

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЯКОВЧЕНКО ОЛЕКАНДР ІВАНОВИЧ

УДК 621.386.98

ДИСЕРТАЦІЯ
**РОЗВИТОК МЕТОДІВ ВИСОКОТОЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ
ПАРАМЕТРІВ РУХУ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ
ПО БОРТОВИМ СПОСТЕРЕЖЕННЯМ СИГНАЛІВ ГЛОБАЛЬНИХ
НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

О. І. Яковченко

Науковий керівник **Жаліло Олексій Олександрович**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

ХАРКІВ - 2023

АНОТАЦІЯ

Яковченко О. І. Розвиток методів високоточного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів по бортовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.17 «Радіотехнічні та телевізійні системи». – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2023.

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача високоточного визначення параметрів руху НКА по бортовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) шляхом удосконалення відомих і створення нових методів і алгоритмів обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень в режимі PPP (Precise Point Positioning), включаючи нові методи розв’язання неоднозначності фазових спостережень, що дозволяє виконувати позиціонування низькоорбітальних космічних апаратів (НКА) та навколосемних об’єктів на сантиметровому рівні точності.

Викладено результати розвитку і верифікації методів і алгоритмів отримання «плаваючого» (float) та/або дискретного/цілочисельного (fixed) розв’язання фазової неоднозначності (РФН) і їхніх модифікацій в ході PPP-рішень, які реалізують запропоновані автором спеціальні процедури спільного МНК-оцінювання сукупності інформаційних і неінформаційних параметрів з використанням фазових і кодових ГНСС-спостережень робочого сузір’я супутників.

Запропоновані і досліджені алгоритми передбачають використання багатоетапної процедури обробки спостережень, де на кожному з етапів виконується уточнення рішення. Це дозволяє отримати надійне рішення задачі визначення параметрів руху НКА та місцеположення приземних об’єктів

на сантиметровому рівні точності в різних умовах проведення вимірювань. Так, вперше запропоновані алгоритми, які в ході РФН в якості проміжного рішення використовують, на відміну від відомих підходів, не «безіоносферні» кодові псевдовідстані низької точності, а більш точне (у кілька разів) нове комбіноване кодово-фазове координатне рішення (на основі спільної обробки кодових спостережень першої частоти ГНСС і двохчастотних неоднозначних фазових «безгеометричних» ГНСС-спостережень), що також дає суттєве (на $\sim 20\div 30\%$) збільшення надійності РФН та зменшення інтервалу його досягнення (ініціалізації/збіжності PPP-рішення).

Запропонована апробована нова реалізація метода оцінки комбінацій інструментальних кодових та фазових затримок в бортовій апаратурі супутників ГНСС (GPS) і формування поправок, які вираховуються по спостереженням не тільки глобальних, а й регіональних мереж ГНСС-станцій (зокрема, української мережі перманентних станцій) та дозволяють досягти надійного дискретного/цілочисельного РФН і реалізувати найбільш точний fixed-метод PPP.

В роботі показано, що при реалізації кінематичного методу досягнута потенційна точність визначення параметрів траєкторій НКА, яка відповідає найсучаснішим світовим досягненням і задовольняє найжорсткішим вимогам до точності для існуючих та майбутніх космічних місій. Зокрема, експериментальні результати показали, що стійко досягається визначення координат НКА (PPP-рішення) з середньоквадратичними похибками (СКП), які не перевищують $\sim 10\div 20$ см (з вірогідністю $P \approx 95\%$) з використанням «плаваючого» методу РФН та $\sim 3\div 5$ см ($P \approx 95\%$) з використанням дискретного методу РФН. Складові вектора швидкості НКА визначаються з похибками (СКП), які не перевищують $\sim 1\div 2$ мм/с ($P \approx 95\%$).

Для статичного режиму PPP-визначень приземних об'єктів СКП визначення координат на добовому інтервалі не перевищують ~ 8 мм ($P \approx 95\%$). При реалізації дискретного/цілочисельного РФН у статичному режимі позиціонування середній час ініціалізації становить $\sim 15\div 20$ хв., після чого

похибки точкових оцінок координат не перевищують $\sim 2\div 5$ см. Для кінематичного режиму PPP-визначень СКП оцінок координат приземних об'єктів на інтервалі спостережень ~ 2 години не перевищують $\sim 3\text{--}5$ см по плановим координатам і $\sim 7\text{--}8$ см по висоті. Такі результати відповідають найкращим досягненням провідних наукових лабораторій світу.

Достовірність наукових результатів і висновків, сформульованих в дисертації, доведена, перш за все, експериментальною перевіркою основних викладених наукових положень на великій кількості реальних сесій ГНСС-спостережень. Запропоновані способи оцінки фактичної точності координатних визначень, включаючи підхід з реалізацією фазового диференціального методу точного позиціонування, що дозволило провести достовірну верифікацію PPP-рішень для статичного та кінематичного позиціонування.

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), розв'язання фазової неоднозначності (РФН), режим точного позиціонування PPP (Precise Point Positioning), спостереження, алгоритм, точність, похибка, надійність, верифікація.

ABSTRACT

***Yakovchenko O.I.* Development of the methods for high precision determination of the motion parameters of Low Earth Orbit satellites based on the on-board observations of global navigation satellite systems signals. – Qualifying scientific work as a manuscript.**

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (PhD) in specialty 05.12.17 «Radio engineering and Television systems» – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2023.

The dissertation solves the scientific and technical problem of high precision determination of the motion parameters of Low Earth Orbit satellites (LEOs) based

on the on-board observations of global navigation satellite systems (GNSS) signals by improving the known methods and creating new methods and algorithms for processing carrier-phase and code GNSS-observations in the PPP (Precise Point Positioning) mode, including new methods for resolving the ambiguity of carrier phase observations, allowing the positioning of the LEOs and near-ground objects at the centimeter level of the accuracy.

There are presented the results of the development and verification of methods and algorithms for obtaining «floating» (float) and/or discrete/integer (fixed) resolution of carrier-phase ambiguity (CPAR) and their modifications in the course of PPP solutions that implement the special procedures proposed by the author for conjoint LSM-estimation of the information and non-information parameters using carrier phase and code GNSS-observations of the working constellation of satellites.

The proposed and studied algorithms involve the use of a multi-stage procedure for processing the observations, where at each stage the solution is refined. This makes it possible to obtain a reliable solution to the problem of determining the motion parameters of the LEOs and the location of near-ground objects at the centimeter level of accuracy under different measurement conditions. So, for the first time, the algorithms have been proposed, that in the course of CPAR use as an intermediate solution in contrast to the known approaches, not «ionosphere-free» code pseudoranges of low accuracy, but a more accurate (several times) new combined (smoothed) code+phase coordinate solution (based on a common processing code pseudoranges of the first (L1) GNSS/GPS frequency and dual-frequency ambiguous phase «geometry-free» GNSS-observations), which gives a significant (by ~20÷30%) increase in the reliability of the CPAR and a decrease the interval for its achievement (initialization/convergence of the PPP solution).

It is suggested and tested new implementation of the method for estimating the combinations of instrumental code and carrier-phase delays in the on-board equipment of GNSS (GPS) satellites and generating the corrections calculated from observations of not only global, but also regional networks of GNSS-stations

(in particular, the Ukrainian network of permanent reference stations), allowing achieve the reliable discrete/integer CPAR and to realize the most accurate PPP fixed method.

The dissertation shows that when implementing the kinematic mode the potential accuracy of determining the LEOs trajectory parameters has been achieved, which meets the most modern world achievements and satisfies the stringent accuracy requirements for existing and future space missions. In particular, the experimental results have shown that a stable determination of the LEOs coordinates (PPP-solutions) is achieved with root-mean-square (RMS) errors not exceeding $\sim 10 \div 20$ cm (with a probability $P \approx 95\%$) using the float CPAR method and $\sim 3 \div 5$ cm ($P \approx 95\%$) using the discrete fixed CPAR method. The components of the velocity vector of the LEOs are determined with errors (RMS) not exceeding $\sim 1 \div 2$ mm/sec ($P \approx 95\%$).

For the static mode of PPP-determinations of near-ground objects the RMS of the estimates of coordinates on a daily interval do not exceed ~ 8 mm ($P \approx 95\%$). When implementing a fixed CPAR in a static positioning mode the average initialization time is $\sim 15 \div 20$ min, after which the errors of point estimates of coordinates do not exceed $\sim 2 \div 5$ cm. For the kinematic mode of PPP-determinations RMS of the coordinate estimates for near-ground objects over the observation interval of ~ 2 hours do not exceed $\sim 3-5$ cm in plan and $\sim 7-8$ cm in height. Such results correspond to the achievements of the leading scientific laboratories of the world.

The reliability of the scientific results and conclusions formulated in the dissertation has been proven, first of all, by experimental verification of the main scientific provisions outlined on a set of real sessions of GNSS observations. Methods for estimating the actual accuracy of coordinate determinations are proposed, including an approach with the implementation of the carrier-phase differential method, which made it possible to carry out reliable verification of PPP solutions for static and kinematic positioning.

Keywords: global navigation satellite systems (GNSS), carrier phase ambiguity resolution (CPAR), PPP (Precise Point Positioning) mode, observations, algorithm, accuracy, error, reliability, verification.

Список публікацій здобувача:

1. Жалило А.А., Флерко С.Н., Яковченко А.И. Мониторинг геометрической конфигурации многобазисной сети пунктов широкозонной дифференциальной подсистемы спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС // Космічна наука і технологія. – К.: – Т.5, № 1. – 1999. – С. 59-68. DOI: [10.15407/knit1999.01.059](https://doi.org/10.15407/knit1999.01.059).

2. Жалило А.А., Яковченко А.И. Способ реализации относительных геодезических определений по сигналам GPS/GLONASS с использованием float-обработки фазовых наблюдений // Известия ВУЗов. – К.: – Т.42, №12. – 1999. – С.55-61. DOI: [10.3103/S073527271999120092](https://doi.org/10.3103/S073527271999120092).

3. Ефимов С.К., Нестерович А.Г., Яковченко А.И. Аппаратура спутниковой навигации КА «Січ-1М» и «Микроспутник» // Космічна наука і технологія. – К.: – Т.7, № 4. – 2001. – С. 114-116.

4. Яковченко А.И. Учёт «wind-up»-эффекта в задачах высокоточного GPS-позиционирования // Радиотехника. Х.: – Выпуск №165 – 2011. – С.75-79.

5. Яковченко А.И. Основные источники и составляющие погрешностей ГНСС-наблюдений и их моделирование при реализации метода точного позиционирования PPP // Радиотехника. Х.: – Выпуск №169 – 2012. – С.315-330.

6. Жалило А.А., Яковченко А.И. Определение параметров траекторий низкоорбитальных космических аппаратов PPP-методом по результатам бортовых GPS-наблюдений // Радиотехника. Х.: –2016. – № 184. С. 80 - 85.

7. Zhalilo A., Yakovchenko A. Development of PPP-method realization for low earth orbit satellite trajectory determination using on-board GPS-observations [Текст] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий (EJET). Х.: – 2016. – №5/9 (83). – С.33-40. DOI: [10.15587/1729-4061.2016.81026](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81026).

8. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-метода определения параметров движения низкоорбитальных спутников по результатам бортовых GPS-наблюдений. Украинский метрологический журнал. Х.: – 2017. – №1. – С.15-19. DOI: [10.24027/2306-7039.1.2017.101882](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2017.101882).

9. Жалило А.А., Дохов А.И., Катюшина Е.В., Васильева Е.М., Яковченко А.И. Лукьянова О.А. Разработка высокоточной системы определения траекторий космических аппаратов и других высокодинамичных объектов. Журнал «Прикладная радиоэлектроника». Х.: – 2017 г. – Т.16 №3-4. – С. 112-117.

10. Zhalilo A.A., Yakovchenko A.I. The realization technique and features of the GPS/GLONASS relative geodetic adjustment using float solution // Proceedings of the 2nd European symposium on GNSS'98. - Toulouse, France, October 20-23, 1998.- Tome 2. - IX-P-02. - P. 1-5.

11. Ефимов С.К., Иванов А.С. Хижняк В.В., Яковченко А.И. Аппаратура спутниковой навигации для ракет-носителей. Матер. II-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 13-14 июня 2002 г., Харьков: ХАИ, 2002.

12. Ефимов С.К., Иванов А.С., Хижняк В.В., Яковченко А.И. Применение бортовых приемников GPS для траекторных измерений ракет-носителей. Матер. III-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 12-13 июня 2003 г., Харьков: ХАИ, 2003.

13. Яковченко А.И., Лукьянов А.М., Аксюта Г.В. О результатах совместной проверки характеристик приемников фирмы Ashtech GG24 и Z18 на пункте контроля навигационного поля GNSS в АО «НИИРИ» (г. Харьков). Матер. III-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 12-13 июня 2003 г., Харьков: ХАИ, 2003.

14. Рудич А.В., Яковченко А.И., Ноздрин И.Г. Тестирование работы СКНОУ методом виртуальных тестовых радионавигационных приёмников. 3-й

Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008. Сборник научных трудов. Том I. Международная конференция «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». Ч. 1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2008. – С.325-328.

15. Яковченко А.И. Результаты применения технологии точного позиционирования при обработке GPS-наблюдений. 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008. Сборник научных трудов. Том I. Международная конференция «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». Ч. 1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2008. – С.329-332.

16. Коньшева Г.Н., Нестерович А.Г., Рудич А.В., Яковченко А.И. Существующие и потенциальные возможности СКНОУ по обеспечению в реальном времени высокоточного определения координат потребителей навигационной информации на территории Украины. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2011. – С.16-17.

17. Коньшева Г.Н., Нестерович А.Г., Рудич А.В., Яковченко А.И. Оценка точности определения координат потребителя в кинематическом режиме при использовании информации СКНОУ. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2011. – С.29-31.

18. Яковченко А.И. Моделирование источников погрешностей при высокоточном GPS-позиционировании. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние

и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2011. – С.97-100.

19. Яковченко О.І. Застосування методу точного позиціонування при проведенні аварійно-рятувальних робіт. Збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія і практика)». Національний університет цивільного захисту України – Харків, 12 березня, 2015.

20. Жалило А.А., Яковченко А.И. Определение параметров траекторий низкоорбитальных космических аппаратов PPP-методом по результатам бортовых GPS-наблюдений. Радиометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані. Міжнародний науковий семінар пам'яті Б.Л. Кащеева до 96-річчя з дня народження - Україна, Харків, 15 березня 2016 р.

21. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-метода определения параметров движения низкоорбитальных спутников по результатам бортовых GPS-наблюдений – X Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка». Збірник тез доповідей конференції, м. Харків, 5-7 жовтня 2016 р., с. 71.

22. Жалило А.А., Дохов А.И., Катюшина Е.В., Яковченко А.И., Лукьянова О.А., Васильева Е.М. Высокоточная многофункциональная система определения траекторий летательных аппаратов авиационных, ракетных и космических комплексов. Збірник тез доповідей 17 науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 07 – 08 вересня 2017 р, с. 151-153.

23. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-технологий статического и кинематического ГНСС-позиционирования. 6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017. Конференция «РАДИОЛОКАЦИЯ. СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИЯ.

РАДИОМОНИТОРИНГ». Сборник научных трудов. - Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, Издательство «Точка», 2017. – С.216-219.

24. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Катюшина О.В., Лук'янова О.О. Поточний стан розробки багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань. Збірник тез доповідей ХІХ науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 05 – 06 вересня 2019 р, с. 99-100.

25. Zhalilo O.O., Dokhov O.I., Yakovchenko O.I. Multi-positional phase system of trajectory measurements and experimental confirmation of its accuracy using GPS-observations of the ukrainian reference stations. Матер. III-ї наук.-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» 12 - 13 вересня 2019 року, Київ, НЦУВКЗ, С.105-106.

26. Zhalilo O.O., Yakovchenko O.I. LEOS trajectory determination using the on-board GPS-observations and PPP-technologies of their processing. Матер. III-ї наук.-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» 12 - 13 вересня 2019 року, Київ, НЦУВКЗ, С.107.

27. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І. Експериментальне підтвердження точності багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань «Вега-V» з використанням GPS-спостережень референціальних станцій України. Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. Матер. VII наук.-техн. конф., м. Київ, 9-10 жовтня 2019 р., с. 308-309.

28. Жалило А.А., Яковченко А.И. PPP-технологии точного GPS-позиционирования. Результаты разработок ХНУРЭ 2014-2019 г.г. Метрология, информационно-измерительные технологии и системы (МИИТС-2020). Матер. VII Международной научн.-техн. конф. – Харьков, 2020. – С. 31. DOI: [10.24027/2306-7039.1A.2020.193279](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1A.2020.193279).

29. Жалило А.А., Дохов А.И., Яковченко А.И. Автономное (PPP) и дифференциальное (DGPS) кинематическое позиционирование. Сравнение точности на примере обработки бортовых GPS-наблюдений самолёта АН-158.

Метрология, информационно-измерительные технологии и системы (МИИТС-2020). Матер. VII Международной научн.-техн. конф. – Харьков, 2020. – С. 33. DOI: [10.24027/2306-7039.1A.2020.193279](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1A.2020.193279).

30. Дохов О.І., Жаліло О.О., Літус Ю.П., Тевяшев А.Д., Шостко І.С., Яковченко О.І. Розробка полігонного комплексу радіотехнічних та квантово-оптичних систем траєкторних вимірювань. Збірник XX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 78-79.

31. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Літус Ю.П., Катюшина О.В., Лук'янова О.О., Медведський М.М., Пап В.О. Реалізація ГНСС-технології автономної PPP-навігації високодинамічних об'єктів з використанням корекцій SBAS. Збірник XX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 85.

32. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Медведський М.М. Калібрування та контроль точності багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань. Збірник XX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 85-86.

33. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І. Траєкторні визначення приземних літальних апаратів з використанням бортових GPS-спостережень, проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. Матер. VIII наук.-техн. конф., м. Київ, 15 жовтня 2020 р., С.115-116.

34. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Літус Ю.П., Катюшина О.В., Лук'янова О.О., Медведський М.М., Пап В.О. Можливості автономної PPP-навігації навколосемних високодинамічних об'єктів по сигналах ГНСС. Збірник XXI науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 2 – 3 вересня 2021 р, с. 99-101.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	17
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1 ТЕНДЕНЦІЇ І ШЛЯХИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ВИСОКОТОЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ НКА З ВИКОРИСТАННЯМ СИГНАЛІВ ГНСС. АВТОНОМНИЙ (НЕДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ) МЕТОД PPP	34
1.1 Призначення та сфера застосування НКА. Сучасні вимоги до точності визначення параметрів руху НКА	34
1.2 Методи визначення параметрів руху НКА. Використання ГНСС для точних траєкторних визначень	36
1.3 Проблемні питання реалізації PPP-методу позиціонування. Особливості та відмінності застосування методу PPP для траєкторних визначень НКА	46
1.4 Постановка завдань дослідження	51
Висновки по розділу 1	51
РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ОБРОБКИ ГНСС-СПОСТЕРЕ- ЖЕНЬ МЕТОДОМ PPP	54
2.1 Вихідні положення. Послідовність та напрямки виконаних досліджень	54
2.2 Рівняння (модель) ГНСС-спостережень. Джерела та складові похибок ГНСС-спостережень	57
2.3 Моделювання повільно змінюючихся похибок недиференціальних ГНСС-спостережень, які піддаються прогнозуванню	66
2.4 Введення корекцій та перетворення системи рівнянь ГНСС- спостережень. Формування лінійних комбінацій ГНСС- спостережень	68
2.5 Методологічні основи обробки ГНСС-спостережень методом PPP ..	71

2.6	Перетворення системи рівнянь ГНСС-спостережень для реалізації float-методу PPP для статичного і кінематичного режимів позиціонування	75
2.7	Перетворення системи рівнянь ГНСС-спостережень для реалізації fixed-методу PPP для статичного і кінематичного позиціонування ..	82
2.8	Методика апостеріорної оцінки точності визначення параметрів руху НКА	84
2.9	Методика оцінки інтервалів збіжності/ініціалізації PPP-рішень	84
	Висновки по розділу 2	85
РОЗДІЛ 3 ВДОСКОНАЛЕННЯ І РЕАЛІЗАЦІЯ ВИСОКОТОЧ-НОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ FLOAT-МЕТОДОМ PPP.....		87
3.1	Алгоритми реалізації float-рішення (РФН та позиціонування) методом PPP для навколоземних/наземних об'єктів у кінематичному і статичному режимах ГНСС-спостережень	88
3.2	Алгоритм оцінки параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів (НКА) float-методом PPP по бортовим GPS-спостереженням. Априорна оцінка точності траєкторних визначень НКА	94
3.3	Кодові та згладжені кодово-фазові проміжні координатні PPP-рішення. Оцінка та усунення іоносферних затримок навігаційних сигналів	104
3.4	Результати тестування і дослідження запропонованих реалізацій позиціонування наземних об'єктів float-методом PPP	112
3.4.1	Вихідні дані для тестування	112
3.4.2	Статичний режим координатних визначень	113
3.4.3	Кінематичний режим координатних визначень	119
3.4.4	Дослідження збіжності float PPP-рішень	127
3.5	Результати тестування і дослідження запропонованої реалізації визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів float-методом PPP	128

3.5.1	Вихідні дані для тестування	128
3.5.2	Основні результати тестування	129
3.6	Пропозиції щодо подальшого розвитку та вдосконалення float-методу	136
	Висновки по розділу 3	137
РОЗДІЛ 4 ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ЦІЛОЧИСЕЛЬНОГО FIXED-МЕТОДУ PPP-ПОЗИЦІОНУВАННЯ		140
4.1	Алгоритми реалізації fixed-рішень (розв’язання фазової неоднозначності та позиціонування) методом PPP у статичному і кінематичному режимах вимірювань	142
4.2	Комбінації кодових та фазових інструментальних затримок сигналів у трактах GPS-супутників для реалізації fixed PPP-рішення. Приклади оцінки інструментальних похибок GPS-спостережень . . .	156
4.3	Розв’язання фазової неоднозначності WL-спостережень з використанням кодово-фазової комбінації Melbourne-Wübbena . . .	168
4.4	Рішення по вимірюванням фази різницевої частоти (WL-рішення) . .	170
4.5	Цільові функції при реалізації дискретного РФН недиференціальних ГНСС-спостережень	172
4.6	Результати тестування і дослідження запропонованої реалізації позиціонування наземних об’єктів fixed-методом PPP	174
4.7	Результати тестування і дослідження запропонованої реалізації визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів fixed-методом PPP	179
4.8	Пропозиції щодо подальшого розвитку та вдосконалення високоточного позиціонування fixed-методом PPP	190
	Висновки по розділу 4	191
ВИСНОВКИ		195
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		200

ДОДАТОК А. Моделювання повільно змінюваних похибок недиференціальних ГНСС-спостережень, які піддаються прогнозуванню	219
ДОДАТОК Б. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	239
ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача	244

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ГНСС (GNSS)	глобальна навігаційна супутникова система; ГНСС – GPS (США), ГЛОНАСС (РФ), Galileo (ЄС), BeiDou (КНР)
ГСК	Грінвічська система координат
ЗТЗ	зенітна тропосферна затримка
ІНС	інерційна навігаційна система
КМ	кореляційна матриця
ЛА	літальний апарат
МНК	метод найменших квадратів
МСК	місцева система координат
НЗ	навігаційна задача
НКА	низькоорбітальний космічний апарат
ПЗ	програмне забезпечення
ПЕВ	повний електронний вміст
РФН	розв’язання фазових неоднозначностей
СВШ	складові вектору швидкості
СКВ	середньоквадратичне відхилення
СКП (RMS)	середньоквадратична похибка (residual mean square)
ЦФ	цільова функція
ANTEX	Antenna Exchange Format – стандарт надання калібрувань приймальних та передавальних ГНСС-антен
ARP	Antenna Reference Point – референсна точка антени

CDAAC	COSMIC Data Analysis and Archive Center – центр аналізу та архівування даних COSMIC
CNES	Centre national d'études spatiales – французьке космічне агентство
BeiDou	глобальна навігаційна супутникова система КНР
COSMIC/ Formosat-3	Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate – угруповання метеорологічних супутників
DCB	Differential Codes Biases – кодові міжчастотні затримки сигналів у радіотрактах супутників
ECEF	Earth-centered, Earth-fixed coordinate system – географічна декартова система координат
EPN	EUREF permanent network – європейська мережа перманентних станцій
FAR	Full Ambiguity Resolution – повне розв'язання неоднозначності
Galileo	глобальна навігаційна супутникова система Європейського Союзу (ЄС)
GF	Geometry Free – фазова лінійна комбінація, яка не містить геометричної складової рівнянь спостережень, але містить комбіновану іоносферну затримку двохчастотних сигналів ГНСС
GNSS (ГНСС)	Global Navigation Satellite System – глобальна навігаційна супутникова система; GNSS – GPS (US), ГЛОНАСС (RF), Galileo (EU), BeiDou (China)
GMT	Greenwich Mean Time – Грінвічський середній час
GPS	Global Positioning System – глобальна супутникова система позиціонування NAVSTAR (США)

GRACE	Gravity Recovery And Climate Experiment – супутникова місія для вивчення гравітаційного поля Землі
IF	Iono Free – фазова безіоносферна комбінація
IFB	Inter-Frequency Code Biases – кодові міжчастотні затримки сигналів у радіотрактах ГНСС-приймачів
IGS	International GNSS Service – міжнародна організація надання послуг на користь геодинаміки та інших фундаментальних наук на основі глобальної мережі ГНСС-станцій
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar – інтерферометрія з використанням радара с синтезованою апертурою
IONEX	IONosphere map EXchange format – формат подання карт ПЕВ в одиницях TEC
ITRF	International Terrestrial Reference Frame – міжнародна земна референсна система координат (реалізація ITRS); рішення ITRS і ITRF підтримуються Міжнародною службою систем обертання Землі та відлікових систем (IERS)
MW	Кодово-фазова лінійна комбінація Melbourne-Wübbena
NL	Narrow Lane – фазова (або кодова) вузькосмугова лінійна комбінація
PAR	Partial Ambiguity Resolution – часткове розв’язання фазової неоднозначності
PCV	Phase Center Variations – варіації (середнього) фазового центру антени
PPP	Precise Point Positioning – точне абсолютне (недиференціальне) позиціонування по фазовим ГНСС-спостереженням

RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring – автономний контроль цілісності
RINEX	Receiver Independent Exchange Format – уніфікований формат подання вимірювальної інформації (ГНСС-спостережень), незалежний від типу та виробника приймача сигналів ГНСС
RMS (СКП)	RMS – residual mean square (середньоквадратична похибка)
RTK	Real Time Kinematic – кінематика у режимі реального часу
SAR	Synthetic Aperture Radar – радар с синтезованою апертурою
SNR	Signal-to-noise ratio – відношення сигнал/шум
TEC	Total Electron Content – англомовний аналог ПЕВ
UTC	Universal Time Coordinated – всесвітній координований час
WGS-84	World Geodetic System 1984 — всесвітня система геодезичних параметрів Землі 1984 р., до яких входить система геоцентричних координат. На відміну від локальних систем є єдиною системою для всієї планети
WL	Wide Lane – фазова лінійна комбінація різницевої частоти

ВСТУП

Обладнання низькоорбітальних космічних апаратів (НКА) приймачами сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), зокрема системи GPS, відкриває унікальні можливості наукових досліджень в таких областях, як геодезія, геодинаміка, уточнення фігури геоїда, моніторинг космічної погоди, метеорологія та ін.

У ряді застосувань (дистанційне зондування Землі, дослідження гравітаційного поля, вивчення танення льодовиків і ін.) визначення поточних координат (позиціонування) НКА має виконуватися на дециметровому і навіть сантиметровому рівні точності. Так, при реалізації місії TOPEX-POSEIDON для виконання глобальних прецизійних зйомок фігури геоїда необхідно було забезпечити визначення траєкторії НКА з сантиметровою точністю. Сучасні SAR-технології (Synthetic Aperture Radar) і InSAR-технології (Interferometric SAR) також вимагають досягнення надзвичайно високої точності координатно-часових визначень низькоорбітальних КА. Традиційні області, в яких ефективно використовуються SAR/InSAR-технології: лісове господарство, управління ресурсами; підвищення продуктивності сільськогосподарських культур, своєчасне надання продовольчої допомоги; виявлення забруднень, планування розвитку територій, топографічне і тематичне картографування, оцінка змін клімату та його впливу на навколишнє середовище, дослідження океанських і річкових течій, якості води, ерозійних процесів, оцінка ризику повеней і збитку при надзвичайних подіях, моніторинг нафтогазових родовищ; визначення місця розташування судів і т.д. Інтерферометричні вимірювання в радарних технологіях дозволяють вирішувати різні завдання, в тому числі виявляти переміщення об'єктів; проводити моніторинг прикордонних територій, нестабільних схилів; відслідковувати зміни на об'єктах,

переміщення земної поверхні, просідання ґрунту при видобутку нафти, газу і т.д.

Задача визначення параметрів руху НКА є актуальною і для України. Зокрема, 13 січня 2022 р. запуснено український супутник оптико-електронного спостереження Землі Січ-2-30. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2021-2025 роки передбачає виведення на орбіту ще семи українських супутників – шести апаратів високої просторової роздільної здатності (1 м) та одного – надвисокої роздільної здатності (0,5 м). Розробляється український науково-прикладний проєкт «Іоносат-Мікро», відповідно до якого передбачено запуск НКА для дослідження іоносфери. Проєкт «Іоносат-Мікро» є етапом підготовки масштабнішого проєкту «Іоносат», мета якого – запуск в іоносферу кластера з трьох космічних апаратів.

Як правило, для визначення параметрів руху НКА використовуються бортові спостереження сигналів ГНСС, або як єдиного засобу вимірювань, або в поєднанні з іншими засобами (лазерними далекомірними системами, доплерівськими супутниковими системами). Досягнення зазначеного рівня точності визначення параметрів руху неможливо без використання фазових спостережень.

Класичним способом досягнення високої точності навігаційних визначень є використання диференціального методу, при якому спостереження рухомого («роверного») приймача споживача комбінуються з спостереженнями однієї або декількох наземних референцних станцій. Однак реалізація диференціального методу для визначення параметрів траєкторій НКА пов'язана зі значними труднощами через істотно різні умови спостережень на борту НКА і на Землі, малі інтервали сумісної радіовидимості середньоорбітальних супутників ГНСС з борта НКА і референцних станцій, труднощі позиціонування НКА над океанами. Іншим методом точного визначення параметрів траєкторій НКА є використання тільки автономних ГНСС-спостережень на борту НКА без вимірювальної інформації референцних станцій. Такий альтернативний

метод отримав назву методу точного позиціонування PPP (Precise Point Positioning).

Перші згадки про режим PPP з'явилися більш 20 років тому. За цей час режим PPP був розвинений і в даний час він широко використовується в наземних додатках. При використанні фазових спостережень необхідно вирішити дві принципові задачі – 1) усунути стрибки фази і 2) розв'язати фазову неоднозначність. Розрізняють два методи розв'язання фазової неоднозначності (РФН) – метод з оцінкою дискретних/цілочисельних параметрів фазової неоднозначності як континуальних (float-метод) і метод визначення параметрів фазової неоднозначності саме як дискретних/цілочисельних величин (fixed-метод). Float-реалізація методу PPP в даний час є в арсеналі практично всіх провідних фірм-виробників програмного забезпечення і обладнання. Однак в останні роки спостерігається пік публікацій, пов'язаних з реалізацією fixed-методу реалізації PPP. Це стало можливим у зв'язку з тим, що точність визначення точних ефемерид і годинників ГНСС значно підвищилася, а також стали доступні інші продукти, такі як кодові і фазові затримки в апаратурі ГНСС, зміщення фазових центрів антен відносно центру мас, діаграми нерівномірності фазових характеристик антен та ін.). Саме знання цих даних є необхідною умовою реалізації цілочисельного fixed-методу PPP.

Що стосується застосування PPP для визначення параметрів руху НКА, то, зазвичай, обробка створюється під кожну космічну місію, універсальний метод обробки відсутній, і такими задачами займаються тільки великі наукові центри та космічні агентства, такі, як JPL, DLR, австрійський університет GRAZ, французьке космічне агентство CNES, і визначні вчені, такі, як проф. R. B. Langley та ін. У теперішній час зусилля вчених зосереджені на підвищенні надійності РФН, підвищенні точності і скороченні часу збіжності PPP-рішень.

З огляду на конструктивні особливості побудови апаратури, при визначенні параметрів руху НКА використовуються тільки двохчастотні спостереження сигналів супутників ГНСС, однак в подальшому будуть

використовуватися трьохчастотні і мультисистемні ГНСС-спостереження. Зазвичай, параметри руху НКА визначаються комбінацією кінематичного і динамічного способів (тобто способу, що враховує модель руху НКА з урахуванням всіх збурюючих впливів). У даній дисертаційній роботі розглядається виключно кінематичний спосіб визначення параметрів руху НКА по бортовим двохчастотним спостереженням сигналів GPS.

На початковому етапі досліджень при визначенні параметрів руху НКА автором було отримано стійке і надійне float-рішення у режимі PPP. Далі була здійснена спроба виконати дискретне/цілочисельне РФН бортових спостережень НКА (з метою підвищення точності та зменшення інтервалу збіжності PPP-рішень) з використанням поправок на інструментальні затримки в апаратурі супутників ГНСС (GPS), які на дати доступних для обробки та аналізу бортових спостережень НКА почали формуватися та надаватися споживачам французьким космічним агентством CNES. Однак на початковому етапі досліджень стійкого дискретного РФН бортових спостережень НКА (з використанням зазначених поправок CNES) досягти не вдалося через, як показав подальший аналіз, недостатню точність поправок на задані дати. Тому виникла нагальна необхідність реалізації наземного (статичного та кінематичного) режиму PPP та з'ясування причини невдалих спроб досягнення дискретного РФН безіоносферних (Iono-Free) двохчастотних бортових спостережень НКА.

В ході реалізації наземного режиму PPP було розроблено метод та алгоритми формування власних поправок для компенсації вкладу інструментальних затримок в апаратурі супутників GPS за спостереженнями наземної регіональної мережі перманентних референцних станцій України. На відміну від поправок CNES запропоновані поправки також абсорбують залишкові похибки ефемерид та годин супутників. З використанням цих власних поправок вдалося досягти стійкого надійного дискретного РФН фазових спостережень різницевої частоти (WideLane-комбінацій), безіоносферних (Iono-Free) фазових спостережень і реалізувати fixed-метод PPP

як для навколоземних споживачів, так і для низькоорбітальних космічних апаратів.

Таким чином, тема дисертаційної роботи, що спрямована на розвиток вітчизняних технологій у сфері високоточного визначення параметрів руху НКА та навколоземних об'єктів, є актуальною й перспективною як з погляду розвитку теорії методів обробки ГНСС-спостережень, так і важливою з погляду їх практичної реалізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційні дослідження пов'язані із проведенням планових науково-дослідних робіт ДП «ЗАО НДІРВ» (м. Харків), Головної астрономічної обсерваторії НАН України (м. Київ) та Харківського національного університету радіоелектроніки, серед яких:

– ДКР «Розробка прецизійної апаратури просторово-часової прив'язки об'єктів за сигналами супутникових радіонавігаційних систем «ГЛОНАСС» та «NAVSTAR»» (шифр «Прив'язка», 1992–1996 рр., № ДР 0195U015604, 1992 р.);

– НДР «Розробка апаратури супутникової навігації космічних апаратів» (1995 р., № ДР 0195U023338);

– ДКР «Система космічного навігаційно-часового забезпечення України» (шифр «Навігація», 1998–2004 рр.);

– НДР «Впровадження–КНЗ» (2008–2012 рр., № ДР 0108U000047Д);

– ДКР «Навігація» Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем» («Навігація-Розвиток» Розвиток мережі ККС та Центру контролю навігаційного поля, модернізація програмно-технічних засобів, забезпечення дослідної експлуатації) (2008–2012 рр., № ДР 0108U008567);

– НДР «Створення системи збору, обробки та аналізу наземних і бортових GPS/ГЛОНАСС спостережень для моніторингу, дослідження

й моделювання повного електронного вмісту іоносфери у рамках міжнародного проекту «Іоносат-Мікро». Етап 3 – Створення та експериментальне дослідження алгоритмів обробки й аналізу бортових космічних ГНСС-спостережень для визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів та наступного моделювання повного електронного вмісту іоносфери» (2015 р., № ДР 0115U002688);

– НДР «Створення технологій побудови багатофункціонального радіотехнічного комплексу для екологічного моніторингу» (2014-2015 рр., № ДР 0114U002697);

– НДР «Дослідження повного електронного вмісту іоносфери при спільному використанні диференціального та автономного методів обробки спостережень в регіональних мережах перманентних ГНСС-станцій» (2016 р., № ДР 0116U004311С);

– НДР «Розробка нових інформаційно-вимірювальних систем і технологій координатно-часового і метеорологічного забезпечення та зв'язку» (2016-2017 рр., № ДР 011U002541);

– НДР «Удосконалення методів усунення інструментальних похибок іоносферних затримок ГНСС-спостережень з метою підвищення точності моделювання ПЕВ» (2017 р., № ДР 0117U00144С);

– НДР «Розробка нової концепції та шляхів створення високоточної системи траєкторних вимірювань параметрів руху високодинамічних літальних апаратів» (2018 р., № ДР 0117U002530);

– НДР «Створення високоточної багатопозиційної фазової системи «Вега-V» для визначення траєкторій навколоземних високодинамічних об'єктів (БФСТВ)» (2019 р., № ДР 0119U000673);

– НДР «Науково-технічне обґрунтування можливостей GNSS-технології в режимі PPP (Precise Point Positioning) для автономного визначення положень навколоземних високодинамічних об'єктів в складі багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань» (2020 р., № ДР 0120U102223);

– НДР «Науково-технічне обґрунтування можливостей GNSS-технології в режимі PPP (Precise Point Positioning) для автономного визначення положень навколоземних високодинамічних об'єктів в складі багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань» (2021 р., № ДР 0121U109921).

У перерахованих роботах здобувач був виконавцем.

Мета і задачі досліджень. *Мета* дисертаційної роботи полягає в створенні, дослідженні і експериментальному тестуванні вдосконалених та нових методів, алгоритмів і процедур високоточного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів та позиціонування навколоземних об'єктів з сантиметровою/дециметровою точністю у автономному (недиференціальному) режимі PPP (Precise Point Positioning) по бортовим двохчастотним фазовим і кодовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні *задачі*:

– розвиток методів, алгоритмів і процедур автономного (недиференціального) позиціонування НКА та навколоземних об'єктів сантиметрової/дециметрової точності, включаючи пошук та дослідження нових алгоритмів «плаваючого» (float) і дискретного/цілочисельного (fixed) розв'язання фазової неоднозначності бортових двохчастотних фазових GNSS-спостережень в автономному (недиференціальному) режимі точного позиціонування PPP;

– розробка моделей похибок GNSS-спостережень, методики і алгоритмів оцінки точності траєкторних визначень (позиціонування) для «плаваючого» (float) і дискретного/цілочисельного (fixed) фазових рішень;

– проведення натурних експериментів з використанням реальних бортових GPS-спостережень НКА для підтвердження ефективності теоретичних результатів дисертаційної роботи, апостеріорна оцінка точності визначення параметрів руху НКА PPP-методом.

Об’єкт дослідження – технології та процеси обробки кодових і фазових ГНСС-спостережень в автономному (недиференціальному) режимі точного позиціонування PPP.

Предмет дослідження – методи і алгоритми реалізації float- і fixed-режимів PPP в задачах високоточного визначення параметрів руху НКА з використанням бортових двохчастотних ГНСС-спостережень з урахуванням особливостей реальної вимірювальної інформації, методи підвищення надійності РФН, зменшення інтервалів збіжності/ініціалізації PPP-рішень і підвищення точності визначень параметрів руху НКА.

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

Наукова новизна отриманих результатів

1. Отримали подальший розвиток методи та алгоритми реалізації високоточних автономних (недиференціальних) координатних PPP-рішень, включаючи розв’язання початкових неоднозначностей фазових ГНСС-спостережень шляхом отримання «плаваючого» (float) та/або дискретного/цілочисельного (fixed) рішень і їхніх модифікацій як для вимірювань на борту низькоорбітальних космічних апаратів (НКА), так і для приземних вимірювань.

Запропоновані нові та вдосконалені методи і алгоритми реалізації PPP-позиціонування дозволяють більш надійно виконувати розв’язання фазової неоднозначності спостережень на значно менших інтервалах збіжності/ініціалізації рішень та потім – виконувати позиціонування на сантиметровому рівні точності. Запропоновані методи та алгоритми, на відміну від відомих, мають ряд істотних особливостей і переваг.

По-перше, в даній роботі вперше запропоновано використовувати так звані «віртуальні» одинарні різниці недиференціальних ГНСС-спостережень з зручною репараметризацією оцінюваних параметрів, що дозволяє поєднати переваги обробки недиференціальних та різницевих

спостережень, підвищити надійність реалізації РФН та точного PPP-позиціонування у порівнянні з відомими підходами, які зазвичай використовують або недиференціальні ГНСС-спостереження, або прямі їх одинарні різниці (між ГНСС-супутниками робочого сузір'я).

