^2 + (Y^j - y_{BC})^2 + (Z^j - z_{BC})^2},$$

де x_{BC} , y_{BC} , z_{BC} – еталонні координати базового приймача.

$$\text{Після чого, проводимо лінеаризацію } R_{Ровер}^j(t_k) \approx \dot{R}_{Ровер}^j(t_k) + \left\| \frac{\partial R_{Ровер}^j(t_k)}{\partial(x, y, z)} \right\|.$$

$R_{Ровер}^j(t_k) = \dot{R}_{Ровер}^j + \|a_{\vec{x}}^j(t_k)\| \cdot \Delta x(t_k)$, з урахуванням, що початкові наближення координат ровера отримані за кодовими визначеннями $\delta \vec{X} \leq 5$ м ($\delta \vec{X} \leq 1 \div 2$ м з застосуванням диференціального методу DGPS).

Після лінеаризації і введення тропосферних і іоносферних (регулярна складова) корекцій маємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta S_{AB}^{*1}(t_k) = \|a_{\vec{x}}^1(t_k)\| \cdot \Delta \vec{X}(t_k) + \eta_S(t_k) + \delta \Delta S_{AB}^1(t_k) \\ \Delta S_{AB}^{*2}(t_k) = \|a_{\vec{x}}^2(t_k)\| \cdot \Delta \vec{X}(t_k) + \eta_S(t_k) + \nabla \Delta I_{\phi_{лAB}}^{21}(t_k) + \delta \nabla \Delta Tr_{AB}^{21}(t_k) + \nabla \Delta S_{млAB}^{21}(t_k) + \delta \Delta S_{AB}^2(t_k) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \Delta S_{AB}^{*m}(t_k) = \|a_{\vec{x}}^m(t_k)\| \cdot \Delta \vec{X}(t_k) + \eta_S(t_k) + \nabla \Delta I_{\phi_{лAB}}^{m1}(t_k) + \delta \nabla \Delta Tr_{AB}^{m1}(t_k) + \nabla \Delta S_{млAB}^{m1}(t_k) + \delta \Delta S_{AB}^m(t_k) \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} \Delta L_{AB}^{*1}(t_k) = \|a_{\vec{x}}^1(t_k)\| \cdot \Delta \vec{X}(t_k) + \eta_L(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^1(t_k) \\ \Delta L_{AB}^{*2}(t_k) = \|a_{\vec{x}}^2(t_k)\| \cdot \Delta \vec{X}(t_k) + \eta_L(t_k) - \nabla \Delta N_{AB}^{21} \cdot \lambda_1 - \nabla \Delta I_{\phi_{лAB}}^{21}(t_k) + \delta \nabla \Delta Tr_{AB}^{21}(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^2(t_k) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \Delta L_{AB}^{*m}(t_k) = \|a_{\vec{x}}^m(t_k)\| \cdot \Delta \vec{X}(t_k) + \eta_L(t_k) - \nabla \Delta N_{AB}^{m1} \cdot \lambda_1 - \nabla \Delta I_{\phi_{лAB}}^{m1}(t_k) + \delta \nabla \Delta Tr_{AB}^{m1}(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^m(t_k) \end{cases} \quad (2.17)$$

Виходячи з вищеписаної системи рівнянь, наведемо безпосередньо алгоритм підбору рівня фазових спостережень щодо кодкових.

Формуємо «реальні» подвійні різниці кодкових і фазових спостережень:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \Delta S_{AB}^{*j1}(t_k) = \Delta S_{AB}^{*j}(t_k) - \Delta S_{AB}^{*1}(t_k) = \\ \left[\left\| \mathbf{a}_{\bar{X}}^j(t_k) \right\| - \left\| \mathbf{a}_{\bar{X}}^1(t_k) \right\| \right] \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \left[\nabla \Delta \mathbf{I}_{\phi_{лAB}}^{j1}(t_k) + \nabla \Delta S_{млAB}^{j1}(t_k) \right] + \delta \nabla \Delta S_{\phi_{лAB}}^{j1}(t_k) \\ \nabla \Delta L_{AB}^{*j1}(t_k) = \Delta L_{AB}^{*j}(t_k) - \Delta L_{AB}^{*1}(t_k) = \\ \left[\left\| \mathbf{a}_{\bar{X}}^j(t_k) \right\| - \left\| \mathbf{a}_{\bar{X}}^1(t_k) \right\| \right] \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \left[\nabla \Delta_{\phi_{лAB}}^{j1}(t_k) + \nabla \Delta S_{млAB}^{j1}(t_k) \right] - \nabla \Delta N_{AB}^{j1} \cdot \lambda_1 + \delta \nabla \Delta L_{AB}^{j1}(t_k) \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Формуємо різниці «код-фаза» подвійних різниць спостережень:

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^{j1}(t_k) &= \nabla \Delta S_{AB}^{*j1}(t_k) - \nabla \Delta L_{AB}^{*j1}(t_k) = 2 \cdot \nabla \Delta \mathbf{I}_{\phi_{лAB}}^{j1}(t_k) + \nabla \Delta S_{млAB}^{j1}(t_k) + \\ &+ \nabla \Delta N_{AB}^{j1} \cdot \lambda_1 + \delta \nabla \Delta S_{\phi_{лAB}}^{j1}(t_k) + \delta \nabla \Delta L_{AB}^{j1}(t_k). \end{aligned}$$

Оцінюємо середнє значення по кожному набору $\Phi_{AB}^{j1}(t_k)$:

$$\bar{\Phi}_{AB}^{j1} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \Phi_{AB}^{j1}(t_k);$$

$$\bar{\Phi}_{AB}^{j1} = 2 \cdot \left\langle \nabla \Delta \mathbf{I}_{\phi_{лAB}}^{j1}(t_k) \right\rangle + \left\langle \nabla \Delta S_{млAB}^{j1}(t_k) \right\rangle + \nabla \Delta N_{AB}^{j1} \cdot \lambda_1 + \left\langle \nabla \Delta S_{\phi_{лAB}}^{j1}(t_k) \right\rangle;$$

Виконуємо операцію згладжування для подвійних різниць спостережень:

$$\begin{aligned} \nabla \Delta \tilde{S}_{AB}^{j1}(t_k) &= \nabla \Delta L_{AB}^{*j1}(t_k) + \bar{\Phi}_{AB}^{j1} = \left[\left\| \mathbf{a}_{\bar{X}}^j(t_k) \right\| - \left\| \mathbf{a}_{\bar{X}}^1(t_k) \right\| \right] \cdot \Delta \bar{X}(t_k) - \nabla \Delta \mathbf{I}_{\phi_{л}}^{j1}(t_k) + \\ &+ 2 \cdot \left\langle \nabla \Delta \mathbf{I}_{\phi_{лAB}}^{j1}(t_k) \right\rangle + \left\langle \nabla \Delta S_{млAB}^{j1}(t_k) \right\rangle + \delta \nabla \Delta L_{AB}^{j1}(t_k) + \left\langle \nabla \Delta S_{\phi_{лAB}}^{j1}(t_k) \right\rangle. \end{aligned}$$

Виконуємо обробку одинарних різниць спостережень референцного супутника:

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^1(t_k) &= \Delta S^1(t_k) - \Delta L^1(t_k) = \eta_S(t_k) - \eta_L(t_k) + \delta \Delta S_{\phi_{л}}^1(t_k) = \\ &\left[\Delta b_{cAB} - \Delta b_{\phi_{лAB}} \right] + 2 \cdot \Delta \mathbf{I}_{\phi_{лAB}}^1(t_k) + \nabla \Delta S_{млAB}^1(t_k) + \Delta N_{AB}^1 \cdot \lambda_1 + \\ &+ \Delta S_{млAB}^1(t_k) - \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) + \delta \Delta S_{\phi_{лAB}}^1(t_k) \end{aligned}$$

Оцінюємо середнє значення за $\Phi_{AB}^1(t_k)$:

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_{AB}^1 &= \left[\Delta b_S - \Delta b_L \right] + \Delta N_{AB}^1 \cdot \lambda_1 + 2 \cdot \left\langle \Delta \mathbf{I}_{\phi_{лAB}}^1(t_k) \right\rangle + \left\langle \Delta S_{млAB}^1(t_k) \right\rangle - \left\langle \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) \right\rangle + \\ &+ \left\langle \delta \Delta S_{\phi_{лAB}}^1(t_k) \right\rangle \end{aligned}$$

Виконуємо операцію згладжування:

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{S}_{AB}^1(t_k) &= \Delta L_{AB}^1(t_k) + \bar{\Phi}_{AB}^1 = \|a_{\bar{X}}^1(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + [\Delta(t_k) - \Delta b_S] - \Delta I_{\phi_{LAB}}^1(t_k) + \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) + \\ &+ 2 \cdot \langle \Delta I_{\phi_{LAB}}^1(t_k) \rangle + \langle \Delta S_{MLAB}^1(t_k) \rangle - \langle \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) \rangle + \langle \Delta S_{\phi_{LAB}}^1(t_k) \rangle + \delta \Delta L_{AB}^1(t_k) = \\ &= \|a_{\bar{X}}^1(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \tilde{\mu}_L(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^1(t_k), \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_L(t_k) &= [\Delta(t_k) - \Delta b_S] - \Delta I_{\phi_{LAB}}^1(t_k) + \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) + 2 \cdot \langle \Delta I_{\phi_{LAB}}^1(t_k) \rangle + \\ &+ \langle \Delta S_{MLAB}^1(t_k) \rangle - \langle \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) \rangle. \end{aligned}$$

Після отримання наборів даних $\nabla \Delta \tilde{S}_{AB}^{j1}(t_k)$ и $\Delta \tilde{S}_{AB}^1(t_k)$, повертаємося до обробки одинарних різниць спостережень, формуючи наступну систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta \tilde{S}_{AB}^1(t_k) &= \|a_{\bar{X}}^1(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \tilde{\mu}_L(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^1(t_k) \\ \Delta \tilde{S}_{AB}^j(t_k) &= \nabla \Delta \tilde{S}_{AB}^{j1}(t_k) + \Delta \tilde{S}_{AB}^1(t_k) = \|a_{\bar{X}}^j(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \tilde{\mu}_L(t_k) - \\ &\underbrace{-\nabla \Delta I_{\phi_{LAB}}^{j1}(t_k) + 2 \cdot \langle \nabla \Delta I_{\phi_{LAB}}^{j1}(t_k) \rangle + \langle \nabla \Delta S_{MLAB}^{j1}(t_k) \rangle + \langle \nabla \Delta S_{\phi_{LAB}}^{j1}(t_k) \rangle + \delta \nabla \Delta L_{AB}^{j1}(t_k)}_{\text{остаточні сумарні повільно змінюючися похибки}} \end{aligned} \right. \quad (2.19)$$

Систему рівнянь згладжених кодових спостережень можна записати в остаточному вигляді:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta \tilde{S}_{AB}^1(t_k) &= \|a_{\bar{X}}^1(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \tilde{\eta}_{SL}(t_k) + \delta \tilde{f}_{AB}^1(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^1(t_k) \\ \Delta \tilde{S}_{AB}^2(t_k) &= \|a_{\bar{X}}^2(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \tilde{\eta}_{SL}(t_k) + \delta \tilde{f}_{AB}^2(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^2(t_k) \\ \dots &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \Delta \tilde{S}_{AB}^m(t_k) &= \|a_{\bar{X}}^m(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \tilde{\eta}_{SL}(t_k) + \delta \tilde{f}_{AB}^m(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^m(t_k). \end{aligned} \right. \quad (2.20)$$

Тут:

$$\tilde{\eta}_{SL}(t_k) = \Delta(t_k) + \Delta b_S + \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) - \langle \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) \rangle - \text{оцінюваний параметр};$$

$$\delta \tilde{f}_{AB}^j(t_k) = 2 \cdot \langle \Delta I_{\phi_{LAB}}^j(t_k) \rangle - \Delta I_{\phi_{LAB}}^j(t_k) + \langle \Delta S_{MLAB}^j(t_k) \rangle - \text{повільно змінюючися складові}$$

($j=1,m$)

похибок.

Оцінка параметрів $\Delta \bar{X}(t_k)$ и $\tilde{\eta}_{SL}(t_k)$ виконується за методом найменших квадратів.

На рис. 2.3 наведено приклади подвійних різниць кодівих і «згладжених» кодівих спостережень. У розділі 4 наведено результати експериментальної перевірки та порівняння результатів координатних визначень при використанні запропонованого методу (умовно будемо його називати методом 1) та існуючих аналогів.

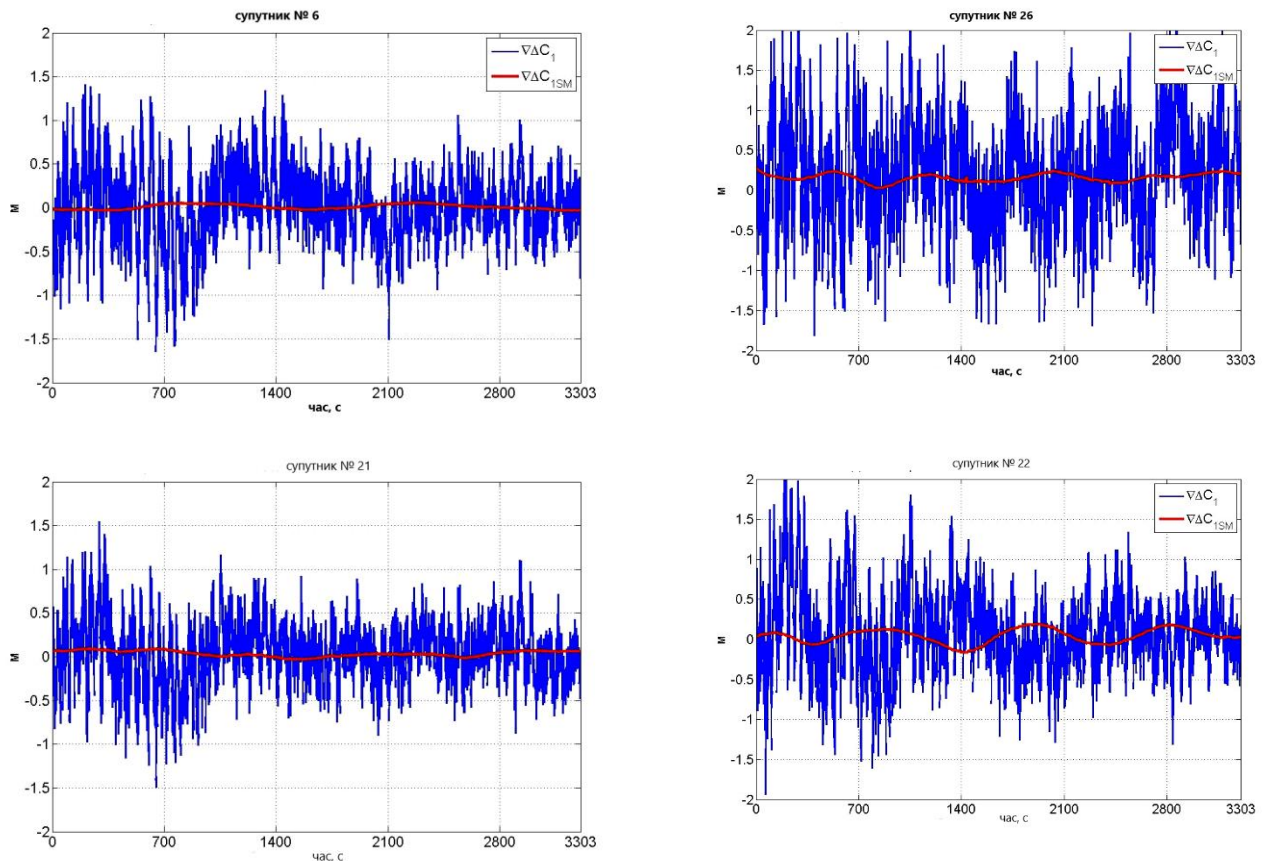


Рисунок 2.3 – Подвійні різниці кодівих і «згладжених» кодівих спостережень, що отримані в результаті обробки спостережень за запропонованим методом 1

На рис. 2.4 наведено приклад координатного рішення при використанні диференціального кодового рішення і з використанням «згладжених» кодівих вимірювань, які були оброблені з використанням класичного алгоритму згладжування/фільтрації («Hatch»-фільтр) і методу 1, запропонованого в даній роботі. Як видно з рис. 2.4 використання подібних підходів дозволяє значно підвищити точність координатних визначень до субметрового/дециметрового рівня.

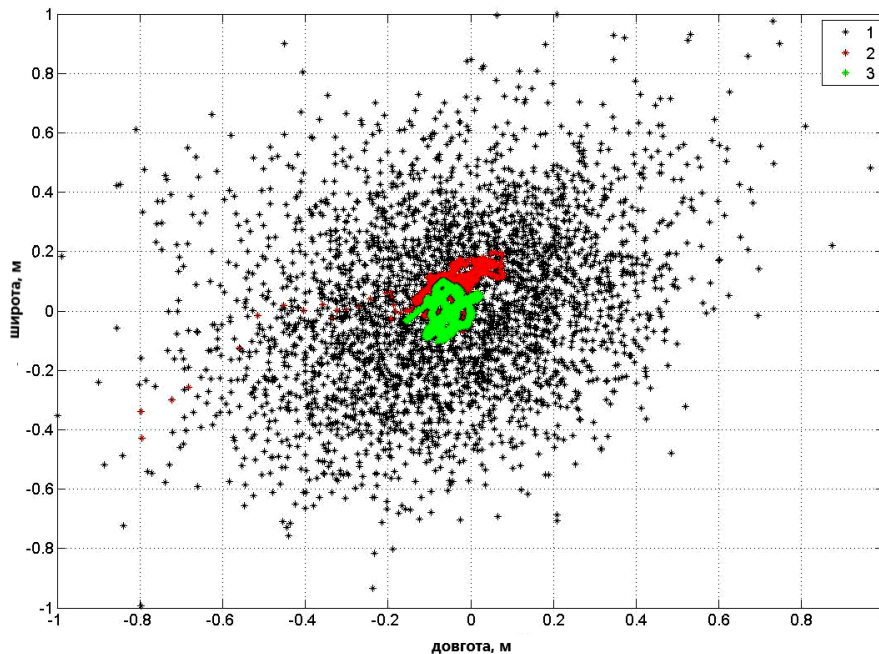


Рисунок 2.4 Відхилення отриманого рішення по плановим координатами щодо еталонних оцінок координат (1 – диференціальне кодове рішення; 2 – «Hatch»-фільтр; 3 – метод 1)

Блок-схема кодово-фазової обробки представлена на рис. 2.5. «Hatch»-фільтр можна розглядати як фільтр нижніх частот для кодових спостережень і як фільтр верхніх частот для фазових спостережень з постійною часу τ . На вхід фільтра подаються кодові ($S: \rho_1, \rho_2$) і фазові ($L: \phi_1, \phi_2$) спостереження. Як показано на рис. 2.5 перед фільтром формуються різниці спостережень $\chi = S - L$ (в зарубіжній літературі дана комбінація отримала назву «code-minus-carrier» (СМС) – код-мінус-фаза (КМФ)). Коефіцієнти α і β вказують на наявність вимірювань і комбінацію спостережень, яка використовується в обробці. Сума коефіцієнтів дорівнює 1:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1,$$

$$\beta_1 + \beta_2 = 1.$$

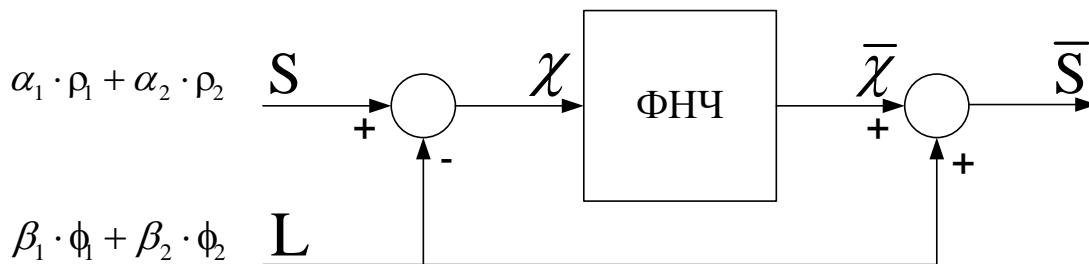


Рисунок 2.5 Блок-схема обробки кодових і фазових спостережень

Рекурсивну формулу згладжуючого фільтра запишемо в такий спосіб [6-8]:

$$\bar{S}(t_i) = w \cdot S(t_i) + (1 - w) \cdot (\bar{S}(t_{i-1}) + \delta L(t_i, t_{i-1})),$$

де $\bar{S}(t_i)$ – згладжені значення кодової псевдовідстані на момент t_i , $S(t_i)$ – кодова псевдовідстань на момент t_i , $\delta L(t_i, t_{i-1}) = L(t_i) - L(t_{i-1})$ – різниця фазових спостережень, w – змінюваний у часі ваговий множник. Для початкової епохи, $i = 1$, ваговий коефіцієнт дорівнює 1, тобто відбувається повне використання кодової псевдовідстані. Для наступних епох ваговий коефіцієнт поступово зменшується. Швидкість зменшення варіюється від 20 с до 900 с [1-8].

Похибка згладжування визначається похибкою оцінки рівня фазової псевдовідстані щодо кодової і залежить від обсягу вибірки. Більший обсяг даних, що використовуються при згладжуванні, дозволяє отримати більш високий рівень точності.

У даній роботі автором було реалізовано в середовищі Matlab [48, 49] модуль фільтрації/згладжування кодових вимірювань із застосуванням «Hatch» -фільтра. У програмній реалізації включена можливість зміни постійної часу фільтра. На рис. 2.6 представлений приклад координатного рішення на частоті L1 GPS при реалізації фільтрів з різними постійними часу.

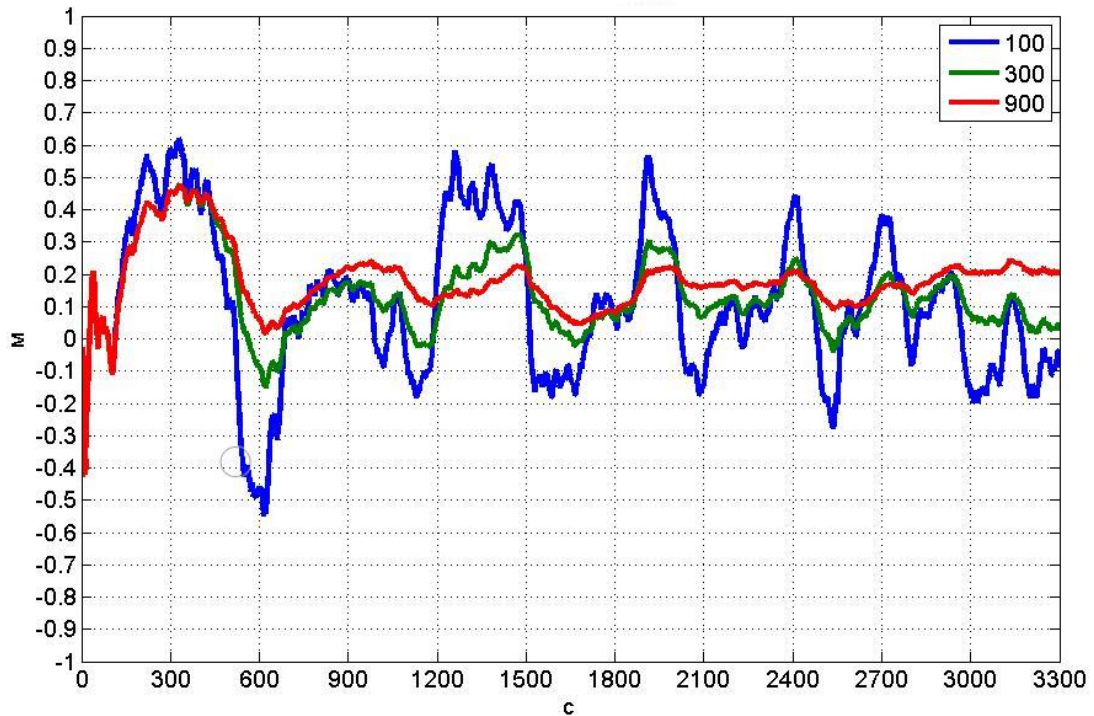


Рисунок 2.6 Координатне рішення по згладженим кодовим ГНСС-спостереженням з використанням різних постійних часу

2.2.2 Метод комбінованого диференційного кодового і фазового рішення

У даному розділі також представлено розроблений метод (умовно позначим його як метод 2) комбінованого диференціального кодового і фазового так званого «плаваючого» (float) рішення. Відмінною особливістю даного методу, у порівнянні з попереднім, є те, що в обробку спільно включаються кодові і фазові спостереження, без безпосереднього здійснення операцій згладжування/фільтрації. Оцінка «рівня» фазових спостережень щодо кодових здійснюється спільно з оцінкою координатно-часових параметрів. Описаний в дисертації метод 2 реалізує обробку фазових спостережень, при якому дискретні цілочисельні фазові неоднозначності трактуються як континуальні невідомі параметри, оцінка яких здійснюється спільно з залишковими систематичними похибками подвійних різниць фазових спостережень. В процесі обробки кодовим і фазовим спостереженням надаються відповідні вагові коефіцієнти. Метод передбачає, що у використовуваних спостереженнях виключені

аномалії (пропуски, фазові циклічні скачки) і відновлена безперервність фазових спостережень.

Особливу увагу приділено обробці методом 2 спостережень ГНСС з частотним розподілом спектрів випромінюваних сигналів. Запропонований удосконалений метод комбінованого диференціального кодового і фазового рішення є найбільш ефективним для спільної обробки спостережень GPS+ГЛОНАСС, так як він враховує особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів ГЛОНАСС та забезпечує дециметровий рівень точності кінематичного позиціонування.

Викладений нижче метод передбачає, що в використовуваних спостереженнях виключені аномалії, фазові циклічні скачки («сліпи») і відновлена безперервність фазових спостережень [81].

При обробці спостережень ГНСС GPS використовуємо вихідну систему рівнянь. Після виконання лінеаризації і введення тропосферних і іоносферних корекцій маємо наступну систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} * \\ \Delta S_{AB}^1(t_k) = \left\| a_{\bar{X}}^1(t_k) \right\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \mu_S(t_k) + \delta \Delta S_{AB}^1(t_k) \\ * \\ \Delta S_{AB}^2(t_k) = \left\| a_{\bar{X}}^2(t_k) \right\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \mu_S(t_k) + \nabla \Delta I_{\phi_{LAB}}^{21}(t_k) + \delta \nabla \Delta \text{Tr}_{AB}^{21}(t_k) + \nabla \Delta S_{\text{MLAB}}^{21}(t_k) + \delta \Delta S_{AB}^2(t_k) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ * \\ \Delta S_{AB}^m(t_k) = \left\| a_{\bar{X}}^m(t_k) \right\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \mu_S(t_k) + \nabla \Delta I_{\phi_{LAB}}^{m1}(t_k) + \delta \nabla \Delta \text{Tr}_{AB}^{m1}(t_k) + \nabla \Delta S_{\text{MLAB}}^{m1}(t_k) + \delta \Delta S_{AB}^m(t_k) \end{array} \right. \quad (2.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} * \\ \Delta L_{AB}^1(t_k) = \left\| a_{\bar{X}}^1(t_k) \right\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \mu_L(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^1(t_k) \\ * \\ \Delta L_{AB}^2(t_k) = \left\| a_{\bar{X}}^2(t_k) \right\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \mu_L(t_k) - \nabla \Delta N_{AB}^{21} \cdot \lambda_1 - \nabla \Delta I_{\phi_{LAB}}^{21}(t_k) + \delta \nabla \Delta \text{Tr}_{AB}^{21}(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^2(t_k) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ * \\ \Delta L_{AB}^m(t_k) = \left\| a_{\bar{X}}^m(t_k) \right\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \mu_L(t_k) - \nabla \Delta N_{AB}^{m1} \cdot \lambda_1 - \nabla \Delta I_{\phi_{LAB}}^{m1}(t_k) + \delta \nabla \Delta \text{Tr}_{AB}^{m1}(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^m(t_k) \end{array} \right. \quad (2.22)$$

Оцінка параметрів $\Delta \bar{X}(t_k)$, $\mu_S(t_k)$, $\mu_L(t_k)$ и $\nabla \Delta N_{AB}^{m1} \cdot \lambda_1$ виконується за методом найменших квадратів.

При обробці спостережень ГЛОНАСС необхідно враховувати особливості системи, зокрема, частотне розділення каналів. В цьому випадку для кожного частотного каналу буде власна величина кодової і фазової затримки сигналів, що вимагає проведення калібрування каналів або включення затримок до складу оцінюваних параметрів. З цієї причини використання вищеописаного методу не дозволить отримати оптимальну оцінку координат.

Нижче наведено метод спільної обробки кодових і фазових спостережень ГЛОНАСС, який передбачає оцінку кодово-фазової комбінації затримок між каналами і комбінації фазових неоднозначностей.

Використовуючи вирази (2.3, 2.5, 2.9) запишемо рівняння спостережень ГЛОНАСС наступним чином:

$$\begin{cases} \Delta S_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \Delta_{AB}(t_k) + \Delta b_{AB}^{jкод} + \Delta I_{AB}^j(t_k) + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) + \delta S_{AB}^j(t_k) \\ \Delta L_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \Delta_{AB}(t_k) + \Delta b_{AB}^{jфаз} - \Delta N_{AB}^j \cdot \lambda_1^j - \Delta I_{AB}^j(t_k) + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) + \\ + \lambda_1^j \cdot \phi_{wp}(t_k) + \delta L_{AB}^j(t_k) \end{cases} \quad (2.23)$$

Запишемо рівняння фазових спостережень для референцного супутника.

$$\Delta L_{AB}^r(t_k) = \Delta R_{AB}^r(t_k) + \Delta_{AB}(t_k) + \Delta b_{AB}^{rфаз} - \lambda_1^r \cdot \Delta N_{AB}^r - \Delta I_{AB}^r(t_k) + \Delta Tr_{AB}^r(t_k) + \\ + \lambda_1^r \cdot \phi_{wp}(t_k) + \delta L_{AB}^r(t_k) \quad (2.24)$$

Об'єднаймо складові, пов'язані з розбіжністю шкал часу, комбінацією фазових затримок в каналах, фазових неоднозначностей і ефектом накручування фази, в окрему змінну і позначимо її наступним чином:

$$\eta(t_k) = \Delta_{AB}(t_k) + \Delta b_{AB}^{rфаз} - \lambda_1^r \cdot \Delta N_{AB}^r + \lambda_1^r \cdot \phi_{wp}(t_k).$$

Затримку в кожному частотному каналі можна уявити як відхилення від середньої затримки по всіх каналах:

$$\Delta b_{AB}^{rфаз} = \Delta b_{AB}^{0фаз} + \delta \Delta b_{AB}^{rфаз}.$$

В результаті рівняння для референцного супутника прийме наступний вигляд:

$$\Delta L_{AB}^r(t_k) = \Delta R_{AB}^r(t_k) + \eta(t_k) - \Delta I_{AB}^r(t_k) + \Delta Tr_{AB}^r(t_k) + \delta L_{AB}^r(t_k).$$

Використовуючи отримані співвідношення, запишемо рівняння спостережень для поточного супутника.

$$\Delta L_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \eta(t_k) - [\Delta b_{AB}(t_k) + (\Delta b_{AB}^{0\phi a3} + \delta \Delta b_{AB}^{r\phi a3}) - \lambda_1^r \cdot \Delta N_{AB}^r + \lambda_1^r \cdot \phi_{wp}(t_k)] + \\ + \Delta b_{AB}(t_k) + (\Delta b_{AB}^{0\phi a3} + \delta \Delta b_{AB}^{j\phi a3}) - \lambda_1^j \cdot \Delta N_{AB}^j - \Delta I_{AB}^j(t_k) + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) + \lambda_1^j \cdot \phi_{wp}(t_k) + \delta L_{AB}^j(t_k);$$

або

$$\Delta L_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \eta(t_k) - \delta \Delta b_{AB}^{r\phi a3} + \lambda_1^r \cdot \Delta N_{AB}^r - \lambda_1^r \cdot \phi_{wp}(t_k) + \\ + \delta \Delta b_{AB}^{j\phi a3} - \lambda_1^j \cdot \Delta N_{AB}^j - \Delta I_{AB}^j(t_k) + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) + \lambda_1^j \cdot \phi_{wp}(t_k) + \delta L_{AB}^j(t_k) = \\ = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \eta(t_k) + \underbrace{(\delta \Delta b_{AB}^{j\phi a3} - \delta \Delta b_{AB}^{r\phi a3})}_{\delta \nabla \Delta b_{AB}^{jr\phi a3}} + (\lambda_1^j - \lambda_1^r) \cdot \Delta \phi_{wp}(t_k) - \\ - (\lambda_1^j \cdot \Delta N_{AB}^j - \lambda_1^r \cdot \Delta N_{AB}^r) - \Delta I_{AB}^j(t_k) + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) + \delta L_{AB}^j(t_k). \quad (2.25)$$

Введемо наступну змінну:

$$\nabla \Delta C_{AB}^{jr}(t_k) = \delta \nabla \Delta b_{AB}^{jr\phi a3} - (\lambda_1^j \cdot \Delta N_{AB}^j - \lambda_1^r \cdot \Delta N_{AB}^r).$$

Остаточний вираз для поточного супутника прийме наступний вигляд:

$$\Delta L_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \eta(t_k) + \nabla \Delta C_{AB}^{jr}(t_k) + \\ + (\lambda_1^j - \lambda_1^r) \cdot \Delta \phi_{wp}(t_k) - \Delta I_{AB}^j(t_k) + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) + \delta L_{AB}^j(t_k) \quad (2.26)$$

В результаті отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta L_{AB}^r(t_k) = \Delta R_{AB}^r(t_k) + \eta(t_k) - \Delta I_{AB}^r(t_k) + \Delta Tr_{AB}^r(t_k) + \delta L_{AB}^r(t_k); \\ \Delta L_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \eta(t_k) + \nabla \Delta C_{AB}^{jr}(t_k) + \\ + (\lambda_1^j - \lambda_1^r) \cdot \Delta \phi_{wp}(t_k) - \Delta I_{AB}^j(t_k) + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) + \delta L_{AB}^j(t_k). \end{cases} \quad (2.27)$$

Сумісна оцінка параметрів $\Delta \vec{X}(t_k)$, $\eta(t_k)$ та $\nabla \Delta C_{AB}^{jr}(t_k)$ виконується за методом найменших квадратів.