По-друге, вперше запропонована оригінальна реалізація дискретного/цілочисельного РФН недиференціальних фазових ГНСС-спостережень для наземних та космічних умов вимірювань, яка, на відміну від відомого та найпоширенішого у світі LAMBDA-методу та інших методів РФН, за рахунок використання спеціальних процедур МНК-оцінювання, верифікації рішень, гнучкого перетворення систем рівнянь спостережень, а також простої репараметризації груп оцінюваних невідомих дозволяє більш надійно виконувати РФН.

По-третє, вперше запропоновані методи та алгоритми PPP-рішень, які в ході РФН в якості проміжного рішення використовують, на відміну від відомих підходів, не «безіоносферні» кодові псевдовідстані низької точності, а більш точне (у кілька разів) нове комбіноване кодово-фазове координатне рішення (на основі спільної обробки кодових спостережень першої частоти ГНСС і двохчастотних неоднозначних фазових «безгеометричних» ГНСС-спостережень), що також дає суттєве (на $\sim 20\div 30\%$) збільшення надійності РФН та зменшення інтервалу його досягнення (ініціалізації/збіжності PPP-рішення).

2. Розроблено новий більш ефективний алгоритм РФН спостережень різницевої частоти «Wide-Lane» (WL) з використанням лінійної комбінації спостережень Melbourne-Wübbena. Запропоновано новий підхід до формування порогових значень з метою більш надійної верифікації WL-рішень, який дозволяє надійно виконувати РФН за $8\div 10$ хвилин.

3. Для досягнення надійного дискретного/цілочисельного РФН при статичному та кінематичному PPP-позиціонуванні приземних об'єктів та НКА запропонована нова реалізація метода і алгоритмів оцінювання інструментальних фазових затримок в апаратурі супутників ГНСС (GPS),

які можуть формуватися по спостереженням не тільки глобальних, а й регіональних мереж ГНСС-станцій (зокрема, української мережі перманентних станцій). При цьому, на відміну від відомих підходів, оцінки інструментальних фазових затримок супутників ГНСС виконуються для різницевої частоти (довжина хвилі $\sim 86,2$ см) і частоти фазових «безіоносферних» комбінацій (довжина хвилі $\sim 10,7$ см) і не розщеплюються на окремі затримки спостережень частот-носіїв, внаслідок чого ці оцінки абсорбують остаточні похибки ефемерид і годинників супутників, що в свою чергу, підвищує надійність дискретного/цілочисельного РФН та досяжність сантиметрової точності PPP-рішень при прийнятному рівні їх ініціалізації/збіжності.

Практичне значення отриманих результатів

1. Виконано експериментальне тестування й проведено дослідження нових та удосконалених методів, алгоритмів і програмних модулів для вирішення завдань точного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів на прикладах НКА FORMOSAT-3/COSMIC (США, Тайвань) та GRACE (США, ФРН). При реалізації кінематичного методу (без використання моделей руху НКА) досягнута практично потенційна точність визначення їх параметрів траєкторій, яка відповідає найсучаснішим світовим досягненням і задовольняє найжорсткішим вимогам до точності визначення параметрів руху НКА для всіх існуючих та майбутніх космічних місій. Зокрема, експериментальні результати показали, що стійко досягається визначення координат НКА (PPP-рішення) з похибками, які не перевищують $\sim 10 \div 20$ см ($P \approx 95\%$) з використанням «плаваючого» методу РФН та $\sim 3 \div 5$ см ($P \approx 95\%$) з використанням дискретного методу РФН. Складові вектора швидкості НКА визначаються з похибками, які не перевищують $\sim 1 \div 2$ мм/с ($P \approx 95\%$).

Для статичного режиму PPP-визначень приземних об'єктів похибки визначення координат на добовому інтервалі не перевищують ~ 8 мм ($P \approx 95\%$). При реалізації дискретного/цілочисельного РФН у статичному режимі позиціонування середній час ініціалізації становить $\sim 15 \div 20$ хвилин, після чого

похибки точкових оцінок координат не перевищують $\sim 2\div 5$ см. Для кінематичного режиму PPP-визначень похибки оцінок координат приземних об'єктів на інтервалі спостережень ~ 2 години не перевищують $\sim 3\text{--}5$ см по плановим координатам і $\sim 7\text{--}8$ см по висоті. Такі результати відповідають найкращим досягненням провідних наукових лабораторій світу.

2. Запропоновано й апробовано сукупність нових методів, алгоритмів та програмних модулів оцінки фазових інструментальних затримок в апаратурі супутників ГНСС на основі використання спостережень регіональних мереж ГНСС-станцій. З використанням отриманих поправок досягається РФН і отримання «безіоносферних» рішень сантиметрової точності не тільки для наземних об'єктів, а й для бортових вимірювань НКА.

3. Розроблений прототип програмного забезпечення обробки ГНСС-спостережень та позиціонування методом PPP може бути використаний для точного визначення параметрів руху НКА, включаючи супутники дистанційного зондування Землі, супутники радіолокаційної інтерферометрії SAR/InSAR, вітчизняні супутники типу «Січ» та супутники проекту «Іоносат».

Результати дисертаційної роботи впроваджені у ДП «ЗАО НДІРВ» (м. Харків), Головної астрономічної обсерваторії НАН України (м. Київ) та Харківського національного університету радіоелектроніки.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно отримані основні результати дисертаційної роботи, які опубліковані в роботах [1, 2]. У роботах, виконаних у співавторстві, авторові належать наступні результати.

У роботі [3] наведено результати моделювання для оцінки точності моніторингу координат фазових центрів антен контрольних станцій.

У роботі [4] запропоновано алгоритм float-обробки фазових спостережень для відносних геодезичних визначень.

У роботі [5] наведено результати розробки апаратури супутникової навігації космічних апаратів «Січ-1М» і Мікросупутник.

У роботах [6-8] наведено результати визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів по сигналам ГНСС в режимі PPP.

У роботі [9] запропоновано принцип побудови високоточної системи визначення траєкторій космічних апаратів і других високодинамічних об'єктів.

Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи обговорені на наступних міжнародних конференціях [10-30], матеріали яких були включені до дисертації:

– II European Symposium on GNSS'1998, 20th-23th October 1998, Toulouse – France;

– II науково-практична конференція «Застосування супутникових радіонавігаційних систем (GNSS) в Україні». 13-14 червня 2002 г., Харків: ХАІ, 2002;

– III науково-практична конференція «Застосування супутникових радіонавігаційних систем (GNSS) в Україні». 12-13 червня 2003 р., Харків: ХАІ, 2003;

– 3-й Міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» МРФ-2008;

– 4-й Міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (МРФ-2011);

– Всеукраїнська науково-практична конференція «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія і практика)». Національний університет цивільного захисту України – Харків, 12 березня, 2015 р;

– Міжнародний науковий семінар пам'яті Б.Л. Кащесєва до 96-річчя з дня народження – Україна, Харків, 15 березня 2016 р;

– X Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка», м. Харків, 5-7 жовтня 2016 р.;

– 6-й Міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку», МРФ-2017;

– 17 науково-технічна конференція «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 07 – 08 вересня 2017 р.;

– XIX науково-технічна конференція «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 05 – 06 вересня 2019 р.;

– III науково-практична конференція «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» 12 – 13 вересня 2019 року, Київ, НЦУВКЗ;

– Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. VII науково-технічна конференція, м. Київ, 9-10 жовтня 2019 р.;

– Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи (МІВТС-2020). VII Міжнародна науково-технічна конференція, 18-19 лютого 2020 р., м. Харків;

– XX науково-технічна конференція «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р.;

– VIII науково-технічна конференція «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», м. Київ, 15 жовтня 2020 р.;

– XXI науково-технічна конференція «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 2 – 3 вересня 2021 р.

Публікації. По тематиці дисертації всього опубліковано 34 наукових роботи, з яких 9 статей, які входять до переліку видань, дозволених МОН України для публікацій результатів досліджень з технічних наук (одна стаття індексована у міжнародних наукометричних базах SCOPUS, Index COPERNICUS та РІНЦ), 25 праць наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (154 найменування),

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

РОЗДІЛ 1
ТЕНДЕНЦІЇ І ШЛЯХИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ
ВИСОКОТОЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ НКА
З ВИКОРИСТАННЯМ СИГНАЛІВ ГНСС.
АВТОНОМНИЙ (НЕДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ) МЕТОД PPP

У даному розділі розглянуто тенденції та шляхи розвитку методів високоточного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів (НКА) з використанням сигналів ГНСС. Розглянуто призначення та сфери застосування НКА, проаналізовані сучасні вимоги до точності визначення параметрів руху (параметрів траєкторій) НКА. Проведено огляд відомих методів визначення параметрів руху НКА. Показано, що для забезпечення сучасних вимог щодо надійності та точності визначення параметрів руху НКА необхідно використовувати фазові ГНСС-спостереження та методи точного позиціонування. Описаний метод PPP (Precise Point Positioning), показані переваги та висвітлено проблемні питання його використання. Показані особливості використання методу PPP для траєкторних визначень низькоорбітальних космічних апаратів. Сформульовані задачі дослідження.

1.1 Призначення та сфери застосування НКА. Сучасні вимоги до точності визначення параметрів руху НКА

Низькоорбітальні космічні апарати знаходять широке застосування в таких галузях, як супутникові системи зв'язку, навігація, космічні місії з дослідження Землі (метеосупутники, супутники для дослідження іоносфери, супутники дистанційного зондування Землі, супутники для дослідження гравітаційного поля Землі, гідрології, гляціології, геології та ін.) Зокрема, 13 січня 2022 р. запущено українського супутника оптико-електронного

спостереження Землі «Січ-2-30». Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2021-2025 роки передбачає виведення на орбіту ще семи українських супутників – шести апаратів високої просторової роздільної здатності (1 м) та одного – на високої просторової роздільної здатності (0,5 м). Розробляється український науково-прикладний проект «Іоносат-Мікро», відповідно до якого передбачено запуск НКА для дослідження іоносфери [44]. Проект «Іоносат-Мікро» є етапом підготовки масштабнішого проекту «Іоносат», мета якого – запуск в іоносферу кластера з трьох космічних апаратів.

Актуальним завданням є визначення параметрів руху (тобто координат та складових вектору швидкості) НКА. При цьому існують космічні місії, в яких параметри руху мають бути визначені з дуже високою точністю (координати з дециметровою і навіть сантиметровою точністю та швидкості з точністю до частки мм/с). Так, при реалізації місії TOPEX-POSEIDON для виконання глобальних прецизійних зйомок фігури геоїду було необхідне забезпечення визначення траєкторії НКА із сантиметровою точністю. Сучасні SAR/InSAR-технології (Synthetic Aperture Radar, Interferometric SAR) також вимагають досягнення надзвичайно високої точності координатно-часових визначень НКА. Традиційні області, в яких ефективно використовуються технології SAR/InSAR: лісове господарство, управління ресурсами; підвищення продуктивності сільськогосподарських культур; своєчасне надання продовольчої допомоги; виявлення забруднень, планування розвитку територій, топографічне та тематичне картографування, оцінка зміни клімату та його вплив на навколишнє середовище, дослідження океанічних та річкових течій, якості води, ерозійних процесів, оцінка ризику повеней та шкоди при надзвичайних подіях, моніторинг нафтогазових родовищ; визначення місцезнаходження судів тощо. Інтерферометричні виміри в радарних технологіях дозволяють вирішувати різні завдання, зокрема виявляти переміщення об'єктів; проводити моніторинг прикордонних територій,

нестабільних ярів; відстежувати зміни на об'єктах, переміщення земної поверхні, просідання ґрунту при видобутку нафти, газу тощо.

У табл. 1.1 наведені вимоги до точності визначення параметрів руху НКА (за даними астрономічного інституту Бернського університету).

Таблиця 1.1 – Вимоги до точності визначення параметрів руху НКА

Тип місії	Типова висота орбіти НКА, км	Технологія визначення параметрів руху	Типова потрібна точність
Дослідження гравітації	260-400	GPS (SLR)	2-5 см (3D)
Висотоміри	500-1400	GPS, DORIS, SLR	2 см (радіальна)
SAR/InSAR	500-1000	GPS, DORIS, SLR	0,1 – 0,5 м
Оптика	750-1000	GPS, DORIS, SLR	0,2 – 0,3 м (панхроматичні) 1 - 5 м (мультиспектральні) 5 – 10 м (гіперспектральні)
Радіопросвічування	400-800	GPS	0,1 м (3D координати) 0,1 мм/с (швидкість)

1.2 Методи визначення параметрів руху НКА. Використання ГНСС для точних траєкторних визначень

Параметри руху НКА, залежно від необхідної точності, можуть бути визначені різними методами або комбінацією методів/систем. Це можуть бути оптичні методи, астрономічні методи, методи/системи лазерної далекометрії, доплерівські вимірювальні системи тощо. При цьому зростає потреба у оснащенні НКА сучасними автономними системами високоточного позиціонування, навігації, та визначення часу (PNT – Positioning, Navigation and Timing). Досягнення високої точності та оперативності визначення параметрів руху НКА різного призначення можна досягти застосуванням технологій супутникової навігації в бортових автономних навігаційних

системах. НКА, що розробляються в США, країнах ЄС, в КНР, в інших країнах світу, оснащуються системами високоточної автономної навігації, заснованими на використанні, в першу чергу, глобальних навігаційних супутникових систем. Так, багатоканальний одночастотний GPS-приймач (української розробки) встановлений на борту вітчизняного НКА «Січ-2-30». Встановлення сучасного мультисистемного двохчастотного ГНСС-приймача планується також на борту вітчизняного НКА «Іоносат-Мікро».

Як правило, для визначення параметрів руху НКА використовуються бортові спостереження сигналів ГНСС або як єдиного засобу вимірювань, або у поєднанні з іншими засобами (лазерними далекомірними системами, доплерівськими супутниковими системами, інерціальними системами тощо).

Досягнення зазначеного вище рівня точності визначення параметрів руху НКА (див. табл. 1.1) неможливе без використання фазових спостережень ГНСС. Є позитивний досвід забезпечення навігації НКА мережею наземних диференціальних станцій. Підтримка, розвиток та експлуатація наземного сегменту управління НКА становлять значну частину вартості космічних проектів. Однак є й складнощі у застосуванні такої мережі. Мережі наземних станцій розміщені на обмеженій території та не можуть забезпечити проведення вимірювань у будь-якій точці орбіти (наприклад, над океаном). Через труднощі забезпечення спільної видимості ГНСС і суттєво різних умов спостережень на Землі та на борту НКА можливості застосування диференціального режиму визначень сильно обмежені. Актуальним є застосування режиму абсолютного (недиференціального) точного позиціонування за сигналами ГНСС. В англійській літературі такий режим отримав назву Precise Point Positioning – PPP.

Застосування методу PPP передбачає використання фазових вимірів, а кодові виміри мають допоміжний характер. Фазові ГНСС-спостереження мають відмінні риси – вони є неоднозначними і, зазвичай, з низки причин (втрата стеження за супутниками, підвищений рівень шумів і багатопроблемності, збоїв у роботі приймача тощо) містять так звані

циклічні/напівциклічні фазові стрибки (в англомовній літературі – carrier-phase slips).

Як правило, для реалізації PPP використовуються двохчастотні приймачі сигналів ГНСС, що виконують кодові та фазові спостереження, які лінійно комбінуються для усунення ефектів іоносферних затримок першого порядку та членів неоднозначності фази хвилі-носія, що оцінюються як дійсні числа за моделлю вимірювання. Тропосферні затримки ГНСС-сигналів також можуть оцінюватися (поряд з використанням тропосферних моделей затримок) сумісно з координатами та неоднозначностями фазових вимірювань. Треба, однак, відмітити, що останнім часом активно розвивається й режим PPP, що використовує одночастотні приймачі ГНСС сигналів (див., наприклад, [45-48]).

Для досягнення максимально можливої точності позиціонування методом PPP такі ефекти, як варіації фазових центрів антен приймачів сигналів ГНСС та бортових антен супутників ГНСС повинні коригуватися за допомогою моделей, що надаються розробниками антен. Залишкові члени, такі як шум приймача та багатопроменеве поширення сигналів (ефекти відбиття сигналів від підстилаючої поверхні, навколишніх предметів та елементів конструкції об'єкта, на якому встановлена ГНСС-антена), зазвичай ігноруються або обробляються, використовуючи стохастичні засоби (див., наприклад, [49-53]).

Певною мірою, унікальним аспектом PPP є те, що це область досліджень, яка активно проводиться академічними колами, урядом та промисловістю, спільно та індивідуально. Як завжди, ранній розвиток методу відбувався в дослідницьких умовах для наукових цілей. Уряди, як постачальники послуг, в деяких випадках займалися наданням послуг PPP населенню з огляду на соціально-економічні вигоди. Промисловість прийняла та просунула технологію, щоб краще обслуговувати своїх клієнтів. Результатами є, з одного боку, швидка розробка та використання PPP у різних галузях, і, з іншого боку,

значний збіг між трьома групами з погляду досліджень та розробок, а також моделей обслуговування.

Одним із перших застосувань режиму PPP була швидка післясеансна обробка статичних геодезичних даних для отримання координат базових станцій та моніторингу деформацій земної кори [54]. Інше застосування методу PPP – визначення точних орбіт низькоорбітальних супутників для відновлення гравітаційного поля Землі (наприклад, [55, 56]); визначення координат морських буїв для виявлення цунамі [57]. PPP використовується в комерційних цілях у сільськогосподарській галузі для точного землеробства (див., наприклад, [58]), у морських додатках для визначення координат суден при створенні карт морського дна (див., наприклад, [59], та [60]), в аерокартографуванні (наприклад, [61]).

Ведуться подальші дослідження та PPP проникає в інші області застосування, такі, як дистанційне зондування Землі, визначення точного часу, межування, будівництво, військові цілі (наприклад, [62] та [48]). PPP є хорошим варіантом у тих випадках, коли необхідна навігація в ізольованих місцях, де відсутня інфраструктура базових станцій та потрібні великі витрати на їх будівництво.

Перші згадки про режим PPP з'явилися у роботах Paul Collins (Natural Resources Canada) близько 20 років тому. За цей час режим PPP був розвинений і зараз широко використовується в наземних додатках. Останні ~10-15 років метод PPP був гарячою темою в дослідженнях ГНСС завдяки його здатності надавати послуги глобального позиціонування на сантиметровому рівні без використання опорних (базових/референцних) ГНСС-станцій [49], хоча для отримання такої точності у той період був потрібен значний час ініціалізації/збіжності PPP-рішень. В останні кілька років були проведені великі дослідження з використанням методів PPP у геодезичних та геодинамічних додатках ([63-70]). Спочатку автономний приймач може отримати рішення PPP без розв'язання цілочисельної фазової неоднозначності, тобто «плаваюче» (float) рішення з часом збіжності декількох десятків хвилин. Такий метод PPP,

по суті, заснований на «нульових» або, що по суті аналогічно, на одинарних різницях ГНСС-спостережень між супутниками. Фазові неоднозначності одинарних різниць не можуть бути розв'язані напряму, тому що супутникові некалібровані фазові затримки не можуть бути відокремлені від цілих неоднозначностей одинарних різниць фазових спостережень. Некалібровані фазові затримки складаються з апаратних затримок, початкових зсувів фаз сигналів супутників та інших невідомих затримок. Але щоб поліпшити точність позиціонування PPP і суттєво скоротити час збіжності рішень, необхідно вирішити задачу дискретного/цілочисельного розв'язання фазової неоднозначності (РФН), тобто, отримання «фіксованого» (fixed) рішення PPP, що і стало новим напрямом досліджень. Суть цілочисельного PPP полягає в тому, щоб відокремити та ізолювати супутникові некалібровані фазові затримки від пов'язаних з ними дискретних/цілочисельних неоднозначностей. Для цього ці затримки оцінюються за спостереженнями мереж наземних перманентних референціальних станцій (глобальних чи регіональних) і надаються споживачам.

На цей час існують три загальновизнані методи для досягнення «фіксованого» (fixed) PPP. Це метод некаліброваних фазових затримок, запропонований в роботі [71], метод роздільних годинників [73] та метод цілочисельних фазових годинників [74]. У методі некаліброваних фазових затримок [71, 72] спостереження одинарних різниць між супутниками використовуються для оцінки затримок в одинарних різницях спостережень супутників, де усуваються апаратні затримки і початкові фазові зсуви опорних генераторів ГНСС-приймачів. Затримки в одинарних різницях спостережень супутників оцінюються шляхом використання широкосмугової комбінацій (WL – Wide Lane [50-52]) та вузькосмугової комбінації (NL – Narrow Lane [50-52]). Затримки WL та NL визначаються шляхом усереднення дробових частин неоднозначностей WL та NL. Як тільки затримки супутників ізолювані від неоднозначностей на станціях мережі, оцінені та передані користувачам, користувачі можуть відновити цілочисельні властивості неоднозначностей.

Цей метод широко вивчався останніми роками. Ефективність цілочисельного РФН і результати позиціонування погодинного PPP були проаналізовані в роботі [75].

Варто згадати й підвищення ефективності інтеграції кількох ГНСС для покращення «фіксованого» (fixed) рішення PPP методом, що розглядається. Так, наприклад, ГНСС GPS (США) та BeiDou (BDS) (КНР), була досліджена у роботах [76] та [77]. Поглиблений аналіз інтеграції GPS та ГЛОНАСС було проведено у роботі [78].

Крім того, в роботі [79] розглянутий інший варіант реалізації «фіксованого» (fixed) рішення PPP, коли замість оцінки некаліброваних фазових затримок одинарних різниць, прийняли фазові затримки приймача за основу та оцінили фазові затримки «нульових» різниць супутників при спільному урівнюванні з цілочисельними значеннями неоднозначностей для покращення оцінок. Якщо при цьому використовується щільна регіональна/локальна мережа референцних ГНСС-станцій, крім оцінок супутникових фазових затримок можна також отримати більш точні тропосферні затримки і передати їх споживачам для подальшого скорочення часу ініціалізації і підвищення точності позиціонування ([80-82]).

На відміну від методу некаліброваних фазових затримок в [73] безпосередньо оцінили кодові та фазові «годинники» (мається на увазі поточні розходження шкал часу супутників та приймачів) за безіоносферними (IF – Iono-Free) комбінаціями спостережень, які поглинають апаратні кодові та фазові затримки та початкові фази опорних генераторів супутників та приймачів. Ці фазові апаратні затримки та початкові фази є основною частиною параметрів некаліброваних фазових затримок. У методі, запропонованому в [83], неоднозначності безіоносферних спостережень записуються як лінійна комбінація неоднозначностей WL та неоднозначностей спостережень частоти L1, а функція Melbourne-Wübbena (MW) [50-52] також використовується для розв'язання неоднозначностей спостережень на частоті WL. Метод розділення «годинників» може використовуватися для відділення

супутникових кодових та фазових апаратних затримок для «плаваючого» (float) методу PPP і відновлення цілочисельних властивостей неоднозначностей на станціях [83]. У той же час, параметри WL-затримки у апаратурі супутника також передаються користувачам для фіксації неоднозначностей. У роботі [84] автори проаналізували якість роз'єднаних «годинних» продуктів, а статистичні результати координатних рішень були отримані та узагальнені у роботі [85]. Ця модель використовувалася для визначення сейсмічного руху земної кори у реальному часі [86, 87].

Подібний, але простіший метод, ніж метод [73], запропоновано в роботі [88]. Цей метод названий цілочисельними фазовими «годинниками», що асимілюють апаратні затримки фазових безіоносферних спостережень. У цьому методі оцінюються тільки фазовий «годинник», а в якості кодового «годинника» використовується кодовий «годинник» IGS. Модель цілочисельних фазових «годинників» була доведена здійсненністю проекту PPP-WIZARD, розробленого Центром національних досліджень космосу (CNES) [89]. Цей метод також використовувався для точного визначення супутникової орбіти [74].

Цілочисельний «годинник» і метод роздільного оцінювання «годинників» справді схожі. Основна відмінність між цими двома моделями полягає у стратегії розрахунку некаліброваних фазових затримок для частоти WL. У методі цілих фазових WL-«годинників» некалібровані фазові затримки отримують шляхом усереднення дробових частин WL-спостережень, як це робиться у методі [71]. Однак у методі з роздільними «годинниками» цілі неоднозначності WL і відповідні апаратні затримки безпосередньо оцінюються за допомогою моделі функції кодових та фазових спостережень MW, а не просто приймають середнє значення неоднозначностей «плаваючої» WL-оцінки. Не розрізняючи ці два методи і називаючи їх відновленим фазовим «годинником» (IRC – Integer Recovery Clocks), в [90] автори довели, що метод некаліброваних фазових затримок (UPD – Uncalibrated Phase Delays) і метод IRC ідентичні з точки зору оцінок координат без використання кодових

спостережень на станціях користувачів. У роботі [91] автори також порівняли описані три методи, зосередившись на стратегіях відновлення цілочисельних властивостей, надмірності системи та необхідних корекцій. Крім того, у [92] автори розробили та впровадили метод розв'язання неоднозначностей у режимі PPP для рівня одинарних різниць супутників (між парами супутників) та визначили поняття PPP-RTK. Автори роботи [93] обчислили поправки для супутникового «годинника», фазових зсувів та інтерпольованих атмосферних затримок на основі параметризованих рівнянь спостережень нульових різниць регіональної еталонної мережі ГНСС-станцій.

Для користувачів правильне розв'язання фазових неоднозначностей є передумовою отримання точних координат. У реальних додатках повне розв'язання неоднозначності (FAR – Full Ambiguity Resolution) легко піддається впливу нових висхідних супутників [94]. У цьому випадку доцільним є часткове розв'язання неоднозначності (PAR – Partial Ambiguity Resolution), якщо вибрано лише надійну частину спостережень для цілочисельного розв'язання фазових неоднозначностей. Фактично виправлення частини неоднозначностей зазвичай достатньо для того, щоб користувачі могли отримати координатне рішення з необхідною точністю. Підхід PAR досліджувався багатьма вченими, було запропоновано кілька стратегій для вибору підмножини неоднозначностей для розв'язання. В роботі [95] запропоновано стратегію вибору підмножини декорельованих неоднозначностей з точки зору їхніх відхилень. Потім кілька найбільш точних неоднозначностей намагалися виправити, і було досягнуто вищу швидкість фіксації неоднозначностей. В роботі [96] автори просто обмежили кут піднесення супутників до 30° , і неоднозначності супутників з нижчими кутами виключили з підмножини неоднозначностей, які потрібно виправити. Автори статті [97] представили два підходи до вибору підмножини, де як обмеження застосовуються як коефіцієнт успіху, так і збільшення точності визначення баз. Крім того, в [98] представлено новий алгоритм PAR для одноетапного додатку Real-Time Kinematic (RTK). Цей метод вибирає підмножину відповідно

до впорядкованого фактора погіршення точності неоднозначності (ADOP) та середнього відношення сигнал/шум (SNR). Після того, як підмножина неоднозначностей буде виправлена, вона буде додатково перевірена на відповідність заданим неоднозначностям попередніх епох. В роботі [99] також використовується критерій точності, щоб упорядкувати неоднозначності для визначення підмножини з максимальними неоднозначностями. Після того, як початкова підмножина зафіксована, кандидат з найвищою точністю з неоднозначностей, що залишилися, додається до підмножини. Цей процес повторюється, доки перевірка неоднозначності не вдасться або всі неоднозначності не будуть розв'язані.

При реалізації PPP принципове значення, на відміну від диференціального методу, набуває врахування (компенсація) впливу низки специфічних джерел похибок, таких, як геодинамічні (приливні та ін.) ефекти, ефекти додаткового фазового набігу, обумовленого обертанням антен супутника та приймача («wind-up»-ефекту), нерівномірності фазових характеристик антен супутників та приймачів, похибок ефемеридно-часового забезпечення ГНСС, затримок в апаратурі супутників та приймачів тощо [5, 100-103]. Та, як детально показано вище, також при реалізації PPP-методу позиціонування має розв'язання фазової неоднозначності (РФН) спостережень, яке може бути досягнуто двома методами – методом з оцінкою цілих параметрів як континуальних (float-метод) і методом знаходження дискретних/цілочисельних параметрів (fixed-метод). Float-реалізація методу PPP в даний час є в арсеналі практично всіх провідних фірм-виробників програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) та обладнання. Проте останніми роками спостерігається пік публікацій (що також наведені вище), пов'язаних із реалізацією fixed-методу реалізації PPP. Це стало можливим у зв'язку з тим, що точність визначення точних ефемерид і годинників супутників ГНСС значно підвищилася, а також стали доступні інші продукти, такі як кодові та фазові затримки в апаратурі ГНСС, зсуви фазових центрів антен супутників відносно центрів мас, діаграми нерівномірності фазових характеристик антен

та ін.). Саме знання цих даних є необхідною умовою реалізації дискретного/цілочисельного fixed-методу PPP.

В даний час зусилля вчених зосереджені на підвищенні точності та надійності PPP-рішень, пошуку більш ефективних процедур розв'язання фазової неоднозначності, скорочення часу ініціалізації/збіжності рішень.

Майже всі великі компанії-розробники ПМЗ обробки ГНСС-спостережень мають власні реалізації методу PPP. Лідерами з них є Trimble, Septentrio, NovAtel. В Україні розробками технологій (методів, алгоритмів та експериментального програмного забезпечення) точного позиціонування, зокрема методами PPP, займається лише відповідна наукова лабораторія ХНУРЕ разом з фахівцями ГАО НАН України [34-43].

Щодо застосування PPP для визначення параметрів руху НКА, то, як правило, процедури обробки спостережень створюється/конкретизуються під кожен космічну місію, повністю універсального методу обробки не існує, і такими задачами займаються лише значні наукові центри (IGS та інші), космічні агенції, такі як JPL, DLR, австрійський університет GRAZ, Французьке космічне агентство CNES, провідні в цій галузі вчені.

Враховуючи конструктивні особливості побудови апаратури, при визначенні параметрів руху НКА використовуються лише двохчастотні спостереження GPS, проте надалі використовуватимуться трьохчастотні та мультисистемні спостереження.

Як правило, параметри руху НКА визначаються комбінацією кінематичного та динамічного способів (тобто способу, що враховує модель руху НКА (кеплеровий рух НКА) з урахуванням всіх збурюючих впливів) [104]. У даній дисертаційній роботі визначення параметрів руху НКА за бортовими двохчастотними сигналами GPS розглядається виключно кінематичним способом.

1.3 Проблемні питання реалізації PPP-методу позиціонування. Особливості та відмінності застосування методу PPP для траєкторних визначень НКА

Хоча метод PPP надає певні переваги для багатьох додатків з точки зору експлуатаційної гнучкості та економічної ефективності, його широке використання обмежено питаннями часу збіжності рішення, його точності та надійності (цілісності).

1) Час збіжності рішення. Float-метод PPP вимагає тривалого часу для оцінки параметрів, що включають дискретні неоднозначності фазових вимірювань, та досягнення заданої (сантиметрової) точності місцевизначення. Головною причиною незадовільно великого часу збіжності float PPP-рішень є сумісна оцінка інформаційних параметрів (координат та поточних розходжень шкал часу ГНСС та приймача) і неінформаційних параметрів, що включають фазові неоднозначності на всьому інтервалі спостережень. Така сумісна оцінка в ході накопичення поділяє всю інформацію, що міститься у спостереженнях, між інформаційними та неінформаційними параметрами не на користь інформаційних параметрів. Це приводить до значного зниження точності всіх параметрів, що оцінюються на інтервалі спостережень, і для досягнення прийнятних результатів по точності потрібні значні інтервали спостережень/накопичення, тобто значно погіршується збіжність координатних рішень. Якщо ж реалізується fixed-метод PPP (дискретне/цілочисельне РФН), оцінені (на відносно короткому інтервалі ініціалізації) параметри фазової неоднозначності корегуються в спостереженнях і далі виконується оцінка тільки інформаційних параметрів, що приводить до значного підвищення точності позиціонування зразу після РФН.

Час збіжності float PPP-рішень також залежить від низки факторів, таких, як геометрія та кількість видимих ГНСС-супутників, навколишнє оточення (що впливає на якість прийому ГНСС-сигналів та на рівень багатопроменевості спостережень), динаміка руху споживача, якість спостережень, частота

дискретизації спостережень та ін. Залежно від комбінації цих факторів змінюватиметься час, необхідний для досягнення заданого рівня точності. Час збіжності зазвичай становить близько 30 хвилин у нормальних умовах і буде значно довшим, перш ніж позиційне рішення зможе зійтися на рівень кількох сантиметрів, якщо взагалі зійтись ([105-107]).

Обмеженням методу PPP також є той факт, що потрібна безперервність спостережень сигналів ГНСС. У разі втрати стеження потрібна повторна ініціалізація, яка може займати тривалий час. До цього часу похибки визначення координат об'єктів можуть перевищувати кілька дециметрів. Це обмеження серйозно обмежує корисність PPP, оскільки його можна успішно використовувати лише за умов безперервного «відкритого неба». Одне з перших застосувань PPP було для подальшої обробки статичних геодезичних даних, наприклад, для швидкої обробки даних станції спостереження ГНСС або моніторингу деформації земної кори [108].

2) Точність. Основним фактором, який обмежує точність PPP, є обмежена точність ефемерид та даних годинників супутників ГНСС внаслідок немодельованих джерел похибок. В даний час при використанні PPP досягається точність визначення споживача в кілька сантиметрів в статичному режимі і дециметровий рівень точності в кінематичному режимі. Підвищення точності визначення орбіт і годин супутників дозволить ще більше підвищити точність місцевизначення в режимі PPP.

3) Надійність (цілісність). Контроль цілісності є одним з найважливіших компонентів будь-якої навігаційної системи. При використанні PPP оцінюється і моделюється більше параметрів (у порівнянні з диференціальним методом), при якому безліч параметрів компенсується при формуванні різниць спостережень. Тому для методу PPP забезпечення надійності (цілісності) рішень є також важливою задачею. Серед користувачів PPP є такі, що потребують отримання двох незалежних рішень: PPP і великобазового диференціального РТК. Два незалежні рішення дозволяють судити

про точність і надійність отриманих результатів. Оцінка результатів PPP, виявлення неякісних спостережень, викидів повинні бути стандартною практикою під час використання PPP. Бажано, щоб під час використання PPP були реалізовані алгоритми автономного контролю цілісності (RAIM).

Незважаючи на наявні в даний час недоліки та обмеження автономного (недиференціального) точного позиціонування, метод PPP може бути покращений. Розглянемо шляхи розвитку методу PPP.

1) Час збіжності рішення може бути суттєво зменшено при швидкому розв'язанні неоднозначності фазових спостережень. При використанні диференціальних методів, де використовуються подвійні різниці спостережень, головним чином використовуються цілочисельне розв'язання неоднозначності. При автономному (недиференціальному) позиціонуванні методом PPP фазові спостереження крім цілих неоднозначностей також включають в себе апаратні затримки та початкові фази опорних генераторів супутників і приймача, що не дає можливості напряду реалізувати цілочисельне РФН. Останнім часом були досягнуті значні успіхи у розумінні особливостей та оцінці початкових зсувів фази. Нові підходи до вирішення задачі цілочисельного РФН використовують корекції, що можна отримувати з наземних ГНСС-спостережень перманентних референціальних станцій, які дозволяють розв'язувати фазові неоднозначності та досягати заданої точності за набагато короткіший час.

2) Інтеграція автономного PPP-метода із диференціальним методом RTK. Інтеграція PPP та RTK може призвести до підвищення точності місцевизначення та зменшення часу збіжності. Концепція мережевого PPP з використанням диференціального метода RTK була описана в роботі [109]. Гібридна система оптимальної інтеграції рішень PPP та RTK також була впроваджена у глобальну систему диференціального позиціонування [110]. Оскільки PPP може стати реальною альтернативою диференціального метода RTK, зараз ведуться роботи з розробки таких інтегрованих систем і є успішні приклади такого підходу [111].

3) Інтеграція з інерціальними навігаційними системами (ІНС). ІНС широко використовуються у автономній та диференціальній супутниковій навігації. Такі інтегровані системи використовуються для підвищення надійності (доступності, цілісності, безперервності) навігації рухомих об'єктів, отримання згладжених траєкторій, що також дозволяє підвищити швидкість виявлення навмисних перешкод сигналів. Інтеграція технологій PPP та ІНС дозволить скоротити час повторної ініціалізації та збіжності PPP-рішення, що особливо актуально для рухомих споживачів, що працюють в умовах, де виникають часті перерви слідування за ГНСС-сигналами.

4) Розробка та використання нових влучних моделей атмосферних (тропосферних та іоносферних) затримок. Як правило, при використанні PPP zenітна тропосферна затримка (ЗТЗ) ГНСС-сигналів включається до оцінюваних параметрів. Іоносферна затримка у двохчастотній апаратурі практично повністю виключається за допомогою лінійних комбінацій двохчастотних спостережень, а в одночастотній апаратурі використовуються іоносферні моделі, які зменшують іоносферні похибки на ~50–80 %. Використання нових точних атмосферних моделей дозволить скоротити загальну кількість невідомих параметрів, що оцінюються, і зменшити час збіжності рішення. Для цього корегування спостережень за допомогою моделей має бути на сантиметровому/субдециметровому рівні точності.

5) Розвиток інфраструктури. Сюди відносяться організації, які розраховують точні ефемериди та дані годинників ГНСС-супутників, частотні затримки, усунення в апаратурі супутників, а також здійснюють розповсюдження цих продуктів та доставку їх споживачам. Останнім часом точність розрахованих ефемерид та даних годинників супутників значно зросла. Тим не менш, для використання PPP в реальному часі необхідно підвищення точності прогнозу точних ефемерид та даних супутникових годинників на інтервалах, не менших кількох годин.

б) Розповсюдження прогнозованих точних ефемерид та даних супутникових годинників. Дані можуть розповсюджуватися різними

способами. Комерційними постачальниками послуг зазвичай використовуються супутникові канали передачі. Споживачі приймають дані за допомогою антен, вбудованих у приймачі GPS. Передача даних через Інтернет потребує набагато менших витрат, тому зараз широко використовується. Дані через Інтернет розповсюджуються за протоколом NTRIP.

7) Розвиток ГНСС. Як було зазначено вище, точність PPP залежить від геометрії та кількості супутників, що спостерігаються. Використання в PPP не тільки спостережень GPS, але й інших навігаційних систем, таких як Galileo, ГЛОНАСС та BeiDou (BDS), вплине на точність позиціонування, надійність і час збіжності. Результати експериментів показують, що комбінована система GPS+ГЛОНАСС може зменшити час збіжності PPP-рішень на ~20–30 % порівняно з використанням лише спостережень GPS. При цьому мають бути вирішені питання сумісності даних.

Особливістю застосування методу PPP для траєкторних визначень НКА (по результатах бортових ГНСС-спостережень) є:

- висока динаміка зміни навігаційних параметрів (кодових та фазових затримок сигналів, доплерівських зсувів) і одночасно – невеликі прискорення та невеликі більш високі похідні параметрів, що вимірюються на борту НКА;
- відсутність затримок сигналів у тропосфері;
- іоносферні затримки, у порівнянні з навколосемними споживачами, змінюються в дуже широких межах – для «високих» супутників ГНСС просвічується тільки частина іоносферного шару, в той час як для «низьких» супутників ГНСС, що знаходяться близько до місцевого горизонту і нижче за горизонт, просвічується повний шар іоносфери;
- гладкість зміни параметрів руху.

Проблемними питаннями реалізації float та fixed методів PPP для траєкторних визначень НКА є підвищення точності визначень параметрів руху, зменшення часу збіжності PPP-рішення та збільшення надійності розв'язання фазової неоднозначності.

1.4 Постановка задач дослідження

Виходячи з вищесказаного, мета даної дисертаційної роботи полягала у створенні, дослідженні і експериментальному тестуванні вдосконалених та нових методів, алгоритмів і процедур оцінки параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів та позиціонування навколоземних об'єктів з сантиметровою/дециметровою точністю у автономному (недиференціальному) режимі PPP (Precise Point Positioning) по бортовим двохчастотним фазовим і кодовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

– розвитку методів, алгоритмів і процедур автономного (недиференціального) позиціонування НКА та навколоземних об'єктів сантиметрової/дециметрової точності, включаючи пошук та дослідження нових алгоритмів «плаваючого» (float) і дискретного/цілочисельного (fixed) розв'язання фазової неоднозначності (РФН) бортових двохчастотних фазових ГНСС-спостережень в автономному (недиференціальному) режимі точного позиціонування PPP.

– розробки моделей похибок ГНСС-спостережень, методики і алгоритмів оцінки точності траєкторних визначень (позиціонування) для «плаваючого» (float) і дискретного/цілочисельного (fixed) фазових рішень.

– проведення натурних експериментів з використанням реальних бортових GPS-спостережень НКА для підтвердження ефективності теоретичних результатів дисертаційної роботи, апостеріорна оцінка точності визначення параметрів руху НКА PPP-методом.

Висновки по розділу 1

1. Проведений аналіз тенденцій та шляхів розвитку методів високоточного визначення параметрів руху НКА з використанням сигналів

ГНСС. Показано, що при виконанні низки практичних задач потрібне визначення координат НКА із дециметровою/сантиметровою точністю. Досягнення зазначеної точності позиціонування НКА можливе лише за умови використання фазових ГНСС-спостережень та методів точного позиціонування. Описано метод PPP (Precise Point Positioning), показані переваги та висвітлено проблемні питання його використання. Показані особливості використання методу PPP для траєкторних визначень низькоорбітальних космічних апаратів.

2. На основі аналізу значної кількості сучасних наукових робіт у даній області дано визначення та розкриті особливості так званих «float» та «fixed» PPP-рішень, які залежать від способу оцінки та усунення неоднозначності фазових ГНСС-спостережень, які є основою реалізації PPP-методу. Показано, що «плаваючий» (float) метод розв'язання фазової неоднозначності (РФН) характеризується великим часом збіжності PPP-рішень – від декількох десятків хвилин до кількох годин. Щоб поліпшити точність позиціонування PPP і суттєво скоротити час збіжності рішень, необхідно вирішити задачу дискретного/цілочисельного РФН, тобто, необхідно отримати «фіксоване» (fixed) рішення PPP, що і стало новим напрямом досліджень у світі.

Описані кілька загальновизнаних методів досягнення «фіксованого» (fixed) PPP-рішення, особливості їх реалізації з використанням (для формування необхідних корегувань) спостережень мереж наземних перманентних референцних станцій (глобальних чи регіональних).

Показано, що правильне розв'язання фазових неоднозначностей є передумовою суттєвого зменшення часу збіжності рішень та отримання точних координат методом PPP, тому пошук більш ефективних процедур РФН є актуальним та важливим для практики.

3. Відповідно до виконаного огляду науково-технічних джерел з обробки методів точного позиціонування виділено проблемні питання, пов'язані зі зменшенням часу збіжності рішення, розв'язанням фазової неоднозначності ГНСС-спостережень та досягнення необхідної точності визначень.

4. Розглянуті шляхи розвитку методу PPP. Один із ефективних шляхів – пошук і реалізація нових підходів до вирішення задачі цілочисельного РФН за рахунок корекцій, які можна отримувати з наземних ГНСС-спостережень перманентних референцних станцій, використання трьохчастотних (багаточастотних) спостережень сигналів кількох ГНСС з реалізацією дискретного/цілочисельного розв’язання фазової неоднозначності.

Сформульовані мета та задачі досліджень.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ОБРОБКИ ГНСС-СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕТОДОМ PPP

Даний розділ присвячений опису запропонованих автором основних принципів обробки ГНСС-спостережень у режимі PPP. Наведено рівняння ГНСС-спостережень та дано аналіз основних джерел похибок. Подано методологічні основи обробки ГНСС-спостережень НКА методом PPP. Наведені перетворення системи рівнянь для реалізації float- та fixed-методів РФН та координатних визначень (позиціонування) НКА та навколоземних об'єктів. Запропоновано методику апостеріорної оцінки точності визначення параметрів руху НКА, а також методику оцінки інтервалів збіжності/ініціалізації float- та fixed-рішень.

2.1 Вихідні положення. Послідовність та напрямки виконаних досліджень

При позиціонуванні методом PPP, як відомо з численних джерел, важливе значення має використання:

- фазових вимірювань параметрів сигналів ГНСС (наприклад, GPS);
- високоточних оцінок ефемерид та корекцій годинників супутників ГНСС;
- розрахунку та компенсації впливу ряду специфічних джерел похибок, таких як геодинамічні (приливні та ін.) ефекти, ефекти додаткового фазового набігу, обумовленого обертанням антен супутника та приймача (т.зв. «wind-up»-ефект), нерівномірності фазових характеристик антен супутників та приймачів (див., наприклад, роботи [5, 49, 112, 113]).

В ході високоточного статичного та кінематичного PPP-позиціонування вирішується задача розрахунку (та компенсації)/оцінювання параметрів середовища поширення сигналів – іоносфери та тропосфери. Зазначені дані

(точні ефемериди, годинники супутників та інші параметри), без яких метод PPP не дозволяє досягти сантиметрової або дециметрової точності, формують, використовують та надають споживачам міжнародні та національні сервісні центри обробки ГНСС-спостережень, такі як IGS (міжнародна служба), CNES (Франція), CSRS (Канада), GMV (Іспанія), BKG (ФРН), JPL (США) та ін.

Позиціонування методом PPP, як показано вище, здійснюється у двох режимах: отримання «плаваючого» (float) рішення [7, 8, 23, 49, 71, 112, 114-116] та «фіксованого» (fixed) рішення [74, 83, 117, 118]. У першому випадку фазові неоднозначності оцінюються як континуальні змінні разом із інформаційними та іншими параметрами моделі спостережень. У другому випадку в ході рішення здійснюється оцінка фазових неоднозначностей як дискретних/цілочисельних змінних (розв'язання фазових неоднозначностей – РФН) відповідно до природи фазових спостережень. Для досягнення «фіксованого» PPP-рішення критичною умовою є облік міжчастотних кодових та фазових затримок сигналів в аналогових трактах ГНСС-супутників [74, 83, 117, 118].

Мета даної дисертаційної роботи, головним чином, полягала у створенні, дослідженні і експериментальному тестуванні вдосконалених та нових методів, алгоритмів і процедур оцінки параметрів руху НКА. На початковому етапі досліджень при визначенні параметрів руху НКА було отримано стійке і надійне float-рішення в режимі PPP, досягнуто розв'язання фазової неоднозначності (РФН) WL-спостережень різницевої частоти з використанням фазових поправок французького космічного агентства CNES, однак розв'язати фазову неоднозначність безіоносферних IF-спостережень і отримати дискретне/цілочисельне PPP-рішення не вдалося, а встановити причину невдачі на попередньому етапі досліджень не уявлялося можливим. Тому виникла нагальна необхідність реалізації (статичного та кінематичного) методу PPP для точного позиціонування навколоземних об'єктів. Метод PPP для навколоземних об'єктів має свої особливості та відмінності, головною з яких є

необхідність введення поправок на геодинаміку, а також оцінки та введення тропосферних поправок (за умови компенсації іоносферних затримок сигналів ГНСС двохчастотним методом, який і розглядається в даній дисертаційній роботі). У той же час, реалізація наземного режиму PPP дозволила встановити та дослідити фактори, що впливають на точність, час збіжності та надійність, встановити причину невдалих спроб досягнення дискретного/цілочисельного РФН безіоносферних ІF-спостережень для НКА. Під час виконання робіт з реалізації методу PPP для навколоземних об'єктів були розроблені метод, алгоритми та експериментальне програмне забезпечення формування власних фазових поправок (фазових затримок сигналів на борту супутників ГНСС(GPS)) з використанням спостережень наземної регіональної мережі перманентних референціальних ГНСС-станцій України.

З використанням власних поправок вдалося досягти достатньо надійного РФН як WL-спостережень (системи GPS) різницевої частоти (на довжині хвилі $\sim 86,2$ см), так і безіоносферних ІF-спостережень (на довжині хвилі $\sim 10,7$ см) та реалізувати дискретний/цілочисельний метод PPP для навколоземних споживачів. На відміну від поправок CNES, як показали дослідження, запропоновані та сформовані поправки абсорбують залишкові похибки ефемерид та показань годинників ГНСС-супутників. Після отримання позитивних результатів розроблені методи адаптувалися та були також успішно застосовані і для обробки бортових спостережень НКА.

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

2.2 Рівняння (модель) ГНСС-спостережень. Джерела та складові похибок ГНСС-спостережень

Наведені у цьому підрозділі рівняння ГНСС-спостережень, а також опис джерел та складових похибок ГНСС-спостережень записані у загальному вигляді, і можуть бути застосовані як для навколоземних/наземних споживачів (у статичному та кінематичному режимах), так і для космічних застосувань [5, 35, 36, 38, 39, 50, 113, 119, 120]. При цьому для кожного варіанту застосування обговорено особливості та відмінності.

Будемо використовувати оцінки кодових $[\hat{S}_{c_1}^j(t_k), \hat{S}_{c_2}^j(t_k)]$ та фазових $[\hat{L}_1^j(t_k), \hat{L}_2^j(t_k)]$ псевдовідстаней (j – індекс супутника), які відносяться до часу прийому (формування вимірювань приймачем) у шкалі часу GPS t_k . Припускаємо, що спостереження на заданому інтервалі часу пройшли попередню обробку (препроцесинг), у ході якої усунуто фазові стрибки, аномальні спостереження (кодові та фазові), всі спостереження приведені до цілих секунд шкали GPS тощо.

Також припускаємо, що крім бортової навігаційної інформації, що передається супутниками GPS в реальному часі, з центрів IGS, CNES та інших є інформація про точні ефемериди і точні годинники супутників GPS, також як і інформація про кодові та фазові затримки сигналів (на частотах L_1 і L_2 GPS) у трактах супутників GPS.

Зазначимо, що позначення C_1 означає, що приймач може вимірювати псевдозатримки сигналів C/A, C_1 і P_1 GPS, а позначення C_2 означає можливість вимірювання псевдозатримок сигналів C_2 або P_2 . Тому важливо мати кодові та фазові корекції затримок у трактах супутників, що відносяться до відповідних сигналів, оскільки зазначені корекції (затримки у трактах) відрізняються для різних сигналів. Більш того, і фазові спостереження,

що використовуються, також повинні відповідати кодовим сигналам. Так, при використанні модульованих сигналів P_1 і P_2 необхідно використовувати спостереження $L_1(P_1)$ і $L_2(P_2)$, а також корекції затримок сигналів у трактах, які отримані в центрах обробки сигналів P_1 і P_2 . Якщо, наприклад, замість P_1 використовуються спостереження сигналів C/A, то й фазові спостереження повинні використовуватись відповідно до сигналів C/A, та корекції затримок також повинні відповідати сигналам C/A. В іншому випадку в режимі PPP реалізувати fixed-метод розв'язання фазової неоднозначності (РФН) неможливо, а float-метод дасть менш точні результати позиціонування. Таким чином, модель спостережень може бути представлена у вигляді [35, 36, 38, 39, 120]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{S}_{c_1}^j(t_k) = F^j(t_k) + I^j(t_k) + (b_{c_1} - B_{c_1}^j) + [\Delta\tilde{\rho}_{pcv1}^j(t_k)] + \Delta R_{GEO}^j(t_k) + \delta S_{c_1}^j(t_k) \\ S_{c_2}^j(t_k) = F^j(t_k) + \gamma^2 \cdot I^j(t_k) + (b_{c_2} - B_{c_2}^j) + [\Delta\rho_{pc12}^j(t_k) + \Delta\tilde{\rho}_{pcv2}^j(t_k)] + \\ \quad + \Delta R_{GEO}^j(t_k) + \delta S_{c_2}^j(t_k) \\ \hat{L}_1^j(t_k) = F^j(t_k) - I^j(t_k) + (b_{\phi_1} - B_{\phi_1}^j) - M_1^j \cdot \lambda_1 + [\tilde{\rho}_{pcv1}^j(t_k)] + \\ \quad + \phi_{wup}^j(t_k) \cdot \lambda_1 + \phi_{wup}(t_k) \cdot \lambda_1 + \Delta R_{GEO}^j(t_k) + \delta L_1^j(t_k) \\ \hat{L}_2^j(t_k) = F^j(t_k) - \gamma^2 \cdot I^j(t_k) + (b_{\phi_2} - B_{\phi_2}^j) - M_2^j \cdot \lambda_2 + [\rho_{pc12}^j(t_k) + \\ \quad + \Delta\tilde{\rho}_{pcv2}^j(t_k)] + \phi_{wup}^j(t_k) \cdot \lambda_2 + \phi_{wup}(t_k) \cdot \lambda_2 + \Delta R_{GEO}^j(t_k) + \delta L_2^j(t_k) \end{array} \right. , \quad (2.1)$$

де:

$$F^j(t_k) = R^j(t_k) + [\Delta^{GPS}(t_k) - \Delta^{j,GPS}(t_k) - F_{rel}^j] + Tr^j(t_k), \quad (M);$$

$$R^j(t_k) = \sqrt{[x(t_k) - \hat{X}^j\{t_k(t_T^j)\}]^2 + [y(t_k) - \hat{Y}^j\{t_k(t_T^j)\}]^2 + [z(t_k) - \hat{Z}^j\{t_k(t_T^j)\}]^2}, \quad (M);$$

$F^j(t_k)$ – функція, що включає частотно-незалежні змінні (орбіти і поправки годинників супутників, розбіжності годинників приймача і GPS, тропосферні затримки, релятивістські поправки); у разі вимірювань на борту НКА тропосферні затримки відсутні і $Tr = 0$;

$R^j(t_k)$ – геометрична дальність між фазовим центром антени (на частоті L_1) приймача та фазовим центром випромінювання антени j -го супутника GPS (на частоті L_1) (м);

$x(t_k)$, $y(t_k)$, $z(t_k)$ – невідомі (що підлягають оцінці) поточні координати фазового центру (на частоті L_1) прийомної антени в Грінвічській системі координат – ГСК (ECEF); у статичному випадку вважаємо, що $x(t_k) = x$, $y(t_k) = y$, $z(t_k) = z$;

$\hat{X}^j\{t_k(t_T^j)\}$, $\hat{Y}^j\{t_k(t_T^j)\}$, $\hat{Z}^j\{t_k(t_T^j)\}$ – розрахункові значення координат (ефемериди) j -го супутника (його центру мас), обчислені на момент випромінювання сигналу j -го супутника GPS (t_T^j) щодо часу (t_k) прийому цього сигналу, (м); тут припускаємо, що у етапі попередньої обробки спостережень було використано корекції ефекту обертання Землі за час поширення сигналу на трасах «супутники – приймач» [53, 121];

$\Delta^{GPS}(t_k)$ – невідома (що підлягає оцінці) величина, пропорційна розбіжності шкал часу приймача та системи GPS, помножена на швидкість світла, (м);

$\Delta^{j,GPS}(t_k)$ – величина, пропорційна розбіжності шкали часу j -го супутника GPS та системної шкали часу GPS, помноженої на швидкість світла (м); $\Delta^{j,GPS}(t_k)$ коригується з використанням поправок годинників;

F_{rel}^j – релятивістський ефект, викликаний взаємним рухом приймача та супутника GPS (м); коригується поправкою, що розраховується відповідно до інтерфейсного контрольного документа ICD-200 (системи GPS) або інших документів [50, 53, 113, 119];

$I^j(t_k)$ – частотно-залежна іоносферна затримка (м) на частоті L_1 GPS

$$(f_{L_1} = 1575,42 \text{ МГц}; f_{L_2} = 1227,6 \text{ МГц}); \gamma^2 = \left(\frac{77}{60}\right)^2 = \frac{f_{L_1}^2}{f_{L_2}^2} = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2};$$

$b_{c_1}, b_{c_2}, B_{c_1}^j, B_{c_2}^j, b_{\varphi_1}, b_{\varphi_2}, B_{\varphi_1}^j, B_{\varphi_2}^j$ – кодові та фазові інструментальні (апаратні) затримки сигналів у трактах супутників GPS (B) та приймача (b), які приймаються постійними на інтервалі спостережень (м); введемо позначення

$$\begin{cases} B_{c_2}^j - B_{c_1}^j = B^j \rightarrow DCB^j; B_{\varphi_2}^j - B_{\varphi_1}^j = B_{\varphi}^j; \\ b_{c_2} - b_{c_1} = b \rightarrow IFB; b_{\varphi_2} - b_{\varphi_1} = b_{\varphi} \end{cases};$$

При рішенні навігаційної задачі (рішенні системи рівнянь) необхідно виконати перерахунок ефемерид супутників GPS із центрів мас супутників на центри випромінювання сигналів, тобто врахувати зміщення фазових центрів антен супутників щодо центрів мас із залученням інформації про кутову орієнтацію супутників; інакше ефемеридні похибки можуть досягати $\sim 1 \div 2$ м, що неприпустимо для PPP-режиму позиціонування;

$\Delta \tilde{\rho}_{pcv1,2}^j(t_k)$ – варіації (pcv) положення фазових центрів GPS-антени приймача для кожної з частот-носіїв (з урахуванням кутового положення j -го супутника) (м); в рівняннях (2.1) опущені аналогічні складові для передавальних бортових GPS-антен супутників, однак і ці складові повинні бути враховані (скориговані) під час підготовки до рішення навігаційної задачі (НЗ) з використанням даних у форматі ANTEX [122];

$\Delta \rho_{pc12}^j(t_k)$ – похибки псевдовідстаней через зміщення фазових центрів приймальної GPS-антени (м); аналогічні похибки виникають через зміщення фазових центрів передавальних антен супутників; похибки $\Delta \rho_{pc12}^j(t)$ призводять до похибки всіх лінійних комбінацій спостережень – комбінації спостережень різницевої частоти (WL), комбінації Melbourne-Wübbena (MW), безіоносферної

комбінації (IF), фазової лінійної комбінації, що не містить геометричної складової рівнянь спостережень (GF), тому ці похибки необхідно компенсувати;

$\varphi_{wup}^j(t_k)$ – «wind-up»-ефект (цикли); даний ефект характеризується додатковим набігом фаз L_1 і L_2 спостережень унаслідок обертання супутників GPS навколо своєї осі щодо приймальної антени; ефект $\varphi_{wup}^j(t_k)$ розраховується та коригується з використанням спеціальних співвідношень, що враховують еволюції супутників GPS та їх просторове становище [101];

$\varphi_{wup}(t_k)$ – «wind-up»-ефект (цикли); даний ефект характеризується додатковим набігом фаз L_1 і L_2 спостережень внаслідок обертання приймальної антени; у статичному варіанті, коли приймальна антена нерухома, $\varphi_{wup}(t_k)=0$; у кінематичному варіанті, коли приймальна антена обертається (наприклад, для НКА), $\varphi_{wup}(t_k)$ розраховується виходячи з інформації про просторове становище приймальної антени; якщо не вводити поправку на «wind-up»-ефект, зумовлений обертанням приймальної антени, то на точність визначення координат фазового центру приймальної антени це не вплине, а некомпенсована похибка, обумовлена «wind-up»-ефектом, увійде до розходження шкал приймача та GPS; слід зазначити, що у групових затримках і фазі різницевої частоти цей ефект відсутній;

$$M_{1,2}^j = N_{1,2}^j - (\varphi_0 - \varphi_0^j);$$

$N_{1,2}^j$ – неоднозначності фазових спостережень на частотах L_1 і L_2 (цикли);

φ_0, φ_0^j – невідомі початкові фази опорних генераторів приймача і j -го супутника GPS (цикли);

$\Delta R_{GEO}^j(t_k)$ – похибки геометричних відстаней між j -м супутником і приймачем, зумовлені впливом геодинамічних ефектів (тверді припливи, океанічні припливи, полярні припливи), виражені у метрах; ці похибки з високою точністю коригуються поправками, що розраховуються за відомими співвідношеннями для наземних споживачів; у випадку вимірювань на борту літака, гвинтокрила, НКА, геодинамічні ефекти відсутні і $\Delta R_{GEO}^j(t_k) = 0$;

$\delta S_{c1}^j, \delta S_{c2}^j, \delta L_1^j, \delta L_2^j$ – флуктуаційні похибки кодових (S) і фазових (L) спостережень, зумовлені шумами та багатопроменевістю поширення навігаційних сигналів.

Зауважимо, що у системі рівнянь (2.1) оцінюваними інформаційними параметрами є координати антени приймача $x(t_k), y(t_k), z(t_k)$ та невідоме відхилення часу приймача відносно системної шкали часу GPS $\Delta^{GPS}(t_k)$.

Розглянемо особливості основних джерел похибок спостережень.

Ефемеридні похибки (в рівняннях (2.1) для спрощення опущені) обумовлені неточністю прогнозування розташування НКА на момент випромінювання сигналу. Величина похибки позиціонування НКА при використанні бортових ефемерид, що формуються наземним керуючим сегментом і закладаються на борт супутника з частотою один раз на кілька годин, лежить у межах одиниць метрів. Для системи GPS величини похибок бортових ефемерид складають 1÷3 м, похибки точних ефемерид складають 10÷20 см (rapid) и 2÷5 см (final) [123]. Причинами залишкових похибок ефемерид є недостатньо точне врахування впливу на рух НКА сил гравітаційного (гравітаційні збурення з боку Землі, Місяця та Сонця) та негравітаційного характеру (наприклад, потоки сонячного вітру) [124]. У режимі PPP зазвичай використовуються точні ефемериди.

Що ж до похибок розрахунку й корегування похибок бортових годинників супутників (у рівняннях (2.1) опущені), слід зазначити таке. Незважаючи на те, що на борту супутників встановлюються високостабільні

стандарти частоти і часу, показання бортових годинників відрізняються від наземного еталона ГНСС і містять повільну складову. Для розрахунку й корегування повільно змінюваної складової у складі інформації, що передається супутником, містяться спеціальні поправки, що формуються наземним сегментом управління спільно з параметрами руху супутників.

Для частотного діапазону роботи ГНСС (L- діапазон $\sim 1100 \div 1600$ МГц) затримки сигналів у тропосфері не залежать від частоти випромінюваного сигналу і приймається рівної за величиною і знаку для кодових і фазових спостережень. Затримки сигналів в тропосфері можна подати у вигляді суми гідростатичної складової затримки, пов'язаної з проходженням радіосигналу крізь тропосферу, де тиск з висотою зменшується відповідно до гідростатичного закону, і складової затримки за рахунок поширення у водяній парі. Значення гідростатичної складової для зенітного напрямку становить близько ~ 2 м і залежить від атмосферного тиску на поверхні Землі, а величина вологої складової може коливатися від кількох сантиметрів до приблизно ~ 40 см і залежить, головним чином, від вологості в приземних шарах тропосфери [35, 39, 116, 119, 120, 125]. При переході від зенітного напрямку до похилих напрямків затримка збільшується приблизно пропорційно до секансу кута місця, досягаючи поблизу горизонту $\sim 20 \div 30$ м [126]. Для компенсації тропосферних затримок зазвичай використовуються моделі, проте залишкові похибки тропосферних затримок суттєво знижують надійність виконання цілочисельного РФН, а у деяких випадках взагалі не дозволяють вирішити зазначену задачу. Тому для більш точного урахування тропосферних затримок зенітні тропосферні затримки оцінюються разом з іншими параметрами – координатами, розбіжностями шкал часу та початковими фазовими неоднозначностями.

Іоносферна затримка обумовлена впливом іонізованих шарів атмосфери, є частотно-залежною і для кодових та фазових спостережень на одній частоті-носії має протилежний знак. Денна величина затримки приблизно у $\sim 5 \div 10$ разів більше, ніж нічна. Величина затримки сигналів у шарі іоносфери залежить від

періоду 11-річного циклу сонячної активності, сезонних та добових варіацій електронної концентрації, кута місця та азимуту розташування супутників ГНСС, а також від широти та довготи розташування приймального пункту. Величина похибки вимірювання псевдовідстані обумовлена затримкою сигналу в іоносфері, для наземних споживачів може лежати в межах від ~2–4 м до ~40–50 м [126, 127]. ГНСС-приймачі на борту НКА знаходяться в шарі іоносфери і при спостереженні «високих» супутників ГНСС іоносферна затримка менша, ніж у наземних споживачів, оскільки просвічується тільки частина шару іоносфери, але при спостереженні «низьких» супутників сигнал поширюється вздовж шару іоносфери, і може досягати значних величин, більших, ніж у наземних споживачів.

Для компенсації іоносферних похибок у цій роботі використовуються відповідні моделі та лінійні комбінації фазових вимірів.

Фазова діаграма спрямованості антен супутників і приймачів нерівномірна і залежить від кутів, під якими випромінюються сигнали (в антені супутника) і приймаються (в антені приймача). Оскільки ГНСС-антени призначені для прийому сигналів практично з усієї верхньої півсфери, то через неоднорідності фазової діаграми спрямованості визначають положення т.зв. середнього фазового центру та відхилення фазової діаграми (варіації фазового центру, англ. PCV – Phase Center Variations). Похибки, зумовлені нерівномірністю фазової діаграми спрямованості антен, можуть змінюватись у межах від кількох міліметрів до кількох сантиметрів. Фазові діаграми спрямованості одержують у результаті калібрування антен. Результати калібрування антен наводяться у файлах ANTEX [122] (див. також Додаток А). Оскільки за даними файлів ANTEX результати калібрування антен супутників для частот L1 і L2 GPS близькі, поправки кодкових та фазових псевдовідстаней будуть практично компенсуватися при формуванні комбінацій вимірювань на частотах-носіях L1 і L2.

Фазові набіги через «wind-up»-ефект, зумовлений можливим обертанням приймальної антени під час руху об'єкта, досягають величин $\Delta\phi=2\pi k+\phi_0$,

де k – кількість повних оборотів, а $\phi\theta$ – частка обороту антени на заданому інтервалі спостереження [101] (див. також Додаток А). Цей вид «wind-up»-ефекту цілком може бути компенсований шляхом формування різниць фазових спостережень між супутниками.

Геодинамічні ефекти можна розділити на три групи: тверді, океанічні та полярні припливи [114, 124] (див. також Додаток А). Сумарні похибки, зумовлені геодинамічними ефектами, можуть становити від одиниць міліметрів до кількох дециметрів (основний вплив мають тверді припливи).

Похибки кодових і фазових спостережень, що викликані багатопроменевістю, є наслідком одночасного прийому антеною не тільки прямого сигналу, але і сукупності відбитих від навколишніх предметів сигналів, і виявляються у вигляді квазігармонічних коливань зі змінною амплітудою і частотою в залежності від положення супутника на небесній сфері і наявності відбиваючих поверхонь поблизу приймальної антени. Типові значення цих похибок для кодових спостережень при використанні сучасної ГНСС-апаратури становлять $\sim 1 \div 2$ м (залежно від умов, можуть досягати $5 \div 6$ м) та від кількох міліметрів до кількох сантиметрів для фазових спостережень.

Некорельовані шумові похибки для кодових спостережень залежать від апаратури, що використовується, і зазвичай лежать в межах кількох дециметрів – кількох метрів. Для фазових спостережень типові значення шумової складової похибки лежать у межах кількох міліметрів.

Слід зазначити, що кодові спостереження можуть містити немодельовані спотворення (у рівняннях (2.1) не позначені) – похибки, що повільно змінюються. Ці спотворення виникають через методичні похибки фільтрації кодових спостережень в умовах підвищеної динаміки об'єкта. Розмір спотворень може досягати 10–15 см і більше на інтервалах спостереження 3–6 годин. Впливають і особливості використовуваних у вбудованому програмному забезпеченні приймачів алгоритмів фільтрації – різні фірми-виробники реалізують власні алгоритми обробки, які можуть відрізнятися для різних типів і версій приймачів.

Величину розбіжності шкали часу приймача відносно системної шкали ГНСС моделювати дуже важко, оскільки вона формується, як правило, вбудованим кварцовим генератором, і цю величину необхідно включати до оцінюваних параметрів поряд з координатами приймача [50, 53].

Представимо комбінації фазових констант (2.1) у такій формі:

$$\begin{aligned} & \left[b_{\varphi 1(2)} - B_{\varphi 1(2)}^j \right] - M_{1(2)}^j \cdot \lambda_{1(2)} = \\ & = \left[b_{\varphi 1(2)} + \varphi_0 \cdot \lambda_{1(2)} \right] - \left[B_{\varphi 1(2)}^j + \varphi_0^j \cdot \lambda_{1(2)} \right] - N_{1(2)}^j \cdot \lambda_{1(2)} = \\ & = \Psi_{1(2)} - \Psi_{1(2)}^j - N_{1(2)}^j \cdot \lambda_{1(2)} \quad , \end{aligned} \quad (2.2)$$

де:

$\Psi_{1(2)}$ – невідомі фазові зрушення (в метрах) у трактах обробки сигналів приймача на частотах-носіях L_1 и L_2 ;

$\Psi_{1(2)}^j$ – невідомі (але можуть бути скориговані) фазові зсуви (в метрах) у трактах j -го супутника GPS на частотах-носіях L_1 (L_2).

Поправки $\hat{\Psi}_{1(2)}^j$ можуть містити не тільки дробову частину (помножену на $\lambda_{1(2)}$), але й цілу частину з безліччю циклів (помножену на $\lambda_{1(2)}$), тому якщо ці корекції вводяться в спостереження, може виявитися, що вихідні $N_{1(2)}^j$ можуть змінитися. Але це надалі не має принципового значення при розв'язанні фазової неоднозначності і тому ми не змінюватимемо позначення $N_{1(2)}^j$ після введення таких корекцій.

2.3 Моделювання повільно змінюючихся похибок недиференціальних ГНСС-спостережень, які піддаються прогнозуванню

При реалізації методу PPP принципове значення, на відміну від диференціального методу, набуває врахування (компенсація) впливу ряду специфічних джерел похибок, таких як геодинамічні (припливні та ін.) ефекти,

ефекти додаткового фазового набігу, обумовленого обертанням антен супутника та приймача («wind-up»-ефекту), нерівномірності фазових характеристик антен супутників та приймачів, похибок ефемеридно-часового забезпечення тощо. Детальний аналіз, алгоритми і результати моделювання деяких повільно змінюваних похибок недиференціальних ГНСС-спостережень, що піддаються прогнозуванню, наведено у Додатку А.

Розглянемо докладніше тропосферну затримку.

Як було сказано вище, тропосферну затримку можна подати у вигляді суми гідростатичної затримки та затримки за рахунок поширення у водяній парі [50]. Використовуватимемо наступну модель тропосферної затримки:

$$Tr^j(t) = Z_H(t) \cdot mf_H^j(t) + Z_w(t) \cdot mf_w^j(t), \quad (2.3)$$

де:

$Z_H(t)$, $Z_w(t)$ – гідростатична (H) та волога (W) зенітні тропосферні затримки (ЗТЗ), які можуть бути розраховані за моделлю MOPS [128, 129];

$mf_H^j(t)$, $mf_w^j(t)$ – функції відображення ЗТЗ, що залежать в основному, від кута місця, висоти та широти; використовуватимемо функції відображення Niell [130] як одні з найбільш точних функцій, що отримали найбільш широке поширення.

Перетворимо (2.3) з урахуванням використання моделі MOPS (і приблизно відомих координат антени приймача)

$$Tr^j(t) = \hat{Z}_H(t) \cdot mf_H^j(t) + \hat{Z}_w(t) \cdot mf_w^j(t) + \Delta Z(t) \cdot mf_w^j(t), \quad (2.4)$$

де

$\hat{Z}_H(t)$, $\hat{Z}_w(t)$ – розраховані за моделлю значення;

$\Delta Z(t)$ – невідома, що підлягає оцінці, поправка ЗТЗ.

Величину $\Delta Z(t)$ прийнято вважати кусочно-постійною на інтервалі 1–2 години та оцінювати обмежений набір величин $\Delta Z(t)$ на інтервалі спостережень. У цій дисертаційній роботі запропоновано використовувати уявлення величини $\Delta Z(t)$ на заданому інтервалі спостережень у вигляді усіченого розкладання до ряду Фур'є-Лежандра

$$\Delta Z(t) = \sum_{i=0}^n C_i \cdot f_i[h(t)], \quad (2.5)$$

де:

C_i – коефіцієнти ряду, що підлягають оцінці;

$f_i[h(t)]$ – поліноми Лежандра.

Таким чином, на інтервалі спостережень оцінюються не значення величини $\Delta Z(t)$, а набір коефіцієнтів C_i на всьому інтервалі спостережень. Запропонована модель була апробована. Результати апробації представлені у розділах 3, 4.

Таке представлення має низку істотних переваг у порівнянні з аналогами:

- простота реалізації;
- запропонована модель добре описує зміну тропосферної затримки при її значній зміні, наприклад, при різкій зміні висоти під час зльоту/посадки літака або гвинтокрила, значній зміні погодних умов, особливо поблизу морів тощо. При цьому потрібно правильно підібрати ступінь полінома.

2.4 Введення корекцій та перетворення системи рівнянь ГНСС-спостережень. Формування лінійних комбінацій ГНСС-спостережень

Виконаємо попередні необхідні корекції спостережень у системі (2.1), а саме розрахуємо та введемо наступні корекції: $\hat{\Delta}^{j, GPS}$ – розбіжності шкал часу j -го супутника GPS та системної шкали часу GPS; \hat{F}_{rel}^j – релятивістські поправки;

$\Delta\hat{R}_{GEO}^j$ – геодинамічні поправки; $\Delta\hat{\rho}_{pc12}^j, \hat{\Delta}_{pcv1,2}^j$ – корекції на зміщення фазових центрів (на двох частотах) і корекції на варіації фазового центру (на обох частотах) приймальної антени та передавальних антен супутників GPS; $\hat{\phi}_{wup}^j \cdot \lambda_{1,2}$ – корекції на «wind-up»-ефект через обертання супутників GPS навколо своїх осей; «wind-up»-ефект для нерухомої приймальної антени відсутній; якщо ГНСС-приймач рухається з поворотами антен, то компенсацію «wind-up»-ефекту виконують шляхом формування одинарних різниць фазових спостережень між супутниками ГНСС; $\hat{B}_{c_1}^j, \hat{B}_{c_2}^j$ – корекції кодових затримок сигналів в апаратурі супутників GPS (надають IGS або CNES); $\hat{\psi}_1^j, \hat{\psi}_2^j$ – корекції фазових затримок L_1 і L_2 в апаратурі супутників GPS.

Необхідно також перерахувати ефемериди супутників GPS із центру мас на центр випромінювання антен (фазовий центр) для більш точного позиціонування.

Крім того, у спостереженнях (2.1) у всіх варіантах обробки введемо модельні тропосферні затримки

$$\hat{T}r_{mod}^j(t) = \hat{Z}_H(t) \cdot mf_H^j(t) + \hat{Z}_W(t) \cdot mf_W^j(t) \quad (2.6)$$

де $\hat{Z}_H(t), \hat{Z}_W(t)$ – розрахункові значення за моделлю MOPS.

З урахуванням введених корекцій рівняння (2.1) наводяться до виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{S}_{c_1}^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \\ \quad + b_{c_1} + \delta\tilde{S}_{c_1}^j(t_k) \\ \hat{S}_{c_2}^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + \gamma^2 \cdot I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \\ \quad + b_{c_2} + \delta\tilde{S}_{c_2}^j(t_k) \\ \hat{L}_1^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) - I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \\ \quad + \psi_1 - N_1^j \cdot \lambda_1 + \delta\tilde{L}_1^j(t_k) \\ \hat{L}_2^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) - \gamma^2 \cdot I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \\ \quad + \psi_2 - N_2^j \cdot \lambda_2 + \delta\tilde{L}_2^j(t_k) \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Оцінюватимемо $\Delta Z(t)$ (з урахуванням (2.5)) спільно с N_1^j и N_2^j (точніше, їх різниці ∇N_1^{jr} і ∇N_2^{jr} відносно обраної референцної ділянки).

Складемо лінійні комбінації кодових та фазових спостережень [50], які будуть використовуватись надалі.

1) Кодова безіоносферна IF-комбінація:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{IF}^j(t_k) = k_1 \cdot \hat{S}_{C1}^j(t_k) - k_2 \cdot \hat{S}_{C2}^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS} + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \\ + [k_1 \cdot b_{C1} - k_2 \cdot b_{C2}] - [k_1 \cdot B_{C1}^j k_2 - k_2 \cdot B_{C2}^j] + \varepsilon^j(t_k) + \delta \tilde{S}_{IF}^j(t_k) \end{aligned}$$

2) Кодова комбінація «Narrow Lane»:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{NL}^j(t_k) = \left[\frac{\hat{S}_{C1}^j(t_k)}{\lambda_1} + \frac{\hat{S}_{C2}^j(t_k)}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{NL} = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + \gamma \cdot I^j(t_k) + \\ + \Delta Z(t_k) \cdot mf^j(t_k) + b_{NL} - B_{NL}^j + \varepsilon^j(t_k) + \delta \tilde{S}_{NL}^j(t_k) \end{aligned}$$

де:

$$\begin{aligned} b_{NL} = \left[\frac{b_{C1}}{\lambda_1} + \frac{b_{C2}}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{NL}; \quad B_{NL}^j = \left[\frac{B_{C1}^j}{\lambda_1} + \frac{B_{C2}^j}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{NL}; \quad \lambda_{NL} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}; \\ k_1 = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} = \frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 1}; \quad k_2 = \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} = \frac{1}{\gamma^2 - 1}; \quad k_1 - k_2 = 1; \quad \gamma = \frac{77}{60}; \\ k_1 \approx 2,54572778; \quad k_2 \approx 1,54572778. \end{aligned}$$

3) Комбінація фазових WL-спостережень різницевої частоти:

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{WL}^j(t_k) = \left[\frac{\hat{L}_1^j(t_k)}{\lambda_1} - \frac{\hat{L}_2^j(t_k)}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{WL} = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + \gamma \cdot I^j(t_k) + \\ + \Delta Z(t_k) \cdot mf^j(t_k) + \psi_{WL} - \psi_{WL}^j - N_{WL}^j \cdot \lambda_{WL} + \varepsilon^j(t_k) + \delta \tilde{L}_{WL}^j(t_k) \end{aligned}$$

де

$$\psi_{WL} = \left[\frac{\psi_1}{\lambda_1} - \frac{\psi_2}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{WL}; \quad \psi_{WL}^j = \left[\frac{\psi_1^j}{\lambda_1} - \frac{\psi_2^j}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{WL}; \quad N_{WL}^j = N_1^j - N_2^j;$$

$$\lambda_{WL} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$

4) Фазова «безіоносферна» (IF – Iono-Free) комбінація:

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{IF}^j(t_k) &= k_1 \cdot \tilde{L}_1^j(t_k) - k_2 \cdot \tilde{L}_2^j(t_k) = R^j(t_k) + \left[\Delta^{GPS}(t_k) + (k_1 \cdot \psi_1 - k_2 \cdot \psi_2) \right] + \\ &+ \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) - \left[k_1 \cdot N_1^j \cdot \lambda_1 - k_2 \cdot N_2^j \cdot \lambda_2 \right] + \left[k_1 \cdot \delta \tilde{L}_1^j(t_k) - k_2 \cdot \delta \tilde{L}_2^j(t_k) \right] = \\ &= R^j(t_k) + \xi(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + C_{IF}^j + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k) \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} \xi(t_k) &= \Delta^{GPS}(t_k) + (k_1 \cdot \psi_1 - k_2 \cdot \psi_2); \quad C_{IF}^j = -\left[k_1 \cdot N_1^j \cdot \lambda_1 - k_2 \cdot N_2^j \cdot \lambda_2 \right]; \\ \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k) &= \left[k_1 \cdot \delta \tilde{L}_1^j(t_k) - k_2 \cdot \delta \tilde{L}_2^j(t_k) \right]; \end{aligned}$$

5) Фазова комбінація «Geometry-Free»:

$$\tilde{L}_{GF}^j(t) = \tilde{L}_1^j(t) - \tilde{L}_2^j(t) = (\gamma^2 - 1) \cdot I^j(t) - \left[(N_1^j \cdot \lambda_1 - N_2^j \cdot \lambda_2) - (\Psi_1 - \Psi_2) \right] + \delta \tilde{L}_{GF}^{*j}(t),$$

де $\delta \tilde{L}_{GF}^{*j}(t) = \delta \tilde{L}_1^{*j}(t) - \delta \tilde{L}_2^{*j}(t).$

6) Комбінація Melbourne-Wübbena:

$$\begin{aligned} \hat{MW}(t_k) &= \tilde{S}_{NL}^j(t_k) - \tilde{L}_{WL}^j(t_k) = \left[b_{NL} - \psi_{WL} \right] - \left[B_{NL}^j - \psi_{WL}^j \right] + N_{WL}^j \cdot \lambda_{WL} + \\ &+ \left[\delta \tilde{S}_{NL}^j(t_k) - \delta \tilde{L}_{WL}^j(t_k) \right] = b_{MW} - B_{MW}^j + N_{WL}^j \cdot \lambda_{WL} + \delta \tilde{S}_{MW}^j(t_k). \end{aligned}$$

2.5 Методологічні основи обробки ГНСС-спостережень методом PPP

Для реалізації float- та fixed-методу PPP будемо використовувати «безіоносферні» фазові комбінації $\tilde{L}_{IF}^j(t_k)$. Однак у кінематичному режимі визначення параметрів руху споживача тільки по фазових вимірах неможливе,

необхідна наявність додаткової проміжної інформації, причому надійність і час збіжності фазового рішення залежать від точності проміжної інформації. В якості такої проміжної інформації можуть використовуватися кодові спостереження. У зарубіжних джерелах прийнято разом із «безіоносферною» фазовою комбінацією $\hat{L}_{IF}^j(t_k)$ використовувати кодову «безіоносферну» комбінацію $\tilde{S}_{IF}^j(t_k)$. Проте спільна обробка $\tilde{S}_{IF}^j(t_k)$ и $\hat{L}_{IF}^j(t_k)$ утруднена тією обставиною, що кодові та фазові затримки в апаратурі відрізняються, а вони не можуть бути відокремлені від розходження шкал приймача та GPS. Тому в зарубіжній практиці прийнято розділяти розбіжності шкал приймача та GPS на кодові та фазові та оцінювати їх окремо (т.зв. модель «з розділеними годинниками» – decoupling clock model). У цій дисертаційній роботі при реалізації метода PPP запропоновано використовувати не кодові «безіоносферні» спостереження $\tilde{S}_{IF}^j(t_k)$, а результати визначення координат, що отримані із комбінованого кодово-фазового двохчастотного рішення. Даний підхід має суттєві переваги, зокрема, простішу реалізацію PPP-рішення, оскільки немає необхідності спільної оцінки «кодового» та «фазового» годинників (розбіжностей шкал часу приймача та ГНСС).