2.2.3 Розроблення методу сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень

В роботі також запропоновано метод (умовно позначимо його як метод 3) сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу точного кінематичного позиціонування, який, на відміну від відомих методів,

дозволяє усунути варіаційні складові похибки рішення і виключає стрибки координат, що викликані зміною робочого сузір'я супутників ГНСС. Метод заснований на використанні оцінок зміни безперервних фазових ГНСС-спостережень (збільшень) за часом.

Розроблений метод враховує наступні обмеження[83, 105]:

- в використовуваних кодових і фазових спостереженнях виключені аномалії;
- в фазових спостереженнях виключені циклічні скачки (т.зв. «сліпи») і відновлена безперервність спостережень;
- метод 3 використовує та уточнює згладжене (по методу 1) диференціальне кодово-фазове координатне кінематичне рішення.

В якості вхідних даних метод 3 обробки використовує такі параметри (див. вираз. 2.15):

$$\begin{cases} \Delta\hat{L}_{AB}^j(t_k) = \Delta R_{AB}^j(t_k) + \eta_L + \Delta Tr_{AB}^j(t_k) - \Delta I_{AB}^j(t_k) - \Delta N_{AB}^j \cdot \lambda_1 + \\ + \lambda_1 \cdot \phi_{wp}(t_k) + \delta\Delta L_{AB}^j(t_k) \\ \bar{X}_B(t_k) = X_B(t_k) + \delta X_B(t_k) \end{cases}, \quad (2.28)$$

де $\Delta\hat{L}_{AB}^j(t_k)$ – одинарні різниці фазових спостережень;

$\Delta\bar{X}(t_k)$ – оцінки координат, отриманих з використанням алгоритму по методу 1;

$X_B(t_k)$ – координати, що оцінюються;

$\delta X_B(t_k)$ – похибки оцінок координат, що отримані методом 1;

В процесі обробки формуються прирощення (збільшення) диференціальних фазових спостережень і координат у часі:

$$\begin{cases} d\Delta\hat{L}_{AB}^j(t_{k,k-1}) = \Delta\hat{L}_{AB}^j(t_k) - \Delta\hat{L}_{AB}^j(t_{k-1}), \quad k = \overline{2...n} \\ d\Delta\bar{X}(t_{k,k-1}) = \Delta\bar{X}(t_k) - \Delta\bar{X}(t_{k-1}) \end{cases}. \quad (2.29)$$

Після цього виконуємо рішення навігаційної задачі – оцінюємо прирощення (збільшення) координат по прирощенням фазових спостережень за часом. Використання прирощень фазових спостережень виключає необхідність виконання розв'язання фазової неоднозначності (РФН). Рішення навігаційної задачі виконується методом найменших квадратів.

Після рішення навігаційної задачі виконується операція інтегрування отриманих прирощень координат. Ця операція дозволяє отримати зміни координат у часі з точністю до констант в перший момент часу. Оскільки систематичні похибки визначення збільшень координат в даному випадку малі, а флуктуаційні похибки суміжних фазових спостережень виключаються, то інтегральне значення прирощень координат буде залежати від похибок першої і кінцевої епохи інтервалу інтегрування. Це дає можливість отримати зміни координат у часі з високою точністю і уникнути різких викидів координат при зміні супутникової конфігурації, які притаманні методу 1 (згладженому кодово-фазовому рішення). При цьому залишаються невідомим початкове значення першої епохи спостережень. Визначення середнього значення координат здійснюється за оцінками координат, що отримані методом 1.

Для уточнення середнього значення координат усереднення виконується в два етапи. На першому етапі усуваються епохи, на яких координати виходять за поріг 3σ , на другому – оцінюється середнє значення координат. Підсумкові координати дорівнюють сумі проінтегрованих прирощень координат і середніх значень координат, отриманих за методом 1. Таким чином, точність нового згладженого рішення обмежується точністю визначення середніх значень координат, отриманих методом 1.

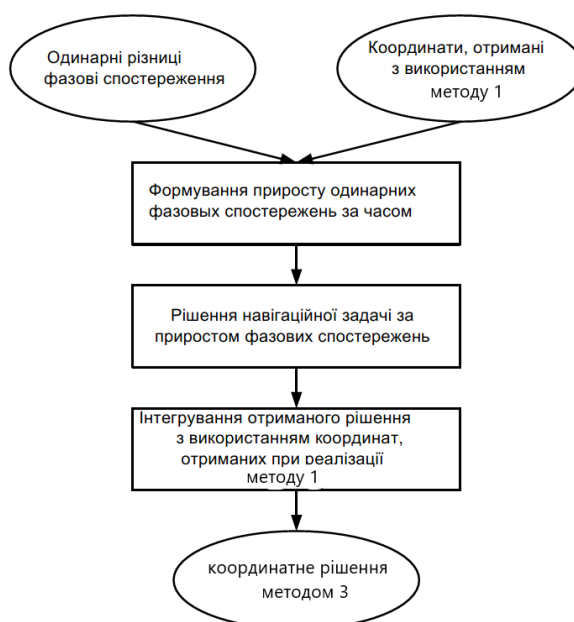


Рисунок 2.7 Блок-схема обробки ГНСС-спостережень.

На рис. 2.7 приведена блок-схема обробки ГНСС-спостережень. Даний метод обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень дозволяє усунути варіаційні складові похибки рішення і виключає стрибки координат, що викликані зміною робочого сузір'я супутників.

Метод дозволяє, як показали дослідження, у середньому у ~ 2 рази зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженого» рішення і в $\sim 3-4$ рази по відношенню до диференціальних кодових DGPS-рішень.

2.3 Алгоритми вирішення задачі координатно-часових визначень

Для вирішення задачі координатно-часових визначень (рішення навігаційної задачі), як в автономному, так і диференціальному режимах позиціонування використаний відомий підхід лінеаризації системи рівнянь спостережень [1–3]. Даний підхід може бути застосований як для вирішення навігаційної задачі (НЗ) за спостереженнями однієї ГНСС, так і при спільному використанні декількох супутникових систем. В даному підрозділі представлені алгоритми вирішення НЗ за результатами диференціальних ГНСС-спостережень з апріорною оцінкою точності.

Вхідними даними для вирішення НЗ на поточний момент часу є набори псевдовіддалемірних, псевдодоплерівських вимірювань і відповідні їм розрахункові значення координат (ефемерид), складових вектора швидкості навігаційних супутників і частотно-часових поправок до спостережень, що розраховуються згідно інтерфейсним контрольним документам відповідних ГНСС. Вихідними даними є оцінки координат споживача, складових вектора швидкості і взаємних розбіжностей шкал часу двох приймачів – роверного приймача, що рухається, і приймача референцної станції.

МНК-рішення лінійної системи рівнянь можна представити таким чином:

$$\Delta \hat{\vec{Q}} = D \Delta \vec{\Theta},$$

$$\text{де } D = \begin{Bmatrix} A_1 & 0 & \vdots & B_1 \\ & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & & A_k & B_k \end{Bmatrix}, \Delta \hat{\vec{Q}} = \begin{Bmatrix} \Delta \vec{Q}_1 \\ \vdots \\ \Delta \vec{Q}_k \end{Bmatrix} \text{ и } \Delta \vec{\Theta} = \begin{Bmatrix} \Delta \vec{\Theta}_1 \\ \vdots \\ \Delta \vec{\Theta}_k \\ \Delta \vec{X} \end{Bmatrix}, \quad (2.30)$$

D –якобіан перетворення – матриця приватних похідних вимірювальних параметрів по параметрам, що оцінюються;

$\Delta \hat{Q}$ – вектор параметрів, що вимірюються;

$\Delta \vec{\Theta}$ – вектор параметрів, що визначаються.

Рішення даної лінійної системи рівнянь має наступний вигляд:

$$\Delta \vec{\Theta} = [D^T W D]^{-1} D^T W \Delta \hat{Q}, \quad (2.31)$$

де $W_Q = \begin{bmatrix} W_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & W_k \end{bmatrix}$, W_Q – матриця вагових коефіцієнтів.

$$\Delta \hat{\Theta}_{(j=\bar{1}, \bar{k})} = (A_j^T W_j A_j)^{-1} A_j^T W_j [\Delta \hat{Q}_j - B_j \Delta \hat{X}], \quad (2.32)$$

$$\Delta \hat{X} = K_{22} \sum_{i=1}^k B_i^T P_i \Delta \hat{Q}_i,$$

де $K_{22} = \left\{ \sum_{i=1}^k B_i^T P_i B_i \right\}^{-1}$, $P_i = W_i - W_i A_i (A_i^T W_i A_i)^{-1} A_i^T W_i$,

$$W_Q = \begin{bmatrix} W_S & 0 \\ 0 & W_L \end{bmatrix}.$$

2.4 Модель похибок ГНСС-спостережень та апріорна оцінка точності навігаційних визначень

При виконанні координатних визначень необхідний інструментарій оцінки точності отриманого рішення – індикатор якості позиціонування. Обробка зважених спостережень призводить до підвищення точності оцінки кореляційної матриці визначених параметрів. Для вирішення даного завдання необхідно оцінити внесок основних джерел похибок спостережень і включити його в кореляційну матрицю вимірювань [39]. В даному підрозділі наведено опис моделі похибок ГНСС-спостережень для координатно-часових визначень в диференціальному режимі (одинарні різниці спостережень). Запропонована модель враховує внесок основних джерел похибок спостережень, де для кожної складової були прийняті

оцінки середньоквадратичних відхилень (СКО), які обрані, ґрунтуючись на результати зарубіжних і власних досліджень.

Модель враховує такі складові:

– ефемеридні похибки – похибки вимірювань, обумовлені неточністю ефемерид, є проекцією вектора помилок координат супутника на напрям приймач-супутник [1–7, 55]. Тому в припущенні, що помилки координат супутника що корельовані, а СКВ кожної з них становить ~ 1 м, отримаємо:

$$\sigma_{\text{эф}}^2(t) = \text{SKO}_{\text{эф}}^2 \cdot \mathbf{h}^T(t) \cdot \mathbf{h}(t),$$

$$\text{де } \mathbf{h}_i(t_k) = \frac{(\mathbf{x}_{sv} - \mathbf{x}_{rov})}{\mathbf{R}_{rov,i}(t_k)} - \frac{(\mathbf{x}_{sv} - \mathbf{x}_{bas})}{\mathbf{R}_{bas,i}(t_k)};$$

\mathbf{x}_{sv} – вектор координат супутника;

\mathbf{x}_{rov} – вектор наближених координат приймача споживача;

\mathbf{x}_{bas} – вектор координат базової станції;

$\mathbf{R}_{rov,i}(t_k)$ – відстань від супутника до приймача споживача;

$\mathbf{R}_{bas,i}(t_k)$ – відстань від супутника до базової станції;

$\text{SKO}_{\text{эф}} = 1$ м.

– похибки, обумовлені неточним урахуванням тропосферного затримки навігаційних сигналів – при обробці спостережень, для компенсації тропосферних затримок використовувалася модель MOPS [56]; згідно з результатами експериментальних досліджень [56, 57] залишкова похибка компенсації тропосферного затримки при використанні моделі MOPS становить 5–10% від розрахункової величини; тому, при диференціальній обробці спостережень з використанням моделі MOPS було прийнято, що $\sigma_{\Delta Tr}(t) = 0,05 \cdot \Delta Tr$;

– похибки, обумовлені неточним врахуванням іоносферних затримок навігаційних сигналів; для компенсації іоносферних затримок використовуються моделі Klobuchar [58] і GIM IONEX [59]; Результати зарубіжних і вітчизняних досліджень показали [60], що залишкові похибки компенсації іоносферної складової при обробці спостережень можуть наступними:

– при застосуванні моделі Klobuchar $\sigma_{\Delta I}(t) = 0,50 \cdot \Delta I$;

- при використанні моделі GIM IONEX $\sigma_{\Delta I}(t) = 0,30 \cdot \Delta I$;
- похибки, обумовлені шумами і багатопроміневістю ГНСС- спостережень: для кодових спостережень GPS – $\sigma_{ш/мл}(t) = 0,4$ м, для фазових GPS и ГЛОНАСС спостережень – $\sigma_{ш/мл}(t) = 0,003$ м; для кодових спостережень ГЛОНАСС $\sigma_{ш/мл}(t) = 1$ м, в дану складову також включена похибка, обумовлена частотними затримками в каналах;
- при реалізації методу 3, наведеного вище, при оцінці рівня фазових спостережень щодо кодових, для оцінки точності отриманого значення $\sigma_{LC}(t)$ пропонується використовувати алгоритм автокореляційного аналізу, запропонованого в [61].

У підсумку, на кожен момент часу для кожного супутника розраховується сумарна дисперсія похибок спостережень:

$$\sigma_n^2(t) = \sigma_{эф}^2(t) + \sigma_{троп}^2(t) + \sigma_{ион}^2(t) + \sigma_{ш/мл}^2(t)$$

або для методу 1:

$$\sigma_n^2(t) = \sigma_{эф}^2(t) + \sigma_{троп}^2(t) + \sigma_{ион}^2(t) + \sigma_{ш/мл}^2(t) + \sigma_{LC}^2(t).$$

По набору розрахункових величин $\sigma_n^2(t)$ при вирішенні НЗ формується кореляційна матриця похибок вимірюваних параметрів \mathbf{K} та вагова матриця \mathbf{W} :

$$\mathbf{K} = \text{diag} \{ \sigma_1^2(t), \sigma_2^2(t), \dots, \sigma_n^2(t) \}, \quad \mathbf{W} = \mathbf{K}^{-1},$$

Оцінка точності визначення поточних координат об'єкту здійснюється згідно формулі розрахунку матриці \mathbf{K}_{22} у (2.32).

Висновки до розділу 2

Запропоновано нові ефективні реалізації методів обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень.

1. В результаті проведених досліджень отримав розвиток і вдосконалення метод, заснований на підборі (оптимальної оцінки) рівня фазових спостережень щодо кодових за рахунок усереднення на інтервалі спостережень, і алгоритми комбінування диференціального кодового і фазового рішення. Запропонований

метод сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень враховує вплив «wind-up»-ефекту накручування фази, який проявляється при кінематичних вимірах в процесі еволюції рухомих об'єктів.

2. Запропонований метод комбінованого диференціального сумісного кодово-фазового рішення навігаційної задачі з одночасною оцінкою початкових фазових неоднозначностей (як континуальних змінних) та без безпосереднього здійснення операцій згладжування/фільтрації. Метод є найбільш ефективним для спільної обробки спостережень GPS+ГЛОНАСС так як враховує особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів ГЛОНАСС.

3. Розроблено метод сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень, що вирішує задачу точного кінематичного позиціонування, який дозволяє усунути варіаційні складові похибки рішення, суттєво зменшення вплив стрибків оцінок кодово-фазових рішень, обумовлених зміною робочого сузір'я супутників ГНСС, а також дозволяє зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженого» та диференціальних рішень.

3 МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТОЧНОСТІ КООРДИНАТНИХ ВИЗНАЧЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ГНСС ДАНИХ

3.1. Загальна структура та основні положення оцінки точності координатних визначень за даними ГНСС

Розглянемо методику оцінки точності диференціальної корегувальної інформації. Для рішення цієї задачі використовуються дані Європейського центру IGS (CODE IGS), зокрема, точні орбіти навігаційних супутників, точні корекції показань бортових годинників супутників, іоносферні затримки в вузлових точках (файли IONEX).

У разі контролю точності широкозонних диференціальних корекцій типу згідно стандарту DO-229C (для систем типу WAAS/EGNOS) методика оцінки точності диференціальної корегувальної інформації компенсації полягає в наступному.

Контроль точності ефемеридної та часової інформації навігаційних супутників полягає в наступному:

- 1) на підставі ефемеридної інформації, яка передається в реальному часі супутниками ГНСС, і коригувальної інформації, переданої функціональним доповненням, що контролюється, обчислюються координати навігаційних супутників і оцінки розбіжностей шкал часу кожного із супутників і шкали часу ГНСС; розрахункові значення формуються з темпом 1 с;
- 2) за даними, що містяться у файлах точних ефемерид і сформованими центром CODE, на часи оцінок координат і розбіжностей шкал часу супутників ГНСС обчислюються еталонні значення цих параметрів;
- 3) формуються різниці однойменних параметрів, сформованих по різним вихідним даним, і проводиться їхня статистична обробка;
- 4) отримані різниці порівнюються з даними про погрішності коригувальних виправлень, переданих у складі диференціальної коригувальної інформації;

5) формується висновок про якість коригувальних виправлень, сформованих диференціальним доповненням ГНСС.

Оцінка точності компенсації іоносферних похибки здійснюється шляхом порівняння оцінок іоносферних затримок, сформованих функціональним доповненням, та аналогічними значеннями, розрахованими по даним про загальну електронну концентрацію у вузлах іоносферної сітки, наданих IONEX у післясеансному режимі обробки.

Оцінка точності компенсації іоносферних похибки навігаційних вимірювань полягає в наступному:

- 1) дані по загальній електронній концентрації у вузлах іоносферної сітки, надані IONEX, перераховуються в оцінки іоносферних затримок; розрахункові значення формуються на моменти часу, на які функціональне доповнення ГНСС видає оцінки іоносферних затримок;
- 2) формуються різниці оцінок іоносферних затримок, сформованих по різним вихідним даним, і проводиться їхня статистична обробка;
- 3) отримані різниці порівнюються з даними про погрішності оцінок іоносферних затримок, переданих у складі цифрової інформації;
- 4) формується висновок про якість іоносферних коригувальних виправлень, сформованих системою космічного навігаційного забезпечення України (СКНЗУ), або іншим диференціальним доповненням ГНСС.

У разі контролю точності формування інтегральних диференціальних корекцій згідно стандарту RTCM (для систем типу DGNSS) методика оцінки точності диференціальної корегувальної інформації полягає в наступному:

- 1) виконуються дії по обчисленню еталонних значень ефемеридних, часових, іоносферних та тропосферних складових похибки вимірювань;
- 2) формуються інтегральні диференціальні корекції для кожного навігаційного супутника, який спостерігається приймачем системи моніторингу якості навігаційного забезпечення;

- 3) формуються різниці оцінок диференціальних корекцій, сформованих по еталонним даним та по вихідним даним функціонального доповнення, що контролюється, проводиться статистична обробка отриманих різниць;
- 4) формується висновок про якість диференціальних корекцій функціонального доповнення, що контролюється.

Оцінка фактичної точності координатних визначень з використанням диференціальної коригувальної інформації проводиться для двох режимів роботи користувальницького GNSS-устаткування:

- ◆ для нерухомого приймача – статичний режим;
- ◆ для мобільного приймача – кінематичний режим.

При роботах у статичному режимі використовуються приймачі які забезпечують прийом корегувальної інформації. Вибір місць проведення експериментів, включаючи місця дислокації перманентних станцій моніторингу, здійснюється таким чином, щоб їхня щільність рівномірно покривала територію України для забезпечення найбільш об'єктивної оцінки якості навігаційних визначень [88, 98, 99].

У мобільному режимі роботи з оцінки точності координатних визначень повинні проводитись в регіонах розміщення перманентних станцій, що входять до складу IGS/EPN, чи в інших місцях після попереднього розміщення там базових станцій і прив'язки їх координат.

Для реалізації методики оцінки фактичної точності координатних визначень з використанням диференціальної коригувальної інформації використовуються спеціальні програмні продукти, такі як PEGASUS (комплексне рішення задач моніторингу диференціальних функціональних доповнень ГНСС), Eclayr (GMV) та GrafNav/GrafNet, GAMIT Globk для визначення еталонних координат та траєкторій руху об'єктів.

Програмний комплекс GAMIT Globk забезпечує дуже високу точність координатних визначень при обробці супутникових спостережень. Але він зорієнтований на рішення задач геодинамічного моніторингу і не пристосований для обробки коротких сеансів спостережень або інформації приймачів, що рухаються.

Програмне забезпечення GrafNav/GrafNet являє собою могутній пакет програм, призначений для обробки спостережень в кінематичному режимі (рухомі об'єкти) з метою одержання точності визначення координат на рівні 1 см і вище при наявності однієї або кількох базових станцій.

Для аналізу якості корегувальної інформації, яку надають функціональні доповнення ГНСС, точності координатних визначень, отриманих з її використанням у різних режимах експлуатації, у цей час в країнах ЄС у найбільшій мірі використовується програмний комплекс PEGASUS, створений з ініціативи Євроконтролю в рамках програм GNSS Programme і European Air Traffic Management Programme. Цей комплекс призначений для обробки спостережень навігаційних приймачів, коригувальної інформації SBAS та GBAS і даних цілісності.

Реалізуються два режими обробки результатів спостережень (оцінка координат користувальницького приймача) [126, 127]:

- ◆ координати визначаються в реальному часі – обробка здійснюється безпосередньо в ГНСС-приймачі;
- ◆ координати визначаються в режимі післясеансної обробки – обробка здійснюється в обчислювальному центрі з використанням коригувальної інформації, зареєстрованої в ході сеансу спостережень. Така схема обробки реалізується для приймачів, що працюють у статичному режимі.

З використанням приймачів, що забезпечують прийом сигналів диференціальних функціональних доповнень ГНСС, оцінка точності координатних визначень у статичному режимі проводиться за наступною методикою:

- 1) приймач переключається в режим формування і видачі координат з використанням коригувальної інформації;
- 2) в ході сеансу спостережень здійснюється запис на зовнішній накопичувач результатів координатних визначень і "сирої" виміральної інформації;
- 3) з використанням "сирої" інформації приймача, що використовувався в експерименті, і відповідної інформації мережі перманентних станцій у післясеансному режимі визначаються координати фазового центра антени в

системі координат WGS-84 (для ГНСС приймачів, що не входять до складу перманентних станцій) – формуються еталонні значення координат;

- 4) обчислюється різниця між оцінками координат, сформованими приймачем автономно, і еталонними координатами приймача;
- 5) проводиться статистична обробка результатів;
- 6) з використанням даних, переданих диференціальною підсистемою, визначаються вертикальний (VPL) і горизонтальний (HPL) захисні рівні;
- 7) проводиться порівняння результатів статистичної обробки результатів координатних визначень зі значеннями VPL і HPL.

Для приймачів, задіяних у експериментах і у яких не реалізована функція прийому диференціальної корегуючої інформації (ДКІ) у передбаченому функціональним доповненням форматі, оцінка точності координатних визначень у статичному режимі проводиться за наступною методикою:

- 1) в ході сеансу спостережень здійснюється запис на зовнішній накопичувач "сирої" інформації;
- 2) с використанням "сирої" інформації приймача, що використовувався в експерименті, і відповідної інформації мережі перманентних станцій у післясеансному режимі визначаються координати фазового центра антени в системі координат WGS84 (для ГНСС приймачів, що не входять до складу перманентних станцій) – формуються еталонні значення координат;
- 3) проводиться післясеансна обробка інформації з використанням диференціальної корегувальної інформації, зареєстрованої приймачем, що забезпечує прийом корегувальної інформації, на тому же часовому інтервалі;
- 4) обчислюється різниця між оцінками координат, сформованими приймачем автономно і еталонними координатами приймача;
- 5) проводиться статистична обробка результатів;
- 6) з використанням даних, переданих диференціальною підсистемою, визначаються вертикальний (VPL) і горизонтальний (HPL) захисні рівні;

7) проводиться порівняння результатів статистичної обробки результатів координатних визначень зі значеннями VPL і HPL.

У кінематичному режимі (рухомий об'єкт) оцінка точності координатних визначень проводиться за методикою, яка в цілому подібна методиці оцінки точності в статичному режимі. Відмінності полягають у тім, що еталонні координати мобільного приймача визначаються в післясеансному режимі з використанням режиму кінематичної обробки інформації мобільного приймача і базової станції.

За результатами обробки й аналізу вимірювальної інформації, отриманої в ході всіх експериментів оцінюється залежність точності координатних визначень користувачів.

Для визначення оцінок точності, цілісності та доступності навігаційного забезпечення по сигналах ГНСС та їх диференціальних доповнень використовуються двовимірні гістограми цілісності-доступності-точності, запропоновані спеціалістами Стенфордського університету, широко відомі як Стенфордські графіки, тому що ці графіки представляють інтегральні характеристики якості навігаційної системи.

Стенфордські графіки створюються з використанням програмного забезпечення PEGASUS, Eclayr, GrafNav/GrafNet (або GAMIT Globk) та власного допоміжного програмного забезпечення, яке забезпечує необхідне перетворення форматів корегувальної інформації.

Ці графіки формуються окремо для горизонтальної і вертикальної компонент похибки визначення координат. На горизонтальній осі позначається величина модуля дійсної похибки визначення координат (у метрах), що була отримана в результаті рішення навігаційної задачі (різниці отриманих координат і їхнього еталонного значення). На вертикальній осі для кожного отриманого рішення навігаційної задачі позначається величина відповідного обчисленого захисного рівня (також у метрах). Таким чином, пара (дійсне значення відхилення обчислених координат від еталону; відповідний захисний рівень) формує точку на даній координатній площині. Координатна площина кантується – ділиться на клітинки

(одиниці дискретності) визначеного розміру, і колір кожної такої клітинки визначається загальною кількістю точок (похибка координат; захисний рівень), сформованих в ході обробки сенсу навігаційних вимірів, що потрапили в її межі.

Виконується наступний аналіз отриманих графічних результатів. Якщо точки Стенфордського графіка розташовані вище прямої, яка визначає захисний рівень, то це свідчить про високу якість навігаційного забезпечення (захисний рівень перевищує дійсну похибку координат). Епохи, яким відповідають точки, розташовані нижче цієї прямої, ідентифікуються як епохи з оманливою інформацією: дійсна похибка координат перевищує захисний рівень, який, за визначенням, має бути верхньою границею для неї.

Точки Стенфордського графіка, які розташовані вище горизонтальної прямої рівня тривоги (для них захисний рівень перевищує рівень тривоги) означають втрату доступності навігаційної інформації або навіть втрату безперервності навігаційного забезпечення. Інформація навігаційної системи, що відповідає цим епохам, помічається як така, що не може використовуватися для визначення координат.

Точки Стенфордського графіка, які розташовані нижче діагоналі графіка і одночасно правіше вертикальної прямої рівня тривоги (для них захисний рівень менший, ніж рівень тривоги, але дійсна похибка визначення координат перевищує рівень тривоги) означають втрату цілісності. Такі епохи ідентифікуються як епохи з небезпечно оманливою інформацією.

Кількісні оцінки необхідних характеристик (цілісність, доступність, безперервність) якості навігаційних визначень надаються програмою PEGASUS.

Дійсна похибка визначення координат повинна завжди бути менша захисного рівня. Будь-яке порушення цього правила розглядається як несправність у роботі навігаційної системи.

На Стенфордських графіках для горизонтальної і вертикальної визначається компонент похибки визначення координат. У цих графіках розмір одиниці дискретності координатної площини складає 0.125 x 0.125 м, а логарифмічна шкала залежності одиниці дискретності від кількості точок, що потрапили в її межі.

Крім того, на Стенфордських графіках позначається рівень тривоги – відповідно до виду графіка, горизонтальний або вертикальний: Horizontal Alarm Limit (HAL) або Vertical Alarm Limit (VAL). Рівень тривоги визначається як межа, що відділяє припустимі значення похибки обчислених координат від неприпустимих, і відображається на графіках у вигляді горизонтальної і вертикальної прямих. Значення рівня тривоги залежить від вимог до точності визначення координат, що існують для кожної конкретної категорії споживачів навігаційного забезпечення [97, 103].

3.2. Методика аналізу і оцінки якості вимірювальної ГНСС-інформації

Аналіз якості вимірювальної інформації проводиться в наступному порядку:

1. У місці розміщення антен ГНСС проводиться візуальний огляд місцевості для виявлення потенційних факторів, які можуть негативно впливати на якість сигналів ГНСС:

– антени передавачів, ретрансляторів, телевізійних вишок, а також високовольтні ЛЕП, службові джерела радіовипромінювання і потенційно здатні перешкодити прийому сигналів ГНСС;

– великі ділянки радіовідображаючих поверхонь, які можуть стати джерелами перевідбиття сигналів ГНСС, і, як наслідок, наявністю інтерференції і підвищеного рівня багатопроміневості сигналів;

– перешкоди прийому сигналів ГНСС, кути закриття супутників.

2. Двочастотний ГНСС-приймач з антеною розміщують у місці тестового дослідження, проводиться реєстрація сеансу вимірювань тривалістю не менше 12 год, за період проведення сеансу вимірювань необхідно забезпечити прийом сигналів ГНСС з усіх можливих напрямків по азимуту і куту місця;

3. Проводиться детальний аналіз вимірювальної інформації зареєстрованого сеансу вимірювань в форматі RINEX.

Аналізуються наступні характеристики сеансу вимірювань:

- стан робочого сузір'я ГНСС;
- співвідношення «сигнал / шум» сигналів ГНСС на частотах L1 і L2;
- кількість фазових «сліпів»;

- рівень багатопроміневості навігаційних спостережень на частотах L1 і L2.

4. Спостережуване робоче сузір'я ГНСС порівнюється з планованим сузір'ям, розрахованим за даними альманаху на час і місце проведення сеансу вимірювань. У разі, якщо реально бачимо сузір'я не збігається з плановим, виявляються ймовірні причини розбіжності (недостатня кількість каналів приймача, низькі кути місця спостережуваних супутників, низький рівень сигналів, обмеження на шляху поширення сигналів, зриви стеження, і т.д.).

5. Розраховується рівень багатопроміневості навігаційних спостережень, будуються графіки і карта багатопроміневості та виявляються можливі джерела виникнення підвищеного рівня багатопроміневості, в разі можливості, намічаються шляхи для її зниження (наприклад, усунення джерел перевідбиття сигналів, перенесення антени в інше місце і т. д.).

При аналізі якості вимірювальної інформації використовуються наступні програмні засоби:

1) TEQC (Translation, Editing and Quality Checking) - спеціалізована утиліта, розроблена і підтримувана UNAVCO (<https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>), призначена, в тому числі, для аналізу якості вимірювальної інформації. У режимі оцінки якості вимірювань програма TEQC на основі RINEX-файлів формує файли звіту, де міститься вся необхідна для оцінки якості інформація. Для візуалізації даних, які видаються утилітою TEQC, використовується розроблене спеціалізоване програмне забезпечення.

2) Багатофункціональний програмно-алгоритмічний комплекс (ПАК) ОСТАВА_РРА спільної розробки ХНУРЕ і ГАО НАНУ, призначений для обробки ГНСС-спостережень.

3) Програма планування сеансу спостережень за даними альманаху ГНСС.

Для аналізу якості вимірюваної ГНСС-інформації наводяться наступні види графіків:

- інтервали видимості спостережуваних супутників;
- кількість супутників – залежність кількості спостережуваних супутників від часу;

- кути місця супутників - залежність кутів місця прийнятих супутників від часу;
- «карта неба» - в полярній системі координат (азимут, кут місця) відображені траєкторії руху прийнятих супутників;
- рівні багатопроміневості - в полярній системі координат (азимут, кут місця) відображені траєкторії руху прийнятих супутників; колір точки відповідає рівню багатопроміневості.

3.2.1 Короткий опис використаного вітчизняного комплексу програмно-алгоритмічного забезпечення ОСТАВА обробки GPS спостережень

Базовий вітчизняний програмно-алгоритмічний комплекс (ПАК) «ОСТАВА» розроблений та протестований співробітниками ХНУРЕ і Головної астрономічної обсерваторії НАН України (ГАО НАНУ) у 2002–2018 рр. та опублікована авторами даного програмного комплексу в ряді наукових публікацій.

ПАК «ОСТАВА», дозволяє здійснювати обробку статичних/кінематичних GPS-спостережень і виконувати традиційне та мережеве позиціонування сантиметрового рівня точності в одночастотному і двочастотному режимах. Він призначений для інтерактивної роботи в обробних центрах і виконання попередньої обробки («пре-процесінгу»), аналізу первинних «сирих» GPS-спостережень, формування диференціальних мережевих корекцій і точного визначення місцеположення в режимі послесансної обробки.

ПАК «ОСТАВА» функціонує в середовищі програмування MatLab і складається з трьох взаємопов'язаних частин – «ОСТАВА_PPA», «ОСТАВА_AR & POS», «ОСТАВА_IONO». Комплекс «ОСТАВА_PPA» призначений для попередньої обробки («пре-процесінгу») GPS-спостережень і є фундаментом для подальших стадій обробки. Рішення завдань розв'язання фазових неоднозначностей (РФН) і точного позиціонування виконує другий комплекс – «ОСТАВА_AR & POS». Третій комплекс, «ОСТАВА_IONO» (2013-2015 рр.), вирішує завдання побудови регіональної моделі повного електронного вмісту іоносфери високої точності з використанням двочастотних фазових спостережень в мережах перманентних GPS-станцій. Ця технологія, що включає ряд інновацій, на

даний момент має значні переваги відносно зарубіжних аналогів, є альтернативою існуючим підходам і може бути використана в багатопозиційних системах SBAS широкозонної (Wide Area Differential) ГНСС-навігації, а також для удосконалення технологій PPP точного автономного позиціонування .