Таким чином, проміжне кодово-фазове рішення може бути отримано одним із таких способів:

- з використанням прямої кодової «безіоносферної» комбінації $\tilde{S}_{IF}^j(t_k)$;
- з використанням кодових спостережень $\hat{S}_{c_1}^j(t_k)$ першої частоти, в яких іоносферні затримки компенсуються шляхом формування та використання «безгеометричних» (GF – Geometry-Free) кодових та фазових двохчастотних комбінацій; при цьому кодова «зашумлена» комбінація суттєво уточнюється підбором рівня (операція «leveling») неоднозначної фазової «безгеометричної» комбінації до однозначної кодової «безгеометричної» комбінації.

Другий запропонований автором підхід, як показали численні експерименти, дозволяє підвищити точність кодового проміжного рішення в рази у порівнянні з використанням прямої кодової безіоносферної комбінації.

В якості проміжної інформації може бути використане також WL-рішення за умови РФН WL-спостережень, але на точність якого, проте, сильно впливає (у режимі автономного, а не диференціального, позиціонування PPP) іоносферна затримка, значно зменшити яку з використанням іоносферних моделей не вдається.

Для реалізації наземного статичного режиму PPP задача, в принципі, може бути вирішена і без використання проміжної інформації (тільки за фазовими спостереженнями), проте, проміжне кодове рішення, як показали дослідження, все ж таки помітно покращує збіжність PPP-рішення, особливо на початку процесу накопичення інформації.

Визначення параметрів руху споживача ускладнюється тим, що у рівнянні для фазової іоносферної комбінації неможливо розділити і спільно оцінити невідоме ціле число довжин хвиль і розбіжність шкал часу приймача і шкали часу ГНСС (GPS). У зарубіжній практиці на вирішення цього завдання прийнято утворювати різниці спостережень – від усіх спостережень віднімаються спостереження референцного супутника (одного із поточного робочого сузір'я) і оцінюються не абсолютні значення невідомого числа довжин хвиль і розбіжності шкал, а їх різниці відносно референцного супутника.

Істотним недоліком такого підходу є необхідність урахування кореляцій похибок спостережень одинарних різниць кодових та фазових псевдовідстаней, формування складних кореляційних матриць, а також додаткові алгоритмічні та програмні складності при зміні поточного референцного супутника. На відміну від відомих джерел (див., наприклад, [132]), у даній роботі автором запропоновано використовувати не фізичні різниці спостережень, а так звані «віртуальні» різниці, що одержуються шляхом реконфігурації невідомих, які підлягають оцінюванню. Цей метод, описаний у [131], був адаптований

для використання у режимі PPP. На відміну від традиційного методу формування різниць спостережень, при даному методі врахування кореляції похибок різницевого спостережень не потрібно, а зміна референцного супутника не становить жодних труднощів.

На відміну від відомих методів, наприклад, фільтра Калмана, що часто використовується в реальному часі, в роботі використовується післясеансна реалізація методу найменших квадратів (МНК) з одночасним вирішенням усієї системи рівнянь спостережень на всьому інтервалі спостережень, коли апріорна інформація про динаміку процесів спостережень та їх похибок не використовується.

Принциповою умовою, що дозволяє досягти дискретне/цілочисельне PPP-рішення, є наявність кодових та фазових інструментальних поправок у бортовій апаратурі ГНСС (тут розглядаємо систему GPS).

В якості кодових інструментальних поправок в даній роботі використовувалися поправки, що формуються IGS. Дискретне/цілочисельне РФН у методі PPP на даний час реалізоване в окремих наукових лабораторіях та програмних продуктах, які самостійно формують фазові поправки, але не поширюються для загального доступу. Відкритим джерелом супутникових інструментальних поправок є французьке космічне агентство CNES, яке формує та розповсюджує ці поправки. У роботі робилися спроби використати поправки CNES, однак вони не призвели до бажаних результатів. І хоча поправки до спостережень різницевої частоти дозволили реалізувати надійне РФН WL-спостережень, з використанням фазових поправок до безіоносферної комбінації спостережень дискретне/цілочисельне рішення досягти не вдалося. Причиною цього, як показали окремі додаткові дослідження автора, була низька якість поправок – нестабільність поправок у часі, розриви та стрибки (у роботі використовувалися дані за 2013 рік). Тому у ході виконання робіт було розроблено методи та алгоритми формування власних інструментальних фазових поправок за спостереженнями наземної регіональної мережі базових

станцій України. Використання власних поправок дозволило досягти стійкого дискретного/цілочисельного РФН спостережень як навколотемних/наземних приймачів споживачів, так і бортових приймачів НКА.

Таким чином, у цій дисертаційній роботі запропоновано поетапне східчасте отримання дискретного/цілочисельного PPP-рішення:

- отримання якомога більш точного проміжного рішення; в якості такого проміжного рішення може бути використане кодове одночастотне рішення з використанням іоносферних затримок, отриманих шляхом відомої операції «leveling» (для наземних споживачів) або рішення по прирощенням фази (для споживачів на борту НКА);

- формування інструментальних фазових поправок по результатам спостережень регіональної мережі наземних перманентних референціальних ГНСС-станцій;

- введення фазових інструментальних поправок у спостереження споживачів;

- реалізація РФН WL-спостережень різницевої частоти;

- РФН «безіоносферних» IF-спостережень та отримання фінального PPP-рішення.

2.6 Перетворення системи рівнянь ГНСС-спостережень для реалізації float-методу PPP для статичного і кінематичного режимів позиціонування

При реалізації float та fixed «безіоносферних» рішень будемо використовувати проміжне координатне рішення $\hat{\mathbf{X}}_a(t_k)$ та фазову безіоносферну комбінацію:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_a(t_k) = \Delta\mathbf{X} + \delta\mathbf{X}_a(t_k) \\ \hat{L}_{IF}^j(t_k) = R^j(t_k) + \xi(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + C_{IF}^j(t_k) + \delta\tilde{L}_{IF}^j \end{cases} \quad (2.8)$$

Як було зазначено вище, як проміжне координатне рішення може бути використане кодове IF-рішення, кодове C1/P1-рішення, WL-рішення або рішення по приращенням фази.

Система (2.8) – нелінійна, і для її вирішення необхідно виконати лінеаризацію. Від похибок лінеаризації залежить точність розв’язання та надійність отримання цілочисельного РФН. Після виконання лінеаризації рішення проводиться за один крок, без виконання ітерацій. Виконаємо розкладання в ряд Тейлора в околиці \vec{X} та $\dot{\vec{X}}$:

$$R^j(t_k) \cong \dot{R}^j(t_k) + [\hat{\vec{a}}^T(t_k)]^j \cdot \Delta\vec{X} \quad (\Delta\vec{X} \text{ – шукані поправки до } \hat{\vec{X}}_a),$$

представивши $\vec{X} = \hat{\vec{X}} + \Delta\vec{X}$ и $\Delta\hat{L}_{IF}^j(t_k) = \hat{L}_{IF}^j(t_k) - \dot{R}^j(t_k)$, отримаємо нову систему рівнянь:

$$\begin{cases} \hat{\vec{X}}_a(t_k) = \Delta\vec{X} + \delta\vec{X}_a(t_k) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^j(t_k) = [\hat{\vec{a}}^T(t_k)]^j \cdot \Delta\vec{X} + \xi(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + C_{IF}^j + \delta\tilde{L}_{IF}^j \end{cases}, \quad (2.9)$$

$[\hat{\vec{a}}^T(t_k)]^j$ – матриця-рядок напрямних косинусів на трасах « j -й супутник – GPS- приймач»,

$$[\hat{\vec{a}}^T(t_k)]^j = \left\| \frac{\partial R^j(t_k)}{\partial [x(t_k), y(t_k), z(t_k)]} \right\|_{\hat{\vec{x}}_a(t_k)}.$$

Далі будемо вести обробку по ділянках. Весь інтервал обробки розбиваємо на окремі ділянки, на кожному з яких вибирається референційний супутник, тобто такий супутник, який видно протягом усієї ділянки. В якості референцного доцільно вибирати супутник з високими кутами місця, що має найбільшу тривалість радіовидимості. При цьому інтервали видимості

референцних супутників на суміжних ділянках мають перекриватися. Референцний супутник позначатимемо індексом r .

Запишемо загальну систему рівнянь для всього інтервалу обробки, який включає усі референцні ділянки.

1-а референцна ділянка:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\mathbf{0}}(t_i^1) = \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^1) + \delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^1) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{r1}(t_i^1) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^1) \right]^{r1} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^1) + \xi_{IF}(t_i^1) + \Delta Z(t_i^1) \cdot mf_w^{r1}(t_i^1) + C_{IF}^{r1} + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{r1}(t_i^1) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{j(1)}(t_i^1) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^1) \right]^{j(1)} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^1) + \xi_{IF}(t_i^1) + \Delta Z(t_i^1) \cdot mf_w^{j(1)}(t_i^1) + C_{IF}^{j(1)} + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{j(1)}(t_i^1) \\ \dots \end{array} \right.$$

$$(i = \overline{1, k_1})$$

2-а референцна ділянка:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\mathbf{0}}(t_i^2) = \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^2) + \delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^2) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{r2}(t_i^2) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^2) \right]^{r2} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^2) + \xi_{IF}(t_i^2) + \Delta Z(t_i^2) \cdot mf_w^{r2}(t_i^2) + C_{IF}^{r2} + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{r2}(t_i^2) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{j(2)}(t_i^2) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^2) \right]^{j(2)} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^2) + \xi_{IF}(t_i^2) + \Delta Z(t_i^2) \cdot mf_w^{j(2)}(t_i^2) + C_{IF}^{j(2)} + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{j(2)}(t_i^2) \\ \dots \end{array} \right.$$

$$(i = \overline{1, k_2})$$

p -а референцна ділянка:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\mathbf{0}}(t_i^p) = \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^p) + \delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^p) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{rp}(t_i^p) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^p) \right]^{rp} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^p) + \xi_{IF}(t_i^p) + \Delta Z(t_i^p) \cdot mf_w^{rp}(t_i^p) + C_{IF}^{rp} + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{rp}(t_i^p) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{j(p)}(t_i^p) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^p) \right]^{j(p)} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^p) + \xi_{IF}(t_i^p) + \Delta Z(t_i^p) \cdot mf_w^{j(p)}(t_i^p) + C_{IF}^{j(p)} + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{j(p)}(t_i^p) \\ \dots \end{array} \right.$$

$$(i = \overline{1, k_p})$$

У всіх ІF-рівняннях додамо і віднімемо, наприклад, C_{IF}^{r1} (можна будь-яку змінну C_{IF}^{rp}), скомбінуємо змінні по-іншому, і, позначивши $\eta_{IF}(t) = \xi_{IF}(t) + C_{IF}^{r1}$, отримаємо остаточно:

1-а референцна ділянка:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\mathbf{0}}(t_i^1) = \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^1) + \delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^1) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{r1}(t_i^1) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^1) \right]^{r1} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^1) + \eta_{IF}(t_i^1) + \Delta Z(t_i^1) \cdot mf_w^{r1}(t_i^1) + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{r1}(t_i^1) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{j(1)}(t_i^1) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^1) \right]^{j(1)} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^1) + \eta_{IF}(t_i^1) + \Delta Z(t_i^1) \cdot mf_w^{j(1)}(t_i^1) + \nabla C_{IF}^{j(1)r1} + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{j(1)}(t_i^1) \\ \dots\dots\dots \end{array} \right.$$

$$(i = \overline{1, k_1})$$

2-а референцна ділянка:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\mathbf{0}}(t_i^2) = \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^2) + \delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^2) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{r2}(t_i^2) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^2) \right]^{r2} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^2) + \eta_{IF}(t_i^2) + \Delta Z(t_i^2) \cdot mf_w^{r2}(t_i^2) + \nabla C_{IF}^{r2r1} + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{r2}(t_i^2) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{j(r)}(t_i^2) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^2) \right]^{j(2)} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^2) + \eta_{IF}(t_i^2) + \Delta Z(t_i^2) \cdot mf_w^{j(r)}(t_i^2) + \nabla C_{IF}^{j(2)r1} + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{j(2)}(t_i^2) \\ \dots\dots\dots \end{array} \right.$$

$$(i = \overline{1, k_2})$$

.....

p-а референцна ділянка:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\mathbf{0}}(t_i^p) = \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^p) + \delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^p) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{rp}(t_i^p) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^p) \right]^{rp} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^p) + \eta_{IF}(t_i^p) + \Delta Z(t_i^p) \cdot mf_w^{rpr1}(t_i^p) + \nabla C_{IF}^{rpr1} + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{rp}(t_i^p) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^{j(p)}(t_i^p) = \left[\hat{\mathbf{a}}^T(t_i^p) \right]^{j(p)} \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_i^p) + \eta_{IF}(t_i^p) + \Delta Z(t_i^p) \cdot mf_w^{rpr2}(t_i^p) + \nabla C_{IF}^{j(p)r1} + \delta\Delta\hat{L}_{IF}^{j(p)}(t_i^p) \\ \dots\dots\dots \end{array} \right.$$

$$(i = \overline{1, k_p})$$

Задача полягає у спільній оцінці параметрів $\Delta\vec{\mathbf{X}}(t_k)$, $\eta_{IF}(t_k)$, $\Delta Z(t_k)$ і ∇C_{IF}^{jr}

($j = \overline{1, m}$; $j \neq r$).

З урахуванням представлення $\Delta Z(t_k) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot f_i[h(t_i)]$ останню систему

рівнянь можна представити у узагальненому векторно-матричному вигляді:

$$\hat{\mathbf{Q}}(t_k) = \mathbf{A}_{\Sigma}(t_k) \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}}(t_k) + \vec{\mathbf{V}}_{\Sigma}(t_k) \cdot \eta(t_k) + \mathbf{\Phi}_{\Sigma}(t_k) \cdot \vec{\mathbf{a}} + \mathbf{H}_{\Sigma}(t_k) \cdot \nabla \vec{C}_{IF} + \delta\vec{\mathbf{Q}}(t_k) \quad (2.10)$$

де:

$\hat{\mathbf{Q}}(t_k)$ – вектор вимірюваних параметрів,

$$\hat{\mathbf{Q}}(t_k) = \left\| \Delta \vec{\mathbf{X}}(t_k) \quad \Delta L_{IF}^r(t_k) \quad \dots \quad \Delta L_{IF}^j(t_k) \quad \dots \quad \Delta L_{IF}^m(t_k) \right\|^T;$$

$\Delta \vec{\mathbf{X}}(t_k)$, $\vec{\boldsymbol{\alpha}}(t_k)$, $\nabla \vec{\mathbf{C}}_{IF}$ – параметри, що визначаються;

$$\Delta \vec{\mathbf{X}}(t_k) = \left\| \Delta x(t_k) \quad \Delta y(t_k) \quad \Delta z(t_k) \right\|^T;$$

$$\vec{\boldsymbol{\alpha}}(t_k) = \left\| \alpha_0(t_k) \quad \alpha_1(t_k) \quad \dots \quad \alpha_n(t_k) \right\|^T;$$

$$\nabla \vec{\mathbf{C}}_{IF} = \left\| \nabla C_{IF_1} \quad \nabla C_{IF_2} \quad \dots \quad \nabla C_{IF_p} \right\|^T;$$

$\mathbf{A}_\Sigma(t_k)$, $\vec{\mathbf{V}}_\Sigma(t_k)$, $\Phi_\Sigma(t_k)$, $\mathbf{H}_\Sigma(t_k)$ – матриці приватних похідних вимірюваних параметрів;

$$\mathbf{A}_\Sigma(t_k) = \left\| \begin{array}{c} \mathbf{E} \\ \mathbf{A}(t_k) \end{array} \right\|;$$

$$\mathbf{E} \text{ – одинична матриця; } \mathbf{E} = \left\| \begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right\|;$$

$\mathbf{A}(t_k)$ – матриця напрямних косинусів;

$$\mathbf{A}(t_k) = \left\| \begin{array}{ccc} \hat{a}_x^{(1)}(t_k) & \hat{a}_y^{(1)}(t_k) & \hat{a}_z^{(1)}(t_k) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{a}_x^{(m)}(t_k) & \hat{a}_y^{(m)}(t_k) & \hat{a}_z^{(m)}(t_k) \end{array} \right\|;$$

$$\vec{\mathbf{V}}_\Sigma(t_k) = \left\| \begin{array}{c} \vec{\mathbf{0}} \\ \vec{\mathbf{V}}(t_k) \end{array} \right\|;$$

$$\vec{\mathbf{0}} = \left\| 0 \quad 0 \quad 0 \right\|^T \text{ – нульовий вектор;}$$

$$\vec{\mathbf{V}}(t_k) = \left\| 1 \quad 1 \quad \dots \quad 1 \right\|^T \text{ – одиничний вектор;}$$

$$\Phi_{\Sigma}(t_k) = \begin{Bmatrix} \vec{\mathbf{0}} \\ \Phi(t_k) \end{Bmatrix};$$

$$\Phi(t_k) \cdot \vec{\mathbf{a}} = \overrightarrow{\mathbf{mf}}(t_k) \cdot \left\{ \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot f_i[h(t_k)] \right\};$$

$$\mathbf{H}_{\Sigma}(t_k) = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_{IF}(t_k) \end{Bmatrix};$$

$$\mathbf{0} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{Bmatrix}.$$

Матриця $\mathbf{H}_{IF}(t_k)$ формується за таким правилом. Рядки матриці відповідають ділянкам, присутнім у момент t_k (включаючи референцну). Стовпці матриці відповідають усім ділянкам на інтервалі спостережень (виключаючи референцну). Елементи матриці, для яких рядки і стовпці відповідають тій самій ділянці, дорівнюють -1 , решта елементів матриці $\mathbf{H}_{IF}(t_k)$ дорівнюють нулю. Таким чином, рядок матриці $\mathbf{H}_{IF}(t_k)$, що відповідає референційній ділянці, завжди нульовий. Стовпці, що відповідають ділянкам, які не присутні в момент t_k , також нульові. Наведемо приклад матриці $\mathbf{H}_{IF}(t_k)$. Нехай у сеансі спостережень присутні ділянки $1 \div 8$, і ділянка 4 обрана як референсна. Нехай у момент часу t_j присутні ділянки 1, 3, 4, 5, 8. Тоді матриця $\mathbf{H}_{IF}(t_k)$ має вигляд (для наочності у матриці показані лише ненульові елементи):

$$\mathbf{H}_{IF}(t_j) = \begin{array}{c} \left\| \begin{array}{cccccccc} -1 & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & -1 & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & -1 & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & -1 \\ & & & & & & & \end{array} \right\| \begin{array}{l} 1 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 8 \end{array} \end{array}$$

Розглянемо окремі випадки реалізації float-режиму PPP для різних умов.

Для наземного статичного режиму позиціонування оцінювані координати фазового центру не змінюються: $\Delta\vec{\mathbf{X}}(t_k) = \Delta\vec{\mathbf{X}}$, $\Delta\vec{\mathbf{X}} = \left\| \Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \right\|^T$, та систему (2.10) можна переписати у вигляді

$$\hat{\vec{\mathbf{Q}}}(t_k) = \mathbf{A}_\Sigma(t_k) \cdot \Delta\vec{\mathbf{X}} + \vec{\mathbf{V}}_\Sigma(t_k) \cdot \eta(t_k) + \Phi_\Sigma(t_k) \cdot \vec{\mathbf{a}} + \mathbf{H}_\Sigma(t_k) \cdot \nabla \vec{\mathbf{C}}_{IF} + \delta\vec{\mathbf{Q}}(t_k). \quad (2.11)$$

В цьому випадку узагальнена матриця плану має вигляд:

$$\left\| \begin{array}{ccccccc} \vec{\mathbf{V}}_\Sigma(t_1) & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_\Sigma(t_1) & \Phi_\Sigma(t_1) & \mathbf{H}_\Sigma(t_1) \\ \mathbf{0} & \vec{\mathbf{V}}_\Sigma(t_2) & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_\Sigma(t_2) & \Phi_\Sigma(t_2) & \mathbf{H}_\Sigma(t_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \vec{\mathbf{V}}_\Sigma(t_k) & \mathbf{A}_\Sigma(t_k) & \Phi_\Sigma(t_k) & \mathbf{H}_\Sigma(t_k) \end{array} \right\|. \quad (2.12)$$

Для наземних кінематичних вимірювань систему рівнянь (2.10) можна переписати у вигляді

$$\hat{\vec{\mathbf{Q}}}(t_k) = \mathbf{B}_\Sigma(t_k) \cdot \vec{\boldsymbol{\theta}}(t_k) + \Phi_\Sigma(t_k) \cdot \vec{\mathbf{a}} + \mathbf{H}_\Sigma(t_k) \cdot \nabla \vec{\mathbf{C}}_{IF} + \delta\vec{\mathbf{Q}}(t_k), \quad (2.13)$$

де:

$$\mathbf{B}_\Sigma(t_k) = \left\| \mathbf{A}_\Sigma(t_k) \vdots \vec{\mathbf{V}}_\Sigma(t_k) \right\|;$$

$$\vec{\boldsymbol{\theta}}(t_k) = \left\| \Delta\vec{\mathbf{X}}^T(t_k) \vdots \eta(t_k) \right\|^T.$$

В цьому випадку узагальнена матриця плану має вигляд:

$$\left\| \begin{array}{c|c|c|c|c|c} \mathbf{B}_{\Sigma}(t_1) & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \Phi_{\Sigma}(t_1) & \mathbf{H}_{\Sigma}(t_1) \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{B}_{\Sigma}(t_2) & \dots & \mathbf{0} & \Phi_{\Sigma}(t_2) & \mathbf{H}_{\Sigma}(t_2) \\ \hline \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{B}_{\Sigma}(t_k) & \Phi_{\Sigma}(t_k) & \mathbf{H}_{\Sigma}(t_k) \end{array} \right\| . \quad (2.14)$$

Для вимірювань на борту НКА тропосферні затримки відсутні і систему рівнянь (2.13) можна переписати у вигляді

$$\hat{\vec{Q}}(t_k) = \mathbf{B}_{\Sigma}(t_k) \cdot \vec{\theta}(t_k) + \mathbf{H}_{\Sigma}(t_k) \cdot \nabla \vec{C}_{IF} + \delta \vec{Q}(t_k), \quad (2.15)$$

а узагальнена матриця плану має вигляд:

$$\left\| \begin{array}{c|c|c|c|c} \mathbf{B}_{\Sigma}(t_1) & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\Sigma}(t_1) \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{B}_{\Sigma}(t_2) & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\Sigma}(t_2) \\ \hline \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{B}_{\Sigma}(t_k) & \mathbf{H}_{\Sigma}(t_k) \end{array} \right\| . \quad (2.16)$$

2.7 Перетворення системи рівнянь ГНСС-спостережень для реалізації fixed-методу PPP для статичного і кінематичного позиціонування

Як було зазначено вище, при введенні фазових поправок і РФН WL-спостережень різницевої частоти можливе розв'язання фазової неоднозначності «безіоносферних» фазових спостережень та отримання дискретного/цілочисельного рішення. Для РФН фазових WL-спостережень різницевої частоти використовуватимемо кодово-фазову лінійну комбінацію Melbourne-Wübbena (MW). Алгоритм реалізації РФН комбінації Melbourne-Wübbena наведено в розділі 4. В результаті матимемо оцінки дискретних фазових неоднозначностей $\nabla \hat{N}_{WL}^{jr}$ для заданого інтервалу спостережень.

Після введення поправок у «безіоносферні» спостереження

$$L_{IF}^j(t_k) = \hat{L}_{IF}^j(t_k) + \nabla \hat{N}_{WL}^{jr} \cdot \frac{\lambda_{WL} \cdot \lambda_{NL}}{\lambda_2}$$

вираз (2.10) можна переписати у такому вигляді:

$$\hat{\vec{Q}}(t_k) = \mathbf{A}_\Sigma(t_k) \cdot \Delta \vec{\mathbf{X}}(t_k) + \vec{\mathbf{V}}_\Sigma(t_k) \cdot \eta(t_k) + \Phi_\Sigma(t_k) \cdot \vec{\mathbf{a}} + \mathbf{H}_\Sigma^*(t_k) \cdot \nabla \vec{\mathbf{N}}_{IF} + \delta \vec{\mathbf{Q}}(t_k), \quad (2.17)$$

де:

$$\hat{\vec{Q}}(t_k) = \left\| \Delta \vec{\mathbf{X}}(t_k), \Delta L_{IF}^*(t_k), \dots, \Delta L_{IF}^j(t_k), \dots, \Delta L_{IF}^m(t_k) \right\|^T,$$

$$\mathbf{H}_\Sigma^*(t_k) = \left\| \begin{array}{c} \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_{IF}^*(t_k) \end{array} \right\|;$$

$$\mathbf{H}_{IF}^*(t_k) = -\lambda_{NL} \mathbf{H}_{IF}(t_k).$$

Відповідно, зміняться і вирази для випадків реалізації fixed-режиму PPP для різних умов спостережень.

Для наземного статичного fixed-метода PPP система рівнянь має вигляд

$$\hat{\vec{Q}}(t_k) = \mathbf{A}_\Sigma(t_k) \cdot \Delta \vec{\mathbf{X}} + \vec{\mathbf{V}}_\Sigma(t_k) \cdot \eta(t_k) + \Phi_\Sigma(t_k) \cdot \vec{\mathbf{a}} + \mathbf{H}_\Sigma^*(t_k) \cdot \nabla \vec{\mathbf{N}}_1 + \delta \vec{\mathbf{Q}}(t_k). \quad (2.18)$$

Для наземного кінематичного fixed-метода PPP система рівнянь має вигляд

$$\hat{\vec{Q}}(t_k) = \mathbf{B}_\Sigma(t_k) \cdot \vec{\theta}(t_k) + \Phi_\Sigma(t_k) \cdot \vec{\mathbf{a}} + \mathbf{H}_\Sigma^*(t_k) \cdot \nabla \vec{\mathbf{N}}_1 + \delta \vec{\mathbf{Q}}(t_k). \quad (2.19)$$

Для fixed-методу PPP на борту НКА система рівнянь має вигляд

$$\hat{\vec{Q}}(t_k) = \mathbf{B}_\Sigma(t_k) \cdot \vec{\theta}(t_k) + \mathbf{H}_\Sigma^*(t_k) \cdot \nabla \vec{\mathbf{N}}_1 + \delta \vec{\mathbf{Q}}(t_k) \quad (2.20)$$

2.8 Методика апостеріорної оцінки точності визначення параметрів руху НКА

Для апостеріорної оцінки точності визначення параметрів руху НКА потрібна наявність еталонної траєкторії, визначеної з високою точністю. Як еталонні траєкторії НКА в даній роботі використовувалася траєкторії, отримані кінематичним методом у закордонних центрах обробки. Для НКА COSMIC траєкторії викладено в архіві CDAAC (COSMIC Data Analysis and Archive Center) на сайті <http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.html>, для НКА GRACE – в архіві Information System and Data Center for Geoscientific Data на сайті <http://isdc.gfz-potsdam.de/index.php> [36, 120]. Дані траєкторії зберігаються у форматі Standard Product 3 Orbit Format (SP3) [123]. Файли у форматі SP3 містять координати та складові вектора швидкості НКА з інтервалом 1 хвилина, прив'язані до шкали часу UTC. Для порівняння результатів параметри руху НКА розраховувалися за даними у форматі SP3 на момент часу прийому інформації бортовим GPS-приймачем. Для цього, використовуючи результати рішення навігаційної задачі, визначаються розбіжності шкал часу та визначається час прийому в шкалі часу GPS. Далі на момент прийому розраховуються параметри руху НКА за тими самими алгоритмами, за якими розраховані параметри руху супутників GPS. Параметри руху НКА розраховуються шляхом інтерполяції даних формату SP3 за допомогою поліномів Лагранжа.

2.9 Методика оцінки інтервалів збіжності/ініціалізації PPP-рішень

Важливою характеристикою рішення є час збіжності/ініціалізації рішення. Оцінка інтервалів збіжності/ініціалізації float-рішення проводилася за наступною методикою.

Виконувалося float-рішення на ділянках різної тривалості і на кожній такій ділянці розраховувалося середньоквадратичні відхилення (СКВ) рішення

від еталонної траєкторії (або, у разі статичного режиму, від еталонних координат фазового центру антени приймача). Далі будувався графік залежності СКВ рішення від величини інтервалу, у якому було отримано рішення. Результати оцінки інтервалів збіжності/ініціалізації float-рішення наведені у розділі 3 дисертації.

Оцінка інтервалів збіжності/ініціалізації fixed-рішення проводилася за наступною методикою: весь інтервал спостережень розбивався на часові ділянки фіксованої тривалості – 2 год., 1 год., 30 хв., 15 хв. Далі для кожної ділянки фіксувався факт успішного чи неуспішного виконання РФН, після чого розраховувалися ймовірності правильного РФН і будувалися графіки ймовірності правильного РФН залежно від тривалості ділянки. Крім того, розраховувалося середньоквадратичні відхилення (СКВ) рішення від еталонної траєкторії (або у разі статичного режиму, від еталонних координат фазового центру приймача) і будувався графік залежності СКВ рішення від тривалості ділянки. Результати оцінки інтервалів збіжності/ініціалізації fixed-рішення наведено в розділі 4 даної дисертаційної роботи.

Висновки по розділу 2

1. У розділі наведено опис запропонованих автором основних принципів обробки ГНСС-спостережень у режимі PPP. Наведені рівняння ГНСС-спостережень та дано аналіз основних джерел похибок. Розкриті методологічні основи обробки ГНСС-спостережень НКА методом PPP. Наведені перетворення системи рівнянь для реалізації float- та fixed-методів розв'язання фазової неоднозначності (РФН) та координатних визначень (позиціонування) НКА та навколомних об'єктів.

2. Для реалізації методу PPP запропоновано використовувати не фізичні різниці недиференціальних ГНСС-спостережень, а так звані «віртуальні» одинарні різниці, що одержуються шляхом реконфігурації невідомих оцінюваних параметрів, що дозволяє поєднати переваги обробки

недиференціальних та різницевих спостережень, підвищити надійність реалізації розв'язання фазової неоднозначності та точного PPP-позиціонування у порівнянні з традиційними підходами. При використанні «віртуальних» одинарних різниць спостережень, на відміну від «фізичних», урахування кореляцій похибок між спостереженнями не потрібно, а зміна референцного супутника не становить жодних труднощів.

3. У процесі досліджень показано, що для реалізації float- та fixed-методів PPP-визначень (позиціонування) запропоновано виконувати поетапне східчасте рішення – багатоетапну процедуру обробки спостережень, де на кожному з етапів виконується уточнення рішення. Це дозволяє отримати більш надійне рішення задачі в різних умовах проведення вимірювань. Так, у складі системи рівнянь запропоновано використовувати не кодові занадто зашумлені «безіоносферні» спостереження, а результати визначення координат, що отримані із проміжного комбінованого кодово-фазового двохчастотного рішення. Це рішення формується на основі спільної обробки кодових спостережень першої частоти ГНСС/GPS і двохчастотних неоднозначних фазових «безгеометричних» ГНСС-спостережень. Такий підхід має суттєві переваги, зокрема, як показано у розділах 3, 4, більш високу (в рази) точність такого кодового проміжного рішення, зменшені інтервали збіжності PPP-рішення та простішу його реалізацію.

4. Запропоновано оцінювати зенітну тропосферну затримку не на фіксованих інтервалах спостережень, а використовувати розкладання ЗТЗ (як функції часу) до ряду Фур'є-Лежандра та оцінювати коефіцієнти ряду на всьому інтервалі спостережень. Таке представлення має просту реалізацію і добре описує поведінку тропосферної затримки при її сильній зміні.

5. Для оцінки характеристик якості та верифікації PPP-рішень визначені методики апостеріорної оцінки точності та інтервалів збіжності/ініціалізації float- та fixed-рішень.

РОЗДІЛ 3

ВДОСКОНАЛЕННЯ І РЕАЛІЗАЦІЯ ВИСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ FLOAT-МЕТОДОМ PPP

Даний розділ дисертаційної роботи присвячений удосконаленню та реалізації позиціонування float-методом PPP у кінематичному та статичному режимах ГНСС-спостережень.

Розроблено та досліджено комплекс алгоритмів float-методу оцінки (розв'язання) фазової неоднозначності двохчастотних фазових ГНСС-спостережень та високоточного позиціонування недиференціальним (автономним) методом PPP навіолоземних/наземних об'єктів (у статичному і кінематичному режимах) та визначень параметрів руху НКА (у кінематичному режимі спостережень).

В описаному нижче float-методі оцінки (розв'язання) фазової неоднозначності двохчастотних фазових ГНСС-спостережень та позиціонування методом PPP була використана ідеологія обробки кодових та фазових ГНСС-спостережень та точного позиціонування в диференціальному режимі, яка детально описана в роботах фахівців ХНУРЕ [131, 133-139]. Вклад автора даної дисертаційної роботи полягає у розвитку та вдосконаленні запропонованого методу, його адаптації до умов недиференціального позиціонування, реальних умов вимірювань наземних та космічних споживачів, а також у проведенні досліджень його можливостей з використанням реальної вимірювальної інформації. Наведено відмінні риси запропонованого методу. Запропоновано схему реалізації методу та алгоритмів точного PPP-позиціонування. Окремо розглянуто принципово важливе питання отримання проміжного рішення, від якого залежить точність отримання фінального рішення та надійність розв'язання фазової неоднозначності. Наведено результати float-методу PPP-позиціонування для наземних та космічних додатків.

Підхід щодо проведення досліджень базувався, зокрема, на використанні техніки оптимальних перетворень систем рівнянь спостережень з континуальними та дискретними параметрами, оптимізації вибору лінійних комбінацій фазових спостережень для подальшої обробки з урахуванням впливу різних джерел похибок в режимі абсолютних координатних визначень, на урахуванні закордонних результатів в частині компенсації фазових міжчастотних затримок. Новизну підходу забезпечило використання нових методів та ідей [2, 7, 8, 10, 23, 140], що пройшли апробацію у ході досліджень [35, 36, 38, 42, 43, 141], що за основними характеристиками не поступаються закордонним розробкам.

Вихідними даними для експериментального тестування послужили добові спостереження 35 станцій ГНСС-мережі перманентних референцних станцій України, накопичені 10 січня та 19 червня 2013 р., а також спостереження НКА COSMIC та НКА GRACE на ті самі дати (див. науково-технічні звіти [36, 37]). Проведення натурних експериментів та використання множини результатів спостережень при тестуванні розроблених алгоритмів підтверджують необхідний рівень достовірності отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи. Досліджено збіжність методу PPP. Експериментально підтверджено, що при використанні розробленого комплексу алгоритмів досягається надійна оцінка (розв'язання) фазової неоднозначності та сантиметрова/міліметрова точність визначення місцеположення для статичного і кінематичного режимів позиціонування. Сформульовані пропозиції щодо подальшого розвитку та вдосконалення методу.

3.1 Алгоритми реалізації float-рішення (РФН та позиціонування) методом PPP для навколомних/наземних об'єктів у кінематичному і статичному режимах ГНСС-спостережень

Для рішення поставленої задачі будемо використовувати оцінки кодових і фазових псевдовідстаней, які відносяться до часу прийому (формування

вимірювань приймачем) в шкалі часу ГНСС (тут і далі – GPS). Вважаємо, що спостереження на заданому інтервалі часу пройшли попередню обробку («препроцесінг»), в ході якої усунуті фазові стрибки, аномальні спостереження (кодові і фазові), всі спостереження приведені до цілих секунд шкали часу GPS та ін. Також вважаємо, що, крім бортової навігаційної інформації (переданої супутниками GPS в реальному часі) маємо з центрів IGS та ін. інформацію про точні орбіти і про точні годинники супутників GPS. В моделі спостережень припускаємо введені всі поправки, які необхідні при роботі в режимі PPP (крім інструментальних апаратурних супутникових поправок). Остаточні зенітні тропосферні затримки (ЗТЗ) представляються у вигляді ряду Фур'є-Лежандра. При реалізації float IF PPP-рішення будемо використовувати кодові/кодово-фазові координатні рішення, отримані двома способами: а) більш «грубе» кодове «іоно-free» (IF) рішення і б) запропоноване автором «безіоносферне» рішення C/A (або C1, або P1), що отримане з використанням оцінок іоносферних затримок шляхом операції «leveling» фазових і кодових GF-комбінацій (див. розділ 2, підрозділ 3.3).

Як було показано в розділі 2, реалізація кінематичного float-рішення методом PPP для навколосемних/наземних об'єктів полягає у вирішенні загальної системи рівнянь (див. систему (2.10)):

$$\hat{\vec{Q}}(t_k) = \mathbf{A}_\Sigma(t_k) \cdot \Delta \vec{\mathbf{X}}(t_k) + \vec{\mathbf{V}}_\Sigma(t_k) \cdot \eta(t_k) + \mathbf{\Phi}_\Sigma(t_k) \cdot \vec{\mathbf{a}} + \mathbf{H}_\Sigma(t_k) \cdot \nabla \vec{\mathbf{C}}_{IF} + \delta \vec{\mathbf{Q}}(t_k). \quad (3.1)$$

Для випадку НКА система (3.1) не буде містити складову $\mathbf{\Phi}_\Sigma(t_k) \cdot \vec{\mathbf{a}}$ (див. систему рівнянь (2.15) та підрозділ 3.2 нижче), оскільки на висотах руху НКА тропосферний шар відсутній.

Необхідно провести спільну оцінку параметрів $\Delta \vec{\mathbf{X}}(t_k)$, $\eta(t_k)$, $\vec{\mathbf{a}}$ і $\nabla \vec{\mathbf{C}}_{IF}^{jr}$ ($j = \overline{1, m}; j \neq r$).

В системі рівнянь (3.1) врахуємо наявність можливих «wind-up»-ефектів, які виникають при еволюціях об'єкта в русі (повороти об'єкта). Також передбачається, що в (3.1):

– в кодових спостереженнях виключені затримки сигналів в трактах супутників (по відомим значенням DCB^j із IGS);

– введено всі геодинамічні поправки (див. Додаток А).

Далі будемо реалізовувати наступну послідовність дій.

Отримаємо безіоносферне кодове (P1 або C/A) рішення, використовуючи процедуру «leveling» кодових GF-спостережень і фазових GF-спостережень. На відміну від статичного режиму в даному випадку кінематичних спостережень навколоземних об'єктів (літальних апаратів), можливо, знадобиться уточнення процедури «leveling» з-за значного «wind-up»-ефекту, який виникає в умовах руху об'єкту з поворотами. Тобто, «wind-up»-ефект в фазових GF-спостереженнях (з довжиною хвилі $\sim 8,34$ см) може призвести до помітних похибок в процедурі «leveling», при «підгонці» фазової комбінації до кодової – це необхідно оцінювати під час усунення іоносферної затримки в P1 (або C/A) спостереженнях перед рішенням навігаційної задачі (НЗ). Корекція процедури «leveling» полягає в заміні використання «нерізницевих» спостережень на спостереження одинарних (по супутникам) різниць (кодових і фазових). В цьому випадку «wind-up»-ефект буде виключений, але буде потрібна репараметризація системи рівнянь і уточнення процедури рішення НЗ. У будь-якому випадку для конкретної траєкторії руху об'єкта необхідно оцінити додаткові похибки процедури «leveling» для наявної процедури обробки «нерізницевих» (по супутникам) спостережень.

Реалізація float IF-рішення не потребує обробки WL або MW комбінацій для визначення фазових неоднозначностей різницевої частоти, в той час як дискретне РФН передбачає обов'язкове виконання РФН комбінації Wide-Lane. Крім того, дискретне РФН потребує знання фазових затримок $\nabla \psi_{IF}^{jr}$ (див. розділ 4) в трактах супутників GPS.

Після реалізації всіх наведених процедур попередньої обробки спостережень та їх лінійних комбінацій (ЛК) систему рівнянь (3.1) представимо у наступному вигляді (з урахуванням позначень, що даються в розділі 2):

$$\underbrace{\hat{\vec{Q}}_{\Sigma}(t_k)}_{[3+m(t_k)]} = \underbrace{A_{\Sigma}(t_k)}_{\{[3+m(t_k)] \times 4\}} \cdot \underbrace{\vec{\Theta}(t_k)}_{[4]} + \underbrace{\Phi_{\Sigma}(t_k)}_{\{[3+m(t_k)] \times (n+1)\}} \cdot \underbrace{\vec{\alpha}}_{[n+1]} + \underbrace{H_{\Sigma}(t_k)}_{\{[3+m(t_k)] \times (g-1)\}} \cdot \underbrace{\nabla \vec{C}}_{[g-1]} + \delta \hat{\vec{Q}}_{\Sigma}(t_k), \quad (3.2)$$

де

$$\Phi(t_k) \cdot \vec{\alpha} = m\vec{f}(t_k) \cdot \vec{f}^T(t_k) = m\vec{f}(t_k) \cdot \left\{ \sum_0^h \alpha_i \cdot f_i[h(t_k)] \right\};$$

$$\hat{\vec{Q}}_{\Sigma}(t_k) = \left\| \hat{\vec{0}}^T(t_k); \dot{L}_{IF}^r(t_k), \dots, L_{IF}^{m(t_k)}(t_k) \right\|^T;$$

$$\vec{\Theta}(t_k) = \left\| \Delta x(t_k), \Delta y(t_k), \Delta z(t_k); \eta(t_k) \right\|^T;$$

$$m\vec{f}(t_k) = \left\| mf_w^1(t_k), mf_w^2(t_k), \dots, mf_w^{m(t_k)}(t_k) \right\|^T \xrightarrow{d} [m(t_k)];$$

$$\vec{f}^T(t_k) = \left\| 1, f_1[h(t_k)], f_2[h(t_k)], \dots, f_n[h(t_k)] \right\|^T \xrightarrow{d} [1 \times (n-1)];$$

$f_i[h(t)]$ – поліноми Лежандра;

$$A_{\Sigma}(t_k) = \left\| \begin{array}{ccc|ccc} & & & \dots & & 0 \\ & E & & & & 0 \\ & & & & & 0 \\ \hline & & [\hat{\vec{a}}^T(t_k)]^r & & & 1 \\ & & \dots & & & \dots \\ & & [\hat{\vec{a}}^T(t_k)]^j & & & 1 \\ & & \dots & & & \dots \\ & & [\hat{\vec{a}}^T(t_k)]^{m(t_k)} & & & 1 \end{array} \right\|; \quad E - \text{одинична матриця } [3 \times 3];$$

$$\Phi_{\Sigma}(t_k) = \left\| \begin{array}{c} \mathbf{0}_{n+1} \\ \Phi(t_k) \end{array} \right\|; \quad H_{\Sigma}(t_k) = \left\| \begin{array}{c} \mathbf{0}_{g-1} \\ H_{IF}(t_k) \end{array} \right\|,$$

0_{n+1} , 0_{g-1} – нульові матриці; матриця $H_{IF}(t_k)$ складається з одиниць і нулів і повинна бути узгоджена (як матриця приватних похідних) з послідовністю рівнянь в (3.2).

Матриця плану (приватних похідних вимірюваних параметрів за параметрами, що визначаються) в даному випадку має вигляд:

$$\left\| \begin{array}{cccc|c|c} \vec{\theta}(t_1) & \vec{\theta}(t_2) & \dots & \vec{\theta}(t_k) & \vec{a} & \nabla \vec{c} \\ \hline A_{\Sigma}(t_1) & 0 & \dots & 0 & \Phi_{\Sigma}(t_1) & H_{\Sigma}(t_1) \\ 0 & A_{\Sigma}(t_2) & \dots & 0 & \Phi_{\Sigma}(t_2) & H_{\Sigma}(t_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{\Sigma}(t_k) & \Phi_{\Sigma}(t_k) & H_{\Sigma}(t_k) \end{array} \right\|.$$

З урахуванням представлень:

$$G_{\Sigma}(t_k) = \|\Phi_{\Sigma}(t_k) : H_{\Sigma}(t_k)\| \xrightarrow{d} \left[[3 + m(t_k)] \times \{(n+1) + (g-1)\} \right],$$

$$\vec{\mu} = \|\vec{a}^T : \nabla \vec{c}^T\|^T \xrightarrow{d} [(n+1) + (g-1)]$$

будуємо float-рішення за схемою, що описана в статтях [2, 7, 8, 10, 23, 140] та звітах про виконання НДР [35, 36, 38, 42, 43, 141]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\vec{\mu}} = K_{22} \cdot \sum_{i=1}^k \left[G_{\Sigma}^T(t_i) \cdot P(t_i) \cdot \hat{\vec{Q}}_{\Sigma}(t_i) \right]; \\ K_{22} = \left\{ \sum_{i=1}^k \left[G_{\Sigma}^T(t_i) \cdot P(t_i) \cdot G_{\Sigma}(t_i) \right] \right\}^{-1}; \\ P(t_i) = W(t_i) - W(t_i) \cdot A_{\Sigma}(t_i) \cdot \left[A_{\Sigma}^T(t_i) \cdot W(t_i) \cdot A_{\Sigma}(t_i) \right]^{-1} \cdot A_{\Sigma}^T(t_i) \cdot W(t_i); \\ \hat{\vec{\Theta}}(t_i) = \left[A_{\Sigma}^T(t_i) \cdot W(t_i) \cdot A_{\Sigma}(t_i) \right]^{-1} \cdot A_{\Sigma}^T(t_i) \cdot W(t_i) \cdot \left[\hat{\vec{Q}}_{\Sigma}(t_i) - G_{\Sigma}(t_i) \cdot \hat{\vec{\mu}} \right]. \end{array} \right. ; \quad (3.3)$$

$$W(t_i) = K_{\hat{\vec{Q}}_{\Sigma}}^{-1}(t_i);$$

$$K_{\hat{Q}_{\Sigma}}(t_i) = \left\| \begin{array}{cc} \hat{K}_{\vec{X}_{P1}} & 0 \\ 0 & \hat{K}_{IF}(t_i) \end{array} \right\|; \hat{K}_{\vec{X}_{P1}} - \text{кореляційна матриця похибок кодового}$$

P1-рішення;

$$K_{IF}(t_i) = \text{diag} \left\{ \sigma_{IF}^2, \dots, \sigma_{IF}^2 \right\} \xrightarrow{d} [m(t_i) \times m(t_i)].$$

В результаті отримаємо float-оцінки всіх шуканих параметрів

$$\Delta \hat{X}(t_k) \Rightarrow \hat{X}(t_k); \hat{\alpha} \Rightarrow \Delta \hat{z}(t_k) \Rightarrow \hat{Z}(t_k); \eta(t_k); \nabla \vec{C}.$$

Координати об'єкта порівнюємо з еталоном. Аналізуємо і залишки (residuals) отриманого МНК-рішення.

Реалізація кінематичного одночастотного float PPP-рішення для навколосезонних об'єктів базується на використанні спостережень сигналів на частоті L1 у (2.1) та відрізняється від двохчастотного варіанту, головним чином, тим, що при отриманні кодових точкових рішень та фазових інтервальних float PPP-рішень у L1-спостереження вводяться (крім стандартних поправок для PPP-позиціонування) поправки на вплив іоносфери з використанням моделей (моделей GIM IONEX IGS або моделі Клобушара). Деякі відмінності є також в репараметризації шуканих параметрів. В цілому ж реалізація алгоритму одночастотного float PPP-рішення практично не відрізняється від реалізації двохчастотного варіанту.

Розглянемо й реалізацію двохчастотного float-рішення PPP для статичного режиму ГНСС-спостережень (див. (2.13) у розділі 2). У цьому випадку потрібно вирішити систему рівнянь

$$\hat{\mathbf{Q}}(t_k) = \mathbf{A}_{\Sigma}(t_k) \cdot \Delta \vec{\mathbf{X}} + \vec{\mathbf{V}}_{\Sigma}(t_k) \cdot \eta(t_k) + \mathbf{\Phi}_{\Sigma}(t_k) \cdot \vec{\mathbf{a}} + \mathbf{H}_{\Sigma}(t_k) \cdot \nabla \vec{\mathbf{C}} + \delta \vec{\mathbf{Q}}(t_k), \quad (3.4)$$

для якої узагальнена матриця плану має вигляд:

$$\left\| \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c} \vec{V}_{\Sigma}(t_1) & 0 & \dots & 0 & A_{\Sigma}(t_1) & \Phi_{\Sigma}(t_1) & H_{\Sigma}(t_1) \\ \hline 0 & \vec{V}_{\Sigma}(t_2) & \dots & 0 & A_{\Sigma}(t_2) & \Phi_{\Sigma}(t_2) & H_{\Sigma}(t_2) \\ \hline \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline 0 & 0 & \dots & \vec{V}_{\Sigma}(t_k) & A_{\Sigma}(t_k) & \Phi_{\Sigma}(t_k) & H_{\Sigma}(t_k) \end{array} \right\|.$$

Введемо, як і раніше, такі позначення

$$G_{\Sigma}(t_k) = \left\| A_{\Sigma}(t_k) : \Phi_{\Sigma}(t_k) : H_{\Sigma}(t_k) \right\| \xrightarrow{d} \left[m(t) \times \{3 + (n+1) + (g-1)\} \right],$$

$$\vec{\mu} = \left\| \Delta \vec{X}^T : \vec{\alpha}^T : \nabla \vec{C}^T \right\|^T.$$

Далі по відомій схемі формуємо МНК-рішення:

$$\hat{\vec{\mu}} = K_{22} \cdot \sum_{j=1}^k G_{\Sigma}^T(t_j) \cdot P(t_j) \cdot \hat{\vec{Q}}(t_j); \quad K_{22} = \left[\sum_{j=1}^k G_{\Sigma}^T(t_j) \cdot P(t_j) \cdot G_{\Sigma}(t_j) \right]^{-1};$$

$$P(t_j) = W(t_j) - W(t_j) \cdot \vec{V}_{\Sigma}(t_j) \cdot \left[\vec{V}_{\Sigma}^T(t_j) \cdot W(t_j) \cdot \vec{V}_{\Sigma}(t_j) \right]^{-1} \cdot \vec{V}_{\Sigma}^T(t_j) \cdot W(t_j);$$

$$\eta(t_j) = \left[\vec{V}_{\Sigma}^T(t_j) \cdot W(t_j) \cdot \vec{V}_{\Sigma}(t_j) \right]^{-1} \cdot \vec{V}_{\Sigma}^T(t_j) \cdot W(t_j) \cdot \left[\hat{\vec{Q}}(t_j) - G_{\Sigma}(t_j) \cdot \hat{\vec{\mu}} \right].$$

$W(t_j)$ – вагова (зворотна кореляційній) матриця спостережень.

3.2 Алгоритм оцінки параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів (НКА) float-методом PPP по бортовим GPS-спостереженням. Априорна оцінка точності траєкторних визначень НКА

Скористаємось рівняннями (2.15), (2.16), (2.20) скорегованих «безіоносферних» (IF) фазових спостережень (див. розділ 2).

Зауважимо, що в даному випадку ми будемо використовувати лише результати кодово-фазового рішення (після корекцій на стрибки) та «чисті» фазові IF-спостереження без введення поправок на результати РФН WL-спостережень.

Тоді, у загальному випадку, можна записати лінеаризовану систему рівнянь ІФ-спостережень (див. розділ 2). До цієї системи рівнянь включимо і апріорні оцінки поточних координат НКА, що отримані на етапі кодово-фазового (PL) рішення (див. підрозділ 3.3):

$$\begin{cases} \hat{\vec{0}}_{PL}(t) = \Delta\vec{X}(t) + \delta\vec{X}_{PL}(t) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^r(t) = \left[\hat{\vec{\alpha}}^T(t) \right]^r \cdot \Delta\vec{X}(t) + \eta_{IF}(t) + \delta\Delta L_{IF}^r(t) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^j(t) = \left[\hat{\vec{\alpha}}^T(t) \right]^j \cdot \Delta\vec{X}(t) + \eta_{IF}(t) + \nabla C_{IF}^{jr} + \delta\Delta L_{IF}^j(t) \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\vec{\Theta}(t) = \left\| \Delta\vec{X}^T(t) : \eta_{IF}(t) \right\|^T ;$$

$$\begin{aligned} \nabla C_{IF}^{jr} &= C_{IF}^j - C_{IF}^r = -\left[N_1^j \cdot k_1 \cdot \lambda_1 - N_2^j \cdot k_2 \cdot \lambda_2 \right] + \left[N_1^r \cdot k_1 \cdot \lambda_1 - N_2^r \cdot k_2 \cdot \lambda_2 \right] = \\ &= -\left[\nabla N_1^{jr} \cdot k_1 \cdot \lambda_1 - \nabla N_2^{jr} \cdot k_2 \cdot \lambda_2 \right]; \end{aligned}$$

$$C_{IF}^{j(r)} = -\left[N_1^{j(r)} \cdot k_1 \cdot \lambda_1 - N_2^{j(r)} \cdot k_2 \cdot \lambda_2 \right];$$

$$\nabla N_1^{jr} = N_1^j - N_1^r ; \quad \nabla N_2^{jr} = N_2^j - N_2^r ;$$

$$j = j(r_i) ; \quad r = r_i ; \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad p - \text{кількість референцих ділянок};$$

$j(r_i)$ – номер проходу (прольоту) супутників з прив'язкою до референційної ділянки.

Задача, як і раніше, полягає у спільній оцінці параметрів $\vec{\Theta}(t)$ $\left[t \in t_1 \dots t_k \right]$ і ∇C_{IF}^{jr} на тому ж інтервалі часу при тому, що цей інтервал має таку протяжність, що спостерігається зміна референцих супутників.

Запишемо систему (3.5) у матрично-векторній формі:

$$\vec{Q}(t) = A(t) \cdot \vec{\Theta}(t) + H(t) \cdot \nabla \vec{C}_{IF} + \delta\vec{Q}(t); \quad (3.6)$$

$m(t)+3 \quad [(3+m(t)) \times 4] \quad [(3+m(t)) \times (g-1)]$

$$\delta\vec{Q}(t) = \underbrace{\delta\vec{Q}_\phi(t)}_{\text{флукт. похибка}} + \underbrace{\delta\vec{Q}_c(t)}_{\text{системат. похибка}} ;$$

g – загальна кількість прольотів супутників GPS на всьому інтервалі;

$$K_{\vec{Q}_\Phi} = W^{-1}(t) =$$

$K_{\vec{x}_{PL\Phi}}(t)$	0		<i>розмірність варіюється від часу</i>
0	σ_{IF}^2	0	
	\ddots	σ_{IF}^2	

Матриці $A(t)$ формуються стандартним чином. Важливим є правильне формування матриці $H(t)$, яка залежить від кількості прольотів супутників GPS, виборі структури невідомих $\nabla \vec{C}_{IF}$, нумерації прольотів супутників та її відповідності номерам супутників GPS та приналежністю до l -ї ($l = \overline{1, p}$) референцної ділянки. Доцільно перевірити (перед подальшими обчисленнями) на «зворотність» матрицю $\left[\sum_{i=1}^k H^T(t_i)H(t_i) \right]$.

Вважаємо, що похибки оцінок апріорних координат (з P_1 -рішення) носять флуктуаційний характер на всьому інтервалі спостережень. Далі все ж таки розглянемо і варіант, коли похибки координат включають і систематичні складові. Взаємні кореляції систематичних похибок IF фазових спостережень між проходами вважаємо рівними нулю, тому повна кореляційна матриця $K_\Delta \rightarrow [g \times g]$ систематичних похибок IF-спостережень для всіх проходів дорівнює:

$$K_{\vec{\Delta}} = \left\| \begin{array}{ccc} \sigma_{IF_c}^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sigma_{IF_c}^2 \end{array} \right\|, \text{ а } K_{\vec{Q}_c}(t) = \begin{array}{cc} S(t) & \cdot K_{\vec{\Delta}} \cdot S^T(t), \\ [(3+m(t)) \times g] & [g \times g] \end{array}$$

g – загальна кількість прольотів супутників GPS на інтервалі.

У загальному випадку вважаємо, що крім систематичних похибок IF-спостережень є і систематичні похибки (постійні на всьому інтервалі

спостережень) «априорних» координат. В цьому випадку вектор таких похибок може бути визначений як

$$\vec{\Delta}_Q = \begin{Bmatrix} \vec{\Delta}_{P1} \\ \vec{\Delta} \end{Bmatrix}; \delta \vec{Q}_c = S_Q \cdot \vec{\Delta}_Q; K_{Q_c} = S_Q \cdot K_{\vec{\Delta}_Q} \cdot S_Q^T.$$

У цьому випадку кореляційна матриця $K_{\vec{\Delta}_Q}$ дорівнює

$$K_{\vec{\Delta}_Q} = \begin{Bmatrix} K_{\vec{x}_c} & 0 \\ 0 & K_{\vec{\Delta}} \end{Bmatrix}, K_{\vec{\Delta}_c} = \begin{Bmatrix} \sigma_{P_c}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{P_c}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{P_c}^2 \end{Bmatrix};$$

$$S_Q = \begin{Bmatrix} S_x & : & S_x \\ 3 & & g \end{Bmatrix}; S_x(t) = \begin{Bmatrix} E & : & 0^T(t) \\ [3 \times 3] & & m(t) \end{Bmatrix}^T.$$

Однак цей варіант необхідно розглянути як доповнення до основного варіанту, коли систематика є тільки в ІФ-спостереженнях.

Векторні елементи $\nabla \vec{C}_{IF}$ у разі якщо дискретне/цілочисельне РФН WL-спостережень не виконано та відповідні корекції у вектор $\hat{Q}_{IF}(t)$ не внесено, мають вигляд:

$$\nabla C_{IF}^{jr} = - \left[\nabla N_1^{jr} \cdot k_1 \cdot \lambda_1 - \nabla N_2^{jr} \cdot k_2 \cdot \lambda_2 \right].$$

Якщо РФН WL-спостережень виконано на всьому інтервалі спостережень (з верифікацією рішення), то можлива корекція вектору $\hat{Q}_{IF}(t)$ і тоді

$$\nabla C_{IF}^{jr} = \nabla N_{1IF}^{jr} \text{ і } H(t) = -\lambda_{NL} \cdot H(t); H(t) = -\frac{1}{\lambda_{NL}} \cdot H(t).$$

Остання форма подання краще, оскільки це відразу дозволяє оцінювати невідомі ∇N_1^{jr} , оцінювати точність їх визначення, комбінувати це рішення з апріорним «безіоносферним» кодовим рішенням (з реалізацією «leveling»-оцінок іоносферних затримок), але за умови, що РФН WL-спостережень виконано правильно.

Тут важливо відзначити ту обставину, що тільки остання форма може використовуватися для фінального кроку обробки – побудови цільової функції та перебору $\nabla \vec{N}_1$ у дискретній формі в заданих float-рішенням межах.

Проте, у загальному випадку, форма рівнянь спостережень у принципі однакова для обох варіантів. Тому оцінку точності визначених параметрів ($\nabla \vec{C}_{IF}$, $\vec{\Theta}$) будемо здійснювати за єдиними формулами, маючи на увазі варіанти.

Тепер запишемо набір формул для визначення як параметрів, так і оцінки точності їх визначення.

Системи рівнянь у двох випадках:

Випадок 1.

$$\hat{Q}(t) = A(t) \cdot \vec{\Theta}(t) + H(t) \cdot \nabla \vec{C}_{IF} + \delta \vec{Q}(t)$$

Випадок 2.

$$\begin{aligned} \hat{Q}(t) &= A(t) \cdot \vec{\Theta}(t) + \overset{*}{H}(t) \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \delta \vec{Q}(t) \\ \overset{*}{H}(t) &= -\lambda_{NL} \cdot H(t); \quad H(t) = -\frac{1}{\lambda_{NL}} \cdot \overset{*}{H}(t) \end{aligned}$$

Слід врахувати, що у векторі $\hat{Q}(t)$ у другому випадку внесені корекції з урахуванням WL-рішення. Тоді

$$\hat{K}_{\nabla \vec{C}_\phi} = \left[H^T \cdot P \cdot H \right]^{-1} = \left\{ \sum_{i=1}^k H^T(t_i) \cdot P(t_i) \cdot H(t_i) \right\}^{-1} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^k H^T(t_i) \cdot P(t_i) \cdot S(t_i) \right\} = G;$$

$$\nabla \hat{C}_{IF} = \hat{K}_{\nabla \vec{C}_\phi} \cdot \left[H^T \cdot P \cdot \hat{Q} \right] = \hat{K}_{\nabla \vec{C}_\phi} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^k H^T(t_i) \cdot P(t_i) \cdot \hat{Q}(t_i) \right\};$$

$$\delta \nabla \vec{C}_{IF} = \hat{K}_{\nabla \vec{c}_\phi} \cdot [H^T \cdot P] \cdot \delta \nabla \vec{Q}_\phi + \hat{K}_{\nabla \vec{c}_\phi} \cdot [H^T \cdot P \cdot S] \cdot \vec{\Delta}.$$

Позначимо

$$\begin{aligned} \hat{K}_{\nabla \vec{c}_\phi} \cdot [H^T \cdot P \cdot S] &= [H^T \cdot P \cdot H]^{-1} \cdot [H^T \cdot P \cdot S] = \\ &= \left\{ \sum_{i=1}^k H^T(t_i) \cdot P(t_i) \cdot H(t_i) \right\}^{-1} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^k H^T(t_i) \cdot P(t_i) \cdot S(t_i) \right\}. \end{aligned}$$

Ця матриця, як показують аналіз та розрахунки, включає блоки – одиничні матриці та одиничний стовпець

$$\dim G = [(g-1) \times g].$$

Матриця P має вигляд $P = W - W \cdot A \cdot (A^T \cdot W \cdot A) \cdot A^T \cdot W$ – блочно-діагональна матриця, а для заданого моменту t_i блок

$$P(t_i) = W(t_i) - W(t_i) \cdot A(t_i) \cdot (A^T(t_i) \cdot W(t_i) \cdot A(t_i)) \cdot A^T(t_i) \cdot W(t_i).$$

Тоді кореляційна матриця сумарних (флуктуаційних та систематичних) похибок визначення вектору $\nabla \vec{C}_{IF}$ матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \hat{K}_{\nabla \vec{C}_{IF}} &= \hat{K}_{\nabla \vec{c}_\phi} + \hat{K}_{\nabla \vec{c}_c}; \\ \hat{K}_{\nabla \vec{c}_\phi} &= [H^T \cdot P \cdot H]^{-1} \text{ (см.71)}; \hat{K}_{\nabla \vec{c}_c} = \underset{[(g-1) \times g]}{G} \cdot K_{\vec{\Delta}} \cdot G^T. \end{aligned}$$

У разі, якщо введено і систематичні похибки «апріорних» координат (див. вище), замість $K_{\vec{\Delta}}$ використовується $K_{\vec{\Delta}_0}$, матриця $G \Rightarrow G_Q$ у цьому випадку дорівнює:

$$G_Q = \left\| \begin{array}{c} 0 \quad \vdots \quad G \\ \hline \end{array} \right\|_{\substack{[(g-1) \times 3] \\ [(g-1) \times g]}} \rightarrow [(g-1) \cdot (3+g)],$$

а

$$\hat{K}_{\nabla \vec{c}_c} = G_Q \cdot K_{\vec{\Delta}_Q} \cdot G_Q^T = G \cdot K_{\vec{\Delta}} \cdot G^T,$$

тобто, систематичні зсуви апріорних координат $\vec{\Delta}$ не впливають на зміщення вектору $\nabla \vec{C}_{IF}$. Впливають лише зміщення в IF-спостереженнях.

З аналізу вихідних рівнянь спостережень і на цьому етапі, з отриманого досвіду моделювання похибок, зокрема, і з розгляду похибок $\delta \nabla \vec{C}_{IF}$, слідує важливий висновок, що оцінка вектору $\nabla \vec{C}_{IF}$ абсорбує у собі певну частину систематичних похибок спостережень. В результаті вектор систематичних похибок спостережень $S \cdot \vec{\Delta}$ (або $S_Q \cdot \vec{\Delta}_Q$ у загальному випадку) розщеплюється на дві складові:

$$1) \delta \vec{Q}_{c_1} = H \cdot \delta \nabla \vec{C}_{IF_c} = H \cdot \hat{K}_{\nabla \vec{c}_\phi} \cdot [H^T \cdot P \cdot S] \cdot \vec{\Delta} = H \cdot G \cdot \vec{\Delta}$$

$$2) \delta \vec{Q}_{c_2} = \delta Q_c - H \cdot \delta \vec{C}_{IF} = [S - H \cdot G] \cdot \vec{\Delta}.$$

Очевидно, сума цих двох складових дорівнює

$$\delta \vec{Q}_c = \delta \vec{Q}_{c_1} + \delta \vec{Q}_{c_2} = S \cdot \vec{\Delta}.$$

Як показують розрахунки, матриці $[S(t_i) - H(t_i) \cdot G(t_i)]$ мають специфічний вигляд (складаються з нульових блоків та одиничного вектору відповідної розмірності). Використовуємо 1) та 2) для перевірки ілюстрації викладеного розщеплення векторів систематичних похибок на дві складові, одна з яких 1) «приєдналася» до вектору $\nabla \vec{C}_{IF}$, так що

$$\hat{\vec{\mu}}_{IF} = [\nabla \vec{C}_{IF} + H \cdot G \cdot \vec{\Delta}],$$

$$S \cdot \vec{\Delta} = \underbrace{H \cdot G \cdot \vec{\Delta}}_{H \cdot \nabla \vec{C}_{IF} = H \cdot \hat{\vec{\mu}}_{IF}} + (S - H \cdot G) \cdot \vec{\Delta}.$$

Тоді обчислимо систематичну складову похибки визначення вектору $\hat{\vec{\mu}}_{IF}$:

$$\begin{aligned} \delta \vec{\mu}_{IF} &= K_{\nabla \vec{C}_\phi} \cdot H^T \cdot P \cdot \delta \vec{Q}_{c_2} = K_{\nabla \vec{C}_\phi} \cdot H^T \cdot P \cdot [S - H \cdot G] \cdot \vec{\Delta} = \\ &= \left\{ \underbrace{K_{\nabla \vec{C}_\phi} \cdot [H^T \cdot P \cdot S]}_G - \underbrace{K_{\nabla \vec{C}_\phi} \cdot H^T \cdot P \cdot H \cdot G}_E \right\} \cdot \vec{\Delta} = \{G - G\} \cdot \vec{\Delta} = \vec{0} \end{aligned}$$

що і потрібно було довести.

Тепер сформуємо оцінки вектору $\vec{\Theta}$ (векторів $\vec{\Theta}(t_i)$) та їх точність (розрахуємо кореляційні матриці флуктуаційної та систематичних складових, як і їх суми):

$$\hat{\vec{\Theta}} = D \cdot \left[\hat{\vec{Q}} - H \cdot \nabla \hat{\vec{C}}_{IF} \right],$$

$$D = \left[A^T \cdot W \cdot A \right]^{-1} \cdot A^T \cdot W \text{ – блочно-діагональна матриця,}$$

або

$$\hat{\vec{\Theta}}(t_i) = D(t_i) \cdot \left[\hat{\vec{Q}}(t_i) - H(t_i) \cdot \nabla \hat{\vec{C}}_{IF} \right],$$

$$D(t_i) = \left[A^T(t_i) \cdot W(t_i) \cdot A(t_i) \right]^{-1} \cdot A^T(t_i) \cdot W(t_i).$$

Тоді маємо:

$$\begin{aligned} \delta \vec{\Theta} &= \delta \vec{\Theta}_\phi + \delta \vec{\Theta}_c = D \cdot \left[\delta \vec{\Theta}_\phi - H \cdot \delta \vec{C}_{IF_\phi} \right] + D \cdot \left[\delta \vec{\Theta}_{c_2} - H \cdot \delta \vec{C}_{IF_c} \right] = \\ &= \underbrace{\left[D - D \cdot H \cdot \hat{K}_{\nabla \vec{C}_\phi} \cdot H^T \cdot P \right]}_{\delta \vec{\Theta}_\phi} \cdot \delta \vec{\Theta}_\phi + \underbrace{D \cdot [S - H \cdot G]}_{\delta \vec{\Theta}_{c_2}} \cdot \vec{\Delta} - \underbrace{D \cdot H \cdot G \cdot \vec{\Delta}}_{\delta \vec{\Theta}_{c_1}} \end{aligned}$$

$$\text{Кореляційна матриця (КМ) } \hat{K}_{\vec{\Theta}} = \hat{K}_{\vec{\Theta}_\phi} + \hat{K}_{\vec{\Theta}_c}.$$

Обчислимо окремо КМ для флуктуаційної та систематичної складових.

$$\hat{K}_{\vec{\Theta}_\phi} = \left[D - D \cdot H \cdot \hat{K}_{\nabla \vec{C}_\phi} \cdot H^T \cdot P \right] \cdot \hat{K}_{Q_\phi} \cdot \left[D - D \cdot H \cdot \hat{K}_{\nabla \vec{C}_\phi} \cdot H^T \cdot P \right]^T,$$

$$\text{і з урахуванням, що } \hat{K}_{Q_\phi} = W^{-1}; P \cdot W^{-1} \cdot P = P; \hat{K}_{\vec{\Theta}_\phi} = \left[H^T \cdot P \cdot H \right]^{-1};$$

$$\left[D \cdot W^{-1} \cdot P \right] = 0, \text{ отримаємо, що}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{K}_{\Theta_\phi} = \left[A^T \cdot W \cdot A \right]^{-1} + D \cdot H \cdot \hat{K}_{\nabla \bar{C}_\phi} \cdot H^T \cdot D^T \\ \text{або для діагональних блоків} \\ \hat{K}_{\Theta_\phi}(t_i) = \left[A^T(t_i) \cdot W(t_i) \cdot A(t_i) \right]^{-1} + D(t_i) \cdot H(t_i) \cdot \hat{K}_{\nabla \bar{C}_\phi} \cdot H^T(t_i) \cdot D^T(t_i) \\ \hat{K}_{\Theta_c} = D \cdot \left[S - 2 \cdot H \cdot G \right] \cdot \hat{K}_{\bar{\Delta}} \cdot \left[S - 2 \cdot H \cdot G \right]^T \cdot D^T, \\ \hat{K}_{\Theta_c}(t_i) = F(t_i) \cdot \hat{K}_{\bar{\Delta}} \cdot F^T(t_i), F(t_i) = D(t_i) \cdot \left[S(t_i) - 2 \cdot H(t_i) \cdot G(t_i) \right] \end{array} \right.$$

Тепер неважко визначити і третю складову (через вплив апріорної інформації)

$$\hat{K}_{\Theta_{\text{анп}}}(t_i) = D(t_i) \cdot H(t_i) \cdot \hat{K}_\eta^* \cdot H^T(t_i) \cdot D^T(t_i),$$

де

$$\hat{K}_\eta = \hat{K}_{\nabla N_{1\Sigma}} \cdot \hat{K}_{\nabla N_1}^{-1} \cdot \hat{K}_{\nabla N_{1\Sigma}}.$$

Таким чином, у підрозділах 3.1, 3.2 представлені розроблені автором оригінальні алгоритми float-методу оцінки (розв'язання) фазової неоднозначності двохчастотних фазових ГНСС-спостережень (на прикладі GPS-спостережень) та високоточного позиціонування недиференціальним (автономним) методом PPP навколосемних/наземних об'єктів (у статичному і кінематичному режимах) та визначень параметрів руху НКА (у кінематичному режимі спостережень).

Запропонована узагальнена схема реалізації методів та алгоритмів обробки спостережень споживачів та точного PPP-позиціонування представлена на рис. 3.1 (схема включає також fixed-рішення PPP метода, який буде детально розглянутий у розділі 4).

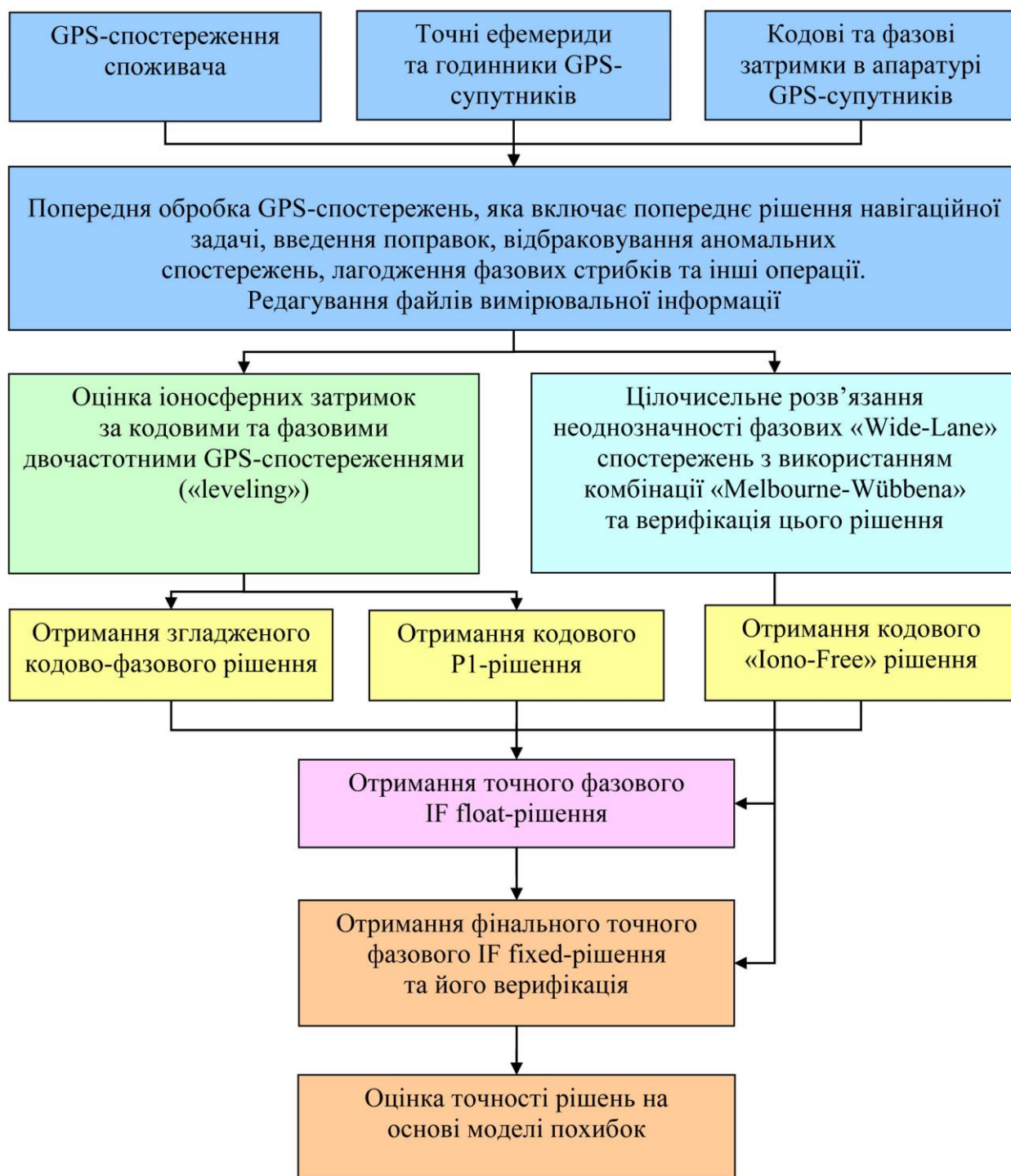


Рисунок 3.1 – Запропонована схема реалізації методу та алгоритмів реалізації методу точного позиціонування PPP

3.3 Кодові та згладжені кодово-фазові проміжні координатні PPP-рішення. Оцінка та усунення іоносферних затримок навігаційних сигналів

Як показано вище, при реалізації float IF PPP-рішень використовуються кодові або кодово-фазові координатні рішення: а) більш «грубе» стандартне кодове «iono-free» (IF) рішення і б) запропоноване автором «безіоносферне» рішення C/A (або P1), що отримується з використанням оцінок іоносферних затримок шляхом операції «leveling» фазових і кодових GF-комбінацій (див. розділ 2).

Розглянемо алгоритм реалізації цього згладженого кодово-фазового рішення. Згладжування двохчастотних кодових спостережень з допомогою фазових виконується в такий спосіб. До кожної ділянки спостережень (проходу ГНСС-супутника) розраховуються кодова GF комбінація (P2-P1), фазова GF комбінація (L1-L2) і проводиться операція «leveling» (підбір рівня), тобто, оцінка зміщення фазової комбінації відносно кодової. Далі кодова комбінація замінюється фазовою з урахуванням знайденого рівня. Крім того, знайдений рівень можна використовувати для розрахунку іоносферної затримки (див. нижче). Істотними обмеженнями точності згладжування двохчастотних кодових спостережень за допомогою фазових та оцінки іоносферних затримок навігаційних сигналів ГНСС є кодові повільно змінювані похибки через багатопроменеве поширення сигналів, а також похибки корекцій інструментальних кодових і фазових затримок сигналів у трактах GPS-супутників. Крім того, похибки підбору рівня (операція «leveling») та визначення іоносферної затримки залежать від тривалості ділянки спостережень, дискретності спостережень та шумових похибок комбінації спостережень (головним чином кодових). На рис. 3.2 – 3.4, як приклад, представлені кодові та фазові GF-комбінації (на вертикальних осях рисунків приведені номери GPS-супутників, масштаб – у метрах), а також оцінки середньоквадратичних похибок (СКП/RMS) оцінок іоносферних затримок

(у метрах) для станції GLSV (Київ, ГАО НАН України) у сеансі спостережень 19 червня 2013 р.

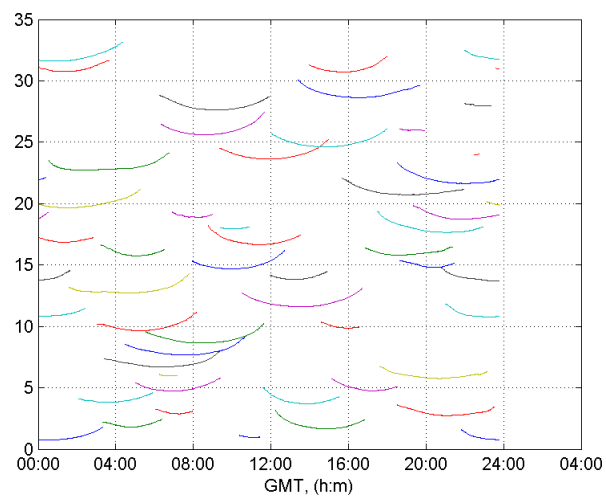
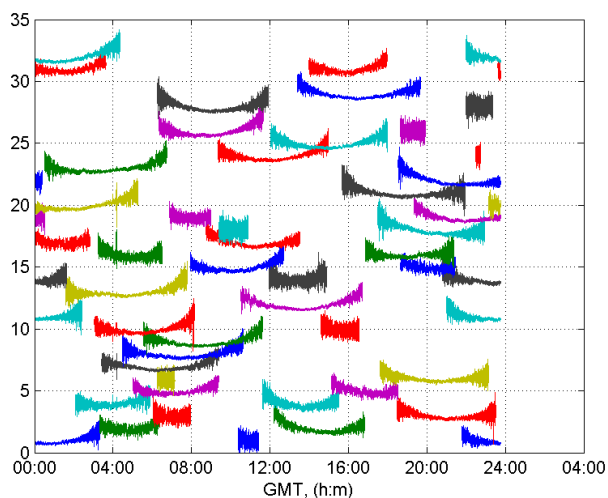


Рисунок 3.2 – Кодові GF-комбінації (P2-P1) спостережень станції GLSV Рисунок 3.3 – Фазові GF-комбінації (L1-L2) спостережень станції GLSV

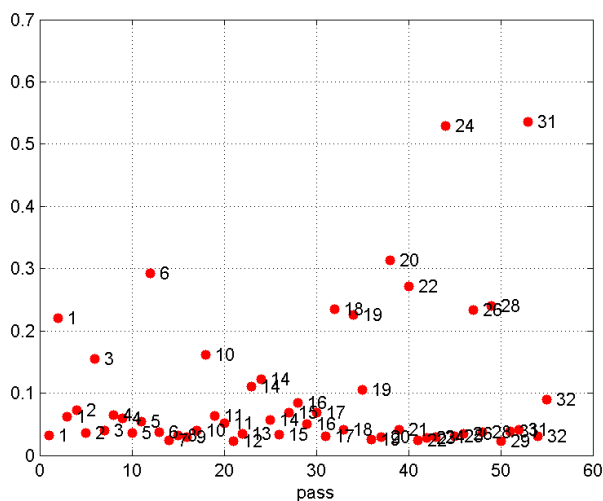


Рисунок 3.4 – Похибки (СКП/RMS) визначення іоносферних затримок сигналів на станції GLSV, м

На рис. 3.5 – 3.7 представлені приклади кодових і фазових GF-комбінацій та СКП/RMS оцінок іоносферних затримок також і для споживача на борту низькоорбітального космічного апарата GRACE у сеансі спостережень 19 червня 2013 р. [36, 37].

Як випливає з порівняння отриманих результатів, для наземних споживачів точність визначення іоносферних затримок зазначеним методом набагато вища, оскільки для них інтервали видимості супутників становлять кілька годин, тоді як для споживачів на борту НКА інтервали видимості супутників ГНСС не перевищують ~40 хвилин. Крім того, якість кодових спостережень станції GLSV набагато вища, а багатопроменева складова похибки нижче, ніж для вимірювань на борту НКА GRACE.