Комплекс «ОСТАВА_PPA» включає процедури, необхідні для виконання багатьох операцій обробки «сирих» GPS-спостережень, що передують основним процедурам позиціонування. Сукупності таких операцій отримали назву «попередньої обробки і аналізу» (від англ. «Pre-processing-and-analysis» або скорочено, PPA). Зокрема, ПК «ОСТАВА_PPA» призначений для виконання наступних основних операцій:

- ◆ перетворень вхідних даних до внутрішнього формату з одночасним контролем вхідних даних на відповідність використовуваним форматам;
- ◆ контролю і забезпечення якості спостережень (усунення аномалій, контроль рівня шуму і наслідків множинного поширення сигналу, швидкості дрейфу опорного генератора приймача і т.д.) і ефемеридно-часової інформації супутників ГНСС;
- ◆ пошуку, оцінки та усунення циклічних/напівциклічних фазових стрибків одночастотних або двочастотних GPS-спостережень;
- ◆ корекції шкал часу приймачів, контролю геометричних умов спостережень і параметрів якості рішення навігаційної задачі та ін.;
- ◆ аналізу результатів попередньої обробки даних і візуалізації контрольних параметрів з висновком про придатність спостережень до подальшої обробки.

Метою попередньої обробки є створення «очищених» і відредагованих масивів спостережень мереж базових станцій і споживачів, які в подальшому можуть використовуватися для точного позиціонування. Важливою складовою комплексу є контроль якості спостережень на всіх етапах попередньої обробки. У 2009-2010 рр. була створена друга версія комплексу «ОСТАВА_PPA», яка дозволила значно розширити його функціональні можливості.

Подальший розвиток передбачає вдосконалення існуючих, створення і впровадження нових методів і алгоритмів попередньої обробки і аналізу спостережень. Так, у 2011-2012 рр. були розроблені і протестовані новий ефективний метод і алгоритми виявлення і усунення фазових стрибків кінематичних спостережень, які дозволяють отримати надійне рішення при частковій короткочасній втраті спостережень супутників поточного сузір'я.

Комплекс «ОСТАВА_AR & POS» використовує вихідні дані ПАК «ОСТАВА_PPA», здійснює рішення низки допоміжних завдань і фінального завдання – точного позиціонування. Цей комплекс включає сукупність програмних модулів, головними з яких є:

- ◆ зчитування іоносферних карт IGS, отриманих за допомогою Internet, і подальший розрахунок трендової складової іоносферних затримок за глобальною моделлю GIM IONEX (IGS);
- ◆ отримання попереднього рішення навігаційної задачі (статичного або кінематичного) підвищеного рівня точності;
- ◆ виконання РФН (дво- або одночастотних спостережень, в статичному або кінематичному режимах); верифікація (контроль якості) РФН;
- ◆ розрахунок тропосферних затримок за допомогою модифікованої моделі MOPS (RTCA DO-229D) та оцінка зенітних тропосферних затримок (ЗТЗ) за фазовими спостереженнями на базовій лінії або для мережі станцій;
- ◆ оцінка лінійних комбінацій іоносферних затримок («geometry-free»);
- ◆ формування мережових диференціальних корекцій і їх урахування в спостереженнях;
- ◆ виконання координатно-часових визначень (позиціонування) з використанням всіх отриманих раніше корекцій без оцінки і з оцінкою додаткових параметрів оточення (наприклад, параметрів моделі іоносферних варіацій, ЗТЗ і ін.);
- ◆ оцінка точності отриманих рішень.

У 2014-2018 рр. особлива увага приділялася вирішенню завдань створення і експериментальних досліджень алгоритмів обробки і аналізу бортових космічних

GPS-спостережень для високоточного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів (КА) і подальшого моделювання повного електронного вмісту іоносфери. В ході експериментальних досліджень з використанням бортових GPS-вимірювань зарубіжних низькоорбітальних КА COSMIC і GRACE показано досягнення дециметрової точності визначення поточних координат КА при реалізації методу PPP (Precise Point Positioning) точного автономного (недиференціального) позиціонування на інтервалах спостережень $\sim 0,5\text{--}2$ години. Надалі на основі даних досліджень планується створення додаткового комплексу «OCTAVA_PPP-LEOS», призначеного для визначення параметрів руху низькоорбітальних КА (висоти орбіт $\sim 300\text{--}1500$ км) з субдециметровою/сантиметровою точністю.

Вітчизняний комплекс «OCTAVA», який був розроблений і розвивається, і який функціонує в середовищі програмування MatLab, не має аналогів в Україні, є унікальним науково-технічним продуктом багаторічної розробки і досліджень. Цей комплекс дозволив виконати цілий ряд актуальних науково-практичних досліджень в галузі розробки нових ефективних методів і алгоритмів точного позиціонування і є науковим і практичним інструментом. Створені технології двочастотного і одночастотного позиціонування сантиметрової точності є конкурентоспроможними, порівнянними за основними характеристиками з кращими закордонними аналогами в класі програмних продуктів для післясеансної обробки.

3.3 Методика аналізу і оцінки точності позиціонування з використанням еталонних значень оцінюваних інформаційних параметрів

Для відпрацювання і натурного тестування запропонованих алгоритмів і процедур обробки ГНСС-спостережень були використані реальні статичні і кінематичні спостереження при проведенні геодезичних робіт і спостереження базових станцій перманентних мереж.

Тестування і дослідження розроблених процедур обробки вимірювань виконувалися за такою методикою.

1) Використовувані спостереження піддаються попередній обробці з використанням програмно-алгоритмічного забезпечення (ПАЗ) «OSTAVA_PPA» [62], яке дозволяє оцінити якість використовуваних кодових і фазових спостережень, усунути циклічні фазові скачки, відновити безперервність фазових спостережень.

2) Виконується обробка спостережень і визначаються високоточні (з сантиметровою точністю) еталонні оцінки координат кінематичних об'єктів, станцій і роверного пунктів з використанням апробованого в багатьох країнах світу протягом останніх двох десятиліть ліцензійного ПЗ «GrafNav/GrafNet» (NovAtel Inc./ Waypoint, Канада) [62].

3) Для кожного сеансу спостережень роверного приймача і референсних станцій виконується їх повна обробка з використанням розроблених методів, а саме діє таким чином:

- обробка ГНСС-спостережень з використанням наступних алгоритмів:
 - «Hatch» -фільтр з постійною часу 100 с [40-42, 71];
 - метод 1;
 - метод2;
- обробка спостережень проводилася для інтервалів часу 300, 900, 1800 с;
- рішення навігаційної задачі з використанням «згладжених» кодових ГНСС-спостережень, обчислення залишків – різниць між вимірюваними параметрами і обчисленими за оцінками рішення НЗ, обчислення середнього і дисперсії залишків.

Для компенсації іоносферної складової похибок використовуються моделі Кlobuchar і GIM IONEX [59, 60]. Для компенсації тропосферної складової похибок використовується модель MOPS [56, 57].

4) Виконується обчислення відхилень (нев'язань) отриманого рішення від еталонного з розрахунком статистичних характеристик відхилень отриманого рішення від еталонного рішення.

Критеріями якості проведених розробок і досліджень - точності координатних визначень з використанням розроблених процедур обробки ГНСС-спостережень, як впливає з викладеного, є:

– статистичні характеристики відхилень отриманих рішень від еталонних і їх відповідність світовим досвідом;

– статистичні характеристики залишків – різниць між вимірюваними параметрами і обчисленими за оцінками рішення НЗ.

При цьому оцінювалися такі статистичні характеристики:

– середнє значення по кожному набору координат $m_x = \frac{1}{n} \sum y_i$;

– середньоквадратичне відхилення від середнього $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (y_i - m_x)^2}$;

– середньоквадратична похибка (СКП/RMS) $\bar{\sigma} = \sqrt{(m_x^2 + \sigma^2)}$.

3.4 Вихідні дані і формування еталонних значень оцінюваних параметрів.

В ході досліджень для обраних сеансів вимірювань виконана обробка і були отримані високоточні (з сантиметровою точністю) еталонні оцінки координат кінематичних об'єктів, станцій і роверного пунктів з використанням ліцензійного ПЗ «GrafNav / GrafNet» (NovAtel Inc./ Waypoint, Канада).

Для виконання експериментальних досліджень використовувалися набори ГНСС-спостережень, отримані в рамках проведення спільних експериментів Національного авіаційного університету (НАУ) з Головною астрономічною обсерваторією НАН України (ГАО НАНУ) в 2008 році [63] і в рамках проведення проекту EEGS FP7 ГАО НАНУ у 2011 році [65].

Як приклад обробки кінематичних спостережень, наведені результати обробки вимірювань, виконаних на борту вертольота (за 179-е GPS-добу 2006 року). Обробка виконана на ділянці вимірювань зі зміною видалення повітряного судна (ПС) від базової станції від 35 м до 22 км (рис. 3.1). Для обробки наземної кінематичної траєкторії використовувалися спостереження, отримані в рамках проведення експериментів в 2008 році.

Як приклад обробки статичних спостережень наведені результати координатного рішення для наземних статичних пунктів, віддалених від БС на відстані 3 м і 75 км.

Пункт 0006 (приймач NovAtel DL-4, смт Бобровиця) був розгорнутий поза трикутником «Київ- Сміла- Прилуки». На пункті проведена статична сесія.

Пункт 0001 (приймач NovAtel DL-V3, смт Остер) був розгорнутий в південному трикутнику «Київ-Сміла-Прилуки». На пункті проведена статична сесія і кінематична сесія (рис. 3.2).

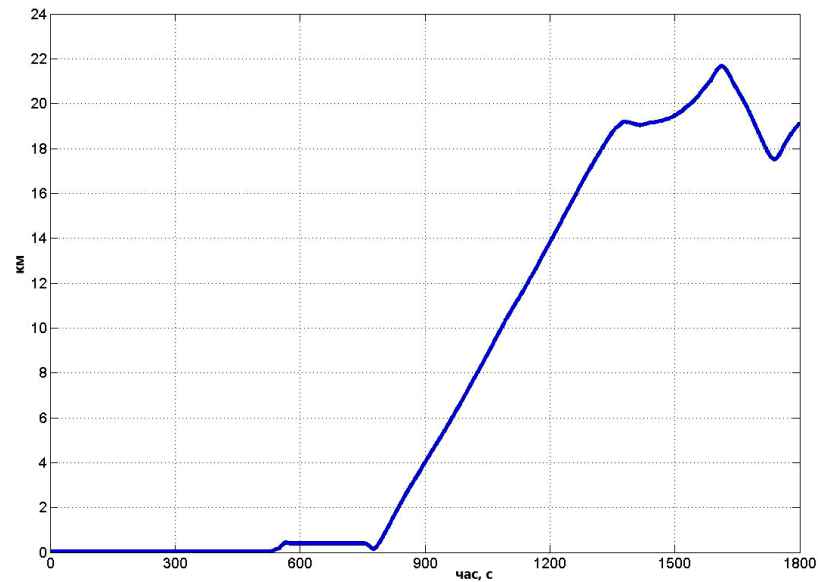


Рисунок 3.1 Віддалення ПС відносно наземної базової станції

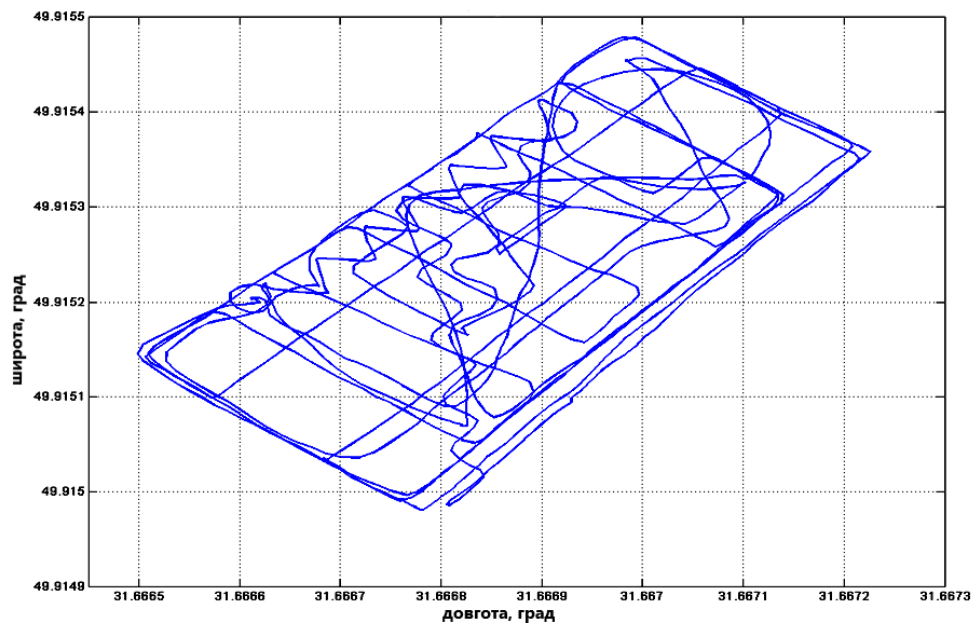


Рисунок 3.2 Еталонна траєкторія руху наземного роверного приймача

Пункт 073 (приймач NovAtel DL-V3, Київ) було розгорнуто в безпосередній близькості від базової станції GLSV (Київ, Голосієво) при проведенні статичних експериментів в рамках проекту FP7 EEGS.

Для обробки статичних спостережень використовувався пакет «GrafNet». Була виконана координатна прив'язка статичних приймачів щодо перманентних станцій мережі України. Обробка кінематичних спостережень проводилася з використанням ПЗ «GrafNav».

Для прикладу, в табл. 3.1 наведені еталонні оцінки координат фазових центрів антен на частоті L1 GPS для станцій і роверного пунктів, а в табл. 3.2 наведені довжини базових ліній між пунктами мережі.

Як приклад обробки спостережень GPS/ГЛОНАСС наведені результати обробки базової станції PRYL (Прилуки) щодо станції GLSV (Київ). Видалення між станціями становить ~137,5 км. Були виконані координатні визначення з використанням окремо GPS-спостережень, ГЛОНАСС-спостережень і виконано спільне GPS+ГЛОНАСС рішення [89, 90, 97, 101].

Таблиця 3.1

Координати фазових центрів антен на частоті L1 для станцій і роверного пунктів

Пункт	Координати ECEF XYZ	X, м	Y, м	Z, м
GLSV		3512888.9382	2068979.9650	4888903.2969
PRYL		3425673.1824	2174035.4809	4904999.9735
0001		3502498.7734	2160368.7961	4856832.0808
0006		3452744.1373	2106256.8263	4915492.4872
073		3512887.8940	2068982.6405	4888902.2935
BC Vert		3665379.6710	2000683.6411	4805355.7300

Таблиця 3.2

Довжина базових ліній, км

	GLSV	PRYL	0001
PRYL	137.5		
0001	97.4	91.7	
0006	75.6	73.7	94.0

Висновки до розділу 3

Запропоновано методику апостеріорної оцінки точності запропонованих методів обробки ГНСС-спостережень та позиціонування з використанням диференціальної корегувальної інформації. Оцінка фактичної точності координатних визначень проводиться для двох режимів роботи користувальницького ГНСС-устаткування: для нерухомого приймача – статичний режим; для мобільного приймача – кінематичний режим.

Критеріями якості проведених розробок і досліджень – точності координатних визначень з використанням розроблених методів, алгоритмів і експериментального ПАЗ обробки ГНСС-спостережень є:

- статистичні характеристики відхилень отриманих рішень від еталонних і їх відповідність світовим аналогам;
- статистичні характеристики залишків – різниць між вимірюваними параметрами і обчисленими за оцінками рішення навігаційної задачі.

4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ТА ЇХ ВЕРИФІКАЦІЯ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕАЛЬНИХ ДАНИХ

В даному розділі представлені результати натурних координатних визначень з використанням статичних і кінематичних вимірювань і порівняльний аналіз результатів використання досліджуваних алгоритмів обробки спостережень.

4.1 Обробка статичних вимірювань

Для обробки спостережень станції GLSV (м. Київ), роверів 073 і 0006 був обраний період часу, який не містить перерв у вимірах за всіма сеансами, тривалістю від 300 с до 1800 с. Сеанси вимірювань містять дані для супутників з кутами піднесення понад 10° . Для всіх інтервалів використовувалися супутники з одними і тими ж номерами [105, 110, 111, 113, 114].

В процесі обробки визначалися координати фазового центру антени роверного приймача, потім розраховувалися нев'язання отриманих рішень з еталонними координатами в геодезичних координатах (в площині горизонту ΔB , ΔL і по висоті ΔH) і в прямокутних координатах ΔX , ΔY , ΔZ , далі обчислювалися статистичні характеристики. Обробка всіх наборів спостережень проводилася з використанням моделей іоносферної затримки Klobuchar і GIM IONEX [58, 59]. Для компенсації тропосферного складової похибок використовується модель MOPS [56, 57].

Нижче, в таблицях 4.1-4.5 наведені статистичні характеристики відхилень при обробці статичних вимірювань, а на рис. 4.3, 4.4 наведені результати координатних визначень для пунктів 073 і 0006.

Таблиця 4.1

Статистичні характеристики координатного рішення пункт 073 інтервал 300 с

Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод 1»			«Float»-метод 2		
	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	-0,079	0,051	0,093	-0,113	0,004	0,113	0,019	0,002	0,019
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	0,004	0,036	0,036	-0,009	0,002	0,009	0,030	0,002	0,030
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,087	0,196	0,214	-0,101	0,003	0,101	0,070	0,003	0,070
$\Delta B_{\text{середнє}}$	0,109	0,109	0,154	0,017	0,003	0,017	0,023	0,002	0,023
$\Delta L_{\text{середнє}}$	0,043	0,018	0,047	0,050	0,003	0,050	0,016	0,001	0,016
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,029	0,173	0,176	-0,139	0,003	0,139	0,078	0,003	0,078

Таблиця 4.2

Статистичні характеристики координатного рішення пункт 073 інтервал 900 с

Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод 1»			«Float»-метод 2		
	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	-0,014	0,111	0,112	0,001	0,005	0,005	-0,069	0,002	0,069
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	-0,028	0,076	0,081	-0,040	0,002	0,040	0,021	0,002	0,021
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	-0,012	0,203	0,203	-0,097	0,007	0,097	0,042	0,004	0,043
$\Delta B_{\text{середнє}}$	0,016	0,107	0,108	-0,044	0,007	0,044	0,068	0,002	0,068
$\Delta L_{\text{середнє}}$	-0,017	0,057	0,059	-0,035	0,003	0,035	0,053	0,002	0,053
$\Delta H_{\text{середнє}}$	-0,022	0,211	0,212	-0,083	0,004	0,083	0,005	0,004	0,007

Таблиця 4.3

Статистичні характеристики координатного рішення пункт 073 інтервал 1800 с

Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод 1»			«Float»-метод 2		
	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	0,063	0,165	0,176	0,066	0,003	0,066	-0,041	0,004	0,041
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	0,027	0,092	0,096	0,017	0,003	0,018	0,062	0,004	0,062
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	-0,031	0,190	0,193	-0,060	0,012	0,061	0,074	0,008	0,075
$\Delta B_{\text{середнє}}$	-0,069	0,101	0,122	-0,086	0,008	0,086	0,053	0,003	0,053
$\Delta L_{\text{середнє}}$	-0,008	0,092	0,092	-0,019	0,002	0,019	0,0745	0,002	0,075
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,023	0,231	0,232	-0,0003	0,010	0,010	0,059	0,009	0,059

Таблиця 4.4

Статистичні характеристики координатного рішення, пункт 0006 інтервал 300 с

Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод 1»			««Float»-метод 2		
	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	-0,006	0,159	0,159	0,181	0,006	0,181	-0,612	0,007	0,612
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	0,085	0,045	0,096	0,064	0,008	0,065	-0,412	0,022	0,413
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,096	0,104	0,141	0,401	0,023	0,401	-0,765	0,010	0,765
$\Delta B_{\text{середнє}}$	0,033	0,077	0,084	0,110	0,018	0,112	0,088	0,011	0,089
$\Delta L_{\text{середнє}}$	0,0754	0,093	0,120	-0,039	0,007	0,040	-0,033	0,018	0,038
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,102	0,153	0,183	0,432	0,015	0,432	-1,056	0,014	1,056

Таблиця 4.5

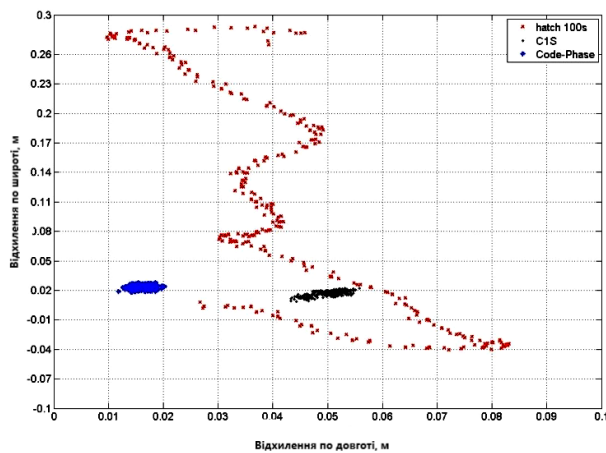
Статистичні характеристики координатного рішення, пункт 0006 інтервал 900 с

Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод 1»			«Float»-метод 2		
	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	0,023	0,115	0,117	0,103	0,033	0,108	-0,545	0,038	0,546
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	0,117	0,070	0,136	0,088	0,014	0,089	0,108	0,034	0,113
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,072	0,145	0,162	0,153	0,044	0,160	-0,538	0,075	0,543
$\Delta B_{\text{середнє}}$	-0,014	0,080	0,082	-0,004	0,026	0,026	-0,022	0,022	0,031
$\Delta L_{\text{середнє}}$	0,088	0,067	0,111	0,021	0,015	0,026	0,376	0,012	0,376
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,109	0,167	0,200	0,206	0,049	0,212	-0,673	0,088	0,679

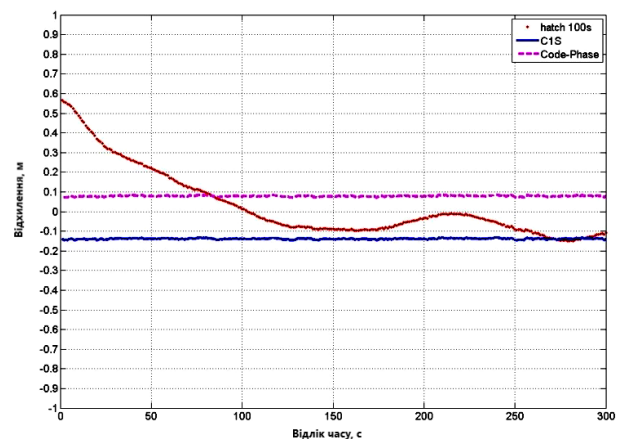
Таблиця 4.6

Статистичні характеристики координатного рішення, пункт 0006 інтервал 1800 с

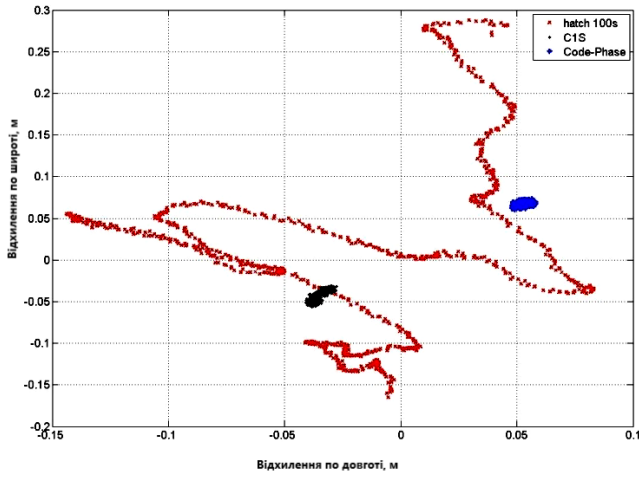
Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод 1»			«Float»-метод 2		
	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	0,035	0,106	0,111	0,096	0,030	0,100	-0,158	0,038	0,163
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	0,056	0,116	0,129	0,024	0,020	0,031	0,352	0,021	0,353
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,084	0,180	0,199	0,103	0,048	0,113	-0,217	0,084	0,233
$\Delta B_{\text{середнє}}$	0,010	0,099	0,099	-0,006	0,022	0,023	-0,172	0,030	0,175
$\Delta L_{\text{середнє}}$	0,030	0,102	0,107	-0,029	0,019	0,035	0,383	0,010	0,383
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,105	0,192	0,219	0,142	0,052	0,151	-0,135	0,089	0,162



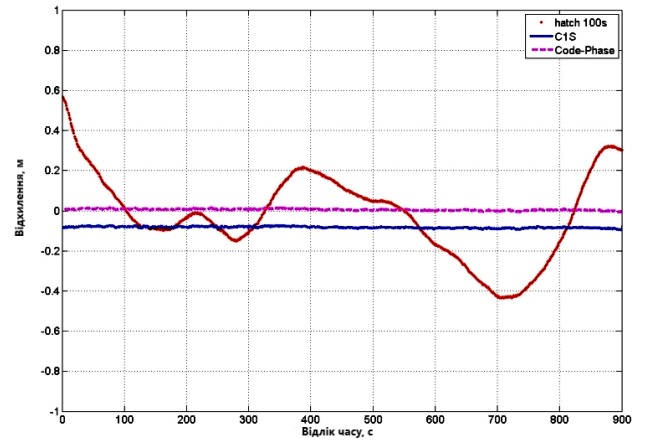
а)



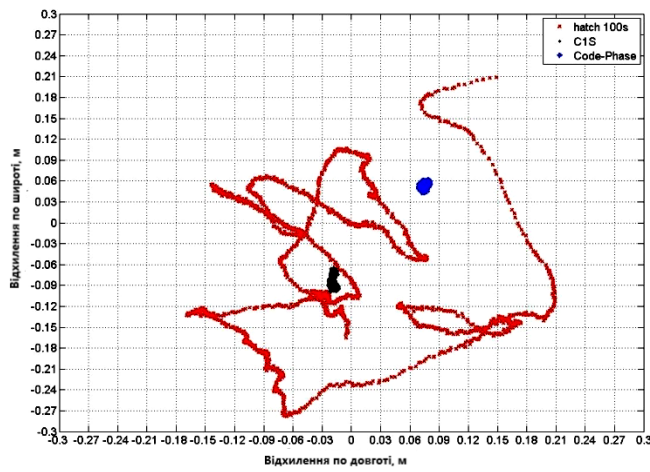
б)



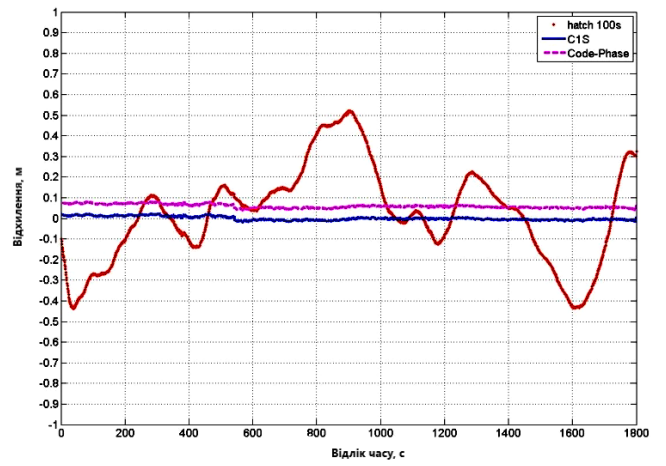
в)



г)

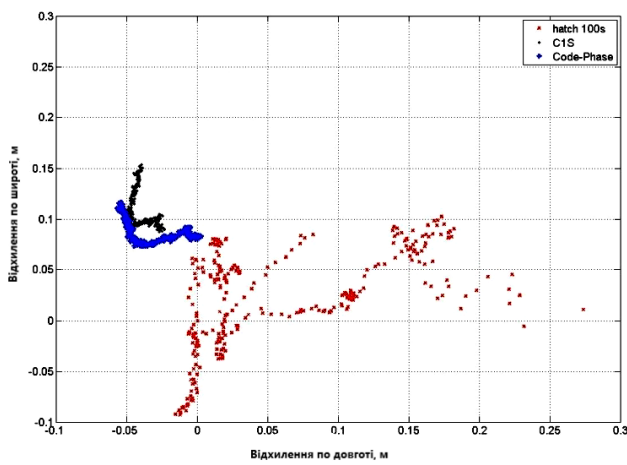


д)

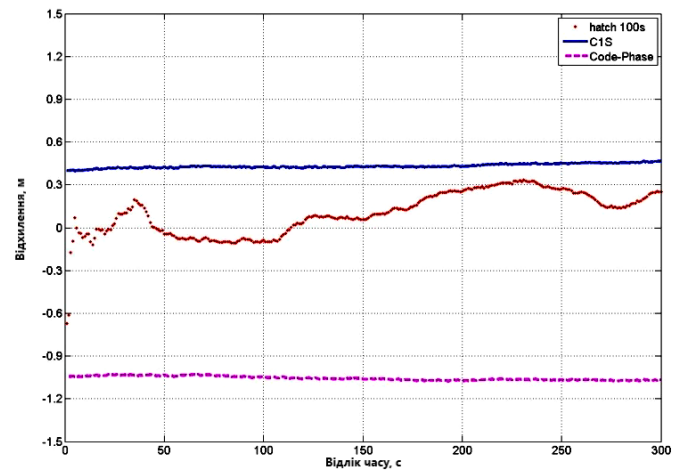


е)

Рисунок 4.1 Відхилення отриманого рішення по плановим координатами (а, в, д) і по висоті (б, г, д) при обробці інтервалів спостережень 5 хвилин (а, б), 15 хвилин (в, г) і 30 хвилин (д, е) при видаленні від базової станції 3 м



а)



б)

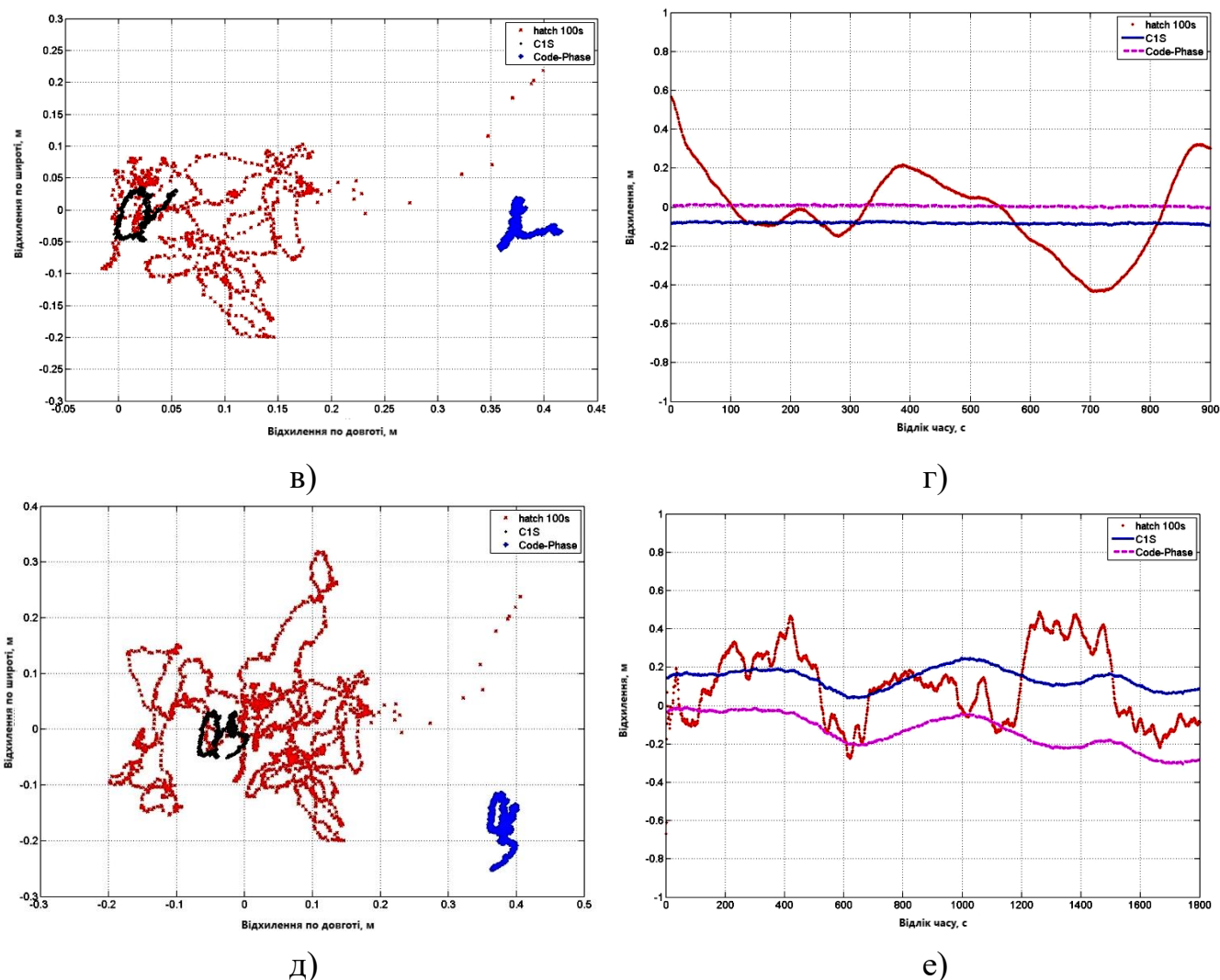


Рисунок 4.2 Відхилення отриманого рішення по плановим координатами (а, в, д) і по висоті (б, г, д) при обробці інтервалів спостережень 5 хвилин (а, б), 15 хвилин (в, г) і 30 хвилин (д, е) при видаленні від базової станції 75 км

4.2 Обробка кінематичних вимірювань

Для обробки спостережень ровера 0001 був обраний період часу, який не містить перерв у вимірах за всіма сеансами, тривалістю від 300 с до 1800 с. Сеанси вимірювань містять дані для супутників з кутами піднесення понад 10° . При обробці спостережень був використаний інтервал спостережень тривалістю 1800 с. За даний проміжок часу зміна видалення об'єкту від БС склало від 35 м до 22 км. Для всіх інтервалів використовувалися супутники з одними і тими ж номерами.