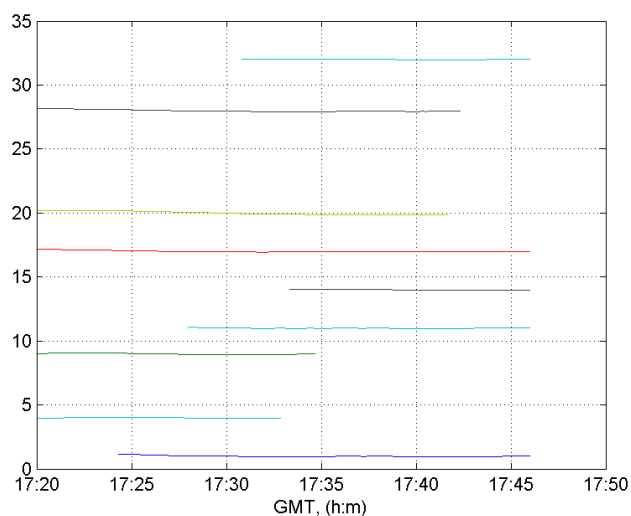
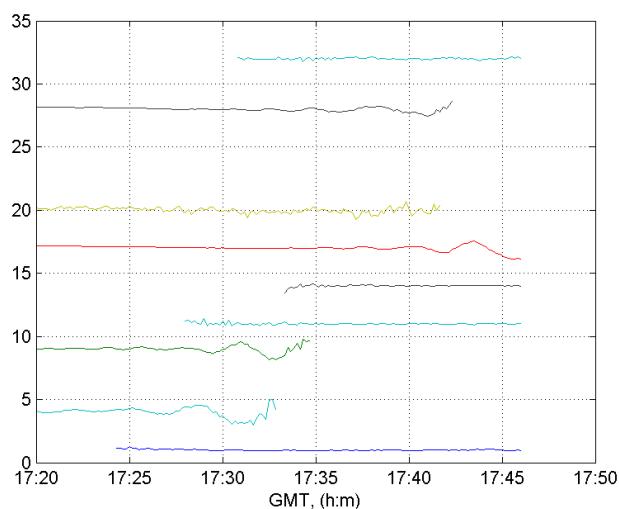


Рисунок 3.5 – Кодові GF-комбінації (P2-P1) спостережень на борту НКА GRACE

Рисунок 3.6 – Фазові GF-комбінації (L1-L2) спостережень на борту НКА GRACE

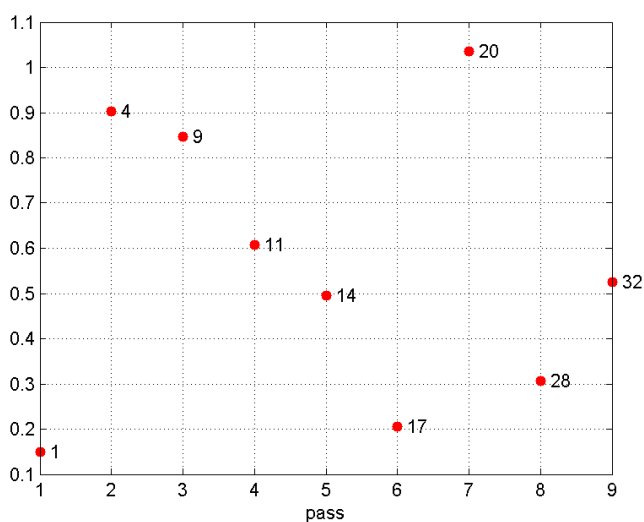


Рисунок 3.7 – Похибки (СКП/RMS) визначення іоносферних затримок сигналів на борту НКА GRACE, м

Точність отримання фінального двохчастотного фазового PPP-рішення та надійність розв'язання (оцінки у випадку float-методу) фазової неоднозначності залежить від точності отримання проміжного координатного рішення, в якості якого можуть бути використані різні варіанти кодових PPP-рішень. Точність двохчастотного проміжного однозначного кодового (або згладженого кодово-фазового) PPP-рішення залежить від похибок компенсації тропосферних затримок поширення навігаційних сигналів. Для наземних споживачів тропосферна поправка компенсується моделлю, параметри якої можна уточнити за рахунок сумісної їх оцінки з інформаційними параметрами (див. запропоновані автором моделі у розділі 2). Іоносферна поправка може бути сформована з використанням двохчастотних кодових та фазових спостережень (показано вище) або розрахована за моделлю, в якості якої можуть бути використані глобальні моделі Клобушара, GIM IONEX (IGS).

Для споживачів на борту НКА тропосферна поправка відсутня, а іоносферна поправка може бути компенсована моделлю, оскільки НКА перебуває у шарі іоносфери, але для цих умов моделі компенсації іоносферної поправки дають великі неприйнятні похибки. У цих умовах іоносферна похибка може бути усунена лише з використанням двохчастотних вимірювань.

У зарубіжній практиці для компенсації іоносферної похибки за двохчастотними вимірюваннями зазвичай застосовується стандартна комбінація кодових P1, P2 спостережень, вільна від впливу іоносфери (кодова «безіоносферна» комбінація). Однак, як показали дослідження, значно кращі результати досягаються при використанні спостережень P1 (або C/A) з компенсацією іоносферних поправок, розрахованих з використанням кодових і фазових безіоносферних комбінацій, як це тут було показано.

Як приклад, на рис. 3.8 та 3.9 представлені нев'язання кодових PPP-рішень, отриманих обома згаданими способами для наземного статичного споживача (на прикладі спостережень станції GLSV за 10 січня 2013 р.). Як впливає з рисунків, результати усереднення різних типів кодових рішень

у статичному режимі на тривалому інтервалі спостережень дають подібні результати, але шумова похибка «безіоносферного» рішення набагато вища – СКП/RMS нев'язань (відносно еталону) стандартного кодового «безіоносферного» рішення втричі більше, ніж СКП/RMS нев'язань рішення P1 з компенсацією іоносферних затримок запропонованим і наведеним вище методом. Спостерігаються варіації кодових рішень, які на невеликих інтервалах усереднення можуть дати значущі відхилення від еталонного значення. Особливо актуально це для кінематичного режиму визначень.

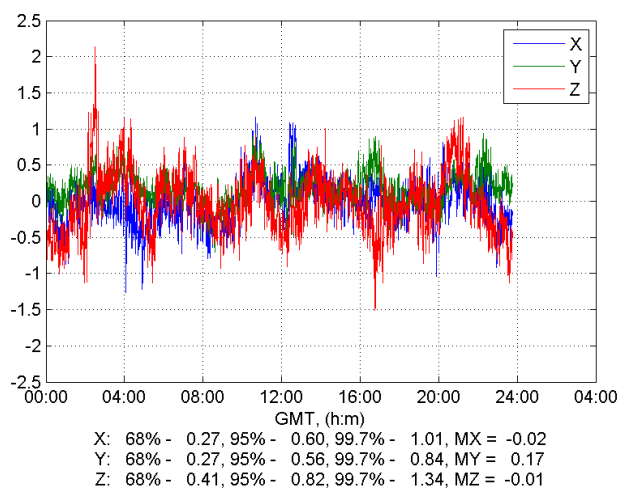


Рисунок 3.8 – Нев'язання кодового рішення P1 з компенсацією іоносферних затримок запропонованим методом

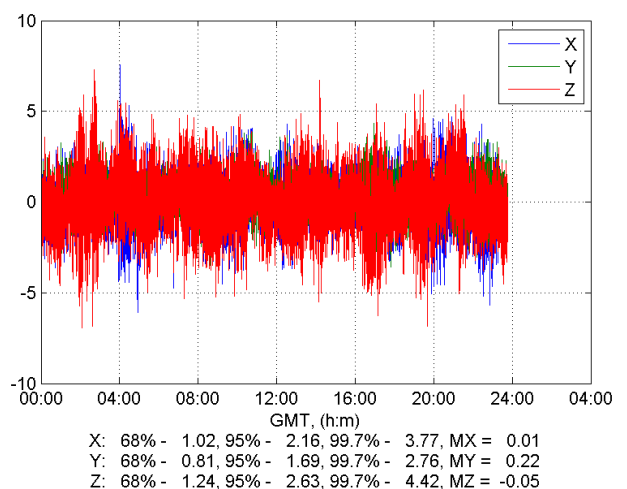


Рисунок 3.9 – Нев'язання стандартного кодового «безіоносферного» рішення

На рис. 3.10 та 3.11 представлені приклади графіків нев'язань різних видів кодових рішень у кінематичному режимі на прикладі спостережень НКА GRACE за 19 червня 2013 р.

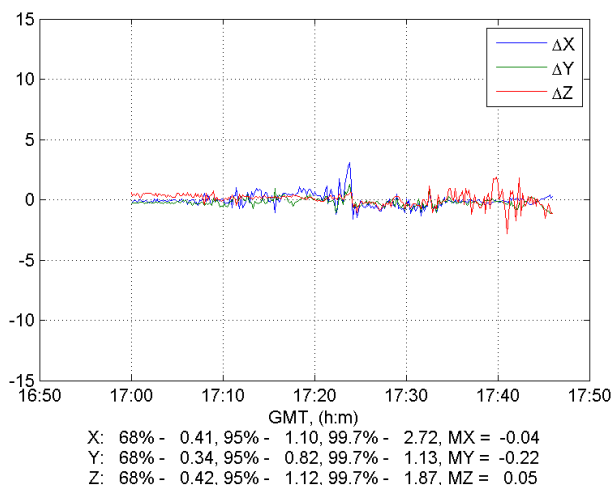


Рисунок 3.10 – Нев’язання кодового рішення P1 з компенсацією іоносферних затримок запропонованим методом

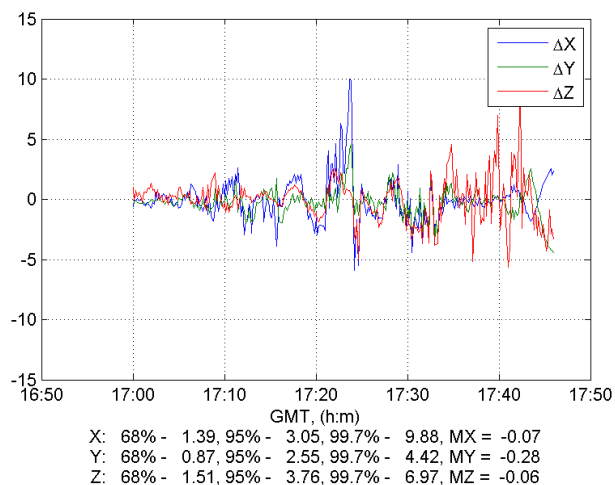


Рисунок 3.11 – Нев’язання стандартного кодового «безіоносферного» рішення

На рис.3.12 та 3.13 представлені графіки збіжності (відхилення від еталону за часом, в метрах) різних типів кодових рішень на прикладі спостережень станції GLSV за 10 січня 2013 р.

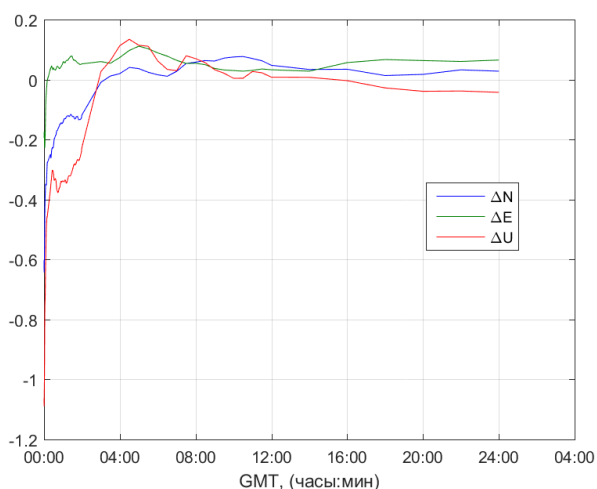


Рисунок 3.12 – Збіжність кодового рішення P1 з компенсацією іоносферних затримок запропонованим методом

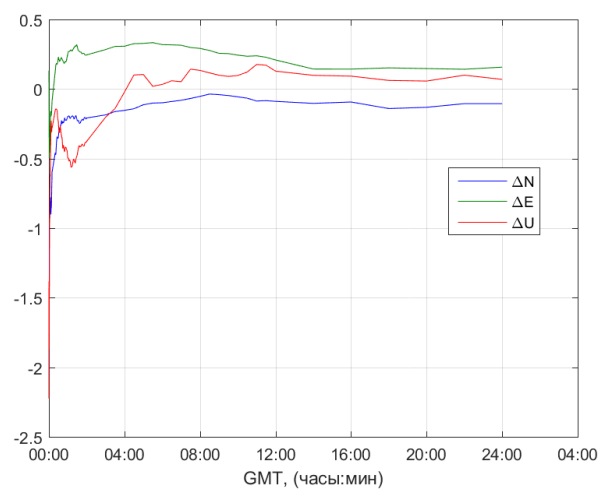


Рисунок 3.13 – Збіжність стандартного кодового «безіоносферного» рішення

Як випливає з порівняння рис.3.12 та 3.13, спостерігається перевага запропонованого рішення у порівнянні з стандартним – суттєво зменшується

збіжність рішення. Одночасно, очевидно, що, незважаючи на тривалий інтервал усереднення, нев'язання кодових рішень не прагнуть нуля. Це пояснюється похибками компенсації тропосферних похибок, і навіть залишковими похибками врахування кодових інструментальних затримок, залишковими похибками точних ефемерид і даних годинників супутників GPS.

При використанні кодового рішення в якості проміжного для досягнення подальшого фазового float- або fixed-рішення важливе значення має вибір правильного співвідношення ваг кодових і фазових спостережень. Для обґрунтування вибору ваг кодових та фазових вимірювань використовуються різниці кодових та фазових вимірювань. На рис.3.14 представлена різниця кодових та фазових спостережень НКА GRACE у сеансі вимірювань 19 червня 2013 р. для супутника GPS 29.

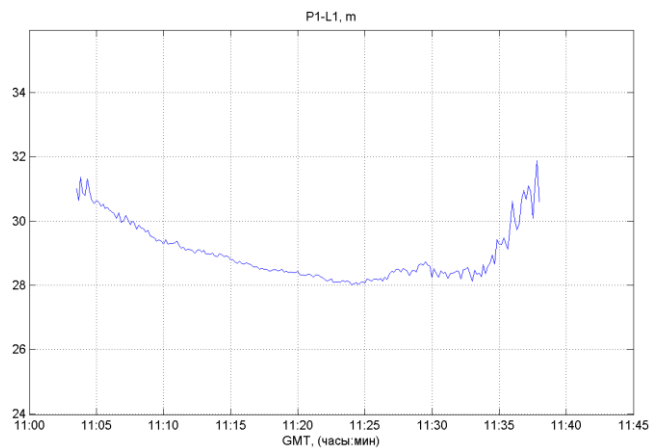


Рисунок 3.14 – Різниця кодових та фазових спостережень на борту НКА GRACE (для супутника GPS 29)

Оскільки флуктуаційна похибка фазових спостережень зневажливо мала порівняно з флуктуаційними похибками кодових спостережень, шуми спостережень різниці спостережень P1-L1 на рис. 3.14 обумовлені саме флуктуаційними похибками кодових спостережень P1. Тренд на рисунку обумовлений відмінністю знаків іоносферної затримки в кодових і фазових спостереженнях і являє собою подвоєну іоносферну затримку. При реалізації

методу PPP у роботі використовується «безіоносферна» комбінація фазових спостережень. Флуктуаційні похибки фазової «безіоносферної» IF-комбінації визначається шляхом віднімання її згладженого значення та визначення статистичних характеристик різниці.

У даній дисертаційній роботі прийнято такі значення СКП/RMS спостережень:

– для статичного режиму було прийнято, що СКП/RMS кодових спостережень P1 становить $\sim 0,17$ м, а СКП/RMS фазової безіоносферної комбінації ~ 0.006 м;

– для кінематичних вимірювань на борту НКА було прийнято, що СКП/RMS кодових спостережень P1 становить ~ 0.7 м, а СКП/RMS фазової безіоносферної комбінації ~ 0.017 м.

Таким чином у даному підрозділі для реалізації надійного розв’язання фазової неоднозначності двохчастотних фазових ГНСС-спостережень та високоточного позиціонування методом PPP вперше запропоновано метод отримання проміжного PPP-рішення, який використовує, на відміну від відомих підходів, не «безіоносферні» кодові псевдовідстані низької точності, а більш точне (у кілька разів) нове комбіноване кодово-фазове координатне рішення (на основі спільної обробки кодових спостережень першої частоти ГНСС і двохчастотних неоднозначних фазових «безгеометричних» ГНСС-спостережень), що, як показали представлені і подальші дослідження, дає суттєве (на $\sim 20\div 30\%$) збільшення надійності РФН та зменшення інтервалу його досягнення (ініціалізації/збіжності PPP-рішення).

3.4 Результати тестування і дослідження запропонованих реалізацій позиціонування наземних об'єктів float-методом PPP

3.4.1 Вихідні дані для тестування

В якості вихідних даних для експериментального відпрацювання та тестування створеного програмно-математичного забезпечення обробки GPS-спостережень float-методом PPP були використані добові спостереження 35 станцій ГНСС-мережі перманентних референцних станцій України, накопичені 10 січня та 19 червня 2013 р.

У більшості експериментів використано спостереження 11 станцій вказаної ГНСС-мережі (див. рис.3.15), з них 5 станцій (GLSV, KHAR, KTVL, MIKL, POLV) входять у міжнародні мережі IGS і EPN.

Перелік станцій, спостереження яких були використані для тестування, наведено в табл. 3.1.

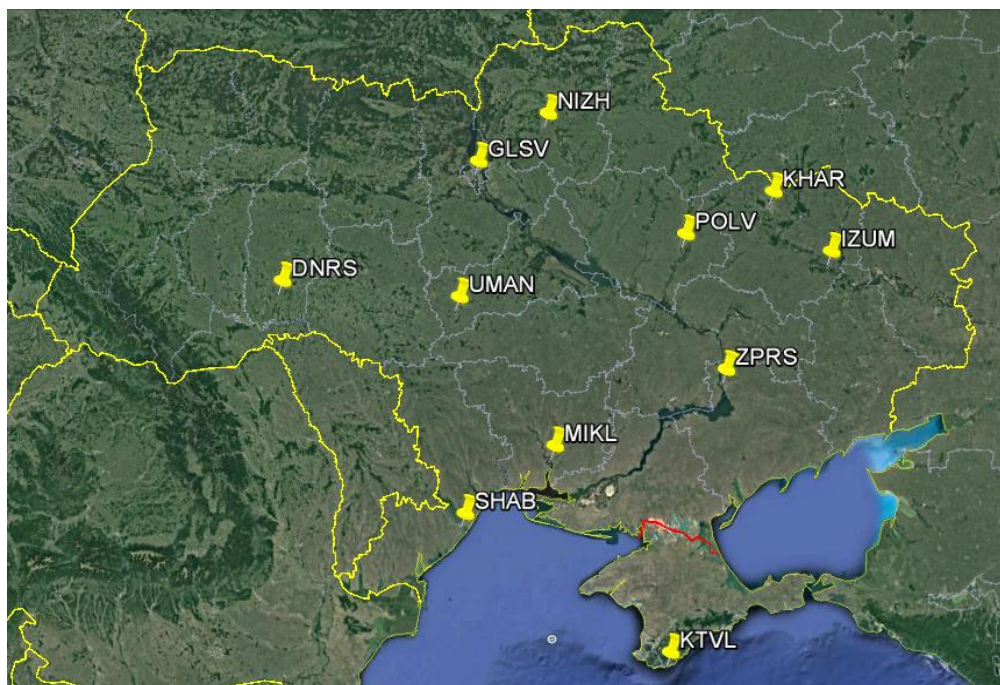


Рисунок 3.15 – ГНСС-станції України, спостереження яких були використані для тестування

Таблиця 3.1 – Загальний список станцій, відібраних для тестування

№	Умовне найменування станції	Приналежність станції (мережа/організація)	Населений пункт
1	DNRS	СКНОУ	Дунаївці, Хмельницька обл.
2	GLSV	ГАО НАНУ, IGS/EPN	Київ
3	IZUM	NGCNET	Ізюм, Харківська обл.
4	KNAR	ГАО НАНУ, IGS/EPN	Харків
5	KTVL	ГАО НАНУ, EPN	Кацівелі, Крим
6	MIKL	НДІ ГК, IGS/EPN	Миколаїв
7	NIZH	SystemNET	Ніжин, Чернігівська обл.
8	POLV	System.NET, IGS, EPN	Полтава
9	SHAB	SystemNET	Шабо, Одеська обл.
10	UMAN	SystemNET	Умань, Черкаська обл.
11	ZPRS	СКНОУ	Запоріжжя

Спостереження перманентних референційних ГНСС-станцій пройшли попередню обробку (контроль якості даних, усунення циклічних фазових стрибків тощо) з використанням вітчизняного програмного комплексу «ОСТАВА» [142-144].

3.4.2 Статичний режим координатних визначень

На рис. 3.16 та 3.17 представлений приклад результатів обробки сеансу спостережень станції GLSV (м. Київ) за 10 січня 2013 р. з використанням float-методу реалізації PPP-рішення. На рисунках тут та нижче наведені статистичні характеристики похибок позиціонування для заданих значень вірогідності.

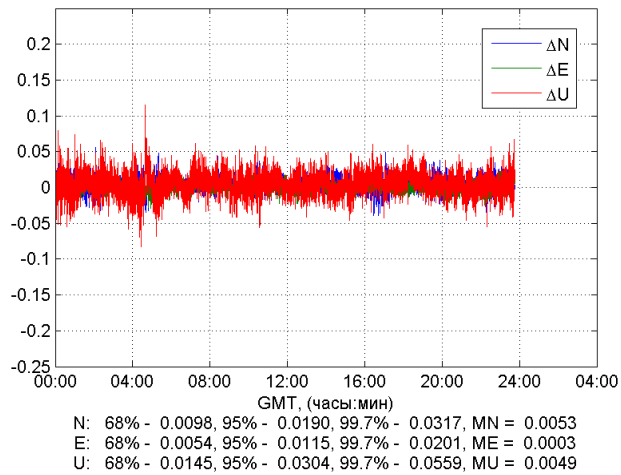


Рисунок 3.16 – Нев’язання (у метрах) float PPP-рішення (у топоцентричній місцевій системі координат – МСК) відносно еталону – похибки поточних оцінок координат станції GLSV

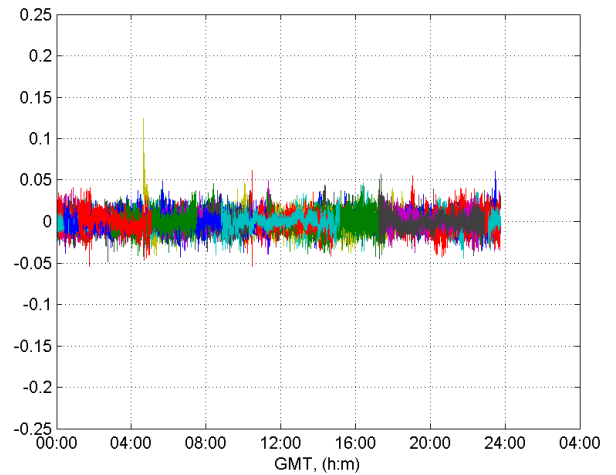


Рисунок 3.17 – Залишки (residuals) float PPP-рішення

Ілюстрації експериментальних порівняльних результатів обробки двохчастотних кодових та фазових GPS-спостережень (10.01.2013 р. та 19.06.2013 р.) з використанням float-методу реалізації PPP-рішення для станцій GLSV та KTVL представлені в табл. 3.2 – 3.4 та на рис. 3.18, 3.19.

Таким чином, як видно з аналізу отриманих результатів, у разі реалізації статичного режиму вимірювань похибки добових float PPP-рішень, отриманих з використанням розроблених автором реалізацій алгоритмів точного позиціонування методом PPP, як показали експерименти, не перевищують ~5–8 мм (з ймовірністю 95%), що підтверджують приклади порівняння з результатами кількох відомих сервісів.

Таблиця 3.2 – Порівняння результатів (окремі приклади) добового статичного PPP-позиціонування (станції у Києві та смт. Кацівелі, Крим) з результатами зарубіжних сервісів

Станція (місто), дата добової сеансу спостережень	Нев'язання PPP-рішень щодо еталонів, м				
	Еталонні координати, м	Сервіс GMV (Іспанія)	Сервіс CSRS (Канада)	Сервіс GAPS (Канада)	PPP(ХНУРЕ)
GLSV (Київ), 10.01.2013 г.	3512888.796584	-0.0017	-0.0086	0.0030	0.0005
	2068979.995670	0.0032	0.0149	0.0052	0.0018
	4888903.258810	0.0057	0.0149	0.0191	0.0115
GLSV (Київ), 19.06.2013 г.	3512888.790912	-0.0093	-0.0029	-0.0043	-0.0055
	2068980.003818	0.0046	0.0068	0.0058	0.0036
	4888903.271024	-0.0005	0.0027	0.0128	0.0064
KTVL (Кацивели) 10.01.2013 г.	3785991.626	-0.0015	0.0033	0.0011	0.0030
	2550749.177	-0.0117	-0.0084	-0.0086	-0.0131
	4439438.286	-0.0127	-0.0087	0.0006	-0.0054
KTVL (Кацивели) 19.06.2013 г.	3785991.626	-0.0112	-0.0053	-0.0071	-0.0036
	2550749.177	-0.0144	-0.0064	-0.0073	-0.0130
	4439438.286	-0.0065	-0.0018	0.0071	0.0049

Таблиця 3.3 – Порівняння результатів (RMS/СКП) добових статичних PPP-визначень координат (у геоцентричній системі координат – ГСК WGS-84) за 35 станціями України (на 10.01.2013 р.) із результатами зарубіжних сервісів. Представлені RMS (СКП) відхилень від середніх оцінок координат станцій, що були отримані від сервісів CSRS, GMV, та розробленого методу PPP

10.01.2013	RMS (X), м	RMS (Y), м	RMS (Z), м
CSRS	0.0034	0.0027	0.0032
GMV	0.0024	0.0034	0.0040
PPP	0.0042	0.0038	0.0032
Mean RMS_XYZ	0.0034	0.0033	0.0034
GAPS	0.0130	0.0087	0.0219
	RMS (N), м	RMS (E), м	RMS (U), м
CSRS	0.0021	0.0017	0.0046
GMV	0.0020	0.0027	0.0047
PPP	0.0032	0.0025	0.0051
Mean RMS	0.0025	0.0023	0.0048
GAPS	0.0067	0.0020	0.0260

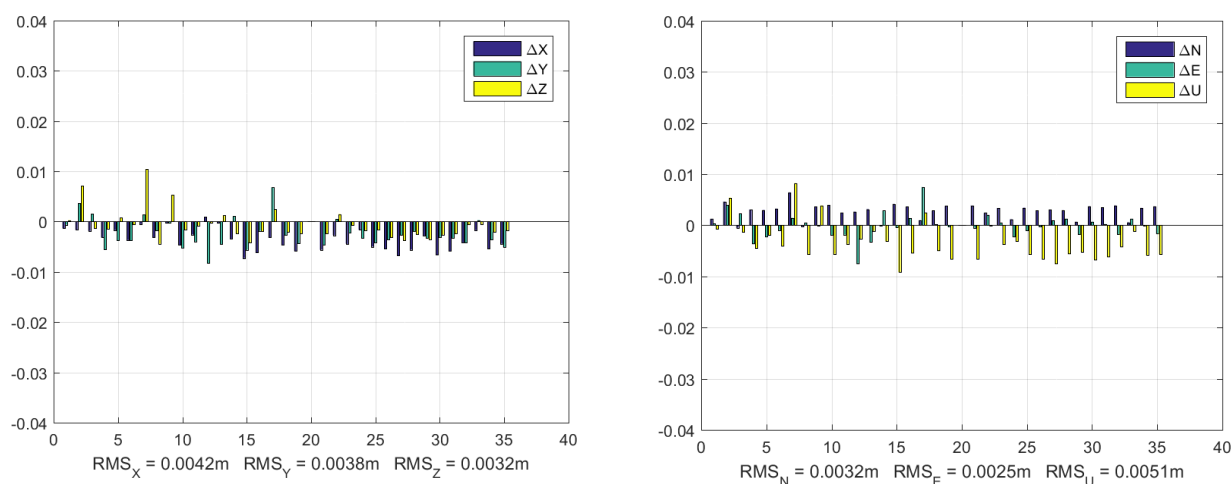


Рисунок 3.18 – Відхилення добового float PPP-рішення (XНУРЕ) від усереднених оцінок координат станцій у ГСК (на 10.01.2013 р.)

Таблиця 3.4 – Порівняння точності (RMS/СКП) добових статичних PPP-визначень за 11 станціями України (на 19.06.2013 р.) із результатами зарубіжних сервісів. Представлені RMS відхилень від середніх оцінок координат станцій (у ГСК WGS-84), отримані від сервісів CSRS, GMV та розробленого методу PPP

19.06.2013	RMS (X), м	RMS (Y), м	RMS (Z), м
CSRS	0.0035	0.0050	0.0037
GMV	0.0017	0.0029	0.0023
PPP	0.0065	0.0037	0.0024
Mean RMS	0.0044	0.0039	0.0028
GAPS	0.0117	0.0083	0.0218
	RMS (N), м	RMS (E), м	RMS (U), м
CSRS	0.0022	0.0035	0.0058
GMV	0.0014	0.0028	0.0026
PPP	0.0047	0.0028	0.0057
Mean RMS	0.0031	0.0030	0.0049
GAPS	0.0069	0.0039	0.0249

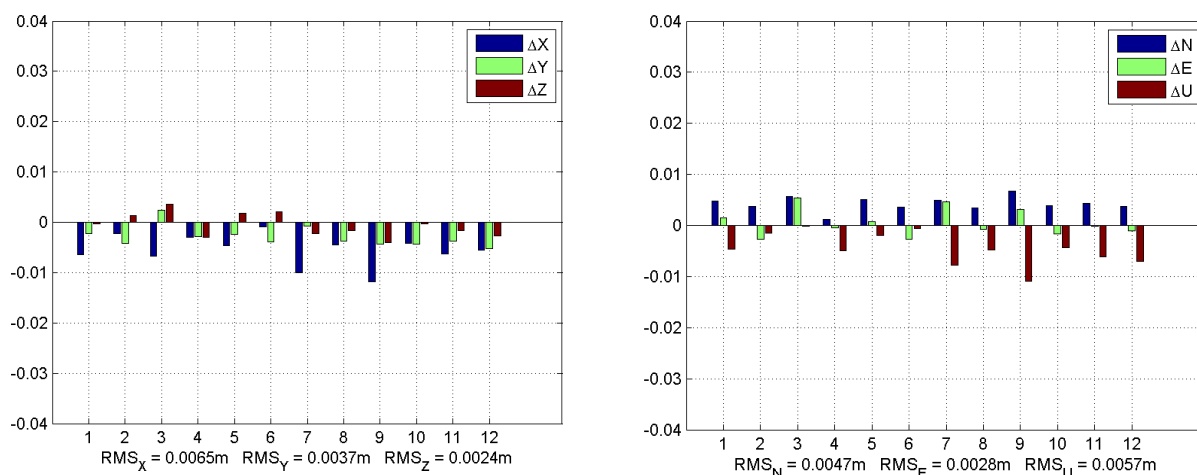
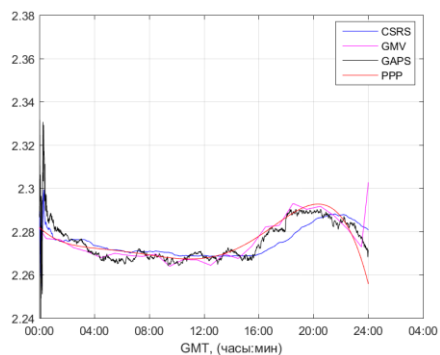
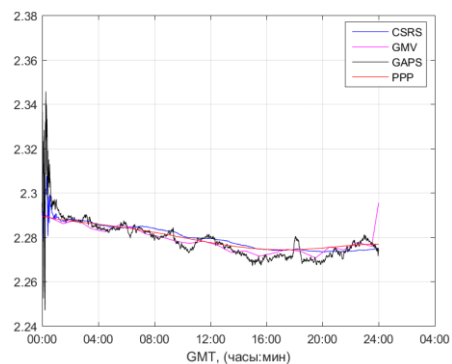


Рисунок 3.19 – Відхилення (у метрах) добового float PPP-рішення від усереднених оцінок координат станцій у ГСК WGS-84 (на 19.06.2013 р.)

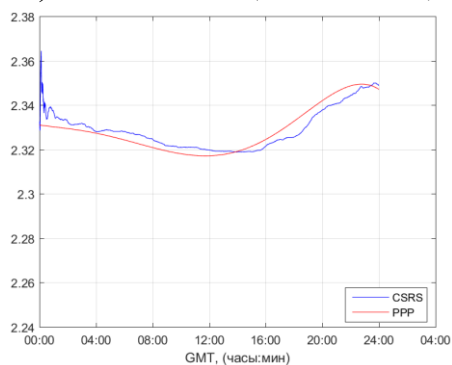
Ілюстрації порівняння добового ходу оцінок zenітних тропосферних затримок (ЗТЗ) запропонованим методом PPP з результатами оцінок ЗТЗ сервісів CSRS, GMV, GAPS для станцій GLSV, KHAR, MIKL, KTVL наведено на рис. 3.20 (на 10.01.2013 р. та на 19.06.2013 р.). Оцінки ЗТЗ дані у метрах.



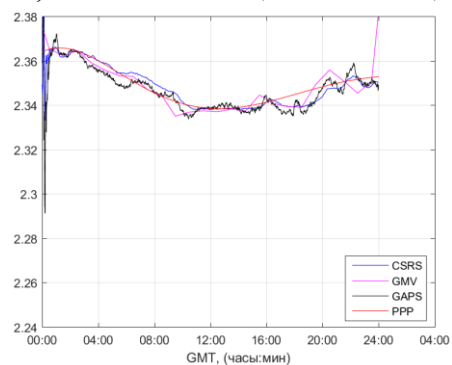
а) GLSV, ЗТЗ (10.01.2013)



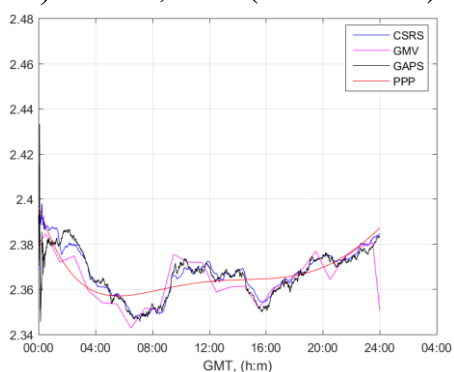
б) KHAR, ЗТЗ (10.01.2013)



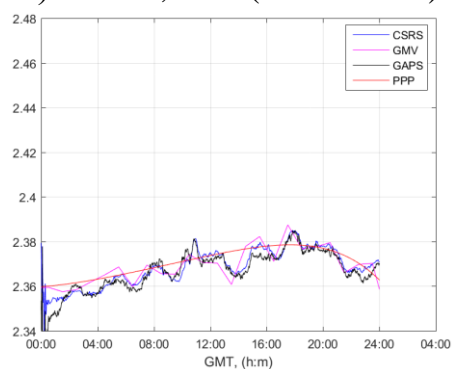
в) MIKL, ЗТЗ (10.01.2013)



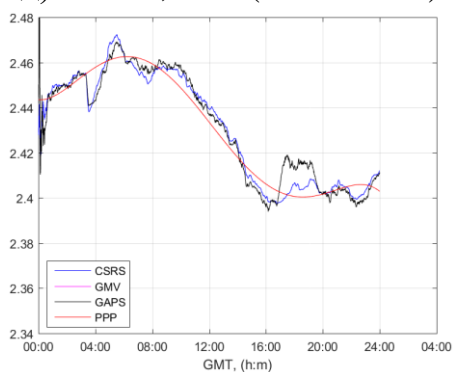
г) KTVL, ЗТЗ (10.01.2013)



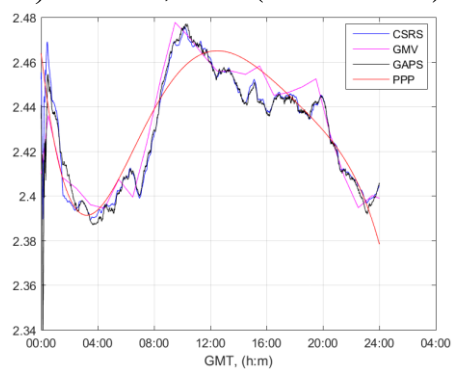
д) GLSV, ЗТЗ (19.06.2013)



е) KTVL, ЗТЗ (19.06.2013)



ж) MIKL, ЗТЗ (19.06.2013)



з) KTVL, ЗТЗ (19.06.2013)

Рисунок 3.20 – Зміна в часі оцінок ЗТЗ (в метрах), отриманих різними сервісами на добових інтервалах 10.01.2013 р. та 19.06.2013 р.

3.4.3 Кінематичний режим координатних визначень

Ілюстрація експериментальних результатів обробки двохчастотних кодових та фазових GPS-спостережень з використанням float-методу реалізації кінематичного PPP-рішення для статичної станції GLSV представлена на рис. 3.21 (для інтервалу накопичення 2 години). На рисунку зображені нев'язання координатних рішень (у топоцентричній місцевій системі координат – МСК) відносно еталонних значень.

Для тестування розробленої реалізації float-методу PPP на реальних натурних кінематичних вимірюваннях були використані ГНСС/GPS-спостереження двохчастотного приймача (NovAtel, Канада), встановленого на борту літака АН-158. Сеанс GPS-спостережень був зареєстрований 22 жовтня 2010 р., тривалість польоту становила близько 2,5 годин (7:52:50 – 10:24:45).

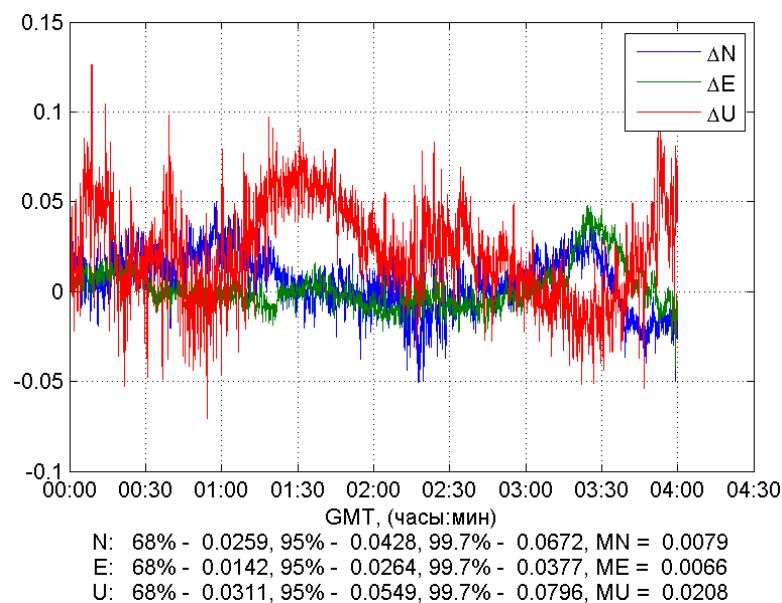


Рисунок 3.21 – Нев'язання (у метрах) кінематичного PPP-рішення відносно еталону

Зазначені спостереження були також опрацьовані в центрі обробки CSRS (Канада), де координати літака були визначені методом PPP. Траєкторія літака,

яка сформована в результаті обробки даних у центрі CSRS, була прийнята як еталонна. З нею порівнювалися оцінки параметрів траєкторії, одержані з використанням розробленого автором float-методу PPP.

Для того, щоб оцінити ефективність розробленого алгоритмічного і програмного забезпечення при різній тривалості інтервалів вимірювань, була також проведена їх обробка на менших інтервалах: 1 година, 15 хвилин і 5 хвилин.

Нижче на рис. 3.22 – 3.48 показані результати визначення траєкторії літака АН-158 та порівняння її з еталонною траєкторією через розрахунки різниць – нев'язань.

Повний інтервал спостережень (~2,5 години)

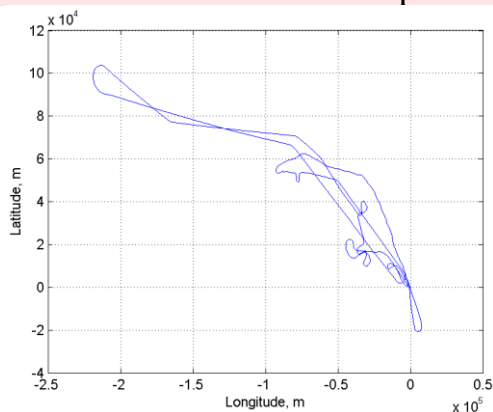


Рисунок 3.22 – Траєкторія польоту літака в горизонтальній проекції (начало топоцентричної МСК – в першій точці траєкторії)

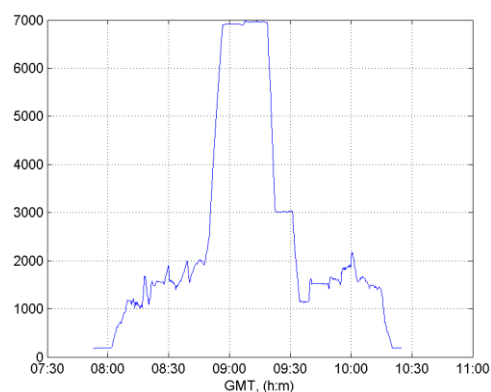


Рисунок 3.23 – Еліпсоїдальна висота польоту, м

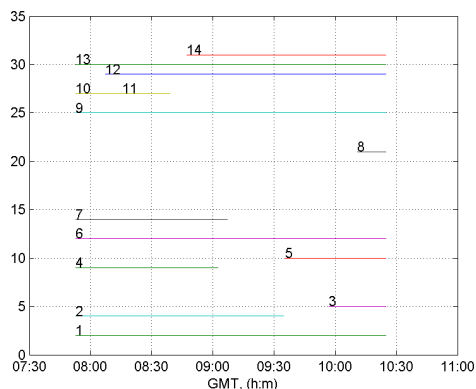


Рисунок 3.24 – Інтервали радіовидимості (після препроцесінгу GPS-спостережень)

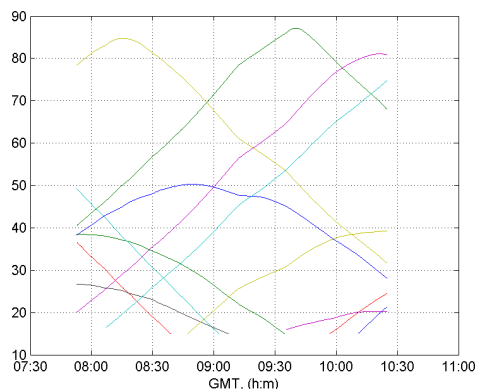


Рисунок 3.25 – Кути місця ($\beta_{\min} = 15^\circ$)

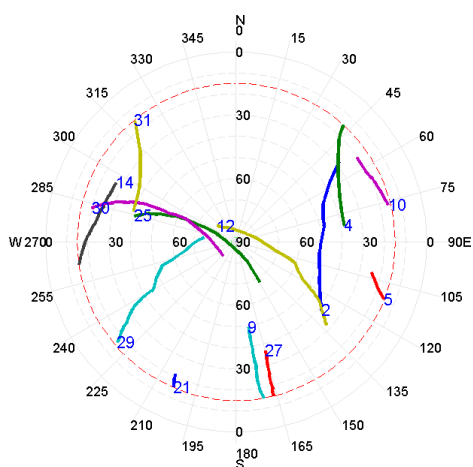


Рисунок 3.26 – «Рисунок неба» (радіовидимість супутників в системі координат «азимут – кут місця»)

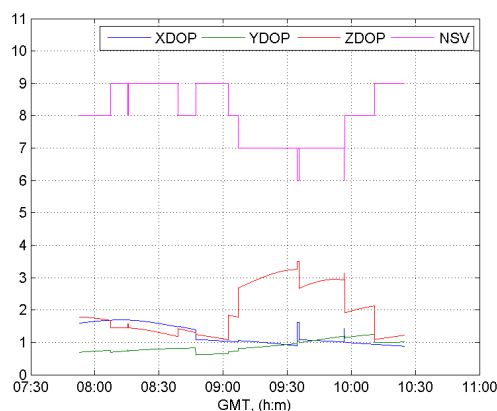


Рисунок 3.27 – Кількість спостережуваних супутників GPS і графіки DOP (Dilution Of Precision – геометричні фактори)

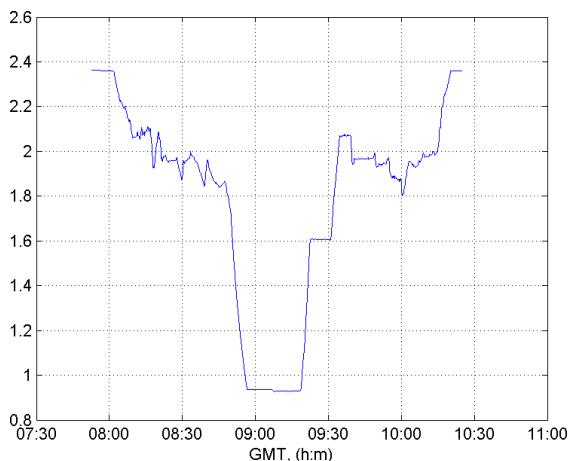


Рисунок 3.28 – Зміна ЗТЗ (зенітної тропосферної затримки) в ході польоту (тропосферна модель MOPS)

Стандартне «безіоносферне» (Ionosphere-Free) кодове PPP-рішення C1P2 IF

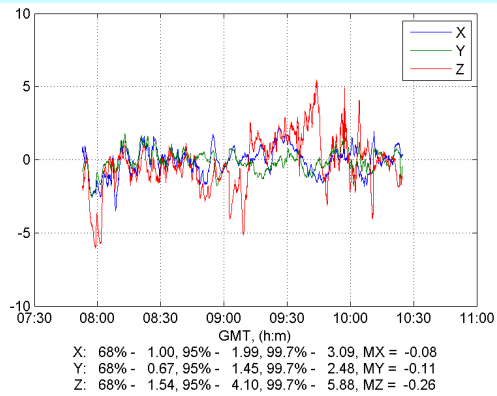


Рисунок 3.29 – Відхилення (нев'язання) кодового C1P2 IF рішення від еталонного в Грінвічській системі координат, м

Запропоноване «безіоносферне» (Ionosphere-Free) кодово-фазове рішення C1 IF

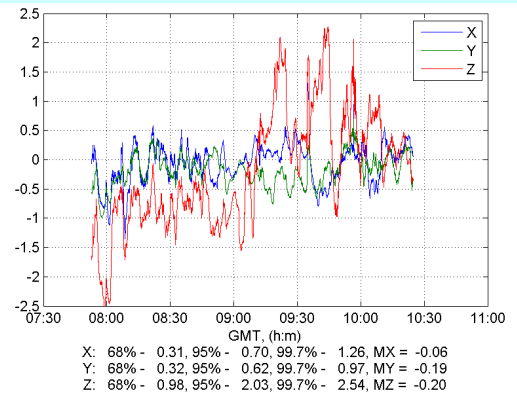


Рисунок 3.30 – Відхилення (нев'язання) кодового C1 IF рішення від еталонного в Грінвічській системі координат, м

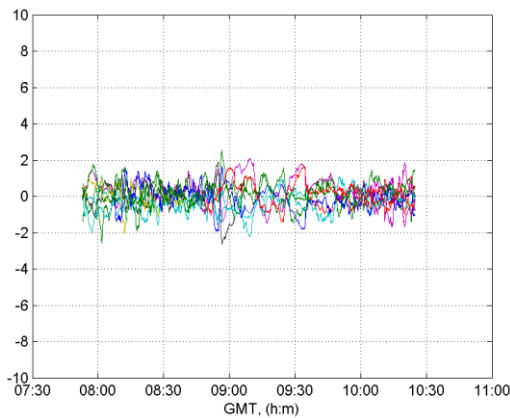


Рисунок 3.31 – Залишки (residuals) стандартного кодового C1P2 IF рішення, м

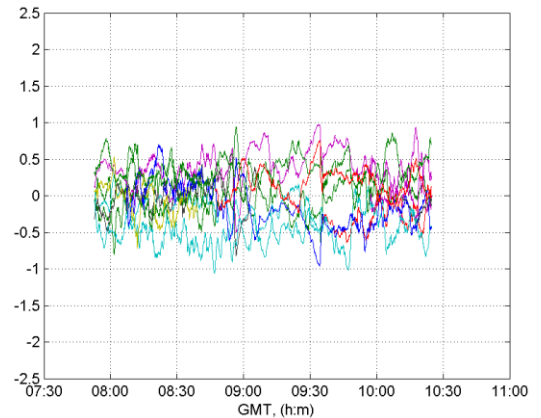


Рисунок 3.32 – Залишки (residuals) запропонованого кодового C1 IF рішення, м

«Безіоносферне» (Iono-Free) фазове float PPP-рішення

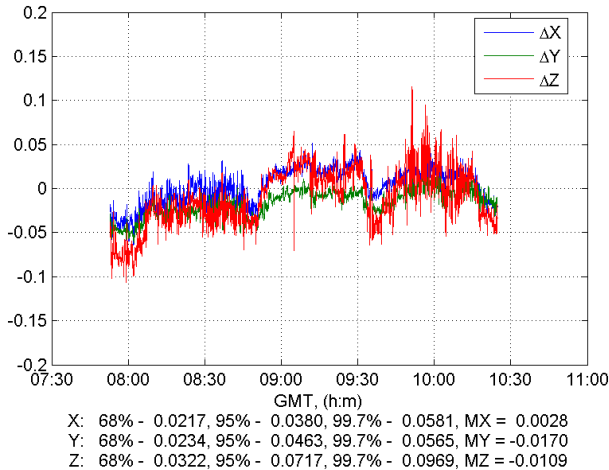


Рисунок 3.33 – Відхилення (нев'язання) фазового float PPP-рішення від еталонного в Гринвічській системі координат, м

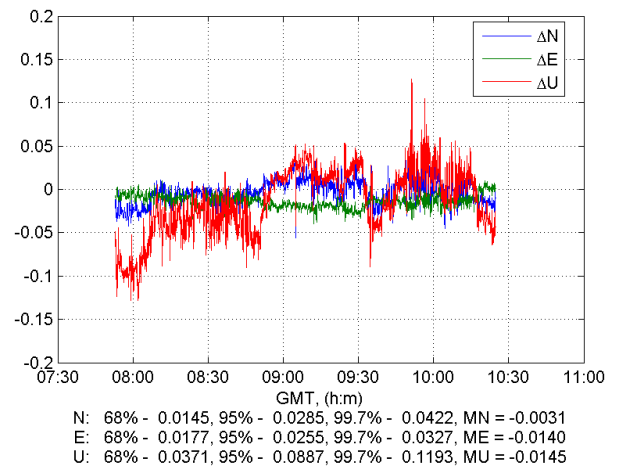


Рисунок 3.34 – Відхилення (нев'язання) фазового float PPP-рішення від еталонного в локальній* топоцентричній МСК, м

*Локальні координати в МСК [3.26]: вісь U направлена в зеніт, вісь N - на північ, а вісь E - на схід.

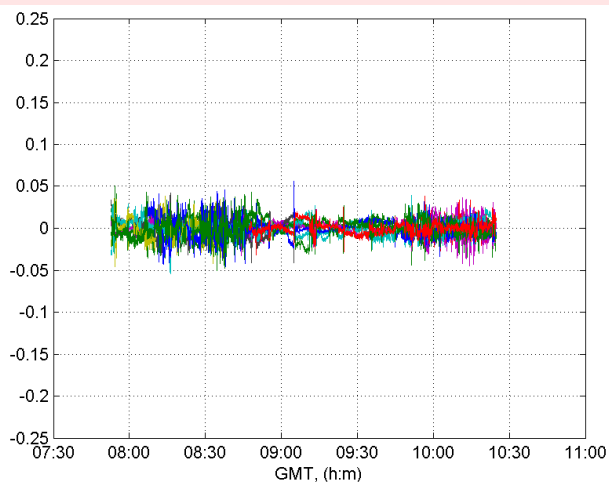


Рисунок 3.35 – Залишки (residuals) фазового float PPP-рішення, м

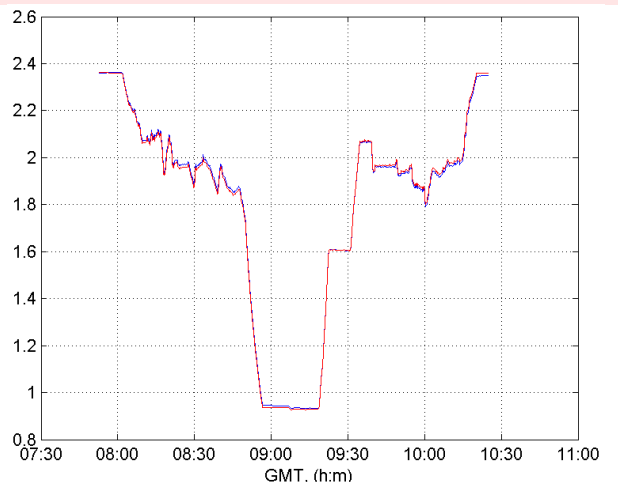


Рисунок 3.36 – Зміна ЗТЗ в ході польоту (в метрах); «синя» лінія відповідає розрахунку по тропосферній моделі MOPS; «червона» лінія відповідає уточненій в ході PPP-рішення тропосферної моделі

Інтервал спостережень 1 година (8:17:30 – 9:17:30)

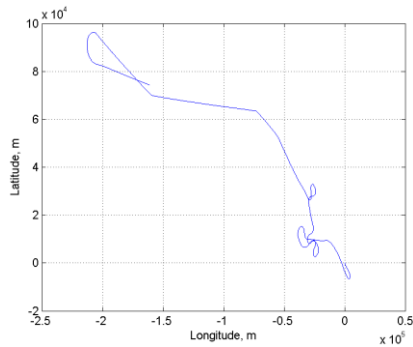


Рисунок 3.37 – Траєкторія польоту літака в горизонтальній проекції (начало топоцентричної МСК – в першій точці траєкторії)

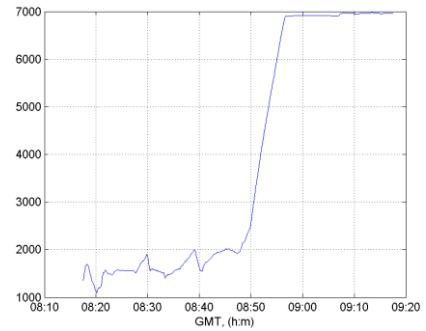


Рисунок 3.38 – Висота польоту, м

«Безіоносферне» (Iono-Free) фазове float PPP-рішення

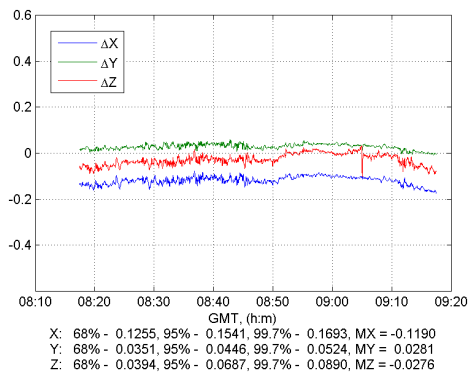


Рисунок 3.39 – Відхилення (нев'язання) фазового float PPP-рішення від еталонного в Грінвічській системі координат, м

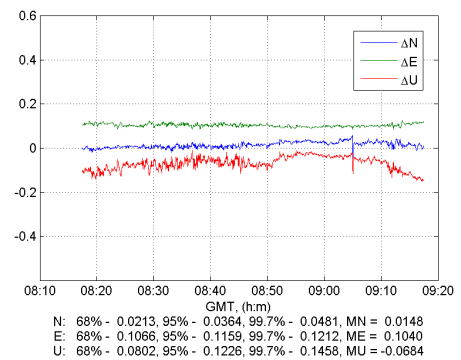


Рисунок 3.40 – Відхилення (нев'язання) фазового float PPP-рішення від еталонного в локальній топоцентричній МСК, м

Інтервал спостережень 15 хв. (8:40:00 – 8:55:00)

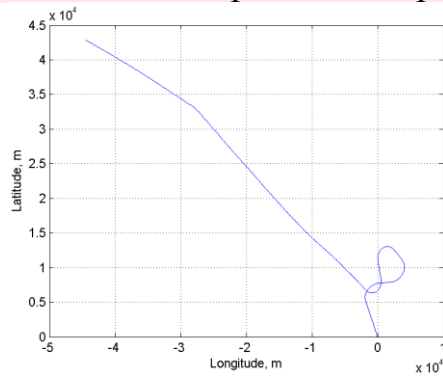


Рисунок 3.41 – Траєкторія польоту літака в горизонтальній проекції (начало топоцентричної МСК – в першій точці траєкторії)

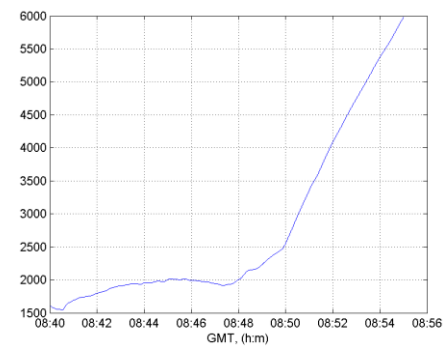


Рисунок 3.42 – Висота польоту, м

«Безіоносферне» (Iono-Free) фазове float PPP-рішення

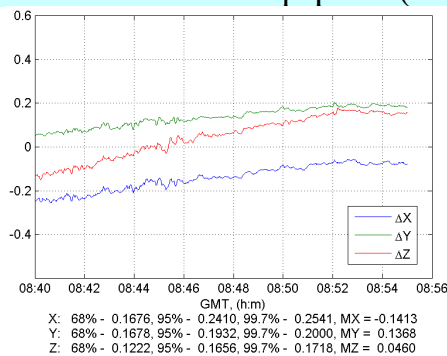


Рисунок 3.43 – Відхилення (нев'язання) фазового float PPP-рішення від еталонного в Грінвічській системі координат, м

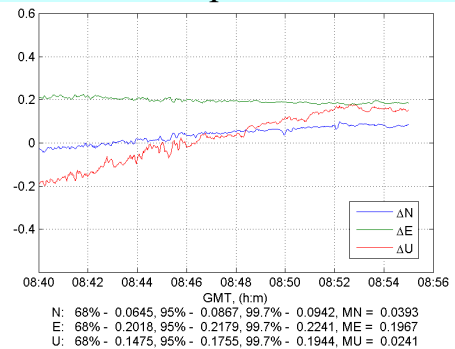


Рисунок 3.44 – Відхилення (нев'язання) фазового float PPP-рішення від еталонного в локальній топоцентричній МСК, м

Інтервал спостережень 5 хв. (8:45:00 – 8:50:00)

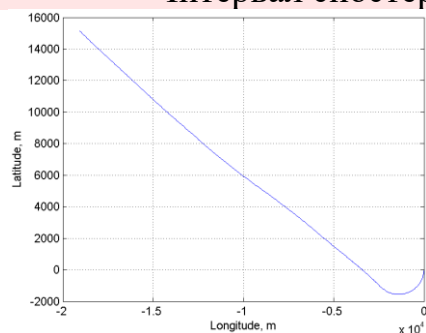


Рисунок 3.45 – Траєкторія польоту літака в горизонтальній проекції (начало топоцентричної МСК – в першій точці траєкторії)

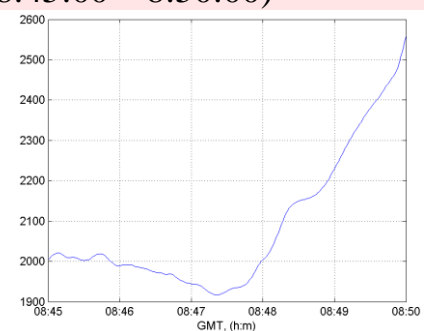


Рисунок 3.46 – Висота польоту, м

«Безіоносферне» (Iono-Free) фазове float PPP-рішення

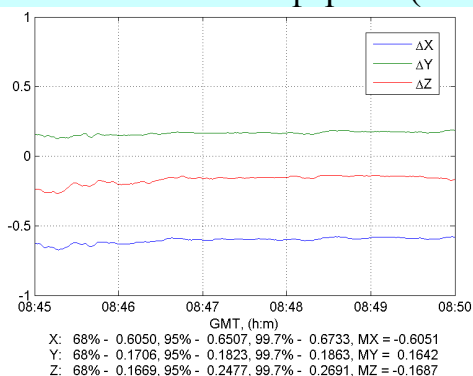


Рисунок 3.47 – Відхилення (нев'язання) фазового float PPP-рішення від еталонного в Грінвічській системі координат, м

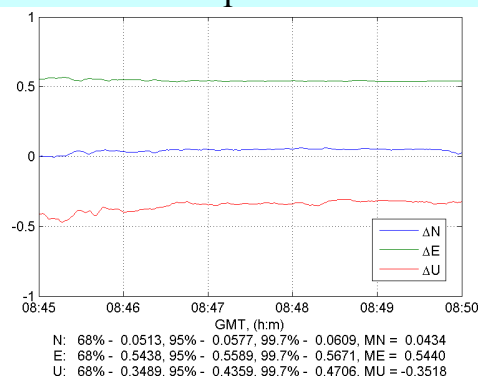


Рисунок 3.48 – Відхилення (нев'язання) фазового float PPP-рішення від еталонного в локальній топоцентричній МСК, м

Оцінки середньоквадратичних похибок (СКП/RMS) фазового рішення CSRS (версія ПЗ 2.26.1) лежать в межах: $\sim 2,5 - 5$ см по плановим координатам та $\sim 6 - 7,5$ см по висоті. СКП відхилень рішень PPP-CSRS не перевищують: $\sim 1,8$ см по плановим координатам та $\sim 3,7$ см по висоті. Таким чином, сумарні похибки (СКП/RMS) кінематичного float PPP-рішення на інтервалі спостережень $\sim 2,5$ години не перевищують $\sim 3 - 5$ см по плановим координатам і $\sim 7 - 8$ см по висоті.

При зменшенні інтервалу спостережень (взяті інтервали: 1 година, 15 хв., 5 хв.) похибки (СКП/RMS) кінематичного фазового float PPP-рішення очікувано зростають і досягають значень, зведених в порівняльну табл. 4.2.1.

Таблиця 3.5 – Порівняння похибок кінематичного PPP-рішення

Інтервал спостережень	Оцінки СКП/RMS похибок визначення поточних координат літака АН-158
$\sim 2,5$ години	$\sim 3 - 5$ см (в плані), $\sim 7 - 8$ см (по висоті)
1 година	$\sim 5 - 6$ см
15 хв.	~ 10 см
5 хв.	~ 20 см

В цілому, апостеріорна оцінка точності кінематичних координатно-часових визначень навколоземних об'єктів з використанням запропонованих автором реалізацій float-методу PPP показала надійне досягнення сантиметрової/дециметрової точності (в залежності від інтервалу спостережень).

3.4.4 Дослідження збіжності float-методу

Нижче представлені оцінки збіжності статичних float PPP-рішень – інтервали часу досягнення заданих порогових значень похибок координат (як планових, так і висотних складових) з ймовірністю $P \approx 95\%$. Для порогу $\Pi = 1,0$ м середній час збіжності становить $t_{cp} \approx 1,5$ хв., а максимальне значення (з ймовірністю $P \approx 95\%$) становить $t_{max} \approx 3$ хв.

Для інших порогових значень інтервали збіжності наступні:

$\Pi=0,3$ м	$t_{cp} \approx 5,5$ хв., $t_{max} \approx 17$ хв.
$\Pi=0,1$ м	$t_{cp} \approx 17$ хв., $t_{max} \approx 60$ хв.
$\Pi=0,05$ м	$t_{cp} \approx 31,5$ хв., $t_{max} \approx 92$ хв.
$\Pi=0,025$ м	$t_{cp} \approx 71$ хв., $t_{max} \approx 167$ хв.

На рис. 3.49 показані експериментальні криві збіжності «плаваючих» (float) PPP-рішень як функцій інтервалу накопичення спостережень.

Середній час збіжності (з ймовірністю $P \approx 95\%$) float PPP-рішень для статичного режиму вимірювань становить ~ 30 хв. для порогу стійкого досягнення точності 5 см. Максимальний час збіжності може досягати ~ 90 хв. для такого ж порогу.

Для кінематичного float PPP-рішення, як показало тестування, середній час збіжності до рівня похибок координат ~ 5 см складає $\sim 1,5-2,0$ години.

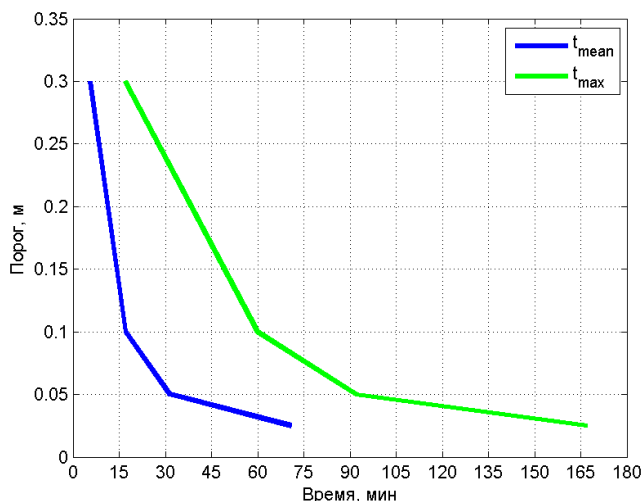


Рисунок 3.49 – Приклад оцінки збіжності float PPP-рішень для статичного режиму вимірювань

3.5 Результати тестування і дослідження запропонованої реалізації визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів float-методом PPP

3.5.1 Вихідні дані для тестування

Для цілей тестування експериментального програмного забезпечення виконано збір та аналіз бортових GPS-спостережень спеціалізованих зарубіжних НКА COSMIC/FORMASAT-3 та GRACE. Були використані добові GPS-спостереження (за 10 січня та 19 червня 2013 р.) угруповання НКА COSMIC/FORMASAT-3 (COSMIC) (див. підрозділ 2.8 та науково-технічні звіти [36, 37]).

Вибрані спостереження пройшли попередню обробку (контроль якості даних, усунення циклічних фазових стрибків тощо) з використанням вітчизняного програмного комплексу ОСТАВА [142-144], модернізованого під дане завдання. Подальша обробка виконувалася в режимі позиціонування PPP згідно з розробленими алгоритмами та процедурами. Крім даних бортових GPS-спостережень НКА виконано ретельний пошук та аналіз доступних джерел по

супутниках COSMIC та GRACE, що дозволило отримати важливу додаткову інформацію про параметри бортових вимірювальних систем НКА та параметри орієнтації та положення приймальних антен та самих космічних апаратів.

3.5.2 Основні результати тестування

На рис. 3.50 – 3.53 наведені приклади-ілюстрації експериментальних результатів координатних двохчастотних float PPP-рішень та оцінки їх точності для одного із супутників (FM1) угруповання COSMIC. В якості еталонних значень при апостеріорній оцінці точності були використані оцінки поточних координат НКА (взяті з архіву CDAAC) з декларованими похибками на рівні ~ 5 см, отримані виконавцями космічної програми COSMIC шляхом комбінованої обробки бортових GPS-спостережень кінематичним та динамічним методами.

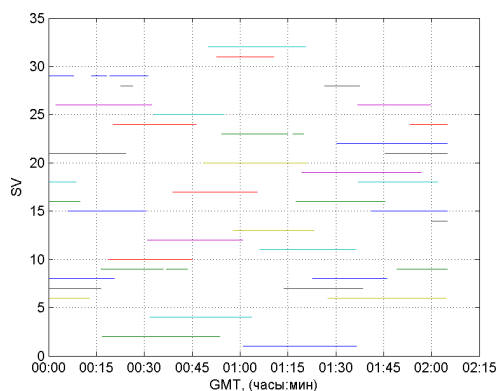


Рисунок 3.50 – Зони радіобачення супутників GPS щодо НКА

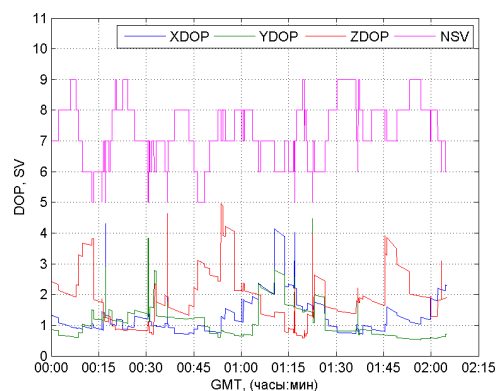


Рисунок 3.51 – Геометричні фактори поточного робочого сузір'я супутників GPS

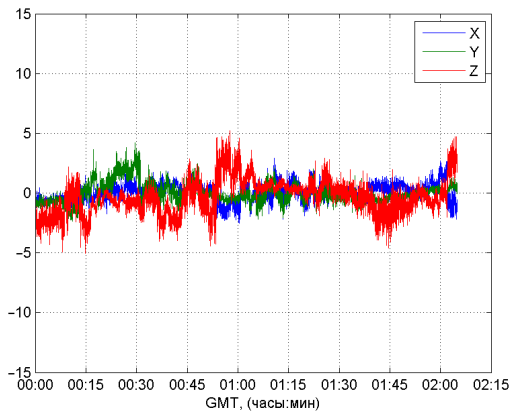


Рисунок 3.52 – Нев’язання (в метрах) кодового P1-рішення відносно еталона

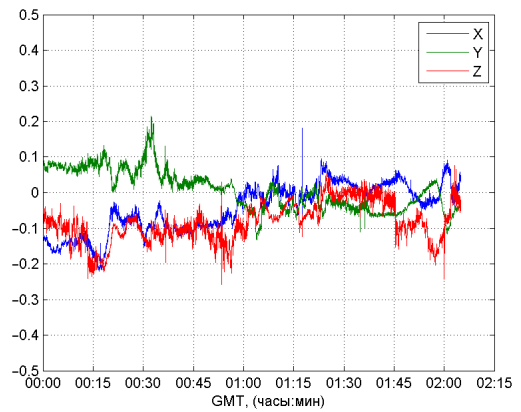


Рисунок 3.53 – Нев’язання (в метрах) float IF-рішення щодо еталона

На вказаних рисунках показано:

- зони радіобачення супутників GPS з борту НКА COSMIC на інтервалі часу ~ 2 години (приблизно один виток НКА навколо Землі) від початку доби 10 січня 2013 р.;

- геометричні фактори поточного робочого сузір’я супутників GPS для виділеного інтервалу спостережень, які характеризують погіршення точності координатного рішення відносно точності спостережень;

- результати автономного кодового P1-рішення – невязання (в метрах) рішення відносно еталонної траєкторії НКА;

- результати автономного Iono-Free (IF) float PPP-рішення – показані невязання (в метрах) по відношенню до еталонної траєкторії НКА.

В цілому експериментальні результати показали, що запропоновані алгоритми обробки бортових GPS-спостережень дозволяють визначати поточні координати НКА з похибками $\sim 10 \div 20$ см ($P \approx 95\%$) при рівні МНК-залишків $\sim 0,01 - 0,02$ м. Останнє свідчить про хорошу внутрішню збіжність рішень на рівні похибок фазових вимірів.

Запропоновані методи та алгоритми досягнення float (та fixed – див. розділ 4) PPP-рішень передбачають спільну обробку кодових (або кодово-фазових) координатних рішень та фазових неоднозначних спостережень (та їх лінійних комбінацій) на відміну від безіоносферних кодових псевдовідстаней,

які, як правило, використовуються у відомих алгоритмах обробки недиференціальних спостережень. Одночасно при цьому автоматично усувається необхідність використовувати складнішу схему обробки спостережень, відому як «Decoupled Clock Model» (див. розділ 1), що передбачає спільне визначення інформаційних та неінформаційних параметрів з роздільним оцінюванням кодових та фазових розбіжностей шкал часу ГНСС та споживача.

Так, при вирішенні задач відшукування float і fixed PPP-рішень у даній роботі запропоновано використовувати в якості проміжного («апріорного») або модифіковане рішення P1, або більш точно – комбінованого кодово-фазового координатного рішення з використанням прирощень фазових безіоносферних спостережень. Це істотно (до $\sim 20\div 30\%$) дає збільшення надійності РФН і зменшення інтервалу його досягнення (збіжності/ініціалізації). Точність проміжних координатних рішень відіграє дуже значну роль у досягненні необхідної надійності РФН та фінальних фазових IF-рішень сантиметрової точності.

Координатне модифіковане рішення P1 (або C/A-рішення) утворюється шляхом обробки спостережень кодових псевдовідстаней частоти L1 GPS з введенням іоносферних корекцій, отриманих шляхом застосування відомої процедури «leveling» («підтягування») безгеометричної фазової лінійної комбінації до «без геометричної» кодової комбінації з попереднім вводом до неї відповідних DCB-поправок.

На рис. 3.54 – 3.57 яскраво ілюструється суттєва відмінність точності кодового модифікованого P1-рішення та стандартного кодового «безіоносферного» (IF) рішення P1P2 (див. також підрозділ 3.3).

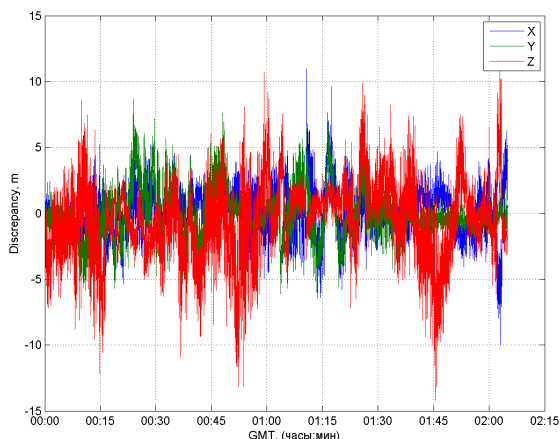


Рисунок 3.54 – Нев'язання стандартного «безіоносферного» кодового рішення P1P2

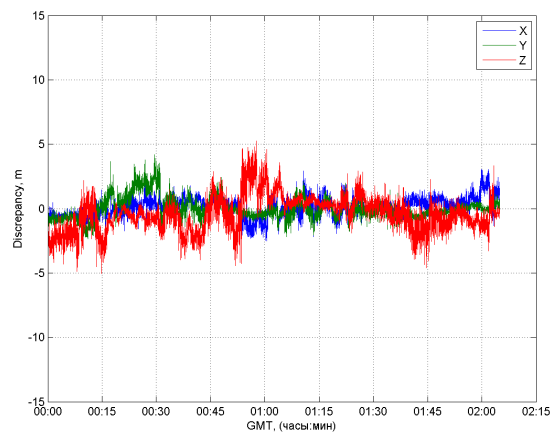


Рисунок 3.55 – Нев'язання модифікованого «безіоносферного» кодового рішення P1

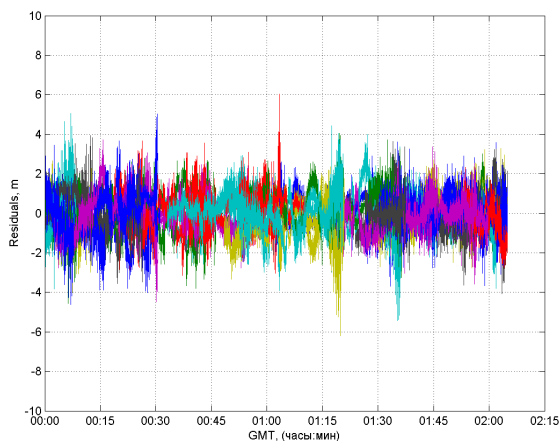


Рисунок 3.56 – Залишки (residuals) стандартного «безіоносферного» кодового рішення P1P2

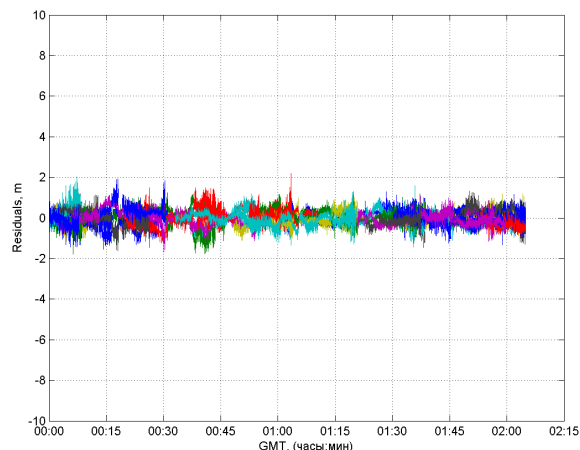


Рисунок 3.57 – Залишки (residuals) модифікованого «безіоносферного» кодового рішення P1

В ході досліджень значну увагу також було приділено розробці та тестуванню моделей похибок GPS-спостережень, оцінці точності координатних визначень з використанням моделей похибок спостережень, а також евристичному уточненню складових цієї моделі. Такі моделі, у поєднанні з апостеріорною оцінкою точності (у разі доступності незалежного джерела надійної еталонної інформації) дозволяють не тільки прогнозувати точність запланованих траєкторних визначень НКА, але й виконують важливу функцію визначення області пошуку дискретного фазового рішення в ході РФН для

досягнення найбільшої точності позиціонування.

Детальний розгляд усіх значущих джерел і складових похибок недиференціальних GPS-спостережень представлено в роботах [5, 146, 147]. На цьому ж етапі досліджень для float- і fixed-рішень були уточнені такі рівні (СКП/RMS) складових похибок IF-спостережень:

- флуктуаційні похибки та багатопроменевість ~1,6 см;
- похибки даних годинників GPS супутників ~4 см;
- похибки ефемерид GPS-супутників ~2 см;
- похибки еталонної траєкторії ~1,7 см;
- систематичні похибки проміжного кодового рішення розраховувалися за окремою виведеною емпіричною формулою.

Використання зазначених складових при обчислення кореляційних матриць похибок координатних визначень (float- і fixed-рішень) показало прийнятну узгодженість отриманих апостеріорних та апріорних (за моделлю похибок) оцінок точності. Це підтверджують результати розрахунків та зіставлення нев'язань PPP-оцінок поточних координат НКА відносно еталона (апостеріорна оцінка точності) та модельних оцінок похибок визначень (апріорна оцінка точності) для кожного з розглянутих рішень – кодового, кодово-фазового float IF-рішення та фазового дискретного рішення. Ілюстрації-прикладу зіставлення оцінок точності визначення поточних координат НКА для кодового та кодово-фазового float IF-рішення наведено на рис. 3.58 – 3.63. Відображені нев'язання (в метрах) згаданих рішень відносно еталона та розрахункові (згідно з запропонованою моделлю похибок) довірчі інтервали (з ймовірністю $p=0,997$) похибок рішення.

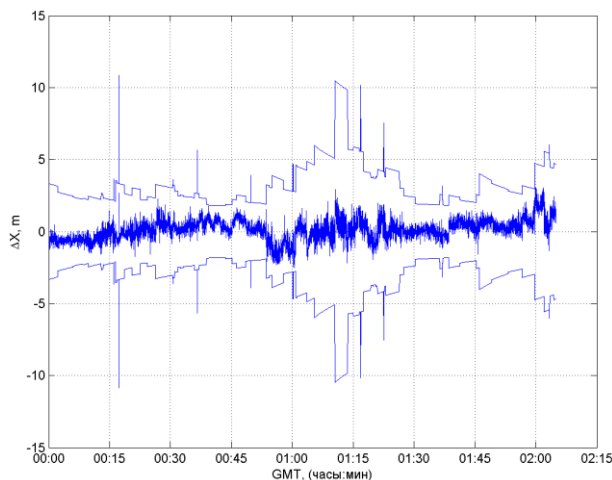


Рисунок 3.58 – Нев'язання координат X кодового рішення P1

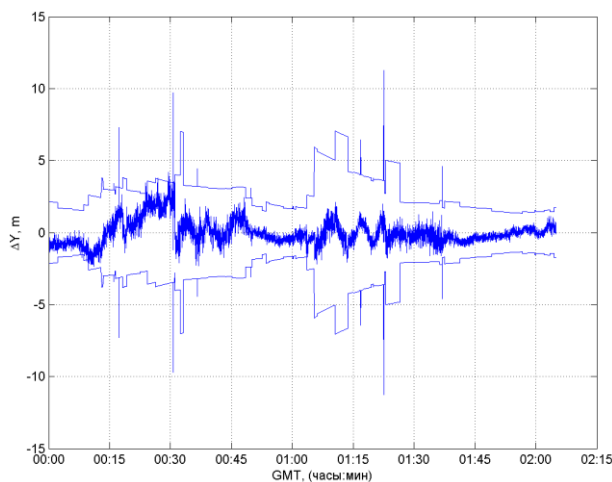


Рисунок 3.60 – Нев'язання координати Y кодового рішення P1

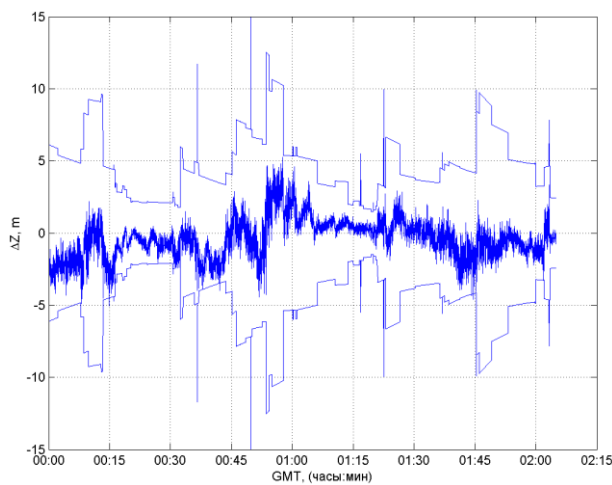


Рисунок 3.62 – Нев'язання координат Z кодового рішення P1

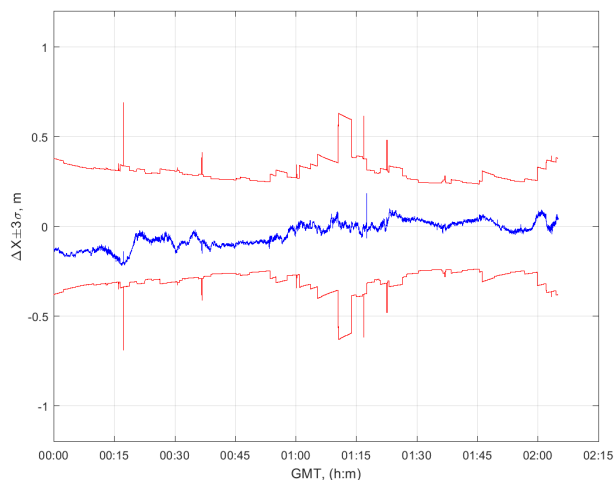


Рисунок 3.59 – Нев'язання координати X кодово-фазового float IF-рішення

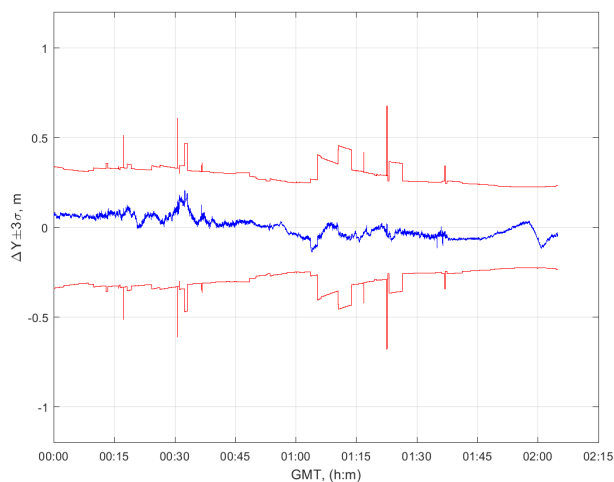


Рисунок 3.61 – Нев'язання координати Y для кодово-фазового float IF-рішення

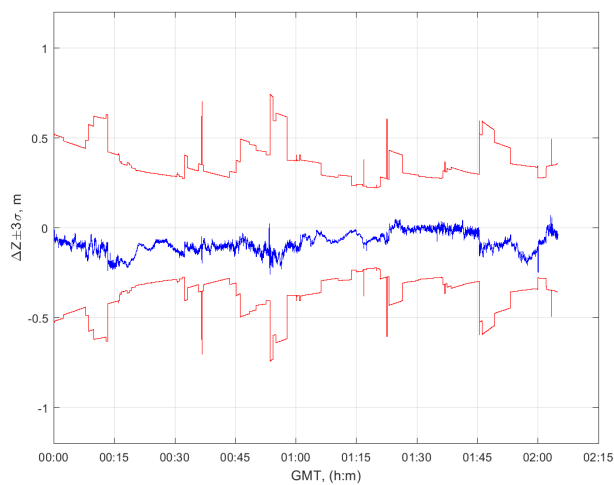


Рисунок 3.63 – Нев'язання координати Z для кодово-фазового float IF-рішення

Дуже важливою характеристикою PPP-рішень є їхня збіжність/ініціалізація (див. також підрозділ 2.1), тобто, такий інтервал накопичення вимірювальної інформації, для якого досягається стійке рішення із заданим рівнем точності (для float IF-рішення), або досягається надійне розв'язання фазової неоднозначності (РФН) у разі виконання дискретного цілочисельного IF-рішення.