Обробка вимірювань проводилася за наступною методикою. Виконувалася обробка базових ліній «GLSV-0001», «Vert – 073» з урахуванням зміни часових інтервалів вимірювань. Обробка кінематичних вимірювань була проведена також

при використанні спостережень частот L1/L2 GPS (лінійна комбінація спостережень «Iono-Free»).

В процесі обробки визначалися координати фазового центру антени роверного приймача, потім розраховувалися нев'язання отриманих рішень з еталонними координатами в геодезичних координатах (в площині горизонту ΔB , ΔL і по висоті ΔH) і в прямокутних координатах ΔX , ΔY , ΔZ , потім обчислювалися статистичні характеристики похибок рішень. Обробка всіх наборів спостережень проводилася з використанням моделей іоносферної затримки Klobuchar і GIM IONEX. Для компенсації тропосферного складової похибок використовується модель MOPS [56, 57].

Нижче, в таблицях 4.7–4.12 наведені статистичні характеристики відхилень при обробці кінематичних вимірювань, а на рис. 4.3–4.7 наведені результати координатних визначень для роверів Vert і 0001.

Таблиця 4.7

Статистичні характеристики координатного рішення, ровер 0001 інтервал 300 с

Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод 1»			«Float»-метод 2		
	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	-0,092	0,164	0,188	-0,030	0,029	0,041	0,152	0,030	0,155
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	-0,124	0,069	0,142	-0,134	0,006	0,134	-0,346	0,006	0,346
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,026	0,160	0,162	0,130	0,028	0,133	-0,277	0,033	0,279
$\Delta B_{\text{середнє}}$	0,128	0,085	0,154	0,159	0,022	0,160	-0,136	0,023	0,138
$\Delta L_{\text{середнє}}$	-0,058	0,119	0,132	-0,098	0,015	0,100	-0,375	0,015	0,375
$\Delta H_{\text{середнє}}$	-0,070	0,189	0,202	0,040	0,030	0,050	-0,243	0,036	0,246

Таблиця 4.8

Статистичні характеристики координатного рішення, ровер 0001 інтервал 900 с

Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод 1»			«Float»-метод 2		
	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	-0,016	0,153	0,154	0,023	0,045	0,051	0,486	0,057	0,489
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	-0,051	0,094	0,107	-0,036	0,042	0,055	-1,267	0,035	1,267
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,098	0,183	0,207	0,074	0,051	0,090	0,829	0,096	0,835
$\Delta B_{\text{середнє}}$	0,096	0,099	0,138	0,049	0,045	0,067	0,729	0,049	0,730
$\Delta L_{\text{середнє}}$	-0,035	0,098	0,104	-0,042	0,046	0,062	-1,333	0,025	1,333
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,051	0,216	0,222	0,060	0,047	0,076	0,475	0,104	0,486

Таблиця 4.9

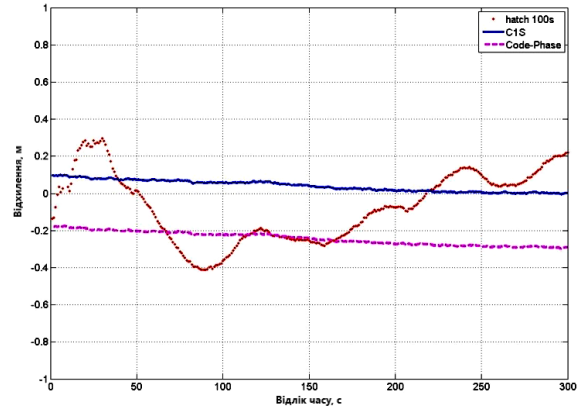
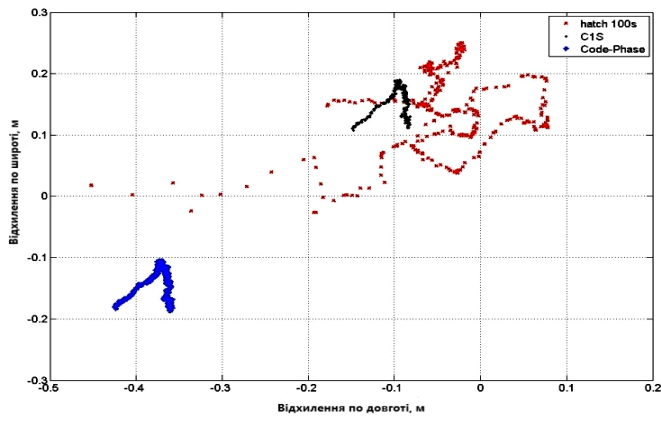
Статистичні характеристики координатного рішення, ровер 0001 інтервал 1800 с
при обробці одночастотних спостережень

Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод 1»			«Float»-метод 2		
	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	0,029	0,170	0,173	0,038	0,042	0,057	-0,574	0,039	0,576
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	-0,032	0,089	0,095	-0,015	0,044	0,047	-0,200	0,033	0,203
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,095	0,150	0,178	0,071	0,088	0,114	-0,262	0,087	0,276
$\Delta B_{\text{середнє}}$	0,057	0,100	0,115	0,030	0,047	0,055	0,288	0,049	0,292
$\Delta L_{\text{середнє}}$	-0,043	0,119	0,126	-0,033	0,038	0,050	0,131	0,034	0,135
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,080	0,188	0,204	0,072	0,089	0,115	-0,581	0,081	0,586

Таблиця 4.10

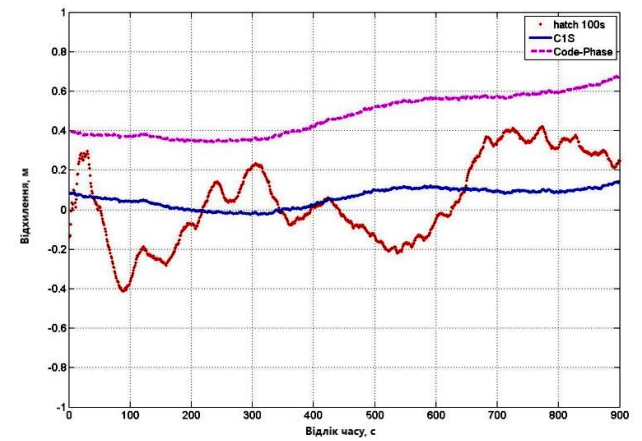
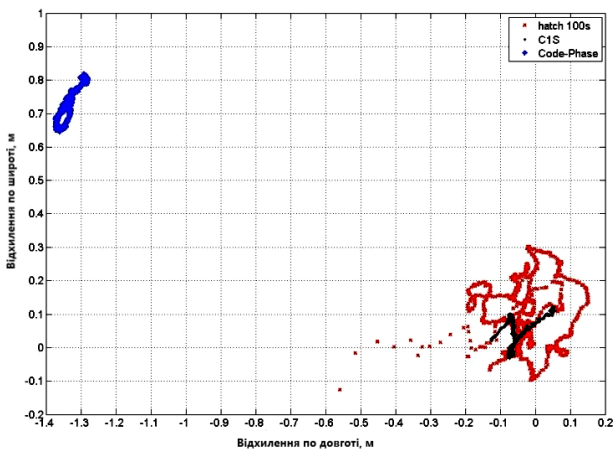
Статистичні характеристики координатного рішення, ровер 0001 інтервал 1800 с
при обробці двочастотних спостережень (лінійна комбінація «Ion-Free»)

Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод 1»			«Float»-метод 2		
	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$	m_x	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	-0,183	0,204	0,274	-0,145	0,028	0,147	-0,195	0,025	0,197
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	-0,117	0,149	0,189	-0,100	0,035	0,106	-0,112	0,021	0,114
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,393	0,254	0,468	-0,014	0,046	0,048	-0,035	0,014	0,037
$\Delta B_{\text{середнє}}$	0,421	0,186	0,461	0,127	0,018	0,128	0,152	0,013	0,152
$\Delta L_{\text{середнє}}$	-0,003	0,098	0,098	-0,009	0,034	0,035	0,007	0,028	0,028
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,163	0,290	0,333	-0,122	0,051	0,132	-0,169	0,018	0,170



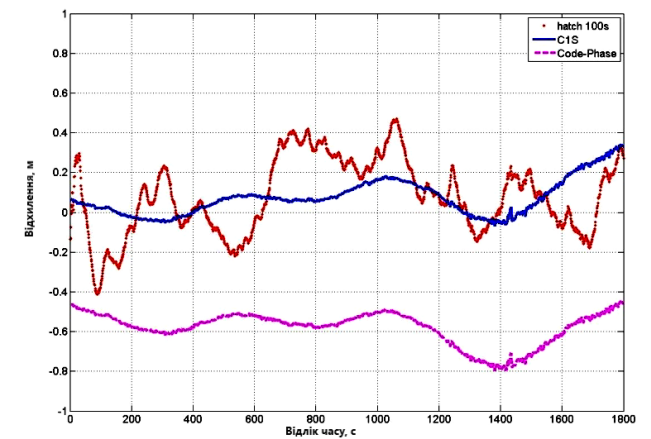
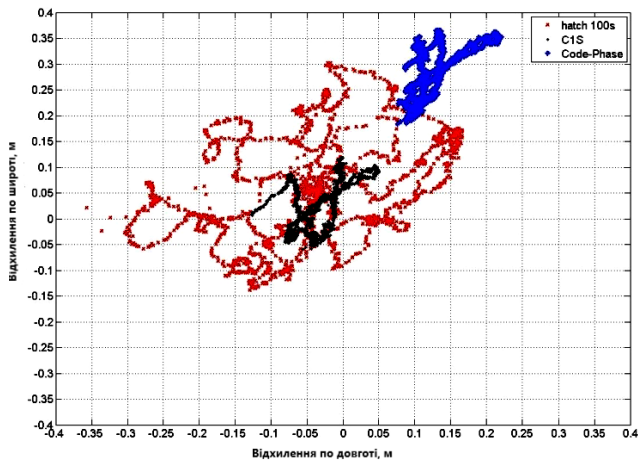
а)

б)



в)

г)



д)

е)

Рисунок 4.3 – Відхилення отриманого рішення по плановим координатами (а, в, д) і по висоті (б, г, е) при обробці інтервалів кінематичних спостережень 5 хвилин (а, б), 15 хвилин (в, г) і 30 хвилин (д, е) при видаленні від базової станції 97 км

Таблиця 4.11

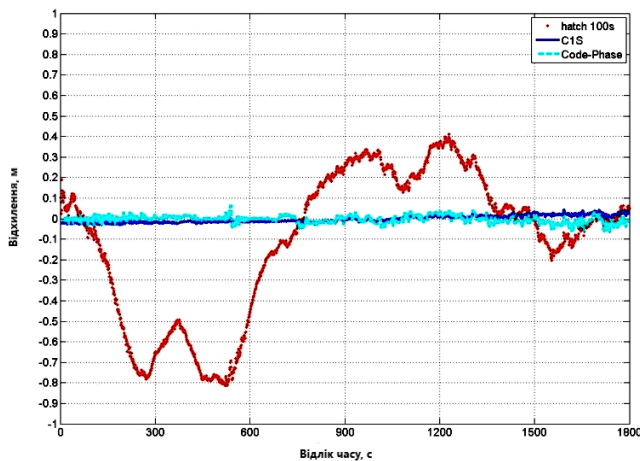
Статистичні характеристики координатного рішення, ровер Vert інтервал 1800 с
при обробці одночастотних спостережень

Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод1»			«Float»-метод2		
	m_X	σ	$\bar{\sigma}$	m_X	σ	$\bar{\sigma}$	m_X	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	0,158	0,433	0,461	0,142	0,032	0,146	0,004	0,018	0,018
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	0,175	0,389	0,427	0,157	0,045	0,163	0,080	0,019	0,082
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,117	0,194	0,226	0,178	0,083	0,196	0,007	0,026	0,027
$\Delta B_{\text{середнє}}$	-0,084	0,379	0,388	-0,027	0,028	0,039	-0,019	0,013	0,023
$\Delta L_{\text{середнє}}$	0,078	0,182	0,198	0,069	0,025	0,074	0,068	0,010	0,069
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,244	0,446	0,509	0,275	0,098	0,292	0,042	0,036	0,055

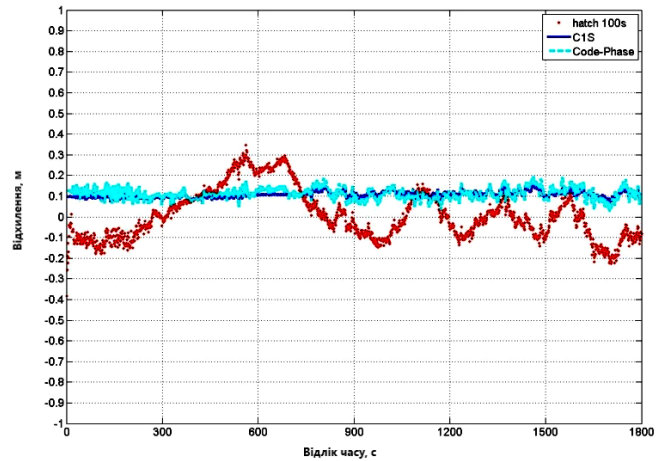
Таблиця 4.12

Статистичні характеристики координатного рішення, ровер Vert інтервал 1800 с
при обробці двохчастотних спостережень (лінійна комбінація «Iono-Free»)

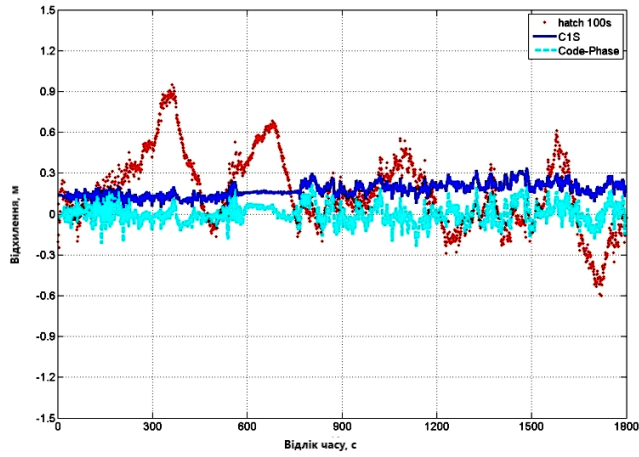
Фільтр	«Hatch»-фільтр			«метод 1»			«Float»-метод 2		
	m_X	σ	$\bar{\sigma}$	m_X	σ	$\bar{\sigma}$	m_X	σ	$\bar{\sigma}$
$\Delta X_{\text{середнє}}$	0,155	0,301	0,338	0,050	0,019	0,054	-0,051	0,035	0,062
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	0,094	0,257	0,274	0,149	0,027	0,152	0,098	0,047	0,109
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,037	0,236	0,239	0,117	0,040	0,123	-0,017	0,049	0,052
$\Delta B_{\text{середнє}}$	-0,104	0,353	0,368	-0,003	0,017	0,017	-0,004	0,017	0,018
$\Delta L_{\text{середнє}}$	0,008	0,121	0,121	0,107	0,015	0,108	0,110	0,026	0,113
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,156	0,270	0,312	0,174	0,051	0,181	-0,002	0,069	0,069



а)

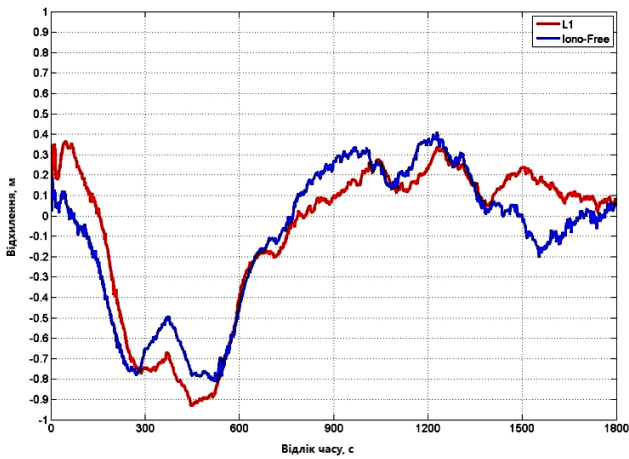


б)

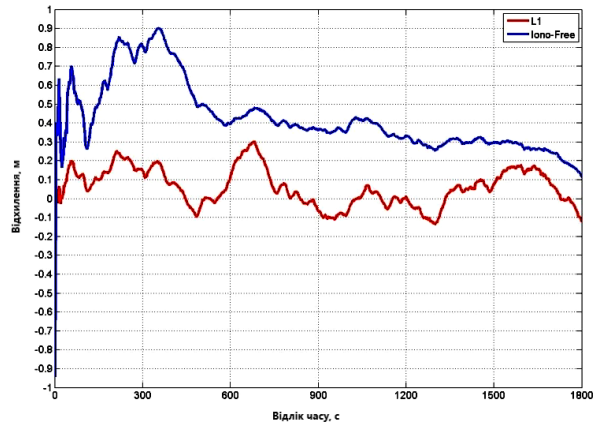


В)

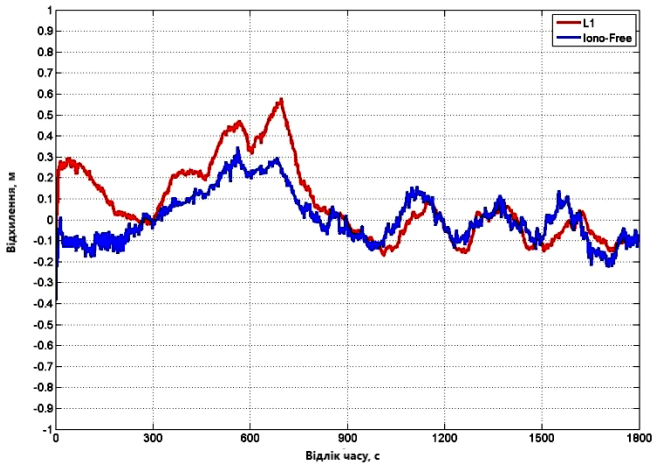
Рисунок 4.4 Відхилення отриманого рішення по широті (а), довготі (б) і по висоті (в) при обробці двочастотних вимірювань для ровера Vert



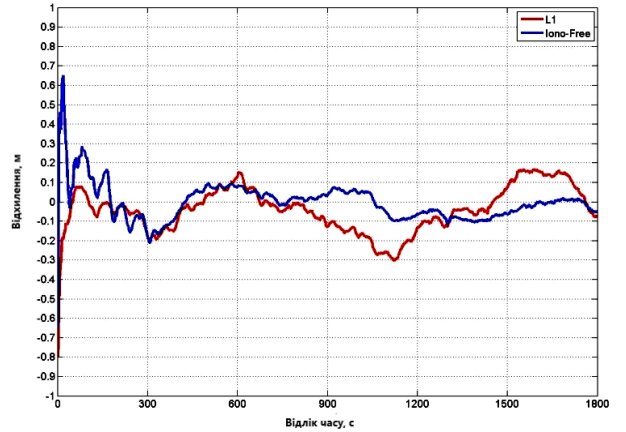
а)



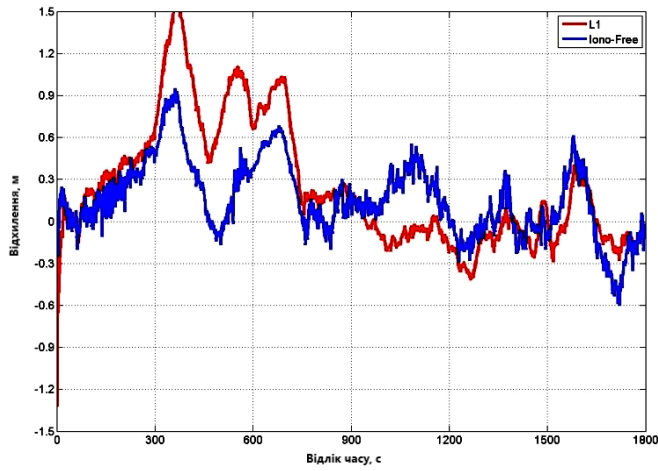
б)



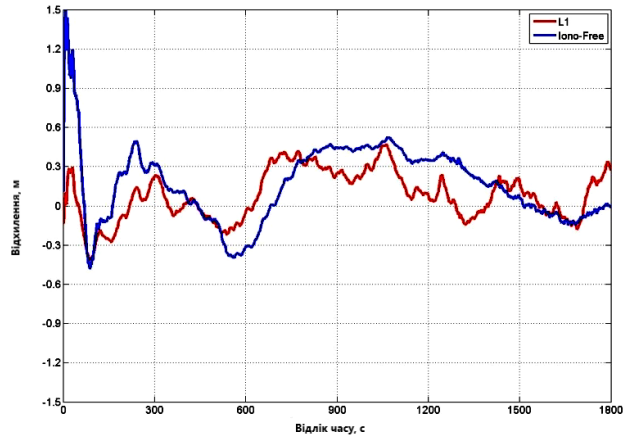
в)



г)

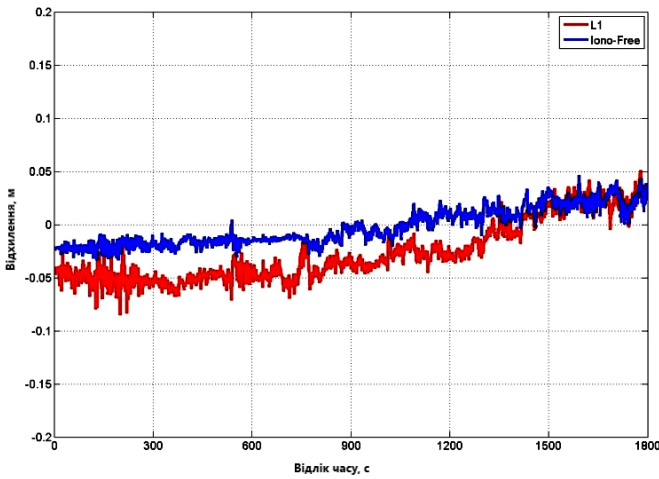


д)

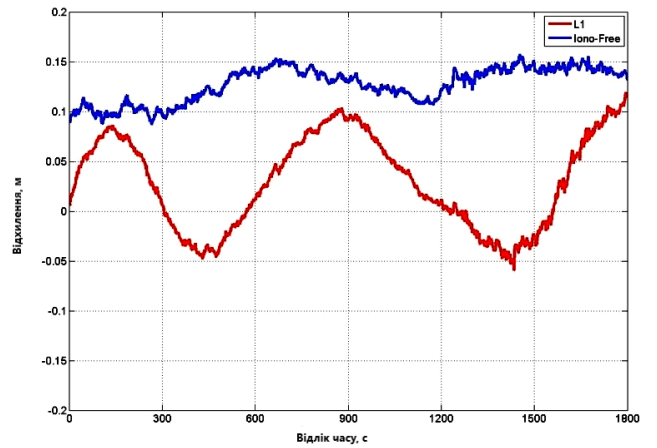


е)

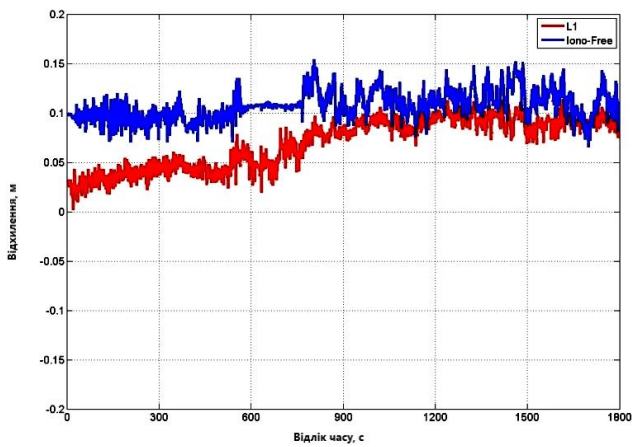
Рисунок 4.5 Відхилення отриманого рішення по широті (а, б), довготі (в, г) і по висоті (д, е) при обробці одночастотних і двочастотних вимірювань ровера Vert (а, в, д) і наземного ровера 0001 (б, г, е) з використанням «Hatch» -фільтра



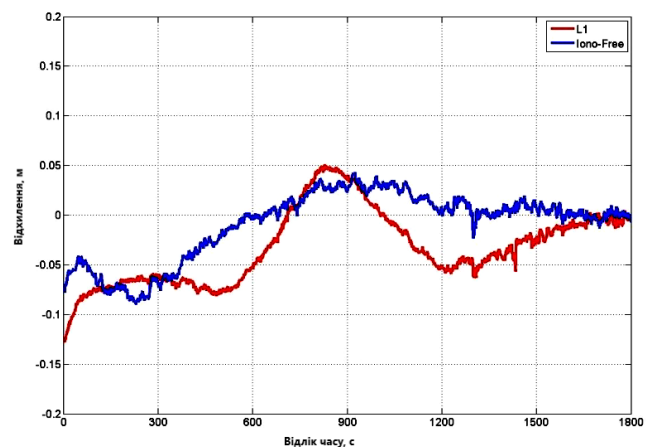
а)



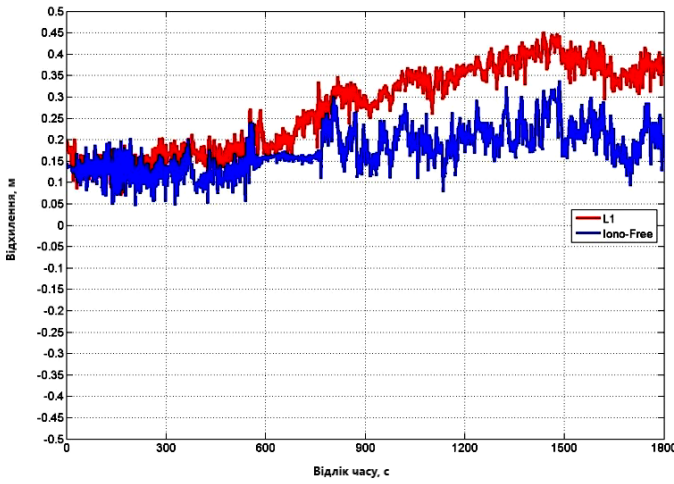
б)



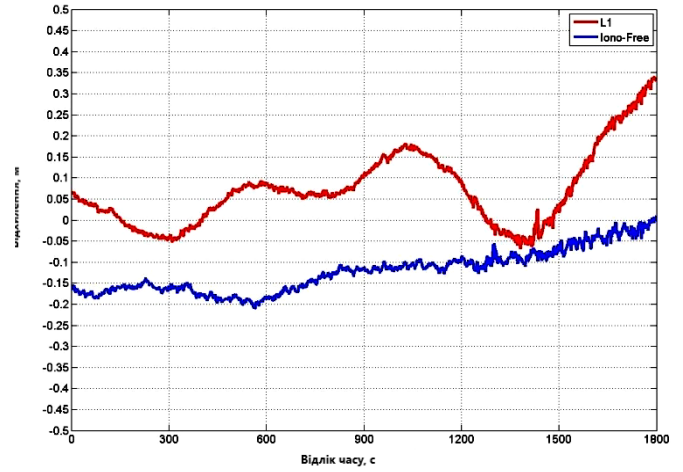
в)



г)

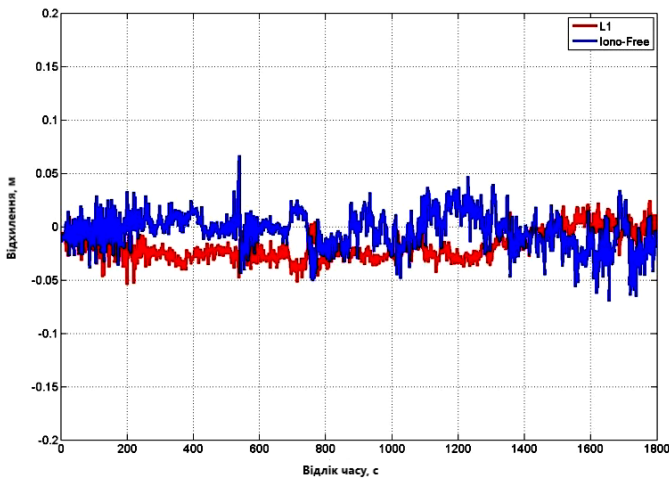


д)

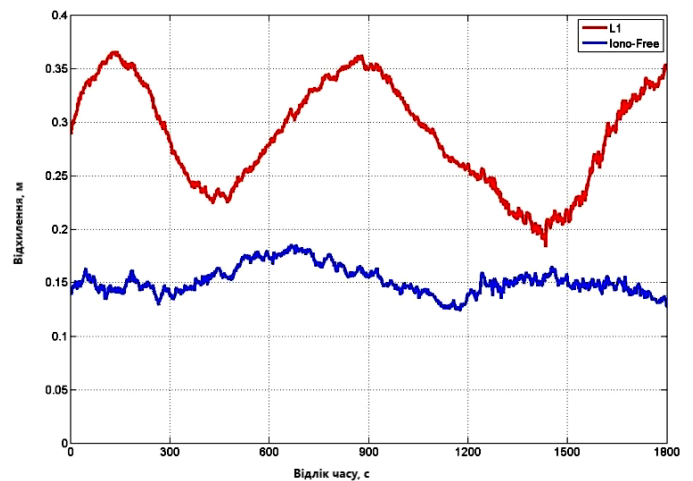


е)

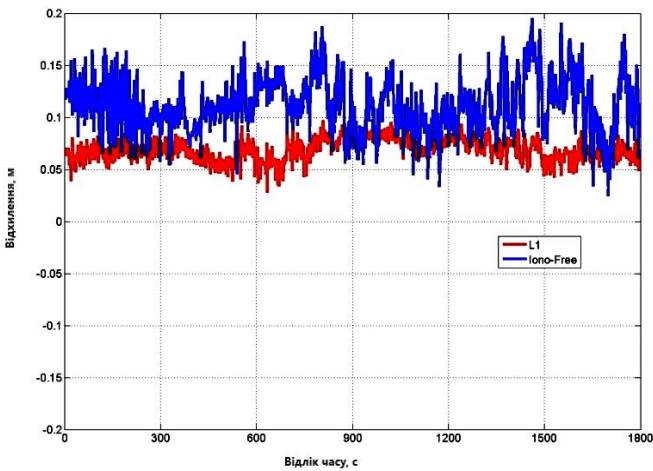
Рисунок 4.6 Відхилення отриманого рішення по широті (а, б), довготі (в, г) і по висоті (д, е) при обробці одночастотних і двочастотних вимірювань ровера Vert (а, в, д) і наземного ровера 0001 (б, г, е) з використанням розробленого алгоритма обробки спостережень по методу 1



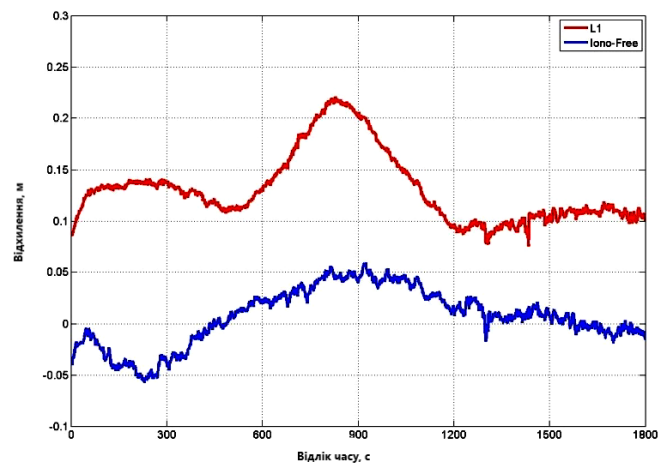
а)



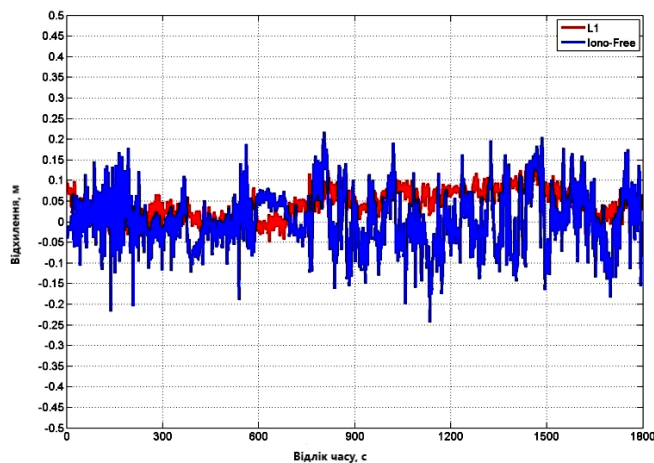
б)



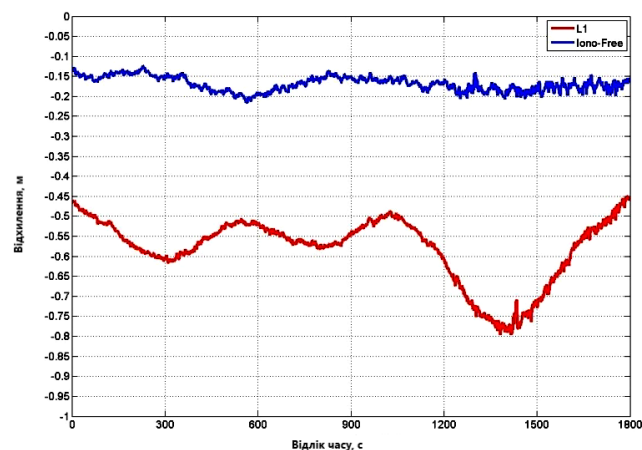
в)



г)



д)



е)

Рисунок 4.7 Відхилення отриманого рішення по широті (а, б), довготі (в, г) і по висоті (д, е) при обробці одночастотних і двочастотних вимірювань ровера Vert (а, в, д) і наземного ровера 0001 (б, г, е) з використанням фазового «float»-рішення (з використанням розробленого алгоритма обробки спостережень по методу 2)

4.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень

Обробка вимірювань статичних і кінематичних сесій з використанням запропонованих алгоритмів показала наступне:

- розроблені методи (1, 2) обробки спостережень дозволяють отримати дециметрову точність кінематичного позиціонування навіть на коротких інтервалах спостережень (від 5 хвилин); використання запропонованих методів дозволяє отримати точність (середньо-квадратичні похибки – СКП) кінематичних координатних визначень $\sim 10\text{--}15$ см по плановим координатам і $\sim 10\text{--}20$ см по висоті;

- метод (2) показав дещо гірші результати у порівнянні з методом підбору рівня при кодово-фазовому згладжуванні на інтервалах часу менше $\sim 15\text{--}30$ хв. та на базових віддаленнях більше ~ 50 км; при інтервалах спостережень $\sim 30\text{--}60$ хв. і більше результати обробки спостережень згаданими методами практично не відрізняються;

- запропоновані методи (1, 2) дозволяють отримати дециметрову точність позиціонування як для кінематичних, так і для статичних об'єктів навіть на коротких інтервалах спостережень (від 5 хвилин). Розроблені алгоритми протестовані в

режимі післясеансної обробки, але в подальшому будуть адаптовані для вирішення завдань в режимі реального часу (Real Time Kinematic);

– «згладжене» координатне рішення в значній мірі звужує область пошуку цілочисельних оцінок фазових неоднозначностей, тобто є важливою і необхідною складовою обробки для отримання надійного дискретного розв'язання фазової неоднозначності («fixed» -рішення). З цієї точки зору найбільш підходящим для цього додатка є застосування «методу1», оскільки він дозволяє отримати рішення з необхідною точністю за найменший інтервал часу.

Слід зазначити, що результати тестування алгоритмів були отримані в умовах обмеження кількості «видимих» супутників (від 5 до 7 супутників) і в період сильних збурень іоносфери (основна частина оброблених сесій була обрана в зимовий період). Із зіставлення отриманих результатів з результатами зарубіжних досліджень можна зробити важливий висновок про те, що в літній період при виконанні спостережень днем точність кінематичного позиціонування істотно підвищується аж до субдециметрового рівня на базових відстанях 100-150 км.

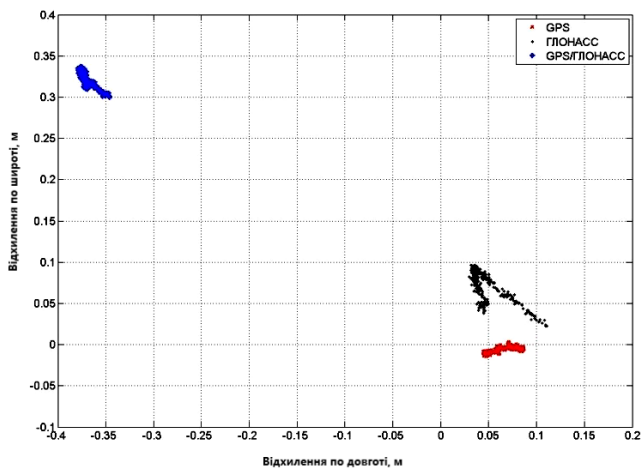
Результати досліджень обробки спостережень декількох ГНСС, зокрема, ГЛОНАСС і GPS+ГЛОНАСС для вирішення поставлених завдань. Як приклад обробки спостережень GPS+ГЛОНАСС наведені результати обробки базової станції PRYL (Прилуки) щодо станції GLSV (Київ) за 346-у GPS-добу 2008 року (грудень). Видалення між станціями становило 137,5 км. Обробка спостережень велася зі зміною інтервалу спостережень: 300 с, 900 с, 1800 с, 2700 і 3600 с. При обробці спостережень використовувалися спостереження семи супутників кожної ГНСС. Були виконані координатні визначення з використанням окремо GPS-спостережень, ГЛОНАСС-спостережень і спільне рішення. Обробка спостережень виконувалася з використанням «float» - методу (метод 2) (див. розділ 2.2). Попередньо, ГНСС-спостереження пройшли етап пре-процесінгу (попередньої обробки) із застосуванням програмного забезпечення (ПЗ) «OSTAVA_PPA v.2» [65], яке підтримує можливість обробки ГЛОНАСС-спостережень. Вимірювання, координати супутників ГЛОНАСС були приведені до єдиної шкали часу з вимірами GPS (шкала GPS) і до системи координат (WGS-84) [66, 67].

Таблиця 4.13

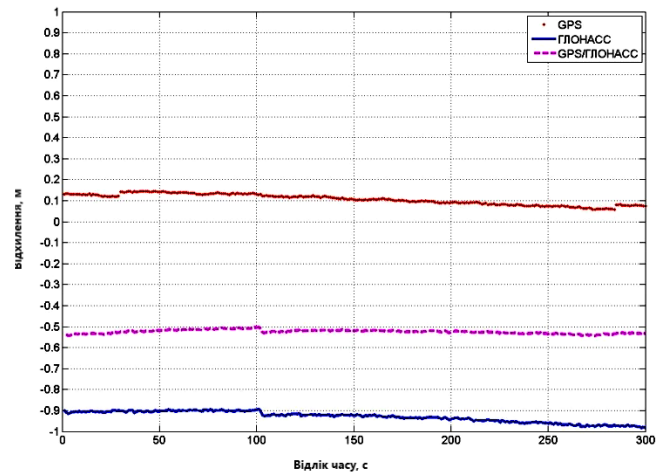
Середні значення відхилень координат в залежності від інтервалу спостережень і типу обробки

	GPS	ГЛОНАСС	GPS/ГЛОНАСС
Інтервал	300 с		
Параметр	m_x	m_y	m_z
$\Delta X_{\text{середнє}}$	0,025	-0,571	-0,293
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	0,095	-0,304	-0,625
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,075	-0,678	-0,204
$\Delta B_{\text{середнє}}$	-0,006	0,070	0,323
$\Delta L_{\text{середнє}}$	0,066	0,049	-0,371
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,106	-0,930	-0,525
Інтервал	900 с		
$\Delta X_{\text{середнє}}$	-0,424	-0,131	0,086
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	-0,686	-0,209	-0,391
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,278	-0,232	0,186
$\Delta B_{\text{середнє}}$	0,740	0,027	0,226
$\Delta L_{\text{середнє}}$	-0,352	-0,106	-0,376
$\Delta H_{\text{середнє}}$	-0,243	-0,318	0,059
Інтервал	1800 с		
$\Delta X_{\text{середнє}}$	0,095	0,090	0,096
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	0,366	-0,236	-0,135
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,057	-0,041	-0,019
$\Delta B_{\text{середнє}}$	-0,175	0,015	-0,017
$\Delta L_{\text{середнє}}$	0,257	-0,247	-0,165
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,223	-0,060	-0,007
Інтервал	2700 с		
$\Delta X_{\text{середнє}}$	-0,365	0,187	0,179
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	-0,105	-0,248	-0,123
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	-0,073	0,027	0,031
$\Delta B_{\text{середнє}}$	0,237	0,000	-0,044
$\Delta L_{\text{середнє}}$	0,107	-0,309	-0,199
$\Delta H_{\text{середнє}}$	-0,285	0,040	0,081
Інтервал	3600 с		
$\Delta X_{\text{середнє}}$	0,013	0,047	0,047
$\Delta Y_{\text{середнє}}$	-0,036	-0,068	-0,080
$\Delta Z_{\text{середнє}}$	0,009	-0,056	-0,016
$\Delta B_{\text{середнє}}$	0,015	-0,035	-0,005
$\Delta L_{\text{середнє}}$	-0,037	-0,082	-0,093
$\Delta H_{\text{середнє}}$	0,004	-0,039	-0,012

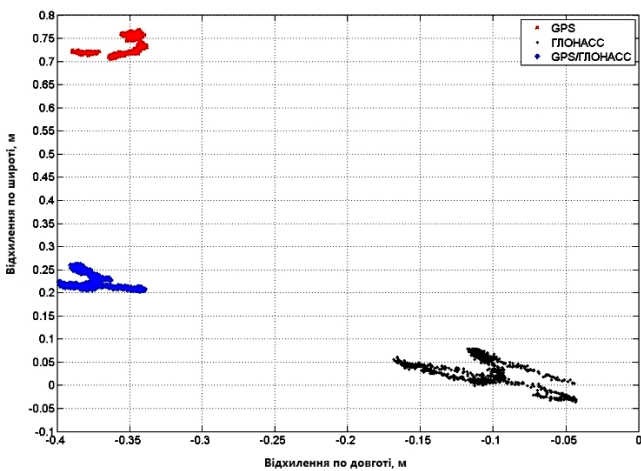
В таблиці 4.13 наведені середні значення відхилень координат в залежності від інтервалу спостережень і типу обробки, а на рис. 4.8 приведені отримані відхилення планових координат і відхилення по висотній компоненті. Представлені результати є попередніми і на даний момент проводяться більш детальні дослідження комбінованого виду обробки.



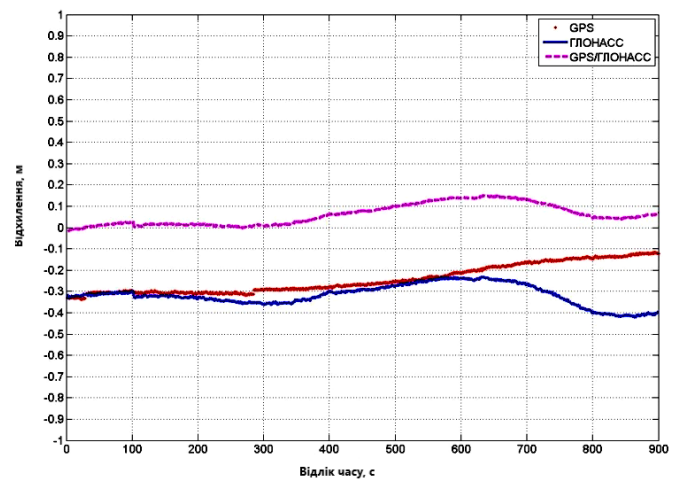
а)



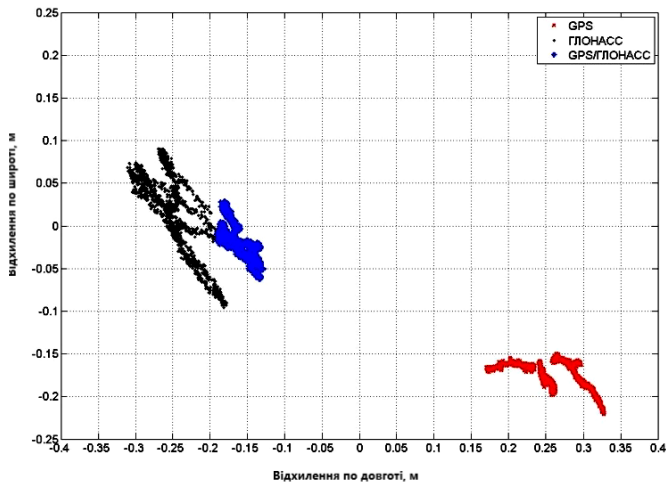
б)



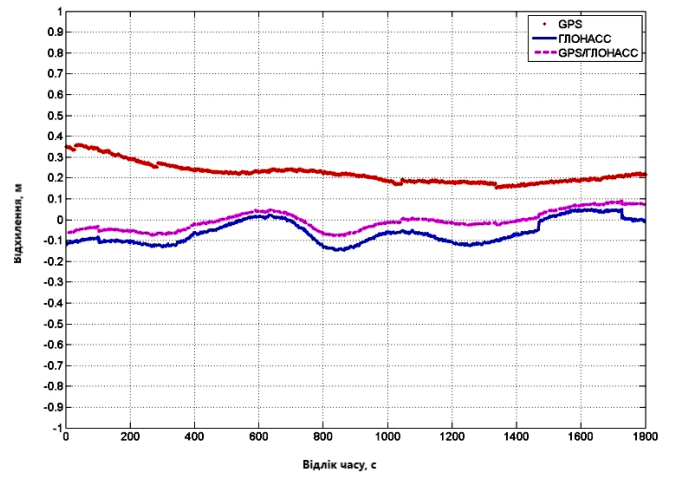
в)



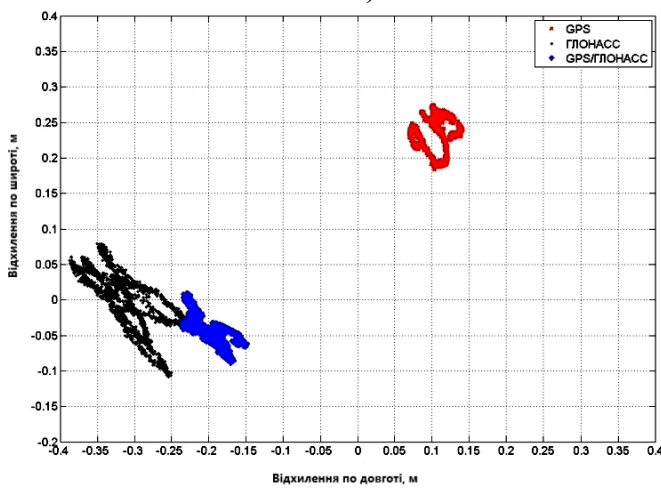
г)



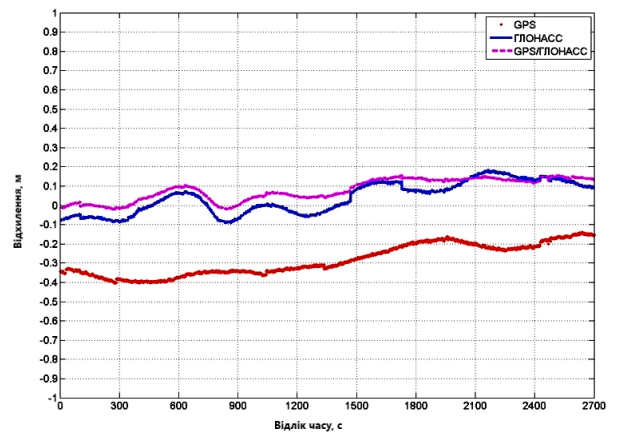
Д)



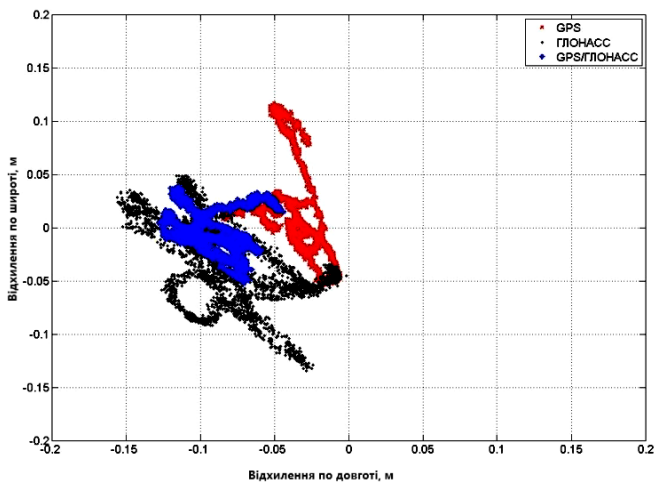
е)



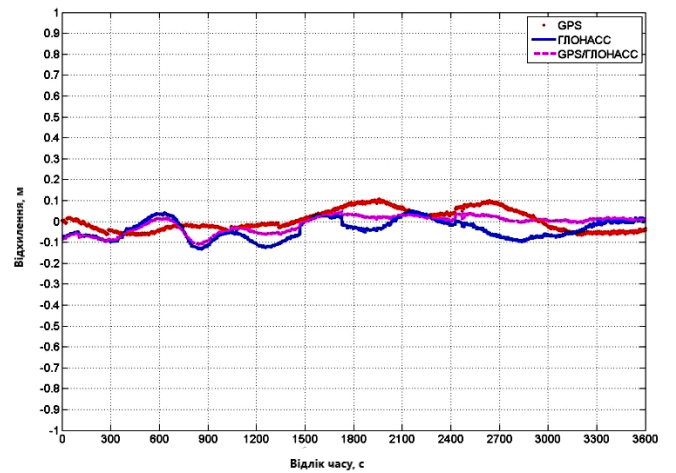
Ж)



з)



і)



к)

Рисунок 4.8 Відхилення отриманого рішення по плановим координатам (а, в, д, ж, і) і висоті (б, г, е, з, к) при обробці одночастотних вимірювань при тривалості 300 (а, б), 900 (в, г), 1800 (д, е), 2700 (ж, з) і 3600 с (і, к)

Аналіз отриманих результатів.

Результати досліджень використання спостережень декількох ГНСС дозволили зробити наступні висновки:

– метод комбінування кодового і фазового «float»-рішення (метод 2) є найбільш підходящим і рекомендованим для обробки спостережень ГЛОНАСС, тому що дозволяє врахувати особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів;

– результати визначення координат з використанням спостережень кожної з ГНСС окремо показують, що координатне рішення по ГЛОНАСС-спостереженнями і GPS-спостережень дозволяють отримати практично однакову точність позиціонування 10–20 см (СКП) незалежно від інтервалу спостережень;

– результати позиціонування з використанням спільних спостережень GPS+ГЛОНАСС показали, що вже на коротких проміжках часу (5–15 хвилин) досягається точність позиціонування 10–15 см і вище, а на інтервалах 30 хвилин і вище точність позиціонування становить 7–12 см по всіх координатах;

– використання вимірювань декількох систем одночасно дозволяє значно підвищити надійність отримання координатного рішення, оскільки знижуємо зони втрати сигналу, особливо в умовах міської забудови, за рахунок збільшення супутникового угруповання.

4.4 Обробка результатів досліджень із застосуванням розробленого нового методу 3

Як приклад обробки спостережень, отриманих в результаті проведення експерименту на аеродромі Бородянка (Київська обл., 2013 р.). В результаті експерименту були отримані вимірювання з борту безпілотного літального апарату (БПЛА). На БПЛА було встановлено розроблений експериментальний зразок ГНСС-апаратури (рис. 4.9) [82, 83, 108, 109].



Рисунок 4.9 Фото експериментального зразка

На час проведення експерименту на аеродромі була встановлена наземна референсна станція P1LB.

Обробка спостережень виконувалася за наступним сценарієм.

- Прив'язка станції P1LB щодо станції GLSV (IGS/EPN станція, Київ, Голосіїв) двочастотним однобазовим фазовим методом (базове відстань ~ 52.5 км, див. рис. 4.10).
- Визначення еталонної траєкторії БПЛА щодо P1LB з використанням двочастотної однобазові фазової обробки.
- Порівняння траєкторії, отриманої з використанням DGPS рішення (щодо P1LB), щодо еталонної траєкторії.
- Порівняння траєкторії, отриманої з використанням стандартного DGPS рішення (щодо GLSV), щодо еталонної траєкторії .
- Порівняння траєкторії, отриманої з використанням згладженого (по методу 1) кодово-фазового рішення (щодо P1LB), щодо еталонної траєкторії.
- Порівняння траєкторії, отриманої з використанням згладженого (по методу 3) кодово-фазового рішення (щодо P1LB) , щодо еталонної траєкторії.
- Порівняння траєкторії, отриманої з використанням згладженого (по методу 3) кодово-фазового рішення (щодо GLSV), щодо еталонної траєкторії.
- Аналіз отриманих результатів.

На рис. 4.10 приведена карта із зазначенням розміщення наземної референційної станції (РС) P1LB (Бородянка) щодо станції GLSV (базове відстань ~ 52.5 км).

Визначення координат РС PILB виконувалося щодо станції GLSV двочастотним однобазовим фазовим методом.

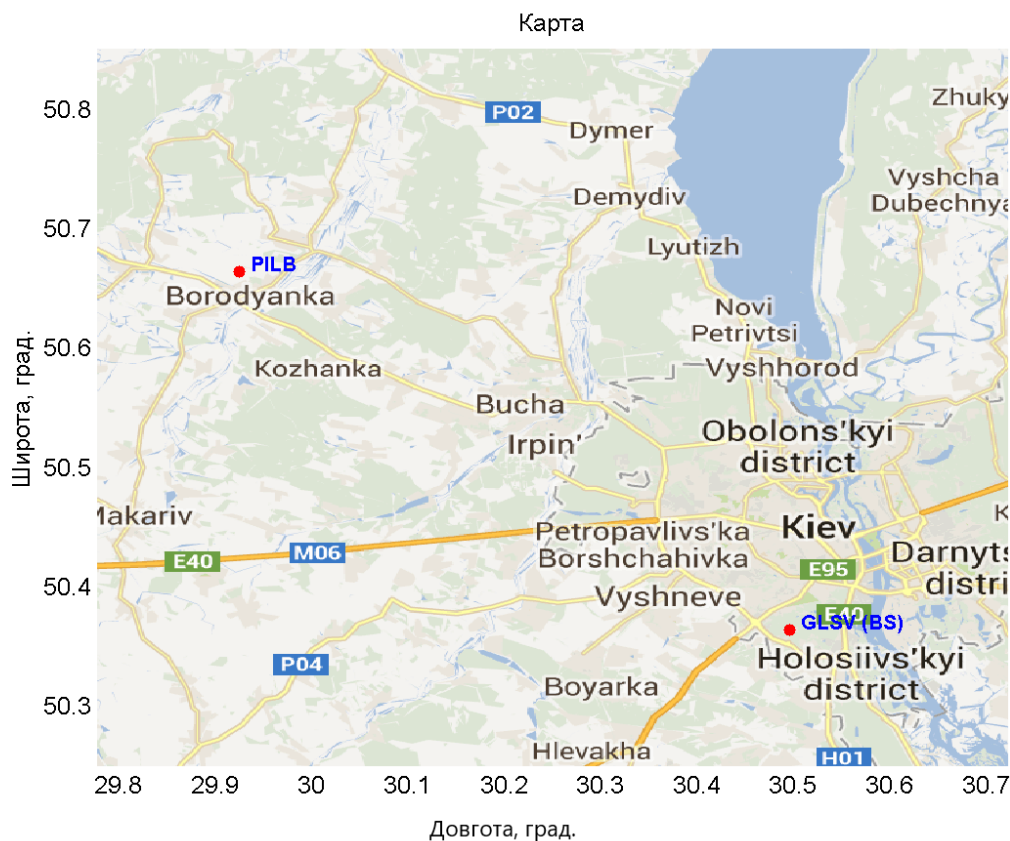


Рисунок 4.10 – Карта розташування станцій

Нижче на рис. 4.11–4.12 наведені графічні результати отриманого рішення, а саме:

- траєкторія руху БПЛА при проведенні експерименту;
- зміна висоти БПЛА при проведенні експерименту;
- видалення БПЛА щодо РС PILB;
- залишки між оціненими та вимірюваними параметрами.

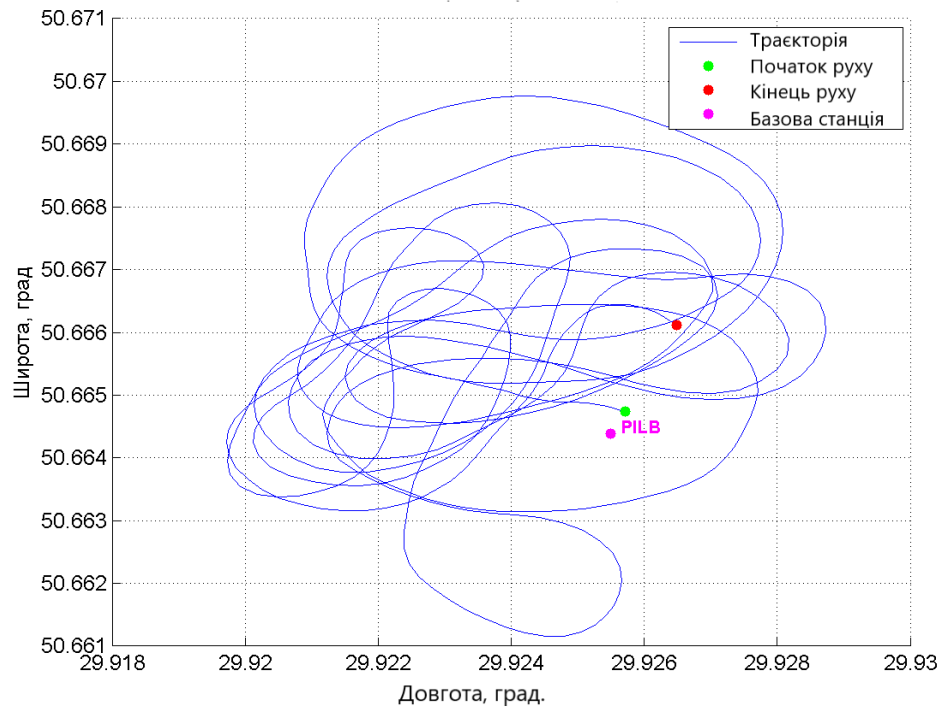


Рисунок 4.11 Траекторія руху БПЛА при проведенні експерименту

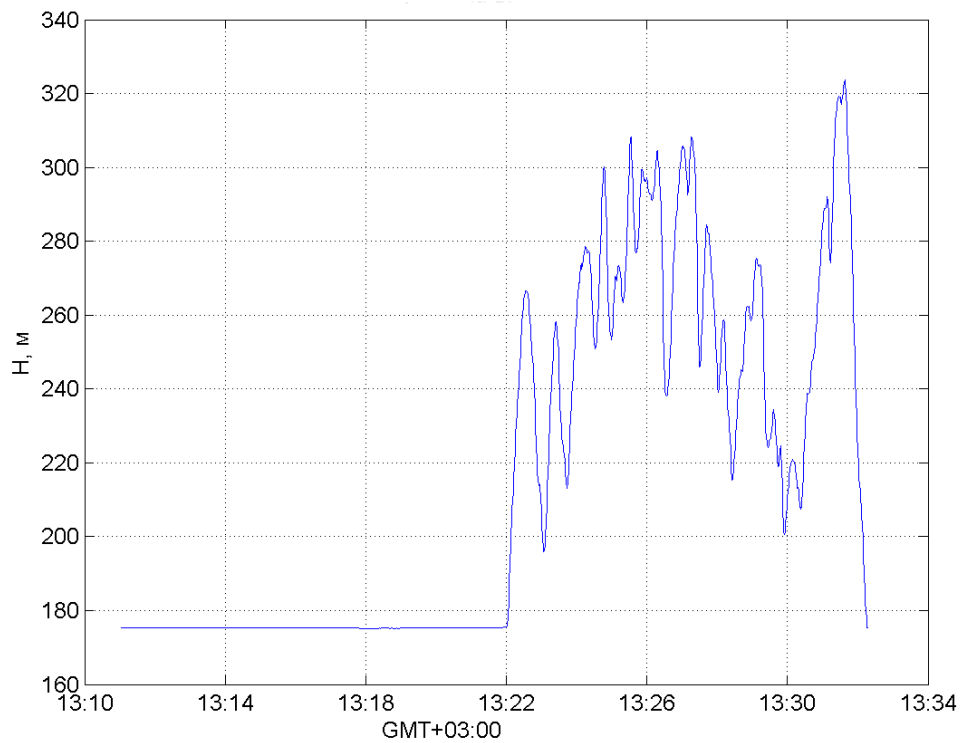


Рисунок 4.12 Зміна висоти БПЛА при проведенні експерименту

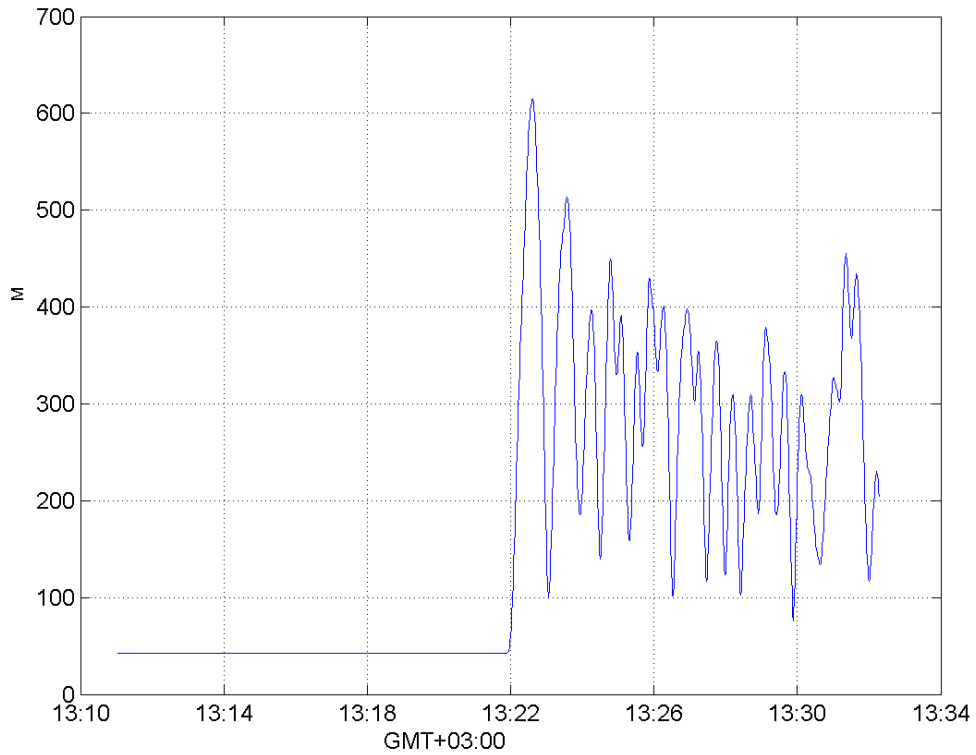


Рисунок 4.13 Віддалення БПЛА щодо РС РІЛВ (мінімальне віддалення 42 м, максимальне віддалення 615 м)

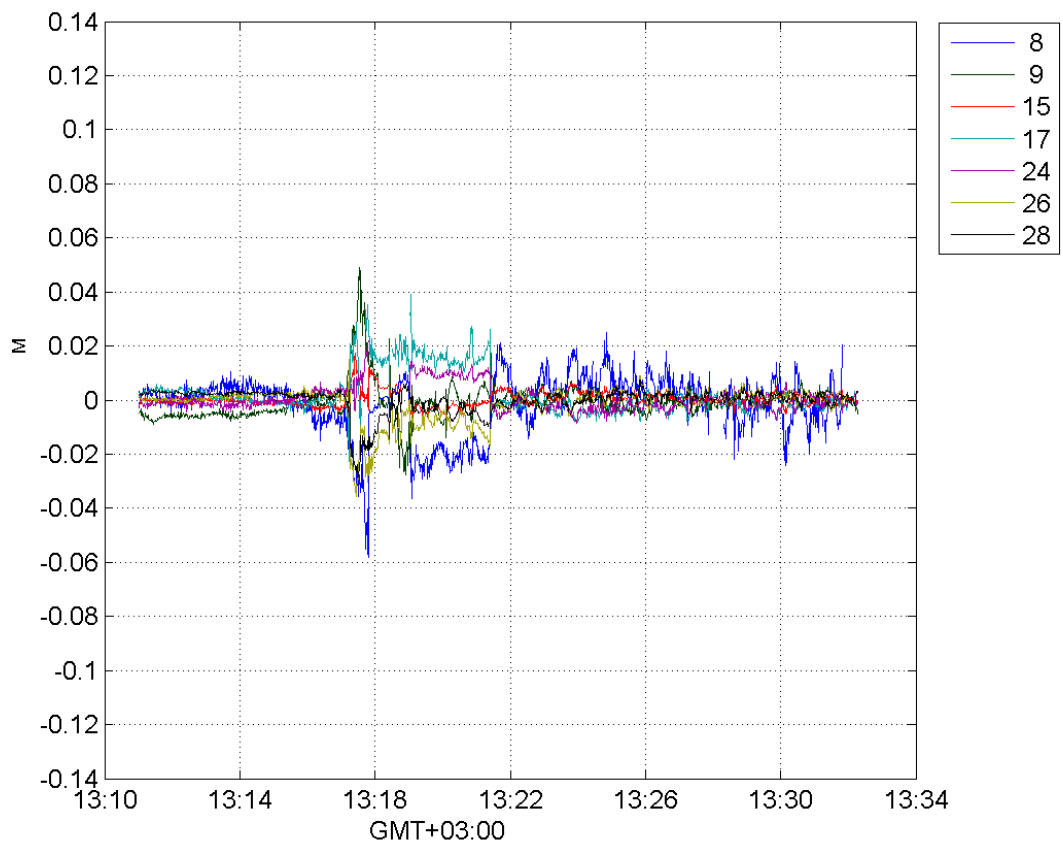
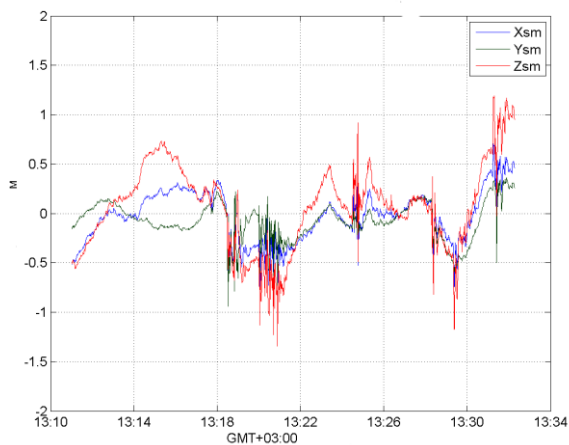


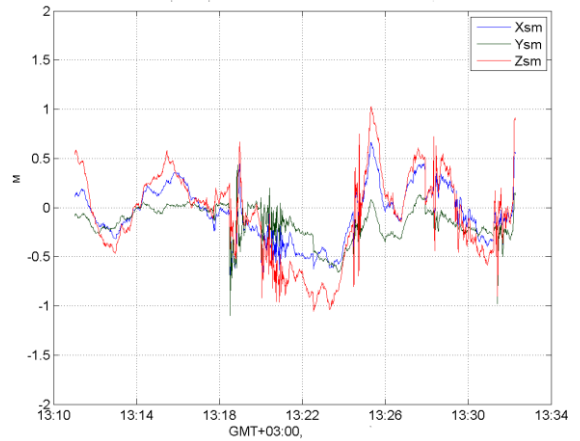
Рисунок 4.14 Залишки між оціненими та вимірюваними параметрами

Виходячи з рис. 4.15–4.16 видно, що в період з 13:11 до 13:16 бортовий приймач був запущений для статичної ініціалізації. В період з 13:17 за 13:21 проводилася передпольотна підготовка БПЛА: робота техніків і інженерів безпосередньо з елементами БПЛА. З цієї причини в даний момент часу спостерігається погіршення радиовидимості і підвищення похибки визначення координат. В період з 13:22 по 13:32 виконувався політ БПЛА.

Нижче на рис. 4.16–4.17 представлені відхилення DGPS рішень щодо PC PILB і GLSV. У табл. 4.14–4.15 наведені статичні характеристики отриманих рішень.

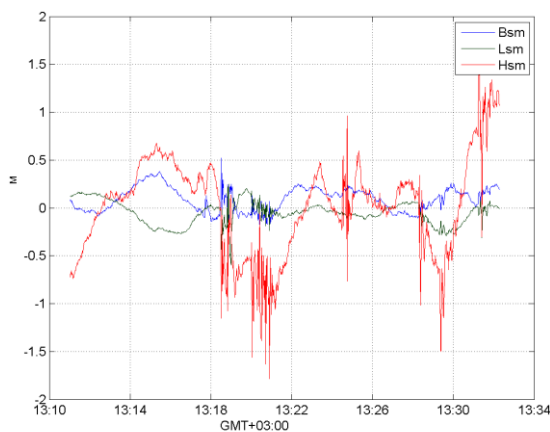


а)

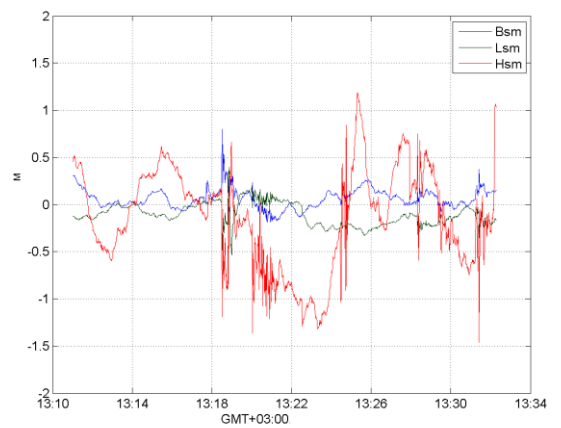


б)

Рисунок 4.15 Відхилення отриманого рішення від еталонних оцінок за координатами XYZ щодо PC PILB (а) і PC GLSV (б)



а)



б)

Рисунок 4.16 Відхилення отриманого рішення від еталонних оцінок за плановими координатами і висоті щодо PC PILB (а) і PC GLSV (б)

Таблиця 4.14

Статистичні характеристики координатних визначень PILB

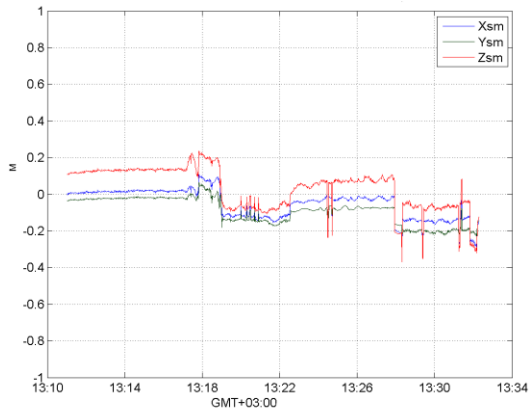
	Среднее значение	P=68% (RMS)	P=95%	P=99.7%
ΔX , м	-0.028	0.261	0.496	0.798
ΔY , м	-0.074	0.161	0.447	0.702
ΔZ , м	0.064	0.462	0.899	1.182
ΔB , м	0.091	0.164	0.302	0.374
ΔL , м	-0.05	0.136	0.255	0.484
ΔH , м	0.014	0.536	1.072	1.503

Таблиця 4.15

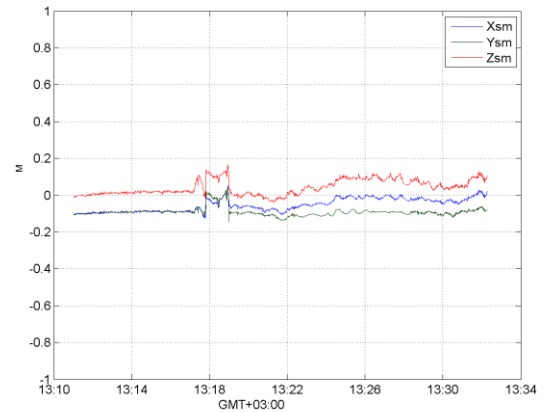
Статистичні характеристики координатних визначень GLSV

	Среднее значение	P=68% (RMS)	P=95%	P=99.7%
ΔX , м	-0.073	0.306	0.553	0.782
ΔY , м	-0.162	0.232	0.550	0.692
ΔZ , м	-0.083	0.454	0.890	1.034
ΔB , м	0.061	0.118	0.240	0.485
ΔL , м	-0.104	0.171	0.269	0.460
ΔH , м	-0.152	0.547	1.107	1.310

Нижче на рис. 4.17–4.18 представлені відхилення рішень, отриманих з використанням «методу 1» і «методу 3», щодо РС PILB. У табл. 4.16–4.17 наведені статичні характеристики отриманих рішень.

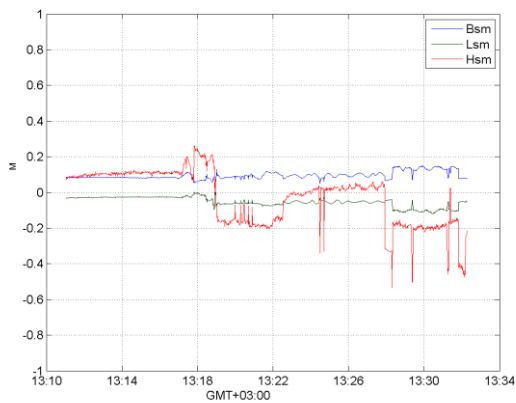


а)

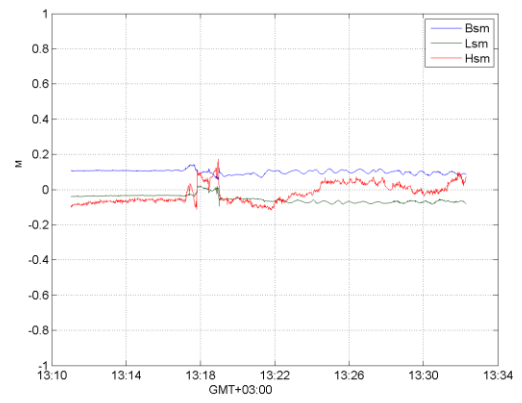


б)

Рисунок 4.17 Відхилення рішення, отриманого з використанням «методу 1» - (а) і «методу 3» (б), від еталонних оцінок за координатами XYZ щодо РС P1LB



а)



б)

Рисунок 4.18 Відхилення рішення, отриманого «методом 1» (а) і «методом 3» (б), від еталонних оцінок за плановими координатами і висоті щодо РС P1LB

Таблиця 4.16

Статистичні характеристики координатних визначень P1LB «метод 1»

	Среднее значение	P=68% (RMS)	P=95%	P=99.7%
ΔX , м	-0.053	0.118	0.170	0.295
ΔY , м	-0.091	0.141	0.208	0.226
ΔZ , м	0.035	0.129	0.215	0.337
ΔB , м	0.096	0.099	0.143	0.147
ΔL , м	-0.053	0.061	0.106	0.118
ΔH , м	-0.027	0.169	0.264	0.489

Таблиця 4.17

Статистичні характеристики координатних визначень PІLB («метод 3»)

	Среднее значение	P=68% (RMS)	P=95%	P=99.7%
ΔX , м	-0.053	0.084	0.099	0.116
ΔY , м	-0.091	0.099	0.115	0.136
ΔZ , м	0.043	0.066	0.111	0.137
ΔB , м	0.101	0.107	0.115	0.140
ΔL , м	-0.053	0.068	0.078	0.083
ΔH , м	-0.021	0.064	0.098	0.123

Нижче на рис. 4.19–4.20 представлені відхилення рішень, отриманих з використанням «методу 1» і «методу 3», щодо PC GLSV. У табл. 4.18-4.19 наведені статичні характеристики отриманих рішень.

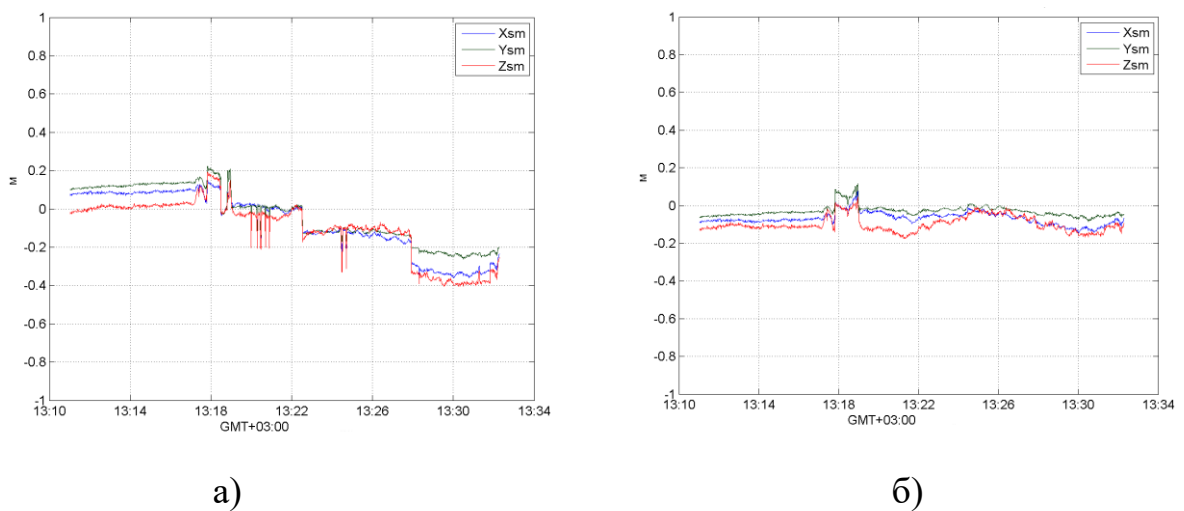
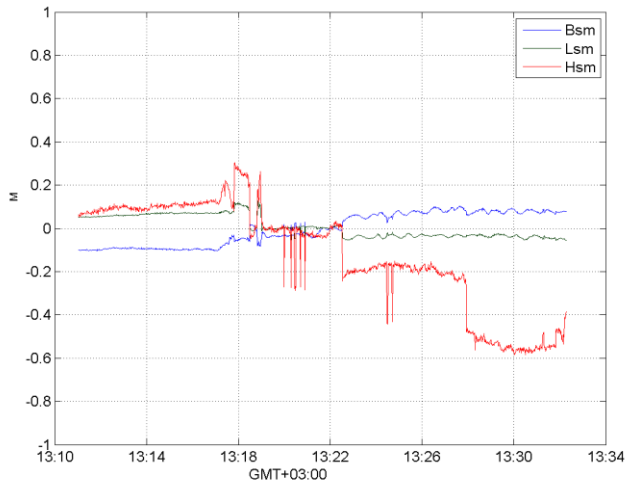
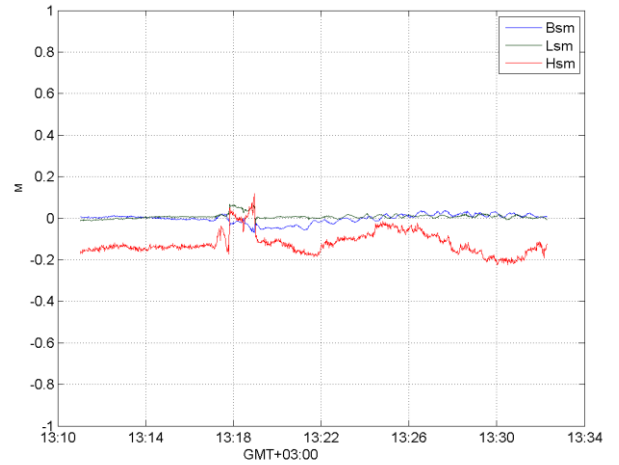


Рисунок 4.19 Відхилення рішення, отриманого з використанням «методу 1» (а) і «методу 3» (б), від еталонних оцінок за координатами XYZ щодо PC GLSV



а)



б)

Рисунок 4.20 Відхилення рішення, отриманого з використанням «методу 1» (а) і «методу 3» (б), від еталонних оцінок за плановими координатами і висоті щодо РС GLSV

Таблиця 4.18

Статистичні характеристики координатних визначень GLSV («метод 1»)

	Среднее значение	P=68% (RMS)	P=95%	P=99.7%
ΔX , м	-0.069	0.136	0.341	0.357
ΔY , м	-0.03	0.137	0.243	0.256
ΔZ , м	-0.098	0.121	0.390	0.404
ΔB , м	-0.002	0.091	0.100	0.104
ΔL , м	0.008	0.055	0.079	0.119
ΔH , м	-0.12	0.207	0.560	0.578

Нижче в таблиці 4.19 представлено статистичні характеристики координатних визначень GLSV (нового «методу 3»)

Таблиця 4.19

Статистичні характеристики координатних визначень GLSV (нового «метод 3»)

	Среднее значение	P=68% (RMS)	P=95%	P=99.7%
ΔX , м	-0.069	0.082	0.124	0.142
ΔY , м	-0.03	0.048	0.067	0.102
ΔZ , м	-0.098	0.119	0.155	0.171
ΔB , м	-0.002	0.020	0.049	0.063
ΔL , м	0.008	0.010	0.039	0.065
ΔH , м	-0.12	0.146	0.200	0.219

Аналіз отриманих результатів. Похибки DGPS рішень ($p = 95\%$) щодо станцій «PILB» (базове відстань до 1 км) і «GLSV» (базове відстань ~ 52.5 км) практично однакові і складають $\sim 25\text{--}30$ см за плановими складовим координат і ~ 1 м по вертикалі.

Похибки згладженого рішення збільшуються зі збільшенням базового відстані (в основному висотна складова). Щодо станції «PILB» похибки рішення ($p = 95\%$) склали $\sim 10\text{--}15$ см за плановими складовими координат і ~ 25 см по вертикалі. Щодо станції «GLSV» похибки рішення ($p = 95\%$) склали ~ 10 см за плановими складовими координат і ~ 56 м по вертикалі.

Похибки ($p = 95\%$) згладженого рішення по методу 3 щодо станції «PILB» склали ~ 10 см по всім трьом складовим координат. Щодо станції «GLSV» похибки рішення ($p = 95\%$) склали ~ 5 см по плановим складовим координат і ~ 20 см по вертикалі.

Згладжене рішення за «методом 3» дозволяє практично повністю усунути варіаційні складові похибки рішення і стрибки координат, викликані змінною робочого сузір'я супутників (різка зміна геометричного фактора GDOP), до якого досить відчутні згладжені рішення. В основному точність позиціонування, при використанні рішення по методу 3, залежить від точності визначення середніх значень координат, отриманих за згладженим рішенням по методу 1.

Використання згладженого рішення за «методом 3» дозволяє в середньому у ~ 2 рази зменшити похибки позиціонування по відношенню до згладженого рішення і у $\sim 3\text{--}4$ рази по відношенню до стандартного DGPS рішення.

4.5 Обробка результатів експериментальних досліджень в аеропорту Жуляни відповідно до запропонованої методики

Відповідно до виконання міжнародного проекту за програмою Горизонт 2020 «UKRAINE "Відтворення обізнаності та інновацій в Україні на основі ЄГНСС" ("UKraine Replication, Awareness and INnovation based on EGNSS", для розширення зони дії EGNOS, необхідне розміщення RIMS станції на території України. Для вибору у потенційних місцях розміщення RIMS було проведено дослідження аналізу якості вимірювальної інформації ГНСС сигналів, згідно з методикою, запропонованою в розділі 3 даної роботи.

У період з 3 лютого по 4 березня 2016 року була зареєстрована вимірювальна інформація в передбачуваному місці розміщення RIMS поблизу злітно-посадкової смуги аеропорту Жуляни. Всього проведено дві серії вимірювань по три сеанси вимірювань в кожній серії (рис.4.21 і рис.4.22) [87, 115, 125, 131, 132].



Рисунок 4.21 Аеропорт Жуляни



Рисунок 4.22 Розміщення антен поблизу злітно-посадкової смуги аеропорту Жуляни

Таблиця 4.20

Дані про час проведення сеансів вимірювання.

Номер сеансу	Початок сеансу	Кінець сеансу	Тривалість
1	03.02.16 12:06:40	04.02.16 03:58:38	15:51:59
2	04.02.16 11:55:10	05.02.16 04:05:23	16:10:14
3	09.02.16 14:40:13	10.02.16 07:43:58	17:03:46
4	29.02.16 08:10:01	01.03.16 08:44:55	24:34:55
5	02.03.16 09:38:43	03.03.16 08:50:29	23:11:47
6	03.03.16 09:33:02	04.03.16 03:03:23	17:30:22

У кожній серії вимірювань антени розташовувалися в вершинах трикутника зі стороною близько 80 м. Для реєстрації вимірювальної інформації використовувалась двочастотний ГНСС-приймач (на базі плати Novatel OEM4-G2) з антеною (Novatel 702GG), розміщеною на тринозі. При реєстрації вимірювань було встановлено обмеження на мінімальний кут місця супутників 5° .

Результати аналізу інформації, зареєстрованої в точці 1, наведені на рис. 4.23-4.40. На рис. 4.23 зображені інтервали «видимості» спостережуваних супутників, на рис. 4.24 - кількість супутників, на рис. 4.25 - кути місця супутників, на рис. 4.26 – «карта неба». На рис. 4.27 і 4.28 зображено співвідношення сигнал/шум на частотах L1 і L2,

на рис. 4.29 і 4.30 рівні багатопроменевості на частотах L1 і L2, побудовані за даними ПЗ TEQC. На малюнках 4.31 і 4.32 зображені рівні багатопроменевості з зазначеними фазовими «сліпами» (за даними TEQC).

На рисунках 4.33-4.40 зображені графіки і рівні багатопроменевості, розраховані за допомогою ПЗ OSTAВА_PPA.

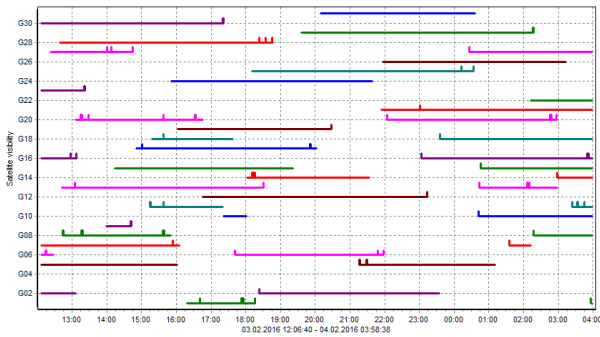


Рисунок 4.23 Інтервали спутників

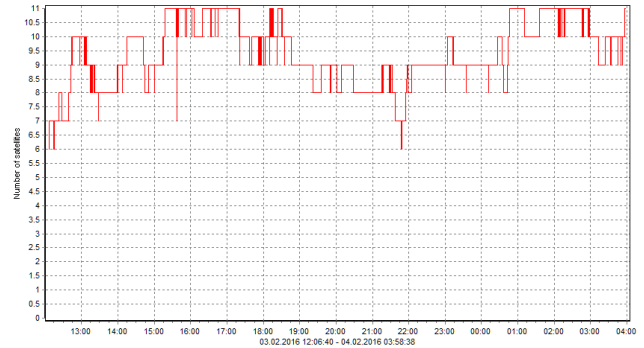


Рисунок 4.24 Кількість спутників

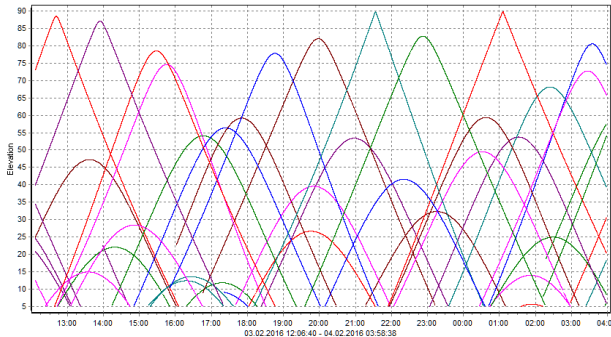


Рисунок 4.25 Кути місця спутників

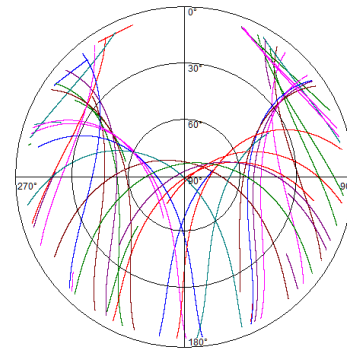


Рисунок 4.26 «Карта неба»

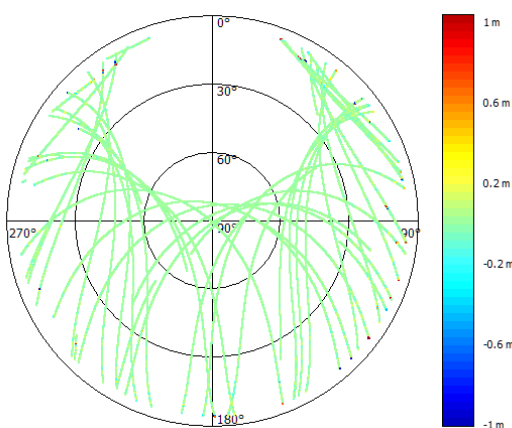


Рисунок 4.27 Рівень багатопроменевості сигналів на частоті L1

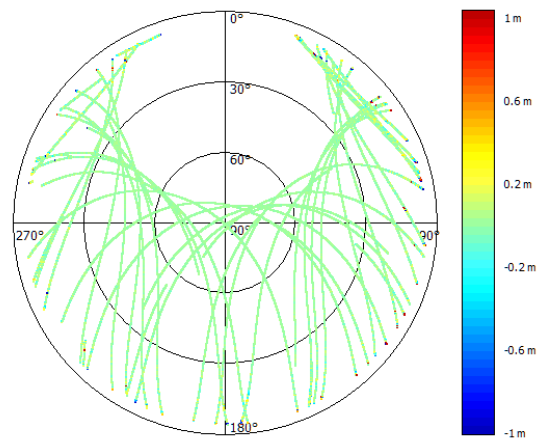


Рисунок 4.28 Рівень багатопроменевості сигналів на частоті L2

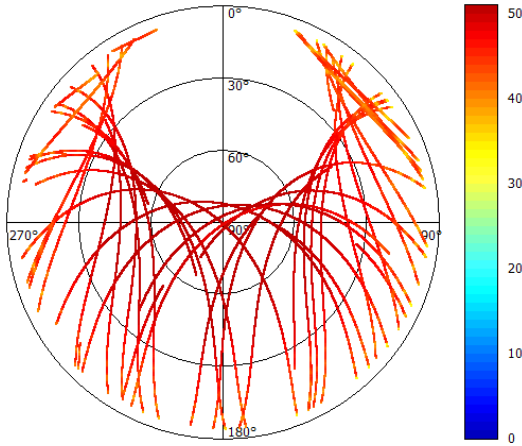


Рисунок 4.29 Співвідношення сигнал/шум на частоте L1

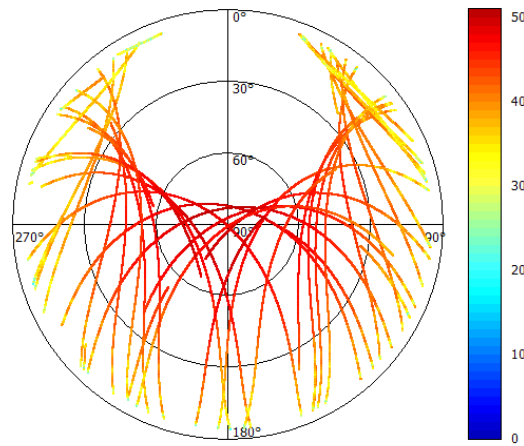


Рисунок 4.30 Співвідношення сигнал/шум на частоте L2

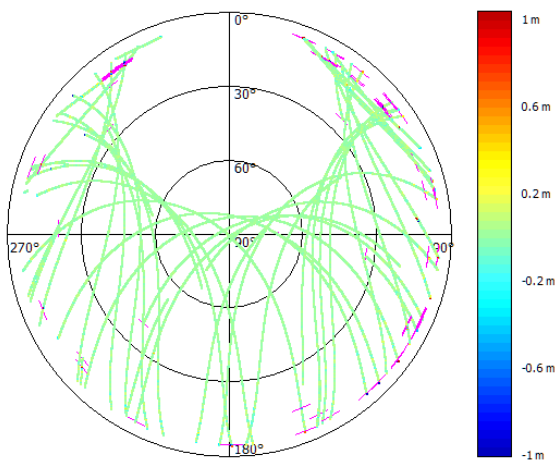


Рисунок 4.31 Рівень багатопроменевості сигналів на частоті L1

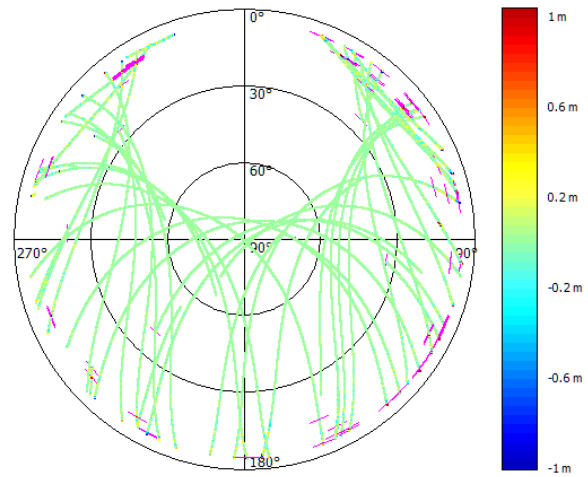


Рисунок 4.32 Рівень багатопроменевості сигналів на частоті L2

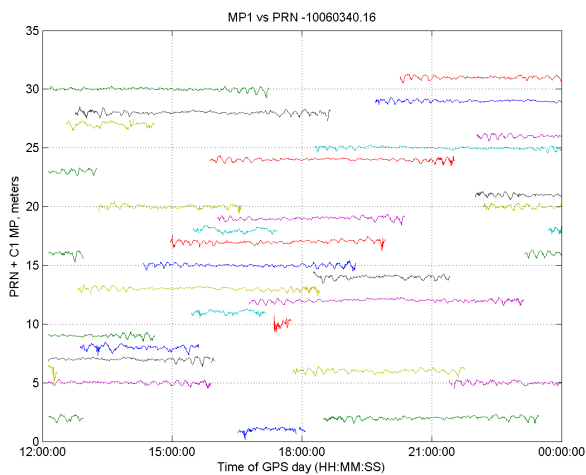


Рисунок 4.33 Графіки багатопроменевості на частоті L1 (доба 1)

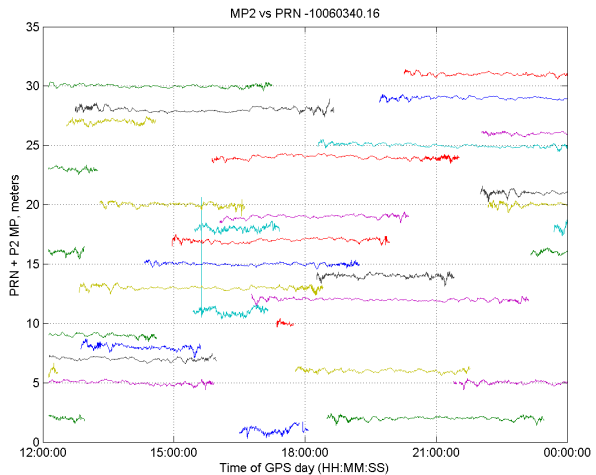


Рисунок 4.34 Графіки багатопроменевості на частоті L2 (доба 1)

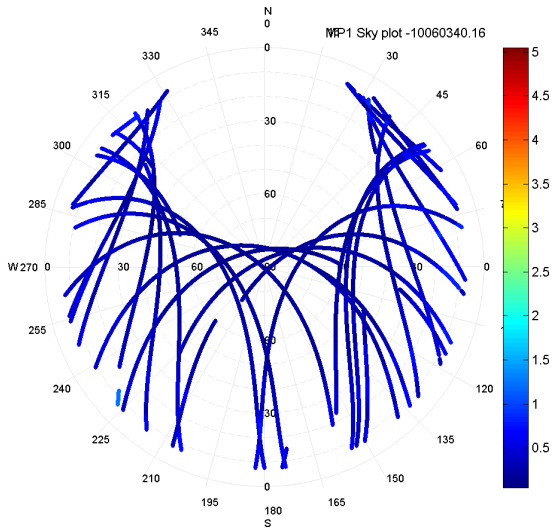


Рисунок 4.35 – Рівні багатопроменевості на частоті L1 (доба 1)

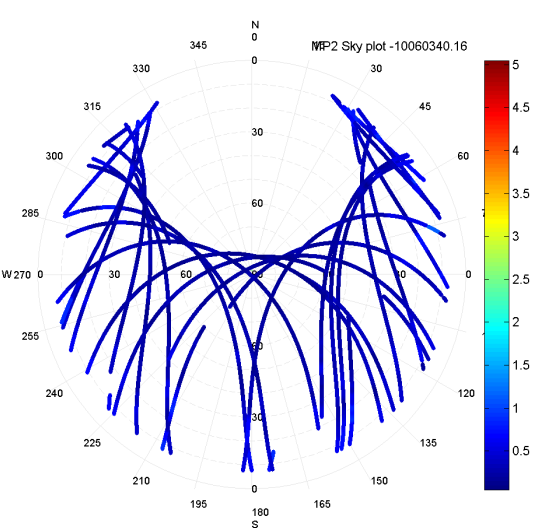


Рисунок 4.36 Рівні багатопроменевості на частоті L2 (доба 1)

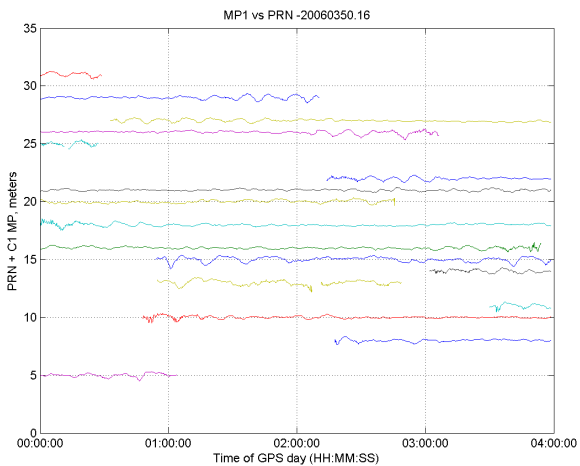


Рисунок 4.37 Графіки багатопроменевості на частоті L1 (доба 2)

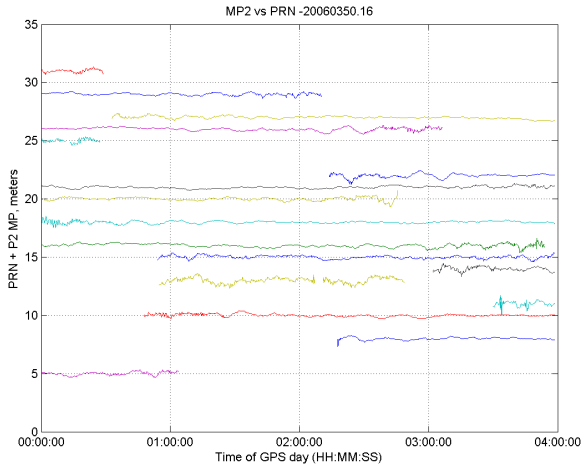


Рисунок 4.38 Графіки багатопроменевості на частоті L2 (доба 2)

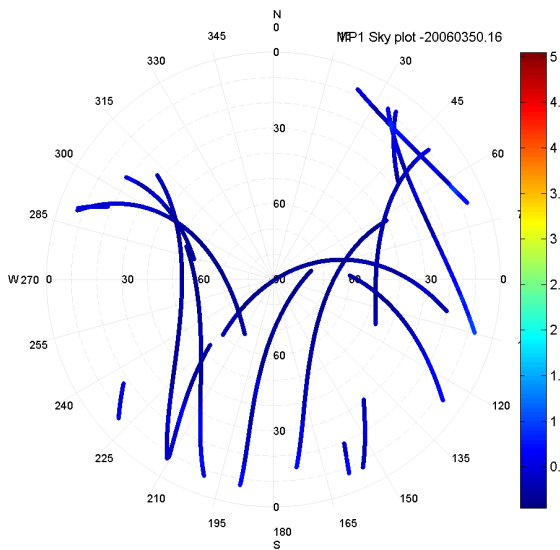


Рисунок 4.39 Рівні багатопроменевості на частоті L1 (доба 2)

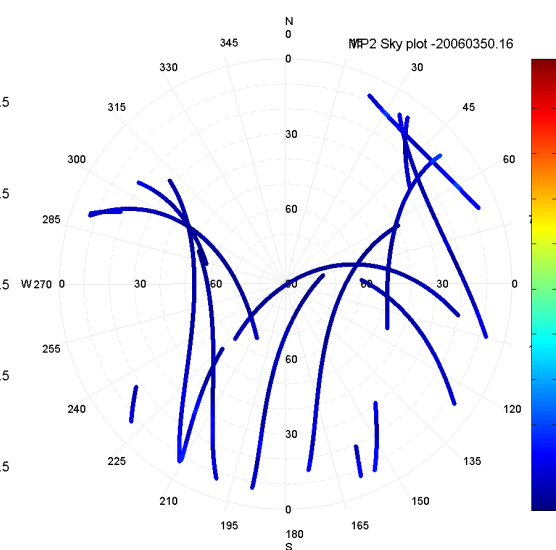


Рисунок 4.40 Рівні багатопроменевості частоті L2 (доба 2)

В результаті аналізу вимірювальної інформації, зареєстрованої в точці 1 поблизу злітно-посадкової смуги аеропорту Жуляни, встановлено, що приймач відстежує всі заплановані супутники. Обмеження видимості супутників відсутні. Середній рівень багатопроменевості сигналів –20–25 см на частоті L1 і 30–40 см на частоті L2 (тут і далі наводиться граничне значення рівня багатопроменевості). Результати визначення рівня багатопроменевості з використанням ПЗ TEQC і ПАК OSTAВА_PPA практично збігаються. Разом з тим за час проведення сеансу вимірювань спостерігалася одна аномальна ділянка вимірювань тривалістю близько 30 с з (4 лютого 2016 р 15:37:27 - 15:38:01). У цей час у всіх супутників сталося різке зменшення співвідношення сигнал/шум і підвищення рівня багатопроменевості сигналів (особливо на частоті L2), а для чотирьох супутників (8, 11, 18, 20) відбувся зрив стеження. Супутники 8, 11, 18 спостерігалися при низьких кутах місця (близько 10°), а супутник 20 – при досить високому куті (близько 24°). При цьому азимути спостережуваних супутників були різними, тобто ця аномалія не може бути викликаною обмеженням видимості. В 15:38:01 стеження за всіма супутниками відновилося, різкі флуктуації співвідношення сигнал/шум припинилися. На рис. 21-24 наведено співвідношення сигнал/шум і кути місця супутників 8, 11, 18, 20. На аномальній ділянці спостерігається різке зниження співвідношення сигнал/шум.

Кількість фазових стрибків («сліпів») за час сеансу було незначним, в основному при кутах піднесення супутників нижче 15° . В результаті попередньої обробки за допомогою ПЗ OSTAВА_PPA все «сліпи» були полагоджені і безперервність фазових вимірювань відновлена.

Порівняння результатів аналізу вимірювальної інформації, зареєстрованої в точках 1-6 поблизу аеропорту Жуляни, показує, що інформація у всіх точках має практично однакову якість. Обмеження прийому сигналів відсутні, приймач відстежує всі заплановані супутники. Як правило, середній рівень багатопроменевості сигналів не перевищує 45 см на частотах L1 і L2. Максимальне значення рівня багатопроменевості при низьких кутах місця не перевищує 1.5 м. У той же час виявлено кілька ділянок аномальних вимірювань, на яких у всіх супутників спостерігається зниження рівня сигналу, підвищення рівня

багатопроменевості, а у супутників з низькими кутами місця спостерігаються втрати стеження за сигналами. Аномальні вимірювання спостерігаються у супутників з різними кутами місця і азимутами, тому не можуть бути пояснені обмеженнями видимості. Найбільш імовірною причиною аномалій є перешкоди прийому сигналів, викликані випромінюванням сторонніх радіотехнічних засобів, можливо, передавальних засобів аеропорту Жуляни. Наявної інформації недостатньо для визначення причини аномалій. Для визначення джерела перешкод необхідне застосування спеціальних технічних засобів (радіопеленгаторів, спектроаналізаторів), і, можливо, зіставлення графіка роботи радіотехнічних засобів аеропорту з часами аномальних ділянок. Очевидно, що наявність аномальних ділянок не залежить від місця розташування точок, тому точки 1-6 з точки зору розташування антен RIMS рівнозначні.

4.6 Порівняльний аналіз отриманих результатів із зарубіжними аналогами

Запропоновані методи точного позиціонування дозволяють отримати координатне рішення з близькою або навіть з більшою точністю в порівнянні з рішеннями провідних світових виробників. Зокрема, подібні характеристики забезпечують режими позиціонування «RT-20» [61] (рис. 4.41) і «GLIDE» [68], реалізовані компанією NovAtel. На рис. 4.42 представлені результати експериментального тестування технологій PDP (Pseudorange/Delta-Phase) і «GLIDE». На рис. 4.43 наведені точності характеристики технологій Crescent і Eclipse, пропонованих компанією Hemisphere GPS [71]. В рамках даних технологій приймачі Hemisphere GPS підтримують методи (Extended differential) і L-Dif (Local differential). Метод e-Dif використовує SBAS диференціальні корекції і забезпечує субметровий рівень точності позиціонування. Метод L-Dif використовує поправки, що формуються приймача з підтримкою Crescent технології. Даний метод дозволяє забезпечити рівень точності ~20 см (СКП) [71].

Як видно з представлених характеристик результати, отримані з використанням запропонованих алгоритмів, подібні, а в ряді випадків дозволяють отримати кращі результати на великих базових відстанях.

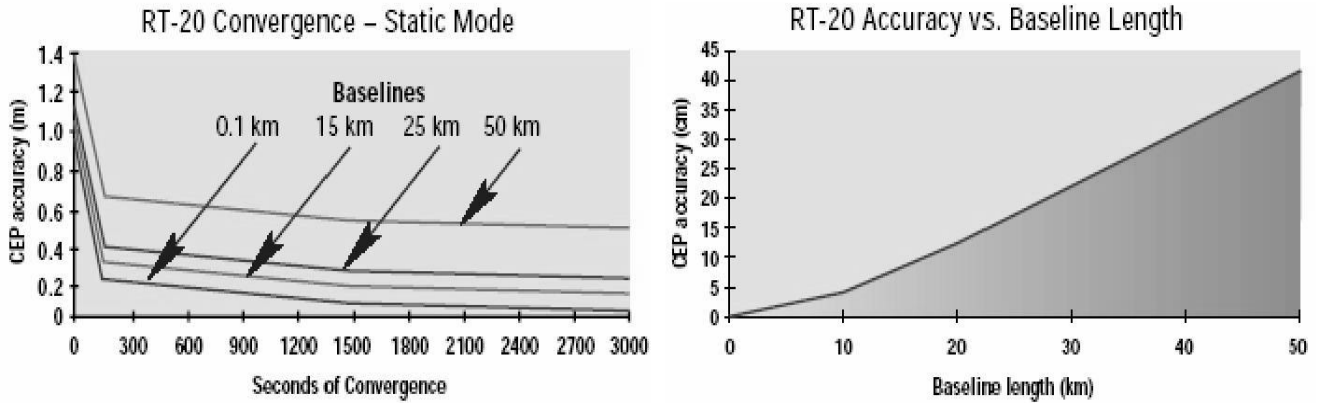


Рисунок 4.41 – Збіжність рішення в залежності від інтервалу накопичення і залежність точності кінцевого рішення від видалення між приймачами

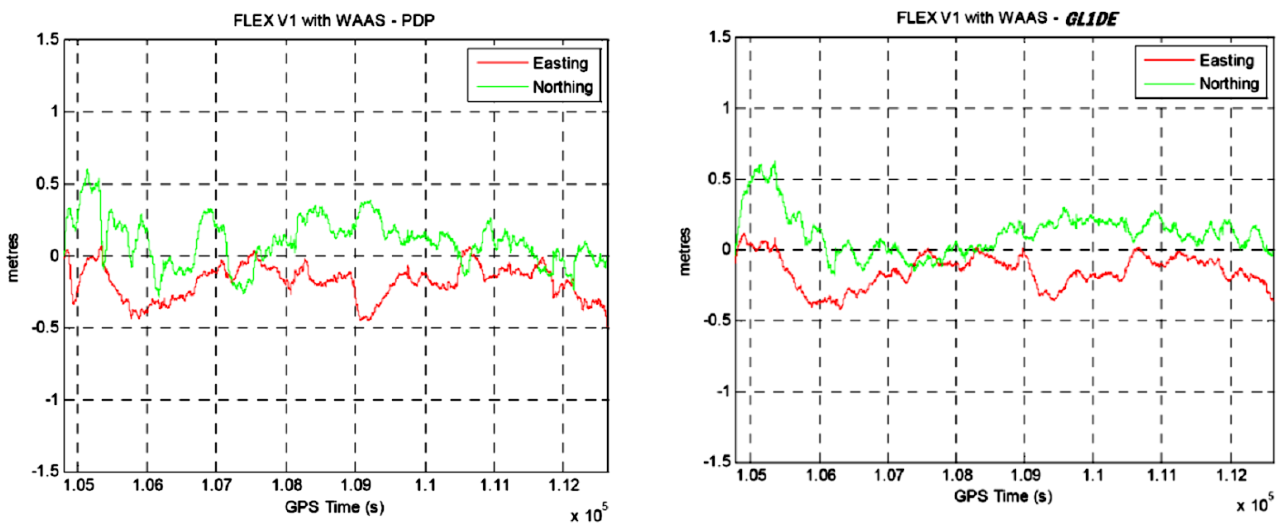


Рисунок 4.42 – Результати координатного рішення при використанні технологій PDP і GLIDE NovAtel Inc.

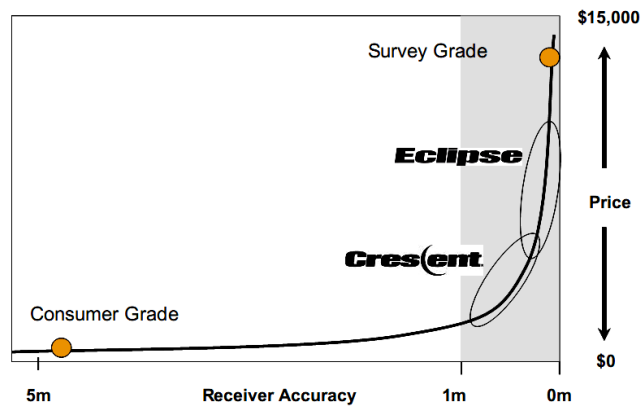


Рисунок 4.43 – Точнісні характеристики технології позиціонування Hemisphere GPS

4.7 Рекомендації з практичного застосування запропонованих рішень та подальший напрям досліджень

Напрямки подальших досліджень, на думку автора, полягають у наступному:

- ◆ оптимізація параметрів розроблених методів в залежності від умов їх подальшого застосування (післясеансної обробка, режим реального часу);
- ◆ адаптація і поліпшення характеристик розроблених методів з метою спільної обробки спостережень включаючи нових ГНСС, що вводяться в експлуатацію;
- ◆ дослідження шляхів підвищення точності і надійності координатних визначень з використанням досвіду отриманих розробок.

Виходячи з вище наведених характеристик, запропоновані автором методи обробки ГНСС-спостережень дозволяють забезпечити рівень точності позиціонування на рівні зарубіжних аналогів, а в ряді випадків перевищує їх. Іншими словами, подальший розвиток запропонованих методів і алгоритмів і їх практичне впровадження дозволить створити конкурентоспроможні додатки для вирішення завдань високоточної навігації і управління рухомими об'єктами.

Висновки до розділу 4

Результати обробки кінематичних і статичних сесій з використанням запропонованих методів і їх порівняльний аналіз із зарубіжними аналогами показали наступне:

– розроблені методи обробки спостережень дозволяють отримати дециметрову точність кінематичного позиціонування навіть на коротких інтервалах спостережень (від 5 хвилин); використання запропонованих методів дозволяє отримати точність (середньо-квадратичні похибки – СКП) кінематичних координатних визначень ~10–15 см по плановим координатам і ~10–20 см по висоті;

– метод 2 комбінування кодового і «float» -фазового рішення показав дещо гірші результати в порівнянні з обробкою за «методом 1» при виконанні координатних визначень на інтервалах менше 15-30 хв. на базових удаленнях

більше 50 км. При інтервалах спостережень порядку 30-60 хв. і більше результати обробки спостережень алгоритмами практично не відрізняються;

– метод 2 комбінування кодового і фазового «float» -рішення є найбільш підходящим і рекомендованим для обробки спостережень ГЛОНАСС, тому що дозволяє врахувати особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів;

– результати позиціонування з використанням спільно спостережень GPS / ГЛОНАСС показали, що вже на коротких проміжках часу (5-15 хвилин) досягається точність позиціонування 10-15 см і вище, а на інтервалах 30 хвилин і вище точність позиціонування становить 7-12 см по всіх координатах ;

– метод 3 обробки ГНСС-спостережень дозволяє практично повністю усунути варіаційні складові похибки рішення, і скачки координат, викликані різкою змінною робочого сузір'я супутників. Використання даного підходу до обробки дозволяє в середньому в 2 рази зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженому» рішенням і в 3-4 рази по відношенню до DGPS рішенням.

– «згладжене» координатне рішення в значній мірі звужує область пошуку цілочисельних оцінок фазових неоднозначностей, тобто є важливою і необхідною складовою обробки для отримання надійного дискретного розв'язання фазової неоднозначності («fixed»-рішення). З цієї точки зору найбільш підходящим для цього додатка є застосування «методу 1», оскільки він дозволяє отримати рішення з необхідною точністю за найменший інтервал часу.

– розроблені алгоритми протестовані в режимі післясеансної обробки, але в подальшому будуть адаптовані для вирішення завдань в режимі реального часу (Real Time Kinematic);

– запропоновані розроблені та вдосконалені методи точного позиціонування дозволяють отримати координатне рішення з близької або навіть з більшою точністю в порівнянні з рішеннями провідних світових виробників. Це дозволяє говорити про те, що подальший розвиток запропонованих методів і алгоритмів і їх практичне впровадження дозволить створити конкурентоспроможні додатки для вирішення завдань високоточної навігації.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена науково-технічна задача розробка методів і алгоритмів прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за допомогою обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень без ускладненої процедури розв'язання фазової неоднозначності. Розроблені методи і алгоритми, на відміну від відомих, дозволяють усунути вплив «wind-up»-ефекту (накручування фази при еволюціях об'єкту) на точність згладжування/фільтрації кодових ГНСС-спостережень з використанням фазових, суттєво зменшити варіаційні складові похибок координатних рішень та підвищити точність до дециметрового рівня диференціального позиціонування об'єктів, що рухаються.

Результати обробки кінематичних спостережень з використанням запропонованих методів і алгоритмів і їх порівняльний аналіз із зарубіжними аналогами показали наступне:

1) обробка ГНСС-спостережень з використанням запропонованих методів дозволяє отримати точність (середньоквадратичні похибки – СКП) кінематичних координатних визначень ~10–15 см по плановим координатам і ~10–20 см по висоті;

2) метод отримання комбінованого кодово-фазового (float) рішення найбільш підходить для обробки спостережень ГЛОНАСС (або GPS+ГЛОНАСС), тому що дозволяє врахувати особливості частотного розносу спектрів випромінюваних сигналів; цей метод показав дещо гірші результати у порівнянні з методом підбору рівня при кодово-фазовому згладжуванні на інтервалах часу менше ~15–30 хв. та на базових віддаленнях більше ~50 км; при інтервалах спостережень ~30–60 хв. і більше результати обробки спостережень згаданими методами практично не відрізняються;

3) результати позиціонування з використанням спільних спостережень GPS та ГЛОНАСС показали, що вже на коротких проміжках часу (~5–15 хв.) досягається точність (СКП) позиціонування ~10–15 см і вище, а на інтервалах 30 хв. і вище точність позиціонування становить ~7–12 см по всіх координатах;

4) «згладжені» координатні рішення в значній мірі звужують область пошуку дискретних цілочисельних оцінок (розв'язання) фазових неоднозначностей, тобто є важливою і необхідною складовою обробки для отримання надійного диференціального позиціонування найвищої точності;

5) вперше розроблений новий метод сумісної обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень дозволяє практично повністю усунути варіаційні складові похибки рішення і стрибки координат, що викликані змінною робочого сузір'я супутників; використання даного методу дозволяє в середньому у ~ 2 рази зменшити похибки позиціонування по відношенню до «згладженого» рішення і в $\sim 3-4$ рази по відношенню до стандартних DGPS рішень.

Запропоновані методи точного позиціонування в цілому дозволяють отримати координатні рішення з більшою точністю у порівнянні з рішеннями провідних світових виробників. Це дозволяє говорити про те, що подальший розвиток запропонованих методів і алгоритмів та їх практичне впровадження дозволить створити конкурентоспроможні додатки для вирішення різноманітних задач прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів.

Слід зазначити, що результати тестування алгоритмів були отримані в умовах обмеження кількості видимих супутників (від 5 до 7 супутників) і в період сильних збурень іоносфери (основна частина оброблених сесій була обрана в зимовий період).

Напрямки подальших досліджень, на думку автора, полягають у наступному:

- ◆ оптимізація параметрів розроблених методів в залежності від умов їх подальшого застосування (післясеансної обробка, режим реального часу);
- ◆ адаптація і поліпшення характеристик розроблених методів з метою спільної обробки спостережень декількох ГНСС (GPS, ГЛОНАСС і т.д.);
- ◆ дослідження шляхів підвищення точності і надійності координатних визначень з використанням досвіду отриманих розробок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Parkinson B.W. Global Positioning System. Theory and Applications. : Volume I / B.W. Parkinson, J.J. Spilker Jr.// Washington, DC.-AIAA.- 1996. – 469 p.
2. Parkinson B.W. Global Positioning System. Theory and Applications. : Volume II / B.W. Parkinson, J.J. Spilker Jr.// Washington, DC.-AIAA.- 1996. – 483 p.
3. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтнеггер, Д. Коллінз, пер. з англ. під ред. Я.С. Яцківа. – Київ: Наукова думка.- 1995. – 380 с.
4. Rizos C. Principles and Practice of GPS Surveying [Электронный ресурс] /C. Rizos // SNAP, Australia. – 1999. – Режим доступа: http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/principles_gps.htm.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
6. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. / К.М. Антонович. – М.: ФГУП «Картгеоцентр».- 2005. – Т. 1: Монография. – 2005. – 334 с.
7. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. / К.М. Антонович. – М.: ФГУП «Картгеоцентр».- 2005. – Т. 2: Монография. – 2005. – 360 с.
8. Бабак В.П., Конін В.В., Харченко В.П. Супутникова радіонавігація. - К.: Техніка, 2004. – 328 с.
9. Kuzin S. GLONASS as a key element of the Russian Positioning Service / S. Kuzin; S. Revnivykh; S.Tatevyan // Advances in Space Research.-2007.- Volume 39, Issue 10.- P. 1539-1544.
10. Российская система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) / Режим доступа: <http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/sdkm/>
11. Системы дифференциальной коррекции мониторинга. Интерфейсный контрольный документ. – Редакция 1 М.; РНИИ КП, 2012.
12. Europe's Satellite Navigation Programmes GALILEO and EGNOS Plan [Электронный ресурс] // Режим доступа:

<http://www.gsa.europa.eu/download.cfm?downloadfile=52B7C637-02C6-7DA7-C2F2E75DCA239878&typename=dmFile>

13. European GNSS Service Centre [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>

14. Hein, GW. MBOC: The new optimized spreading modulation recommended for Galileo L1 OS and GPS L1C / GW. Hein et al. // Inside GNSS.-2006.- Issue 1(4).-P. 57-65.

15. Конин В.В., Харченко В.П. Системы спутниковой радионавигации. Национальный авиационный университет. К.: Холтех, 2010. – 520 с.

16. Концепції Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2021-2025 роки [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15-2021-%D1%80#Text>

17. Chen A GNSS over China. The Compass MEO satellite codes / A. Chen, D. de Lorenzo, P. Enge, GX. Gao, S. Lo // Inside GNSS.-2007.- Issue 2(5).- P. 36-43.

18. De Wilde W. More Compass points. Tracking China's MEO satellite on a hardware receiver / De Wilde W., F. Boon, J-M. Sleewaegen, F. Wilms // Inside GNSS.- 2007.- Issue 2(5) .- P. 44-48.

19. Глобальная навигационная спутниковая система БЭЙДОУ [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/beidou.php>

20. Tsujino.T Effectiveness of the Quasi-Zenith Satellite System in Ubiquitous Positioning / T. Tsujino // Science and Technology Trends.– 2005 – 6 – P. 88-101.

21. Региональная навигационная спутниковая система QZSS [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/qzss.php>

22. Весник ГЛОНАСС /Обзор индийской региональной навигационной спутниковой системы IRNSS/ Режим доступа: <http://vestnik-glonass.ru/stati/obzor-indiyskoy-regionalnoy-navigatsionnoy-sputnikovoy-sistemy-irnss/>

23. Региональная навигационная спутниковая система NAVIC [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/navic.php>

24. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации / Ю.А. Соловьев. - М.: Эко-Трендз, 2000. – 260 с

25. Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат / А.А. Поваляев. – М.: Радиотехника, 2008. – 328 с.

26. Карпінський Ю.О. Геоінформаційне забезпечення навігації наземного транспорту / Ю. О. Карпінський, А. А. Лященко, О. П. Дроздівський // Наука та інновації. – 2007. – Т 3.№ 1. – С. 43–57.

27. Hatch, R., “The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements,” in Proceeding of 3rd International Symposium on Satellite Doppler Positioning, Las Cruces, NM, 1982.

28. Optimal Hatch Filter With a Flexible Smoothing Window Width Byungwoon Park, Changdon Kee Seoul National University, Seoul, Korea ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, 13-16 September, Long Beach, CA, 2005.

29. Le A.Q., Teunissen P.J.G. Optimal Recursive Least-Squares Filtering of GPS Pseudorange Measurements / A.Q. Le, P.J.G. Teunissen // Режим доступа: http://lr.home.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen_en_Leerstoelen/Afdeling_RS/Mathematical_Geodesy_and_Positioning/Publications/Papers/1010/doc/2008.022_Optimal_Le.pdf .

30. Radovanovic, R. and N. El-Sheimy Using Optimal GNSS Multi-Frequency Carrier Phase Combinations for Precise Kinematic Positioning. Presented at the ION 58th Annual Meeting 2002. Albuquerque, New Mexico. July 2002 p.p. 223 – 230.

31. P. Collins, “An overview of gps inter-frequency carrier phase combinations,” Technical Memorandum, Geodetic Survey Division, University of New Brunswick, Ottawa, Ontario, Canada, 1999. Режим доступа: <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/L1L2combinations.collins.pdf>.

32. Evaluation of Two Types of Dual-Frequency Differential GPS Techniques under Anomalous Ionosphere Conditions Hiroyuki Konno, Sam Pullen, Jason Rife, and

Per Enge Stanford University // Режим доступа:
<http://waas.stanford.edu/~wwu/papers/gps/PDF/KonnoIONNTM06.pdf>

33. Контроль качества кодовых и фазовых GPS-наблюдений на этапе предварительной обработки : материалы міжн. конф. [«Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам»], (Санкт-Петербург, 28-30 травня 2007 р.) / Держ. наук. центр РФ – Центральный научно-дослідний інститут «Электроприбор» - С.-Пб.: Центральный научно-дослідний інститут «Электроприбор», 2007. - С. 310-312.

34. Roberts G.W. Using adaptive filtering to detect multipath and cycle slips in GPS/Accelerometer bridge deflection monitoring data / G.W. Roberts, X. Meng, A.H. Dodson // FIG XXII International Congress. - TS6.2 Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering. – Washington.- 2001.

35. Long-duration Carrier-Smoothed-Code Algorithm for GPS Positioning H.-S. Chen, L.4. Wang Institute of Applied Mechanics National Taiwan University, Taipei, Taiwan, R.O.C. E-R. Chang Department of Electrical Engineering National Taiwan University, Taipei, Taiwan, R.O.C.

36. Novel adaptive Hatch filter to mitigate the effects of ionosphere and multipath on LAAS / Lin Zhao, Liang Li, Ming Sun, and Xiaoxu Wang // Journal of Systems Engineering and Electronics Vol. 21, No. 6, December 2010, pp. 1046–1053.

37. Meyerhoff, S. L., and A. G. Evans "Demonstration of the combined use of GPS pseudorange and Doppler measurements for improved dynamic positioning." In: INSMAP'86, Proceedings of the International Symposium on Marine Positioning, Reston, Va., 14-17 October 1986, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, pp. 149-156.

38. GPS Phase-Connected, Precise Point Positioning of Low Earth Orbiters Sunil B. Bisnath and Richard B. Langley // Режим доступа:
<http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/gnss01.bisnath.pdf>

39. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений / Б.Ф. Жданюк – М.: Сов. радио, 1978. – 350 с.

40. NovAtel's RT-20 - A Real Time Floating Ambiguity Positioning System Tom J. Ford and Janet Neumann Режим доступа:

<http://www.topcon.tw/novatel/Documents/Papers/File22.pdf>

41. Position-Domain Hatch Filter For Kinematic Differential GPS/GNSS H. K. Lee, Member, IEEE, and C. Rizos Режим доступа:

http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/leehy_etal2006a.pdf

42. The "New" Hemisphere GPS Phil Gabriel, GM Precision Products Режим доступа:

<http://www.ion-alberta.org/meetings/08.01.25%20-%20Gabriel%20-%20The%20New%20Hemisphere%20GPS.pdf>

43. RTK base station networks driving adoption of GPS +/- 1 inch automated steering among crop growers Roz Buick, Ph.D., Agricultural Division, Westminster, Colorado, USA

Режим доступа:

http://www.putyourfarmonthemap.com/pdf/AG_RTK_BSNetworks_WP_0806.pdf

44. Carrier phase wind-up in GPS reflectometry [Электронный ресурс] / Режим доступа <http://www.oocities.org/gbeyerle/publications/paper/WindUp-081124.pdf>

45. Don Kim, Luis Serrano, Richard Langley Innovation: Phase Wind-Up Analysis [Электронный ресурс] / Don Kim, Luis Serrano, Richard Langley // GPS World –2006 /

Режим доступа <http://www.gpsworld.com/gps/innovation-phase-wind-up-analysis-1108>

46. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. М: Радиотехника, 2010. 800 с, ил.

47. A Study on GPS/GLONASS Multiple Reference Station Techniques for Precise Real-Time Carrier Phase-Based Positioning [Электронный ресурс] / Liwen Dai,

Shaowei Han, Jinling Wang and Chris Rizos// Режим доступа www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/dai_etal2001j.pdf

48. Математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковой навигационной системы GPS. Стандартный режим / Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А., Трубников С.А.]- М.: МГУ, 2001. – 117 с.

49. Colombo, O.L., Errors in Long Distance Kinematic GPS, Proceedings of the ION GPS '91, Albuquerque, September 1991.

50. Donghyun Kim GPS Ambiguity Resolution and Validation: Methodologies, Trends and Issues [Электронный ресурс] / Donghyun Kim, Richard B. Langley // Режим доступа: gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/gnss2000.kim.pdf

51. Donghyun Kim B. GPS Ambiguity Resolution for Long-Baseline Kinematic Applications [Электронный ресурс] / Donghyun Kim and Richard B // Режим доступа: gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/geoide00.pdf

52. M.E. Cannon G Kinematic Ambiguity Resolution With a High Precision C/A Code Receiver / M.E. Cannon G. Lachapelle, G. Lu // Journal of Surveying Engineering, Amer. Soc. Civil Eng. Vol. 119, No.4(November), 1993.

53. Theory of Carrier phase Ambiguity resolution/Teunissen PJG// Wuhan University Journal of Natural Sciences, 8(2b), 2003 p.p. 471-484.

54. Blewitt, G., Carrier phase ambiguity resolution for The Global Positioning System applied to geodetic baselines up to 2000 km, J. Geophys. Res., 9j, (B8), 10,187-10,203, 1989.

55. Повышение надежности разрешения неоднозначности фазовых ГНСС-наблюдений за счет учета систематических погрешностей в весовой матрице измерений [Текст] : материал технической информации / Е.В. Гринченко // Прикладная радиоэлектроника : Научно-техн. журнал. - 2007. - Том6, N4. - С. 567-572

56. Лукьянов А.М. Коррекция тропосферных задержек сигналов спутниковых навигационных систем в СКНОУ / А.М. Лукьянов // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития". Международная конференция "Системы локации и навигации" (МКСЛН'2005): междунар. радиоэлектр. форум , 19-23 сент. 2005 г.: тезисы докл. – Х.,2005. – С. 536-539.

57. Schüler T. Impact of systematic errors on precise long-baseline kinematic GPS positioning / GPS Solutions.- 2005. - pp. 1-18.

58. Klobuchar J.A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users / J.A. Klobuchar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. - Vol. AES-23. - pp. 325-331.

59. IONEX: [Электронный ресурс] /The IONosphere maps EXchange format Version 1» / Stefan Schaer, Werner Gurtner// - Режим доступа <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/ionex1.pdf>

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

61. 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.

62. Жаліло О.О. Результати 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. Жаліло // Всеукраинский научно-технический сборник «Радиотехника». – 2008. – № 152. – С. 172-184.

63. Кондратюк В.М. 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. Жаліло, О.О. Желанов та ін.. // Наука та інновації. – Т.5, №2 –2009 – С. 5-22.

64. EGNOS Extension to Eastern Europe [Электронный ресурс]/ Режим доступа: <http://www.gsa.europa.eu/index.cfm?objectid=A2CF27AA-943C-85D6-49D273BF1B8CD0CD>

65. Шелковенков Д.А. Многофункциональный программно-алгоритмический комплекс предварительной обработки ГНСС-наблюдений ОСТАВА_PPA / Д.А. Шелковенков // Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17. № 3. С. 16–27.

66. ГОСТ Р 51794-2001 Глобальная навигационная спутниковая система и глобальная система позиционирования. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. [Электронный ресурс]/ Режим доступа: http://murmansk-tisiz.ru/rar/gost_r_51794.doc

67. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС [Электронный ресурс]/ Режим доступа: <http://www.aggf.ru/gnss/glon/ikd51ru.pdf>.
68. NovAtel's GLIDE™ Technology [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://webone.novatel.ca/assets/Documents/Papers/D12139.pdf>
69. Дьяконов В. П. Matlab 6.5 SP1/7+ Simulink 5/6. Основы применения. / В. П. Дьяконов – М.: СОЛОН- Пресс, 2005. – 800 с.
70. В. П. Дьяконов Matlab 6.5 SP1/7+ Simulink 5/6 в математике и моделировании. / В. П. Дьяконов – М.: СОЛОН- Пресс, 2005. – 576 с.
71. Smoothing filter time constant [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.ecacnav.com/downloads/ESTBNT_WG4_M3ENAC1.pdf
<http://www.hemispheregps.com/>
72. European GNSS Agency (2017), GNSS Market Report, Issue 5, available at https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss_market_report_2017_-_surveying.pdf (Accessed 28 November 2017)
73. Баранов Г. Л., Кошовий А. А., Падалко В. Г., Скорик Є. Т., Хавило В.І. Радіонавігаційний план України. Посібник. Під загальною редакцією д.т.н. Кошового А. А. – Київ, видавництво «КВІЦ», 2002. - 77 с.
74. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Трикоз В. П., Вишнякова Є. В., Газнюк М. О. Впровадження супутникових навігаційних технологій та зв'язку в систему моніторингу та управління рухомими об'єктами. Научно-технический журнал. Технологические системы. № 3, К. : 2006. – С. 45–47. ISSN: друкване –2074-0603.
75. Скорик Є. Т., Кондратюк В. М. Супутникові технології навігації та зв'язку для автотранспортної галузі, «Наука та інновації» 2007, 3 (1): 67–83.
76. Скорик Є. Т., Пасічник Л. П., Кондратюк В. М. Супутникові технології радіонавігації та радіозв'язку на залізничному транспорті «Наука та інновації» 2007, 3 (1): 90–105.
77. Жаліло О., Желанов О., Шелковенков Д., Шокало В., Кондратюк В., Литвин М, Флерко С., Черевко В. Результати експериментальних досліджень реалізації DGPS/RTK режиму супутникового позиціонування з використанням NTRIP-технології. Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства

УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва», 2008. –
Вип. 1(15). Львів. – С. 125–132. *SSN*: 1819-1339.

78. Яцків Я. С., Харченко В. П., Шокало В. М., Терещук О. І., Жаліло О. О., Кондратюк В. М., Куценко О. В., Лук'янов О. М., Литвин М. О., Шелковенков Д. О., Желанов О. О., Грінченко О. В., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В. Практика створення в Україні інформаційно-вимірювальної GNSS-системи та мережної VRS-технології забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок. Наука та інновації, Т. 5, № 2. – С. 5–22, Видавничий дім «Академперіодика», Київ, 2009. *ISSN*: *друковане* – 2409–9066, 1815–2066 *електронне* – 2413–4996, 2413–497X.

79. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Застосування диференціальних методів глобальних навігаційних супутникових систем у визначеннях поточних координат рухомих об'єктів. Вісник Національного авіаційного університету. – К., 2010. – № 2(43). – С. 46–52. *ISSN*: *друковане* – 1813–1166 *електронне* – 2306–1472.

80. Кондратюк В. М. Усовершенствованный метод сглаживания дифференциальных кинематических кодовых ГНС-наблюдений. Системы управління, навігації та зв'язку – 2011. – № 3(19). – С. 8–13. *ISSN*: *друковане* – 2073-7394.

81. Кондратюк В. М. Сравнительный анализ методов и алгоритмов кодово-фазового ГНС-позиционирования. Вісник інженерної академії – 2012. – № 1. – С. 57–61.

82. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М. Інформаційне забезпечення автоматизованого керування літальним апаратом з використанням системи GNSS. Вісник Національного авіаційного університету Київ, 2013. – № 2 (55). – С. 40–43.

83. Кондратюк В. М. Желанов А. А., Дицкий И. В., Бессонов Е. А. Модифицированный алгоритм сглаживания/фильтрации дифференциальных гнсс наблюдений в режиме кинематического позиционирования. Вестник НАУ. – 2014. – № 4. – С. 56–64.

84. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M. RPAS ADS-B Trajectory Control Data Transmission via Satellite. Proceedings of the NAU, 2017, v. 3, pp. 26–32.

85. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M., Ermakov A. U., Chernyuk E. O. Influence of Transmitter Nonlinearities on Data Transmission from Remotely Piloted Air System. Proceedings of the NAU, 2017, v. 3, pp. 33–41.

86. Kondratiuk V., Konin V., Kutsenko O., Ilynska S. Testing Static and Kinematic Modes of Precise Point Positioning Service in Ukraine. Radioelectronics and Communications Systems, 2019, 62(10). – С. 530–540. (**Scopus**).

87. Kondratiuk V. M., Konin V. V., Ilynska S. I., Kutsenko O. V. Zhuliany Airport as a Possible Candidate for Ranging and Integrity Monitoring Station placement in Kyiv region ISSN 1990-5548 Electronics and Control Systems 2019. N 4 (62): 16–23. ISSN: *друковане* – 1990–5548.

88. Жалило А. А., Кондратюк В. М., Куценко А. В., Конин В. В., Сушко В. Г., Харченко В. П., Шелковенков Д. А., Шокало В. М. GPS-навигация и геодезическая съемка – результаты экспериментальной верификации технологии OMNISTAR. Научный Вестник ГосНИИ «Аэронавигация», № 7. – М. : 2007. – С. 27–35.

89. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Ільницька С. І. Исследование работоспособности дифференциального сервиса на территории Украины. Научный вестник. Секция технических наук – г. Хелм, Польша, № 1/2009. – С. 51–61.

90. Kharchenko V., Kondratiuk V. Aerospace Navigation Technologies in Logistic. "Logistics and Transport" Journal, ISSN: 1734-2015. No 2 (2015). – P. 5–10.

91. Kharchenko V., Grekhov A., Kondratiuk V., Nagorna K. ADS-B Satellite Communication Channel Based on IEEE 802.16 Standard. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2017. ISSN 2255-9876 (online) ISSN 2255-968X (print) December 2017, vol. 5, pp. 18–27.

92. Kondratiuk V., Kovalevskiy E., Ilynska S. Determination of Space Debris Coordinates by Means of a Space Service Vehicle. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2017. Mar 2017, vol. 3, pp. 31–37.

93. Kondratiuk V., Kovalevskiy E., Ilynska S. Integrated Positioning System With Restricted Access to Navigation Satellite Signals. Transport and Aerospace

Engineering. RTU Press. Riga 2017. ISSN 2255-9876 (online) ISSN 2255-968X (print) December 2017, vol. 5, pp. 60–66.

94. Grekhov A., Kondratiuk V., Ilnitska S. RPAS Satellite Communication Channel Based on IEEE 802.11 b Standard. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2019, 7 (1), 32–40.

95. Grekhov A., Kondratiuk V., Ilnitska S. RPAS communication channels based on WCDMA 3GPP standard. Aviation, 2020, 24(1). – С. 42–49. **(Scopus)**.

96. Ilnitska S. I., Li F., Grekhov A., Kondratiuk V. Loss Estimation for Network-Connected UAV/RPAS Communications. IEEE Access, 2020, 8, стр. 137702–137710, 9149599. **(Scopus)**.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

97. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Способы и средства оценки тактико-технических характеристик широкозонных функциональных дополнений GPS (GNSS). Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.17–21.23.

98. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Методики экспериментальной оценки навигационных характеристик широкозонных функциональных дополнений GPS(GNSS). Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.10–21.16.

99. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Зарубежный опыт создания и применения систем FIS (Fight Inspection Systems) для контроля характеристик и сертификации авионики и аэронавигационного обеспечения воздушных судов с использованием DGPS (DGNSS) подсистем. Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.1–21.9.

100. Жалило А. А., Кондратюк В. М. Спутниковый высокоточный дифференциальный VBS&HP-сервис компании FUGRO/OMNISTAR BV: технологии GPS-местопределения и их характеристики. Сборник трудов

2-го Международного радиоэлектронный Форума (МРФ-2005) «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Международная конференция по системам локации и навигации (МКЛСН-2005), г. Харьков, ХНУРЭ, 19–23 сентября 2005 г., – Т. 2. – С. 516–519.

101. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Трикоз В. П., Вишнякова С. В., Газнюк М. О. Впровадження супутникових навігаційних технологій та зв'язку у систему моніторингу та управління рухомими об'єктами. 5-ий міжнародний авіакосмічний салон «Авіасвіт–XXI», 2006 р.

102. Харченко В. П., Кондратюк В. М. Аспекты создания и практической реализации интегрированных систем GIS, GPS и беспроводной связи. Материалы II Международной конференции GIS и GPS в практике. – г. Хелм, Польша, 19–20 апреля 2007 г. – С. 55–61.

103. Кондратюк В. М., Мелкумян В. Г. Оцінка якості навігаційного забезпечення супутникових радіонавігаційних систем з використанням диференціальної коригувальної інформації. Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2009». – Т. 1. – К. : НАУ, 2009. – С. 7.45–7.48.

104. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Тунік А. А., Ільницька С. І., Куценко О. В., Вишнякова С. В. Розробка інтегрованої навігаційної системи для безпілотного літального апарата. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2011», Київ, 19–21 квіт. 2011 р. – К., 2011. – Т. 2. – С. 8.14–8.17.

105. Кондратюк В. М., Желанов А. А. Высокоточное позиционирование движущихся объектов с использованием усовершенствованного метода сглаживания кодовых дифференциальных ГНСС-наблюдений. Сборник научных трудов 4-го международного радиоэлектронного форума (МРФ) «Прикладная электроника. Состояние и перспективы развития». 2011. – Т. 1, ч. 2. – С. 79–82.

106. Kharchenko V., Kondratyuk V., Kutsenko O. Experimental validation of small integrated navigation system. Proceedings of the Fifth World Congress “Aviation in the XXI-st century”: “Safety in Aviation and Space Technologies”. Vol. 2. Kyiv 2012. – P. 3.2.30–3.2.35.

107. Харченко В. П., Кондратюк В. М. Навігаційні технології в автотранспортній галузі. Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «ABIA-2013». – Т. 2. – К. : НАУ, 2013. – С. 7.42–7.46.

108. Kharchenko, V., Kondratyuk, V., Ilnytska, S., Kutsenko, O., Larin, V. Urgent problems of UAV navigation system development and practical implementation. 2013 IEEE 2nd International Conference on Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments, APUAVD 2013 – Proceedings, 2013. – С. 157–160, 6705313. (**Scopus**).

109. Kharchenko V. P., Kondratyuk V. M., Ilnytska S. I., Kutsenko O. V. Recommendations to UAV navigation system test validation and some practical results. 2014 IEEE 3rd International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC 2014 – Proceedings, 2014. – С. 31–34, 6979723. (**Scopus**).

110. Kharchenko V., Kondratyuk V., Kutsenko O., Vyshnyakova E., Ismael A. Some practical results of integrated navigation system flight testing. Proceedings of the Sixth World Congress “Aviation in the XXI-st century”: “Safety in Aviation and Space Technologies”. September 23–25, 2014. Vol. 2. Kyiv 2014. – P. 3.2.30–3.3.1.

111. Kharchenko V., Konin V., Kondratyuk V., Ilnytska S., Kutsenko O., Vyshnyakova E., Shmelyov T., Shyshkov F. Acceleration of GNSS applications development and facilitation of their broad acceptance in Ukraine through international cooperation and own experience Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції «ABIA–2015». – К. : НАУ, 2015. – С. 8.89–8.101.

112. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M., Nagorna K. N. Nonlinearities Impact on RPAS Data Transmission. 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2017 – Proceedings, 2018, January, c. 188–191. (**Scopus**).

113. Kutsenko O. V., Ilnytska S. I., Kondratyuk V. M., Konin V. V. Unmanned Aerial Vehicle Position Determination in GNSS Landing System. 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2017 – Proceedings, 2018, January, c. 79–83 (**Scopus**).

114. Ilnytska S. I., Kondratyuk V. M., Vyshnyakova Ye. V., Tunik A. A. Experimental Investigation of Multi-GNSS in Static Mode. 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC 2018 – Proceedings, 2018, с. 132–134, 8576271. **(Scopus)**.

115. Ilnytska S., Kondratiuk V., Kutsenko O., Konin V. Potential Possibilities of Highly Accurate Satellite Navigation Use for Landing Operations of Unmanned Aerial Systems. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2019 – Proceedings, 2019, с. 174–177, 8943873. **(Scopus)**.

116. Grekhov A., Kondratiuk V., Ilnytska S., Vyshnyakova E., Kondratiuk M., Trykoz V. Satellite Traffic Simulation for RPAS Swarms. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2019 – Proceedings, 2019, с. 265–269, 8943881. **(Scopus)**.

117. Баранов Г. Л., Беляєвський Л. С., Дмитриченко М. Ф., Дмитрієв М. М., Кошовий А. А., Кондратюк В. М., Левковець П. Р., Топольськов Є. О. Система диспетчерського керування рухомими об'єктами з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації. Патент на винахід № 75709 Бюл. № 5, 2006 р.

118. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Погурельський О. С. Система диспетчерського керування рухомими біологічними об'єктами з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації: пат. № 39917 Україна: МПК G01S 5/14; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.

119. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Ільницька С. І. Апаратно-програмний комплекс моніторингу та управління рухомими об'єктами : пат. № 50277 Україна, МПК G01S 5/14; опубл. 25.05.10, Бюл. № 10.

120. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Харченко В. П. Спосіб придушення широкосмугових завад в аеронавігації: пат. № 75978 Україна, МПК H01Q 21/06; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24.

121. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Ільницька С. І., Кондратюк М. В., Васильєв І. В., Савченко О. В. Система високоточного визначення координат на основі супутникових радіонавігаційних систем: пат. Україна: МПК (2006.01) G01S 5/14. № 78185; заявл. 10.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.

122. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Харченко В. П. Комбінований спосіб пеленгації джерела випромінювання радіосигналу: пат. № 129990 Україна; опубл. 26.11.2018, бюл. № 22.

123. Харченко В. П., Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Кондратюк М. В. Комбінований спосіб визначення координат радіовипромінюючих об'єктів: пат. № 139423 Україна; опубл. 10.01.2020, бюл. № 1.

124. «Розроблення та впровадження апаратно-програмного комплексу моніторингу та управління спеціальними рухомими об'єктами» (№ держреєстрації 0106U011430).

125. «Теоретичні засади високоточних визначень координат в реальному часі на основі супутникових радіонавігаційних систем» (№ держреєстрації 0108U004005).

126. «Дослідження шляхів сертифікації системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України (СКНЗУ) щодо якості надання послуг та забезпечення безпеки їх використання споживачами сигналів глобальних навігаційних супутникових систем», шифр «Безпека» (№ держреєстрації 0107U006891).

127. «Навігація» Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем». («Навігація-Сертифікат». Сертифікація системи). шифр «Навігація-Сертифікат» (№ держреєстрації 0108U008542).

128. «Розробка та дослідження апаратно-програмних засобів споживача для обміну даними з центром обробки спостережень» (№ держреєстрації 0107U000153).

129. «Розроблення апаратно-програмних засобів інтегрованої інерційно-супутникової навігаційної системи для безпілотних літальних апаратів (БПЛА)» (№ держреєстрації 0111U000173).

130. «Мультизадачний комплекс автоматичного управління на базі інтегрованої інерційно-супутникової системи для БПЛА» (№ держреєстрації 0115U002467).

131. Горизонт 2020. Грантова угода № 641517 UKRAINE «Відтворення обізнаності та інновацій в Україні на основі ЄГНСС» ("UKraine Replication, Awareness and INnovation based on EGNSS").

132. «Система моніторингу доступності радіонавігаційного поля при заходах на посадку літальних апаратів за сигналами GNSS» (№ держреєстрації 0117U002371).

Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації*Список публікацій здобувача*

Список публікацій у фахових наукових виданнях України

1. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Трикоз В. П., Вишнякова Є. В., Газнюк М. О. Впровадження супутникових навігаційних технологій та зв'язку в систему моніторингу та управління рухомими об'єктами. Научно-технический журнал. Технологические системы. № 3, К. : 2006. – С. 45–47. ISSN: друковане –2074-0603.
2. Скорік Є. Т., Кондратюк В. М. Супутникові технології навігації та зв'язку для автотранспортної галузі, «Наука та інновації» 2007, 3 (1): 67–83.
3. Скорік Є. Т., Пасічник Л. П., Кондратюк В. М. Супутникові технології радіонавігації та радіозв'язку на залізничному транспорті «Наука та інновації» 2007, 3 (1): 90–105.
4. Жаліло О., Желанов О., Шелковенков Д., Шокало В., Кондратюк В., Литвин М, Флерко С., Черевко В. Результати експериментальних досліджень реалізації DGPS/RTK режиму супутникового позиціонування з використанням NTRIP-технології. Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва», 2008. – Вип. 1(15). Львів. – С. 125–132. SSN: 1819-1339.
5. Яцків Я. С., Харченко В. П., Шокало В. М., Терещук О. І., Жаліло О. О., Кондратюк В. М., Куценко О. В., Лукь'янов О. М., Литвин М. О., Шелковенков Д. О., Желанов О. О., Грінченко О. В., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В. Практика створення в Україні інформаційно-вимірювальної GNSS-системи та мережної VRS-технології забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок. Наука та інновації, Т. 5, № 2. – С. 5–22, Видавничий дім «Академперіодика», Київ, 2009. ISSN: друковане – 2409–9066, 1815–2066 електронне – 2413–4996, 2413–497X.
6. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Застосування диференціальних методів глобальних навігаційних супутникових систем у визначеннях поточних координат рухомих об'єктів. Вісник Національного авіаційного університету. – К., 2010. – № 2(43). – С. 46–52. ISSN: друковане – 1813–1166 електронне – 2306–1472.

7. Кондратюк В. М. Усовершенствованный метод сглаживания дифференциальных кинематических кодовых ГНСС-наблюдений. Системы управління, навігації та зв'язку – 2011. – № 3(19). – С. 8–13. ISSN: друковане – 2073-7394.

8. Кондратюк В. М. Сравнительный анализ методов и алгоритмов кодово-фазового ГНСС-позиционирования. Вісник інженерної академії – 2012. – № 1. – С. 57–61.

9. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М. Інформаційне забезпечення автоматизованого керування літальним апаратом з використанням системи GNSS. Вісник Національного авіаційного університету Київ, 2013. – № 2 (55). – С. 40–43.

10. Кондратюк В. М. Желанов А. А., Дицкий И. В., Бессонов Е. А. Модифицированный алгоритм сглаживания/фильтрации дифференциальных гнсс наблюдений в режиме кинематического позиционирования. Вестник НАУ. – 2014. – № 4. – С. 56–64.

11. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M. RPAS ADS-B Trajectory Control Data Transmission via Satellite. Proceedings of the NAU, 2017, v. 3, pp. 26–32.

12. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M., Ermakov A. U., Chernyuk E. O. Influence of Transmitter Nonlinearities on Data Transmission from Remotely Piloted Air System. Proceedings of the NAU, 2017, v. 3, pp. 33–41.

13. Kondratiuk V., Konin V., Kutsenko O., Ilnytska S. Testing Static and Kinematic Modes of Precise Point Positioning Service in Ukraine. Radioelectronics and Communications Systems, 2019, 62(10). – С. 530–540. (Scopus).

14. Kondratiuk V. M., Konin V. V., Ilnytska S. I., Kutsenko O. V. Zhuliany Airport as a Possible Candidate for Ranging and Integrity Monitoring Station placement in Kyiv region ISSN 1990-5548 Electronics and Control Systems 2019.

N 4 (62): 16–23. ISSN: друковане – 1990–5548.

Список публікацій у міжнародних фахових журналах за кордоном

15. Жалило А. А., Кондратюк В. М., Куценко А. В., Конин В. В., Сушко В. Г., Харченко В. П., Шелковенков Д. А., Шокало В. М. GPS-навигация и геодезическая

съемка – результаты экспериментальной верификации технологии OMNISTAR. Научный Вестник ГосНИИ «Аэронавигация», № 7. – М. : 2007. – С. 27–35.

16. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Ільницька С. І. Исследование работоспособности дифференциального сервиса на территории Украины. Научный вестник. Секция технических наук – г. Хелм, Польша, № 1/2009. – С. 51–61.

17. Kharchenko V., Kondratiuk V. Aerospace Navigation Technologies in Logistic. "Logistics and Transport" Journal, ISSN: 1734-2015. No 2 (2015). – P. 5–10.

18. Kharchenko V., Grekhov A., Kondratiuk V., Nagorna K. ADS-B Satellite Communication Channel Based on IEEE 802.16 Standard. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2017. ISSN 2255-9876 (online) ISSN 2255-968X (print) December 2017, vol. 5, pp. 18–27.

19. Kondratiuk V., Kovalevskiy E., Іlnytska S. Determination of Space Debris Coordinates by Means of a Space Service Vehicle. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2017. Mar 2017, vol. 3, pp. 31–37.

20. Kondratiuk V., Kovalevskiy E., Іlnytska S. Integrated Positioning System With Restricted Access to Navigation Satellite Signals. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2017. ISSN 2255-9876 (online) ISSN 2255-968X (print) December 2017, vol. 5, pp. 60–66.

21. Grekhov A., Kondratiuk V., Іlnytska S. RPAS Satellite Communication Channel Based on IEEE 802.11 b Standard. Transport and Aerospace Engineering. RTU Press. Riga 2019, 7 (1), 32–40.

22. Grekhov A., Kondratiuk V., Іlnytska S. RPAS communication channels based on WCDMA 3GPP standard. Aviation, 2020, 24(1). – С. 42–49. (Scopus).

23. Іlnytska S. I., Li F., Grekhov A., Kondratiuk V. Loss Estimation for Network-Connected UAV/RPAS Communications. IEEE Access, 2020, 8, стр. 137702–137710, 9149599. (Scopus).

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

24. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Способы и средства оценки тактико-технических характеристик широкозонных функциональных дополнений GPS (GNSS). Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.17–21.23.

25. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Методики експериментальної оцінки навігаційних характеристик широкозонних функціональних доповнень GPS(GNSS). Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.10–21.16.

26. Харченко В. П., Жалило А. А., Конин В. В., Кондратюк В. М. Зарубежный опыт создания и применения систем FIS (Fight Inspection Systems) для контроля характеристик и сертификации авионики и аэронавигационного обеспечения воздушных судов с использованием DGPS (DGNSS) подсистем. Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26–28 квітня 2004 р. – Т. 2. – С. 21.1–21.9.

27. Жалило А. А., Кондратюк В. М. Спутниковый высокоточный дифференциальный VBS&HP-сервис компании FUGRO/OMNISTAR BV: технологии GPS-местопределения и их характеристики. Сборник трудов 2-го Международного радиоэлектронный Форума (МРФ-2005) «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Международная конференция по системам локации и навигации (МКЛСН-2005), г. Харьков, ХНУРЭ, 19–23 сентября 2005 г., – Т. 2. – С. 516–519.

28. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Трикоз В. П., Вишнякова Є. В., Газнюк М. О. Впровадження супутникових навігаційних технологій та зв'язку у систему моніторингу та управління рухомими об'єктами. 5-ий міжнародний авіакосмічний салон «Авіасвіт–XXI», 2006 р.

29. Харченко В. П., Кондратюк В. М. Аспекти создания и практической реализации интегрированных систем GIS, GPS и беспроводной связи. Материалы II

Международной конференции GIS и GPS в практике. – г. Хелм, Польша, 19–20 апреля 2007 г. – С. 55–61.

30. Кондратюк В. М., Мелкумян В. Г. Оцінка якості навігаційного забезпечення супутникових радіонавігаційних систем з використанням диференціальної коригувальної інформації. Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції “АВІА-2009”. – Т. 1. – К. : НАУ, 2009. – С. 7.45–7.48.

31. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Тунік А. А., Ільницька С. І., Куценко О. В., Вишнякова Є. В. Розробка інтегрованої навігаційної системи для безпілотного літального апарата. Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2011», Київ, 19–21 квіт. 2011 р. – К., 2011. – Т. 2. – С. 8.14–8.17.

32. Кондратюк В. М., Желанов А. А. Высокоточное позиционирование движущихся объектов с использованием усовершенствованного метода сглаживания кодовых дифференциальных ГНСС-наблюдений. Сборник научных трудов 4-го международного радиоэлектронного форума (МРФ) «Прикладная электроника. Состояние и перспективы развития». 2011. – Т. 1, ч. 2. – С. 79–82.

33. Kharchenko V., Kondratyuk V., Kutsenko O. Experimental validation of small integrated navigation system. Proceedings of the Fifth World Congress “Aviation in the XXI-st century”: “Safety in Aviation and Space Technologies”.

Vol. 2. Kyiv 2012. – P. 3.2.30–3.2.35.

34. Харченко В. П., Кондратюк В. М. Навігаційні технології в автотранспортній галузі. Матеріали ХІ міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2013». – Т. 2. – К. : НАУ, 2013. – С. 7.42–7.46.

35. Kharchenko, V., Kondratyuk, V., Ilytska, S., Kutsenko, O., Larin, V. Urgent problems of UAV navigation system development and practical implementation. 2013 IEEE 2nd International Conference on Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments, APUAVD 2013 – Proceedings, 2013. –

C. 157–160, 6705313. (Scopus).

36. Kharchenko V. P., Kondratyuk V. M., Ilytska S. I., Kutsenko O. V. Recommendations to UAV navigation system test validation and some practical results.

2014 IEEE 3rd International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC 2014 – Proceedings, 2014. – С. 31–34, 6979723. (Scopus).

37. Kharchenko V., Kondratiuk V., Kutsenko O., Vyshnyakova E., Ismael A. Some practical results of integrated navigation system flight testing. Proceedings of the Sixth World Congress “Aviation in the XXI-st century”: “Safety in Aviation and Space Technologies”. September 23–25, 2014. Vol. 2. Kyiv 2014. – P. 3.2.30–3.3.1.

38. Kharchenko V., Konin V., Kondratiuk V., Ilnytska S., Kutsenko O., Vyshnyakova E., Shmelyov T., Shyshkov F. Acceleration of GNSS applications development and facilitation of their broad acceptance in Ukraine through international cooperation and own experience Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції «АВІА–2015». – К. : НАУ, 2015. – С. 8.89–8.101.

39. Grekhov A. M., Kondratiuk V. M., Nagorna K. N. Nonlinearities Impact on RPAS Data Transmission. 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2017 – Proceedings, 2018, January, c. 188–191. (Scopus).

40. Kutsenko O. V., Ilnytska S. I., Kondratiuk V. M., Konin V. V. Unmanned Aerial Vehicle Position Determination in GNSS Landing System. 2017 IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2017 – Proceedings, 2018, January, c. 79–83 (Scopus).

41. Ilnytska S. I., Kondratiuk V. M., Vyshnyakova Ye. V., Tunik A. A. Experimental Investigation of Multi-GNSS in Static Mode. 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC 2018 – Proceedings, 2018, c. 132–134, 8576271. (Scopus).

42. Ilnytska S., Kondratiuk V., Kutsenko O., Konin V. Potential Possibilities of Highly Accurate Satellite Navigation Use for Landing Operations of Unmanned Aerial Systems. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2019 – Proceedings, 2019, c. 174–177, 8943873. (Scopus).

43. Grekhov A., Kondratiuk V., Ilnytska S., Vyshnyakova E., Kondratiuk M., Trykoz V. Satellite Traffic Simulation for RPAS Swarms. 2019 IEEE 5th International Conference

Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD 2019 – Proceedings, 2019, с. 265–269, 8943881. (Scopus).

Патенти

44. Баранов Г. Л., Беляєвський Л. С., Дмитриченко М. Ф., Дмитрієв М. М., Кошовий А. А., Кондратюк В. М., Левковець П. Р., Топольськов Є. О. Система диспетчерського керування рухомими об'єктами з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації. Патент на винахід № 75709 Бюл. № 5, 2006 р.

45. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Погурельський О. С. Система диспетчерського керування рухомими біологічними об'єктами з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації: пат. № 39917 Україна: МПК G01S 5/14; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.

46. Харченко В. П., Кондратюк В. М., Газнюк М. О., Вишнякова Є. В., Трикоз В. П., Куценко О. В., Ільницька С. І. Апаратно-програмний комплекс моніторингу та управління рухомими об'єктами : пат. № 50277 Україна, МПК G01S 5/14; опубл. 25.05.10, Бюл. № 10.

47. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Харченко В. П. Спосіб придушення широкосмугових завад в аеронавігації: пат. № 75978 Україна, МПК H01Q 21/06; опубл. 25.12.2012, Бюл № 24.

48. Харченко В. П. Кондратюк В. М. Вишнякова Є. В. Трикоз В. П., Куценко О. В., Ільницька С. І., Кондратюк М. В. Васильєв І. В. Савченко О. В. Система високоточного визначення координат на основі супутникових радіонавігаційних систем: пат. Україна: МПК (2006.01) G01S 5/14. № 78185; заявл. 10.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.

49. Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Харченко В. П. Комбінований спосіб пеленгації джерела випромінювання радіосигналу: пат. № 129990 Україна; опубл. 26.11.2018, бюл. № 22.

50. Харченко В. П., Ковалевський Е. О., Кондратюк В. М., Кондратюк М. В. Комбінований спосіб визначення координат радіовипромінюючих об'єктів: пат. № 139423 Україна; опубл. 10.01.2020, бюл. № 1.

Звіти з НДР

51. «Розроблення та впровадження апаратно-програмного комплексу моніторингу та управління спеціальними рухомими об'єктами» (№ держреєстрації 0106U011430).

52. «Теоретичні засади високоточних визначень координат в реальному часі на основі супутникових радіонавігаційних систем» (№ держреєстрації 0108U004005).

53. «Дослідження шляхів сертифікації системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України (СКНЗУ) щодо якості надання послуг та забезпечення безпеки їх використання споживачами сигналів глобальних навігаційних супутникових систем», шифр «Безпека» (№ держреєстрації 0107U006891).

54. «Навігація» Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем». («Навігація-Сертифікат». Сертифікація системи). шифр «Навігація-Сертифікат» (№ держреєстрації 0108U008542).

55. «Розробка та дослідження апаратно-програмних засобів споживача для обміну даними з центром обробки спостережень» (№ держреєстрації 0107U000153).

56. «Розроблення апаратно-програмних засобів інтегрованої інерційно-супутникової навігаційної системи для безпілотних літальних апаратів (БПЛА)» (№ держреєстрації 0111U000173).

57. «Мультизадачний комплекс автоматичного управління на базі інтегрованої інерційно-супутникової системи для БПЛА» (№ держреєстрації 0115U002467).

58. Горизонт 2020. Грантова угода № 641517 UKRAINE «Відтворення обізнаності та інновацій в Україні на основі ЄГНСС» ("UKraine Replication, Awareness and INnovation based on EGNSS").

59. «Система моніторингу доступності радіонавігаційного поля при заходах на посадку літальних апаратів за сигналами GNSS» (№ держреєстрації 0117U002371).

60. «Розроблення інтегрованої системи наведення, навігації та управління польотом дрона» (№ держреєстрації 0119U100629).

61. «Структурно-параметричний синтез розроблення технології побудови геліоенергетичних стратосферних платформ з адаптивно-нейронним керуванням» (№ держреєстрації 0120U101989).

Додаток Б. Акти про реалізацію результатів наукових досліджень



ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН
«УКРОБОРОНПРОМ»
Державне підприємство
«ОРИЗОН – НАВІГАЦІЯ»
вул. Мазура, 24, м. Сміла,
Черкаська обл., Україна, 20708
тел./факс: (04733) 221-08, 222-05
тел. (04733) 422-82
E-mail: orizon@orizon-navigation.com
Код ЄДРПОУ 22794124

05.02.2021 № 00601/159/01 На № _____ від _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заступник директора з розвитку,
маркетингу і логістики

А.Т.Кривов'яз
« 05.02.2021 2021



АКТ

впровадження результатів наукових досліджень
старшого наукового співробітника науково-навчального центру «Аерокосмічний центр»
Національного авіаційного університету

Кондратюка В.М.

Комісія у складі:

Терехов С.О. - помічник директора, голова комісії,

Котов М.Ф. – начальник відділу, член комісії,


Кулюкін В.О. – начальник конструкторського бюро, член комісії,

склала цей акт про те, що кандидатська дисертація Кондратюка В.М. «Методи і алгоритми прецензійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем» є актуальною. Результати дисертаційної роботи відповідають вимогам сучасності і мають практичне застосування. Державним підприємством «Оризон-Навігація» при відпрацюванні можливих варіантів створення пілотажно-навігаційного обладнання були використані наступні результати даної роботи:

1. Метод обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень, який відрізняється від відомих тим, що задача згладжування/фільтрації кодових спостережень вирішується з використанням безперервних фазових спостережень в режимі кінематичної зйомки та враховує вплив накрутки фази несучої.
2. Модернізований метод обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень, який відрізняється від відомих тим, що дозволяє усунути варіаційні складові похибки рішення і врахувати скачки координат, викликані різкою зміною робочого сузір'я супутників.
3. Комісія відмічає доцільність використання запропонованих Кондратюком В.М. методів при створенні пілотажно-навігаційної системи для малих літальних апаратів.

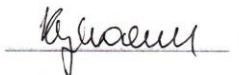
Акт не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород і призначений для пред'явлення в спеціалізовану вчену раду.

Голова комісії

 Терехов С.О.

Члени комісії

 Котов М.Ф.

 Кулюкін В.О.



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

В.о. директора ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління»,
кандидат фізико-математичних наук, с.н.с.

А.В. Цулая

2014 р.



АКТ

впровадження результатів наукових досліджень
старшого наукового співробітника науково-навчального центру «Аерокосмічний центр»
Національного авіаційного університету Кондратюка В.М.

Комісія у складі співробітників ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління»: Баранова Г.Л. – заступника директора з наукової роботи, доктора технічних наук, професора - голова комісії, Гарама В.П. – кандидата технічних наук, Руденка Є.Я. – кандидата технічних наук, - членів комісії,

склала цей акт про те, що результати наукових досліджень Кондратюка В.М. були впроваджені у науково-технічних розробках державного підприємства «Центрального науково-дослідного інституту навігації і управління» для оптимізації законів управління транспортними засобами, у тому числі високошвидкісними, та встановила, що при цьому:

- використовувалась запропонована Кондратюком В.М. модифікація «leveling»-алгоритму, яка базується на використанні даних приросту неперервних фазових спостережень в часі та включає в обробку фазові ГНСС-спостереження і координатні оцінки, отримані з використанням «leveling»-алгоритму;

- даний підхід дозволяє практично повністю ліквідувати варіації і скачки координат, викликані зміною робочого сузір'я супутників (зміни GDOP), до якого досить чутливе згладжене рішення.

Комісія відмічає доцільність використання положень, розробок і практичних рекомендацій, розглянутих наукових результатів Кондратюка В.М., при розробці апаратури визначення координат за сигналами глобальних супутникових навігаційних систем

Акт не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород і призначений для пред'явлення в спеціалізовану вчену раду.

Голова комісії

Г.Л. Баранов

Члени комісії

В.П. Гарам

Є.Я. Руденко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

ТОВ «Є.П.С.»

Директор

С.М.Флерко

«01» грудня 2020 р.

**АКТ**

впровадження результатів наукових досліджень
співробітника науково-навчального центру «Аерокосмічний центр»
Національного авіаційного університету
Кондратюка В.М.

Комісія у складі:

Дейнеко Валерій Миколайович, к.т.н., с.н.с. – голова комісії,

Павлов Сергій Юрійович – член комісії,

Фортуна Віктор Олександрович - член комісії,

склала цей акт про те, що результати кандидатської дисертації Кондратюка В.М. «Методи і алгоритми прецизійного визначення місцеположення рухомих об'єктів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем», що результати дисертаційної роботи є актуальними і мають практичне застосування, ТОВ «Є.П.С.» при верифікації параметрів ГНСС обладнання в статичному та кінематичному режимах були використані наступні результати дисертаційної роботи:

1. Метод комбінованого диференціального кодового і фазового рішення обробки ГНСС-спостереження без здійснення операцій згладжування-фільтрації.
2. Методика оцінки фактичної точності координатних визначень з використанням диференціальної коригувальної інформації для верифікації ГНСС-устаткування користувача в статичному та кінематичному режимах.
3. Комісія відмічає доцільність використання запропонованих методу та методики Кондратюком В.М. для верифікації ГНСС-устаткування користувача в статичному та кінематичному режимах.

Акт не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород і призначений для пред'явлення в спеціалізовану вчену раду.

Голова комісії

Дейнеко В.М.

Члени комісії

Павлов С.Ю.

Фортуна В.О.