Приклади оцінок функцій збіжності кодово-фазового та «чисто» фазового (тобто без використання проміжного кодового P1-рішення) float IF-рішень показані на рис.3.65 та 3.66.

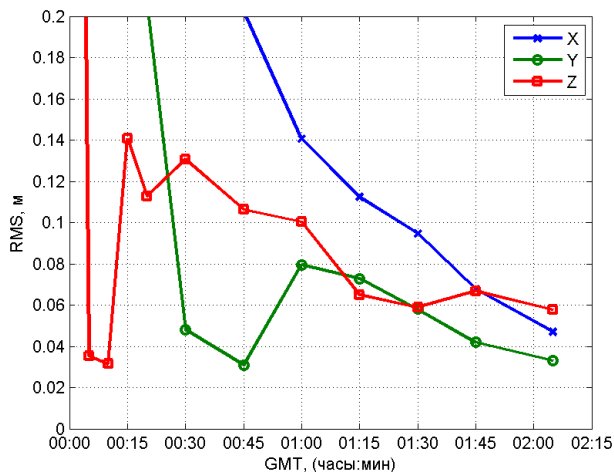


Рисунок 3.64 – Зміна СКП похибок координат (кодово-фазове float IF-рішення) як функцій величини інтервалу спостереження

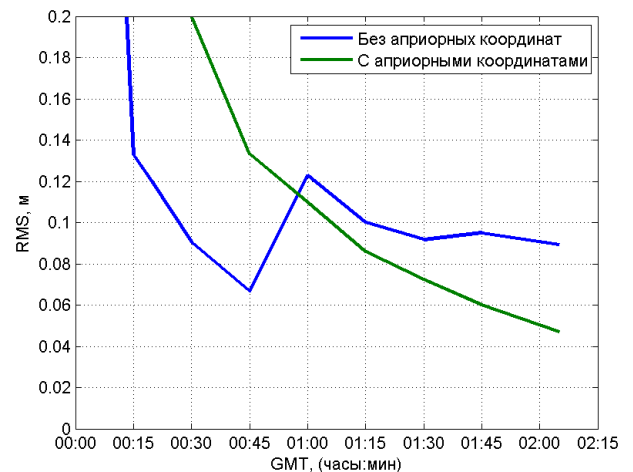


Рисунок 3.65 – Зміна середніх значень СКП похибок координат: кодово-фазове рішення – зелена лінія; «чисто» фазове рішення – синя лінія

На рисунку 3.65 показаний приклад зміни оцінок середніх (за трьома координатами) значень апостеріорних похибок (СКП/RMS) визначення координат НКА для «чисто» фазового float IF-рішення (синя лінія). Зеленою лінією показаний приклад подібної залежності для кодово-фазового float IF-рішення. «Чисто» фазове IF-рішення спочатку сходиться швидше кодово-фазового, але зі збільшенням інтервалу спостереження швидкість збіжності суттєво зменшується і в кінці двогодинного інтервалу спостереження точність

кодово-фазового рішення суттєво перевищує точність «чисто» фазового рішення.

Визначення складових вектору швидкості (СВШ) НКА здійснювалося з використанням фінальних (найточніших) координатних PPP-рішень, оскільки найчастіше архівні RINEX-файли спостережень НКА не містять доплерівських вимірювань. Для вирішення цього завдання був розроблений і верифікований відповідний спеціальний алгоритм оцінювання СВШ НКА, що використовує згладжування координат і відбраковування аномалій, а також враховує плавність руху НКА, для яких друга і вищі похідні координат НКА невеликі.

Апостеріорна оцінка точності, отримана шляхом порівняння з еталонними значеннями, показала, що складові вектору швидкості НКА визначаються запропонованим способом з похибками, що не перевищують $\sim 1 \div 2$ мм/с ($P \approx 95\%$).

Загалом експериментальні дослідження показали, що з використанням розроблених технологій досягається стійке визначення координат НКА (безіоносферні float PPP-рішення) з похибками $\sim 10 \div 20$ см ($P \approx 95\%$). Середні інтервали збіжності «плаваючого» float PPP-рішення із зазначеними похибками, як і було показано раніше, становлять $\sim 1,5 \div 2$ години.

3.6 Пропозиції щодо подальшого розвитку та вдосконалення float-методу

Float-метод PPP-позиціонування – простий та надійний метод отримання фазового рішення високої точності. Єдиний недолік методу – великий час збіжності рішення. Для скорочення часу збіжності рішення та підвищення точності позиціонування необхідно:

- підвищувати точність проміжного рішення;
- адаптувати запропоновані методи та алгоритми для обробки мультисистемних (GPS, Galileo, ГЛОНАСС, BeiDou) ГНСС-спостережень з метою підвищення надійності і точності визначення параметрів руху НКА та позиціонування навколоземних об'єктів;

– адаптувати розроблені методи та алгоритми до роботи в умовах реального часу та реалізувати режим PPP RTK (Real Time Kinematic);

– адаптувати та розвивати запропоновані методи і алгоритми автономного статичного та кінематичного PPP-позиціонування сантиметрового рівня точності до використання трьохчастотних (багаточастотних) спостережень сигналів кількох або всіх функціонуючих ГНСС з реалізацією дискретного/цілочисельного розв’язання фазової неоднозначності і мінімізації інтервалу ініціалізації/збіжності PPP-рішень до рівня ≤ 1 хв.

Висновки по розділу 3

1. У розділі наведено результати розробки та досліджень запропонованого комплексу алгоритмів float-методу оцінки (розв’язання) фазової неоднозначності двохчастотних фазових ГНСС-спостережень та високоточного позиціонування недиференціальним (автономним) методом PPP навколоземних/наземних об’єктів (у статичному і кінематичному режимах) та визначень параметрів руху НКА (у кінематичному режимі спостережень). Запропоновано схему реалізації методу та алгоритмів точного PPP-позиціонування. Розглянуто принципово важливе питання отримання проміжного рішення, від якого залежить точність отримання фінального рішення та надійність розв’язання фазової неоднозначності. Наведено результати float-методу PPP-позиціонування для наземних та космічних додатків. Сформульовані пропозиції щодо подальшого розвитку та вдосконалення float PPP-методу.

2. Проведення натурних експериментів та використання множини результатів спостережень підтвердили необхідний рівень достовірності отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи. Досліджено збіжність методу PPP. Експериментально підтверджено, що при використанні розробленого комплексу алгоритмів досягається надійна оцінка (розв’язання)

фазової неоднозначності та сантиметрова/міліметрова точність визначення місцеположення для статичного і кінематичного режимів позиціонування.

3. Апостеріорна оцінка точності координатно-часових визначень з використанням розроблених реалізацій методу PPP показала можливість досягнення сантиметрової/міліметрової точності визначення місцезнаходження наземних споживачів. У разі реалізації статичного режиму вимірювань похибки добових float PPP-рішень складають $\sim 5\text{--}8$ мм (з ймовірністю $P \approx 95\%$).

У разі реалізації кінематичного режиму вимірювань похибки (СКП/RMS) float PPP-рішень на інтервалі спостережень $\sim 2\text{--}2,5$ години не перевищують $\sim 3\text{--}5$ см по плановим координатам і $\sim 7\text{--}8$ см по висоті. При зменшенні інтервалу спостережень (взяті інтервали: 1 година, 15 хв., 5 хв.) похибки (СКП/RMS) кінематичного фазового float PPP-рішення очікувано зростають і досягають значень $\sim 10\text{--}20$ см.

Середній час збіжності (з ймовірністю $P \approx 95\%$) float PPP-рішень для статичного режиму вимірювань становить ~ 30 хв. для порогу стійкого досягнення точності 5 см. Максимальний час збіжності може досягати ~ 90 хв. для такого ж порогу. Для кінематичного float PPP-рішення, як показало тестування, середній час збіжності до рівня похибок координат ~ 5 см складає $\sim 1,5\text{--}2,0$ години.

4. У разі обробки бортових GPS-спостережень низькоорбітальних космічних апаратів з використанням запропонованої реалізації float-методу PPP поточні координати НКА визначаються з похибками $\sim 10\div 20$ см ($P \approx 95\%$) при рівні МНК-залишків $\sim 0,01\text{--}0,02$ м, що свідчить про хорошу внутрішню збіжність рішень на рівні похибок фазових вимірів. Складові вектору швидкості НКА визначаються з похибками, які не перевищують $\sim 1\div 2$ мм/с ($P \approx 95\%$). Середні інтервали збіжності «плаваючих» float PPP-рішень з похибками $\sim 10\div 20$ см ($P \approx 95\%$) склали $\sim 1,5\div 2$ години.

Вища точність визначення параметрів траєкторій НКА може бути отримана тільки при спільному використанні кінематичного та динамічного

методів, коли крім результатів обробки радіотехнічних вимірювань використовується додаткова апріорна інформація про моделі руху НКА.

5. Розроблена модель похибок недиференціальних GPS-спостережень (для позиціонування методом PPP) та уточнені її складові, проведена апріорна оцінка точності координатних визначень. Така модель у поєднанні з апостеріорною оцінкою точності (у разі доступності незалежного джерела надійної еталонної інформації) дозволяє прогнозувати точність координатних визначень та визначати області пошуку дискретного фазового рішення в ході РФН. Використання зазначеної моделі похибок показало прийнятну узгодженість отриманих апостеріорних та апріорних оцінок точності.

6. Оцінки точних іоносферних затримок (на борту НКА), одержуваних двохчастотним методом PPP, можуть бути використані в завданнях створення уточнених іоносферних моделей та іоносферних карт, відновлення 3D-профілю іоносфери та ін.

7. Представлені результати експериментів і досліджень показали, що розроблена вітчизняна технологія точного позиціонування float-методом PPP є конкурентоспроможною, порівнянною за основними характеристиками з кращими закордонними аналогами.

РОЗДІЛ 4

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ЦІЛОЧИСЕЛЬНОГО FIXED-МЕТОДУ PPP-ПОЗИЦІОНУВАННЯ

Даний розділ дисертаційної роботи присвячений удосконаленню та реалізації fixed-методу PPP-позиціонування для різних умов проведення вимірювань. Розроблено та досліджено комплекс алгоритмів дискретного/цілочисельного fixed-методу розв'язання фазової неоднозначності (РФН) двохчастотних фазових ГНСС-спостережень при наземному статичному і кінематичному позиціонуванні та при визначенні параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів недиференціальним (автономним) методом PPP.

В описаному нижче удосконаленому методі розв'язання неоднозначності фазових ГНСС-спостережень та позиціонування методом PPP була використана ідеологія обробки ГНСС спостережень (РФН та точного позиціонування) в диференціальному режимі, яка була запропонована і детально описана в роботах фахівців ХНУРЕ, включаючи автора даної дисертації [2, 10, 131, 133-140].

Внесок автора полягав у розвитку та вдосконаленні запропонованого методу, його адаптації до умов недиференціального позиціонування, реальних умов вимірювань наземних та космічних споживачів, а також у проведенні досліджень його можливостей із використанням реальної вимірювальної інформації. Наведено відмінні риси запропонованого методу, описано визначення інструментальних фазових затримок сигналів у трактах GPS-спутників (див. також підрозділи 2.1, 2.5, 2.7). Підхід щодо проведення досліджень базувався, зокрема, на використанні техніки оптимальних перетворень систем рівнянь спостережень з континуальними та дискретними параметрами [1, 38, 41, 136], оптимізації вибору лінійних комбінацій фазових спостережень для подальшої обробки з урахуванням впливу різних джерел

похибок в режимі абсолютних координатних визначень, на урахуванні закордонних результатів в частині компенсації фазових міжчастотних затримок [41]. Новизну підходу забезпечило використання нових методів та ідей, що пройшли апробацію у ході досліджень [7, 8, 23, 35, 36, 39, 41-43, 148], що за основними характеристиками не поступаються закордонним розробкам.

Окремо розглянуто принципово важливе питання розв'язання фазової неоднозначності WL-спостережень різницевої частоти (довжина хвилі ~ 86 см) з використанням кодово-фазової комбінації Melbourne-Wübbena (MW) як необхідної умови розв'язання фазової неоднозначності «безіоносферних» фазових IF-спостережень (довжина хвилі $\sim 10,7$ см) та отримання фінального рішення найбільшої точності. Запропоновано критерій контролю якості поточного дискретного/цілочисельного рішення для фазових WL-комбінацій різницевої частоти, досліджено надійність розв'язання фазової неоднозначності WL-спостережень та визначено інтервали накопичення (інтервали ініціалізації), необхідні для отримання надійного РФН спостережень різницевої частоти за умови контролю якості цих рішень. Крім того, отримано WL-рішення, досліджено його характеристики та запропоновано його використання в якості проміжного рішення для позиціонування НКА.

Досліджено також питання розв'язання неоднозначності «безіоносферних» IF комбінацій з використанням оцінок інструментальних фазових затримок в апаратурі супутників GPS, сформованих за спостереженнями регіональної мережі перманентних станцій України. Представлені приклади цільових функцій при виконанні розв'язання неоднозначності «безіоносферних» фазових IF-спостережень.

Вихідними даними для експериментального тестування послужили добові спостереження перманентних референцних ГНСС-станцій України, накопичені 10 січня та 19 червня 2013 р., а також спостереження НКА COSMIC та НКА GRACE на ті самі дати (див. науково-технічні звіти [36, 37] та розділ 3).

Наведено результати тестування запропонованої реалізації fixed-методу PPP-позиціонування для наземних та космічних додатків, досліджено його точність та збіжність. Підтверджено, що при використанні розробленого комплексу алгоритмів досягаються надійне дискретне/цілочисельне РФН та сантиметрова/субдециметрова точність визначення місцеположення та, у цілому, підтверджено необхідний рівень достовірності отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи.

Сформульовані пропозиції щодо подальшого розвитку та вдосконалення fixed-методу розв'язання фазової неоднозначності недиференціальних ГНС-спостережень та позиціонування.

4.1 Алгоритми реалізації fixed-рішень (розв'язання фазової неоднозначності та позиціонування) методом PPP у статичному і кінематичному режимах вимірювань

Розглянемо реалізацію дискретного PPP-рішення для НКА шляхом фіксації (дискретного підбору) фазових неоднозначностей IF-спостережень на довільному (до доби) інтервалі часу з використанням результатів IF float-рішення та оцінки його точності.

Розгляд, аналіз та реалізацію дискретного PPP-рішення почнемо у припущенні, що в ході IF float-рішення, яке виконано до дискретного рішення, була використана система рівнянь (див. рівняння (2.20) підрозділу 2.7):

$$\hat{\vec{Q}}(t) = A(t) \cdot \vec{\Theta}(t) + \overset{*}{H}(t) \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \delta \vec{Q}(t), \quad (4.1)$$

$$\overset{*}{H}(t) = -\lambda_{NL} \cdot H(t); H(t) = -\frac{1}{\lambda_{NL}} \cdot \overset{*}{H}(t).$$

Усі складові рівнянь спостережень (4.1) детально описані раніше (див. також підрозділ 3.2). Стохастична модель похибок спостережень $\delta \vec{Q}(t)$ також

детально описана. Вважаємо, що в якості координатного апріорного рішення використовується кодове P_1 -рішення з відомою кореляційною матрицею. Вважаємо також, що адитивні похибки $\delta\vec{Q}(t)$ розділені на флуктуаційні (некорельовані в часі) та систематичні, які відносяться тільки до фазових ІF-спостережень, а саме, до ефемеридної, часової та апаратурної складових.

Важливі й такі обмеження:

– матриці $A(t)$ – повного рангу і надмірні за фазовими ІF-спостереженнями, тобто. кількість одночасно видимих супутників GPS має бути більшою або рівною 6;

– матриця $\left[\sum_{i=1}^k H^T(t_i) \cdot H(t_i) \right]$ не є сингулярною (виродженою);

– повна (для всього інтервалу спостережень) матриця $\left\| A_{IF} : H_{IF}^* \right\|$ – повного рангу по стовпцям і далека від мультиколінеарності; тут матриці плану A_{IF} , H_{IF}^* враховують лише фазові ІF-спостереження, тобто. не враховують кодові спостереження.

Позначимо кореляційну матрицю (КМ) флуктуаційних похибок спостережень $\delta\vec{Q}(t)$ наступним чином:

із кодового P_1 – рішення

$$K_{\vec{Q}_\Phi} = W^{-1}(t) =$$

$\hat{K}_{\vec{x}_{P1}}(t)$	0
0	$\begin{matrix} \sigma_{IF_\Phi}^2 & 0 \\ & \ddots \\ 0 & \sigma_{IF_\Phi}^2 \end{matrix}$

розмірність варіюється від часу

$\hat{K}_{\vec{x}_{P1}}(t)$ – недіагональна матриця.

Загальна кількість невідомих на всьому інтервалі спостереження:

$S = 4 \cdot k + (g - 1)$, де k – кількість епох, g – кількість проходів супутників.

Ще припущення: відомі також апріорна оцінка вектору $\nabla \hat{N}_1$ та оцінка відповідної КМ $\hat{K}_{\nabla \hat{N}_1}$.

Тепер приступимо до перетворень, таким, щоб систему (4.1) привести до еквівалентної «стисненої» системи, в якій після застосування модернізованого методу підстановки Гауса [1] утворилася б нова система, еквівалентна вихідній, залежна тільки від обраної групи невідомих, у нашому випадку – від невідомого вектору $\nabla \hat{N}_{1Q}$.

Виконаємо наступний ланцюжок дій/перетворень.

1) Декореляція рівнянь.

Для цього виконаємо сингулярне розкладання матриці $W(t)$:

$$W(t) = K_{\hat{Q}_\phi}^{-1}(t) = V_Q(t) \cdot V_Q^T(t) = \underbrace{\|\varphi(t)\| \cdot L^{1/2}(t)}_{V_Q(t)} \cdot \underbrace{L^{1/2}(t) \cdot \|\varphi(t)\|^T}_{V_Q^T(t)}.$$

Помножимо праву та ліву частини (4.1) на невироджену квадратну матрицю $V_Q^T(t)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underbrace{V_Q^T(t) \cdot \hat{Q}(t)}_{\hat{q}(t)} = \underbrace{V_Q^T(t) \cdot A(t)}_{\|\alpha(t)\|} \cdot \vec{\Theta}(t) + \underbrace{V_Q^T \cdot H(t)}_{\|\beta(t)\|} \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \underbrace{V_Q^T \cdot \delta \vec{Q}(t)}_{\delta \vec{q}(t)} \\ \text{або} \\ \hat{q}(t) = \|\alpha(t)\| \cdot \vec{\Theta}(t) + \|\beta(t)\| \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \delta \vec{q}(t) \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Завершимо цей крок твердженням, що

$$\begin{aligned} K_{\hat{q}}(t) &= \langle \delta \vec{q}(t) \cdot \delta \vec{q}^T(t) \rangle = V_Q^T \cdot \langle \delta \vec{Q}(t) \cdot \delta \vec{Q}^T(t) \rangle \cdot V_Q = V_Q^T \cdot K_{\hat{Q}_\phi} \cdot V_Q = \\ &= V_Q^T \cdot (V_Q \cdot V_Q^T)^{-1} \cdot V_Q = E - \text{одична матриця}, \end{aligned}$$

що й потрібно було довести – рівняння декорельовані.

2) «Стиснення» (перетворення) системи рівнянь – статистичний аналог методу Гауса зменшення числа невідомих та усунення лінійно-залежних рівнянь (4.2).

Вирішимо в аналітичному вигляді декорельовану систему (4.2): знайдемо оптимальну умовну МНК-оцінку $\vec{\Theta}(t) = F(\nabla\vec{N}_{1Q})$ і підставимо її в (4.2), після чого отримаємо нову систему рівнянь:

$$\vec{\Theta}(t) |_{\nabla\vec{N}_{1Q}} = \left[\|\alpha(t)\|^T \cdot \|\alpha(t)\| \right]^{-1} \cdot \|\alpha(t)\|^T \cdot \left[\hat{q}(t) - \|\beta(t)\| \cdot \nabla\vec{N}_{2Q} \right] - \left[\alpha^T(t) \cdot \alpha(t) \right]^{-1} \cdot \alpha^T(t) \cdot \delta\vec{q}(t) \quad (4.3)$$

і

$$\hat{q}(t) = \|\alpha(t)\| \cdot \left[\|\alpha(t)\|^T \cdot \|\alpha(t)\| \right]^{-1} \cdot \|\alpha(t)\|^T \cdot \left[\hat{q}(t) - \|\beta(t)\| \right] \cdot \nabla\vec{N}_{1Q} - \left[\|\alpha(t)\|^T \cdot \|\alpha(t)\| \right]^{-1} \cdot \|\alpha(t)\|^T \cdot \delta\vec{q}(t) + \|\beta(t)\| \cdot \nabla\vec{N}_{1Q} + \delta q(t)$$

Або після перетворень

$$F(t) \cdot \hat{q} = F(t) \cdot \|\beta(t)\| \cdot \nabla\vec{N}_1 + F(t) \cdot \delta\vec{q}(t), \quad (4.4)$$

де

$$F(t) = \left\{ E - \|\alpha(t)\| \left[\|\alpha(t)\|^T \cdot \|\alpha(t)\| \right]^{-1} \cdot \|\alpha(t)\|^T \right\} - \text{ідемпотентна матриця}$$

$$(F \cdot F = F), \text{ rank } F(t) = \dim \hat{q}(t) - \text{rank } \|\alpha(t)\| = \dim \hat{q}(t) - \dim \vec{\Theta}(t).$$

Але мати справу з незнайомою в обчислювальному відношенні системою недоцільно і її можна перетворити на зручний вигляд і при цьому знизити розмірність системи рівнянь (стиснути систему без втрати інформації). Для цього виконаємо сингулярне розкладання матриці $F(t)$:

$$F(t) = U(t) \cdot \Lambda(t) \cdot U^T(t),$$

де

$U(t)$ – ортогональна квадратна матриця ($U^T(t) \cdot U(t) = U(t) \cdot U^T(t) = E$ – одинична матриця), яка являє собою систему ортонормованих векторів-стовпців матриці $U(t)$;

$\Lambda(t) = \left\| \begin{array}{c|c} E_p(t) & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right\|$ – матриця сингулярних чисел, p з яких дорівнюють

одиниці, а решта – нулю; $p = \text{rank } F(t) = \dim \hat{q}(t) - \text{rank } \|\alpha(t)\|$ (у нашому випадку $\text{rank } \|\alpha(t)\| = 4$).

Тоді

$$U(t) \cdot \Lambda(t) \cdot U^T \cdot \hat{q} = U(t) \cdot \Lambda(t) \cdot U^T(t) \cdot \|\beta(t)\| \cdot \nabla \vec{N}_1 + \delta \vec{q}(t).$$

Після множення правої та лівої частин на матрицю $U^T(t)$ отримаємо, що $\Lambda(t) \cdot U^T(t) \cdot \hat{q}(t) = \Lambda(t) \cdot U^T(t) \cdot \|\beta(t)\| \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \Lambda(t) \cdot U^T(t) \cdot \delta \vec{q}(t)$.

Представимо $U(t) = \left\| \begin{array}{c|c} u_1(t) & u_2(t) \\ \hline p & s-p \end{array} \right\|$, де $s = \dim \hat{q}(t)$.

Тоді

$$\Lambda(t) \cdot U^T(t) = \left\| \begin{array}{c|c} E_p(t) & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right\| \cdot \left\| \begin{array}{c} u_1^T(t) \\ \dots \\ 0 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} u_1^T(t) \\ \dots \\ 0 \end{array} \right\|,$$

і тепер отримаємо нову «укорочену» на розмір вектору $\vec{\Theta}(t)$ систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underbrace{u_1^T \cdot \hat{q}(t)}_{\hat{\gamma}(t)} = \underbrace{u_1^T \cdot \|\beta(t)\|}_{R(t)} \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \underbrace{u_1^T \cdot \delta \vec{q}(t)}_{\delta \vec{\gamma}(t)} \\ ma \\ \underbrace{\hat{\gamma}(t)}_{[p]} = \underbrace{R(t)}_{[p \times (g-1)]} \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \delta \vec{\gamma}(t), \text{ а } \underbrace{K_{\hat{\gamma}}(t)}_{[g-1]} = u_1^T \cdot K_{\hat{q}} \cdot u_1 = E_p \end{array} \right. \quad (4.5)$$

$$\dim \nabla \vec{N}_{1Q} = (g - 1) .$$

3) Групування всіх підсистем в єдину систему рівнянь, отримання надмірної системи нормальних рівнянь відносно вектору $\nabla \vec{N}_{1Q}$ та аналіз властивостей похибок цих рівнянь. Фінальні перетворення.

Об'єднана система рівнянь має вигляд:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \hat{\gamma}(t_1) \\ \hat{\gamma}(t_2) \\ \vdots \\ \hat{\gamma}(t_k) \end{pmatrix}}_{\hat{\gamma}} = \underbrace{\begin{pmatrix} R(t_1) \\ R(t_2) \\ \vdots \\ R(t_k) \end{pmatrix}}_R \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \underbrace{\begin{pmatrix} \delta \vec{\gamma}(t_1) \\ \delta \vec{\gamma}(t_2) \\ \vdots \\ \delta \vec{\gamma}(t_k) \end{pmatrix}}_{\delta \vec{\gamma}}, \quad (4.6)$$

або

$$\hat{\gamma} = R \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \delta \vec{\gamma}, \quad K_{\hat{\gamma}} = E_{(g-1)}.$$

На цьому кроці можна отримати float МНК-оцінку вектору $\nabla \vec{N}_{1Q}$ та її точність (кореляційну матрицю похибок):

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\nabla} \vec{N}_{1Q} = (R^T \cdot R)^{-1} \cdot R^T \cdot \hat{\gamma} \\ \text{або} \\ \hat{\nabla} \vec{N}_{1Q} = \left[\sum_{i=1}^k R^T(t_i) \cdot R(t_i) \right]^{-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^k R^T(t_i) \cdot \hat{\gamma}(t_i) \right] \\ \delta \nabla \vec{N}_{1Q} = (R^T \cdot R)^{-1} \cdot R^T \cdot \delta \vec{\gamma} \\ \hat{K}_{\nabla \vec{N}_{1Q}} = (R^T \cdot R)^{-1} = \left[\sum_{i=1}^k R^T(t_i) \cdot R(t_i) \right]^{-1} \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Тепер сформуємо систему нормальних рівнянь

$$R^T \cdot \hat{\vec{\gamma}} = \underbrace{[R^T \cdot R]}_P \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \underbrace{R^T \cdot \delta \vec{\gamma}}_{\delta \vec{\chi}}, \quad K_{\vec{\chi}} = R^T \cdot R.$$

Розглянемо два випадки: а) апіорна інформація про вектор $\nabla \vec{N}_1$ відсутня і б) маємо апіорну оцінку $\hat{\nabla} \vec{N}_1$ та відповідну кореляційну матрицю $\hat{K}_{\nabla \vec{N}_1}$.

Розглянемо випадок а).

Оскільки кореляційна матриця $K_{\vec{\chi}}$ не є одиничною, проведемо декореляцію:

$$\begin{aligned} K_{\vec{\chi}}^{-1} &= (R^T \cdot R)^{-1} = V_{\vec{\chi}} \cdot V_{\vec{\chi}}^T; \\ \underbrace{V_{\vec{\chi}}^T \cdot \hat{\vec{\chi}}}_{\hat{\vec{d}}} &= \underbrace{V_{\vec{\chi}}^T \cdot P}_{D_Q} \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \underbrace{V_{\vec{\chi}}^T \cdot \delta \vec{\chi}}_{\delta \vec{d}}; \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\hat{\vec{d}} = D_Q \cdot \nabla \vec{N}_{1Q} + \delta \vec{d}, \quad K_{\vec{d}} = E_{(g-1)}.$$

Тепер система готова до формування цільової функції (ЦФ) та виконання дискретного перебору елементів вектору $\nabla \vec{N}_{1Q}$ для мінімізації ЦФ.

Розглянемо тепер реалізацію обробки кодових та фазових GPS-спостережень наземних статичних приймачів/станцій PPP-методом, а також розв'язання фазової неоднозначності дискретним методом у припущенні, що координати станції відомі з високою точністю.

Нехай маємо оцінки кодових $[\hat{S}_{c_1}^j(t_k), \hat{S}_{c_2}^j(t_k)]$ та фазових $[\hat{L}_1^j(t_k), \hat{L}_2^j(t_k)]$ псевдовідстаней (j - індекс супутника), що відносяться до часу t_k прийому (формування вимірювань приймачем) у шкалі часу GPS. Вважаємо, що спостереження на заданому інтервалі часу пройшли препроцесинг, в ході якого усунути фазові стрибки, аномальні спостереження (кодові та фазові), всі спостереження приведені до цілих секунд шкали часу GPS тощо.

Також вважаємо, що крім бортової навігаційної інформації (переданої супутниками GPS у реальному часі) маємо з центрів IGS, CNES тощо інформацію про точні орбіти і про точні годинники супутників GPS, також як і інформацію про кодові та фазові затримки сигналів (на частотах L_1 і L_2 GPS) у трактах супутників GPS.

Далі скористаємось описом моделі GPS-спостережень, що запропонована і детально описана у підрозділах 2.2 – 2.4 (див. формули (2.1) – (2.7)).

Тут зробимо важливе зауваження. При розв'язанні навігаційної задачі (рішенні системи рівнянь) необхідно виконати перерахунок ефемерид супутників GPS з центрів супутників на центри випромінювання сигналів, тобто врахувати зсув фазових центрів антен супутників відносно центрів їх мас із залученням інформації про кутову орієнтацію супутників. Інакше ефемеридні похибки можуть досягати $\sim 1 - 2$ м, що неприпустимо для PPP-режиму позиціонування. Слід також зазначити, що в рівняннях (2.1) та наступних опущені складові похибок ефемерид та годин супутників GPS, які надалі в ході обробки спостережень та оцінки точності координатно-часових визначень обов'язково слід враховувати.

Далі розглянемо задачу оцінки дискретних/цілочисельних фазових неоднозначностей (різниць ∇N_1^{jr} і ∇N_2^{jr} відносно обраної референцної ділянки – див. підрозділ 2.4.1) для кожного з проходів супутників GPS у зоні радіобачення заданої GPS-станції.

Цю задача вирішуватимемо у припущенні, що координати станції (у системі координат ITRFXXXX) відомі з високою точністю ($RMS_{\bar{x}} \leq 1$ см). На першому етапі рішення будемо шукати за додаткового припущення – тропосферні затримки не оцінюються, а коригуються за допомогою моделі MOPS (див. (2.6), підрозділ 2.4.1) та функцій відображення Niell. На другому етапі рішення шукатимемо у вигляді спільної оцінки ЗТЗ у вигляді поліноміального розкладання (див. (2.5), підрозділ 2.3.2) та фазових

неоднозначностей також за умови знання точних координат станції (фазового центру приймальної антени).

Виконаємо також попередні необхідні корекції спостережень у системі (2.1), а саме розрахуємо та введемо наступні корекції: $\hat{\Delta}^{j, GPS}$ – годинники супутників; \hat{F}_{rel}^j – релятивістські поправки; $\Delta\hat{R}_{GEO}^j$ – геодинамічні поправки; $\Delta\hat{\rho}_{pc12}^j, \hat{\Delta}_{pcv1,2}^j$ – корекції на зміщення фазових центрів (на двох частотах) та корекції на варіації фазового центру (на обох частотах) приймальної (наземної) антени та передавальних антен супутників GPS; $\hat{\phi}_{wup}^j \cdot \lambda_{1,2}$ – корекції на «wind-up»-ефект через обертання супутників GPS навколо своїх осей; «wind-up»-ефект для наземної приймальної антени нерухомої станції відсутній. Необхідно також перерахувати ефемериди супутників GPS від центру мас до центру випромінювання антен (фазового центру) для більш точного позиціонування; $\hat{B}_{c_1}^j, \hat{B}_{c_2}^j$ – корекції кодових затримок сигналів L_1 і L_2 в апаратурі супутників GPS (при умові, що їх надає IGS або CNES); $\hat{\psi}_1^j, \hat{\psi}_2^j$ – корекції фазових затримок сигналів L_1 і L_2 в апаратурі супутників GPS (при умові, що їх надає IGS або CNES).

З урахуванням введених корекцій рівняння (2.1) приводяться до вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\tilde{S}}_{c_1}^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \\ \quad + b_{c_1} + \delta\tilde{S}_{c_1}^j(t_k) \\ \hat{\tilde{S}}_{c_2}^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + \gamma^2 \cdot I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \\ \quad + b_{c_2} + \delta\tilde{S}_{c_2}^j(t_k) \\ \hat{\tilde{L}}_1^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) - I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \\ \quad + \psi_1 - N_1^j \cdot \lambda_1 + \delta\tilde{L}_1^j(t_k) \\ \hat{\tilde{L}}_2^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) - \gamma^2 \cdot I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \\ \quad + \psi_2 - N_2^j \cdot \lambda_2 + \delta\tilde{L}_2^j(t_k) \end{array} \right. \quad (4.9)$$

З фазових спостережень отримана IF-комбінація:

$$\begin{aligned}\hat{\tilde{L}}_{IF}^j(t_k) &= k_1 \cdot \tilde{L}_1^j(t_k) - k_2 \cdot \tilde{L}_2^j(t_k) = \\ &= R^j(t_k) + \left[\Delta^{GPS}(t_k) + (k_1 \cdot \psi_1 - k_2 \cdot \psi_2) \right] + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) - \\ &- \left[k_1 \cdot N_1^j \cdot \lambda_1 - k_2 \cdot N_2^j \cdot \lambda_2 \right] + \left[k_1 \cdot \delta \tilde{L}_1^j(t_k) - k_2 \cdot \delta \tilde{L}_2^j(t_k) \right],\end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned}\psi_{IF} &= (k_1 \cdot \psi_1 - k_2 \cdot \psi_2), \quad \Delta(t_k) = \left[\Delta^{GPS}(t_k) + (k_1 \cdot \psi_1 - k_2 \cdot \psi_2) \right], \\ \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k) &= \left[k_1 \cdot \delta \tilde{L}_1^j(t_k) - k_2 \cdot \delta \tilde{L}_2^j(t_k) \right], \\ k_1 &= \frac{\lambda_2^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} = \frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 1}; \quad k_2 = \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} = \frac{1}{\gamma^2 - 1}; \quad \gamma = \frac{77}{60}; \quad k_1 - k_2 = 1; \\ \lambda_{WL} &= \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}; \quad \lambda_{NL} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1}.\end{aligned}$$

Після перетворень з урахуванням того, що $N_{WL}^j = N_1^j - N_2^j$

$$\text{і } \left[k_1 \cdot N_1^j \cdot \lambda_1 - k_2 \cdot N_2^j \cdot \lambda_2 \right] = \left[N_1^j \cdot \lambda_{NL} + N_{WL}^j \cdot \frac{\lambda_{NL} \cdot \lambda_{WL}}{\lambda_2} \right], \text{ отримаємо}$$

$$\begin{aligned}\hat{\tilde{L}}_{IF}^j(t_k) &= R^j(t_k) + \Delta(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) - \left[N_1^j \cdot \lambda_{NL} + N_{WL}^j \cdot \frac{\lambda_{NL} \cdot \lambda_{WL}}{\lambda_2} \right] + \\ &+ \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k).\end{aligned}$$

Позначимо

$$\eta_{NL}(t_k) = \Delta(t_k) - \left[N_1^r \cdot \lambda_{NL} + N_{WL}^r \cdot \frac{\lambda_{NL} \cdot \lambda_{WL}}{\lambda^2} \right], \quad \nabla N_1^{jr} = N_1^j - N_1^r,$$

$$\nabla N_{WL}^{jr} = N_{WL}^j - N_{WL}^r.$$

Тоді

$$\begin{aligned}\hat{\tilde{L}}_{IF}^j(t_k) &= R^j(t_k) + \eta_{NL}(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) - \\ &- \left[\nabla N_1^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \nabla N_{WL}^{jr} \cdot \lambda_{WL} \cdot \frac{\lambda_{NL}}{\lambda^2} \right] + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k).\end{aligned}\tag{4.10}$$

Припустимо, що $\nabla N_{WL}^{jr} = \nabla \hat{N}_{WL}^{jr}$ – відомо точно (дискретні значення), тоді

$$\tilde{L}_{IF}^j(t_k) = \hat{\tilde{L}}_{IF}^j(t_k) + \nabla \hat{N}_{WL}^{jr} \cdot \frac{\lambda_{WL} \cdot \lambda_{NL}}{\lambda_2}$$

та

$$\tilde{L}_{IF}^j(t_k) = R^j(t_k) + \eta(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) - \nabla N_1^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k) \quad (4.11)$$

Систему рівнянь (4.11) можна записати у такому вигляді:

$$\tilde{L}_{IF}^{*r}(t_k) = R^r(t_k) + \eta_{NL}(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^r(t_k) + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k),$$

.....

$$\tilde{L}_{IF}^{*j}(t_k) = R^j(t_k) + \eta_{NL}(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) - \nabla N_1^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k),$$

.....

$$\tilde{L}_{IF}^{*m}(t_k) = R^m(t_k) + \eta_{NL}(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^m(t_k) - \nabla N_1^{mr} \cdot \lambda_{NL} + \delta \tilde{L}_{IF}^m(t_k).$$

Тоді (4.11) перетворюється на вид (з урахуванням розрахункових відстаней $\dot{R}_j(t_k)$)

$$\Delta \hat{\tilde{L}}_{IF}^j(t_k) = \tilde{L}_{IF}^{*j}(t_k) - \dot{R}_j(t_k) = \eta_{NL}(t_k) - \nabla N_1^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k) \quad (4.12)$$

Систему рівнянь (4.12) перетворимо до вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \tilde{L}_{IF}^{*r}(t_k) = \eta_{NL}(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^r(t_k) + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k), \\ \dots\dots\dots \\ \Delta \tilde{L}_{IF}^{*j}(t_k) = \eta_{NL}(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) - \nabla N_1^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k), \\ \dots\dots\dots \\ \Delta \tilde{L}_{IF}^{*m}(t_k) = \eta_{NL}(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^m(t_k) - \nabla N_1^{mr} \cdot \lambda_{NL} + \delta \tilde{L}_{IF}^m(t_k). \end{array} \right. \quad (4.13)$$

Останню систему рівнянь можна представити у векторно-матричному вигляді:

$$\hat{\vec{Q}}_{[m(t_k)]}(t_k) = \underbrace{\vec{V}}_{\substack{\text{един. вектор} \\ [m(t_k)]}}(t_k) \cdot \eta_{NL}(t_k) + \underbrace{\Phi(t_k)}_{[m(t_k) \times (n+1)]} \cdot \underbrace{\vec{\alpha}}_{[n+1]} + \underbrace{H_{IF}^*}_{[m(t_k) \times (g-1)]}(t_k) \cdot \underbrace{\nabla \vec{N}}_{[g-1]} + \delta \vec{Q}(t_k), \quad (4.14)$$

$$m\vec{f} \cdot \left[\sum_0^n \alpha_i \cdot f_i[h(t)] \right] = \Phi(t_k) \cdot \alpha,$$

$$\text{де } \hat{\vec{Q}}(t_k) = \left\| \begin{array}{c} \Delta L_{IF}^r(t_k) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta L_{IF}^m(t_k) \end{array} \right\|; \quad \Phi(t_k) = m\vec{f}(t_k) \cdot \vec{f}^T(t_k);$$

$$V(t_k) = \left\| 1, 1, \dots, 1 \right\|^T \xrightarrow{d} [m(t_k)];$$

$$m\vec{f}(t_k) = \left\| mf_w^1(t_k), mf_w^2(t_k), \dots, mf_w^{m(t_k)}(t_k) \right\|^T \xrightarrow{d} [m(t_k) \times 1];$$

$$\vec{f}(t_k) = \left\| 1, f_1[h(t_k)], f_2[h(t_k)], \dots, f_n[h(t_k)] \right\|^T \xrightarrow{d} [1 \times (n+1)].$$

У загальному випадку матрицю похідних вимірюваних параметрів (якобіан перетворення) можна представити у вигляді:

$$\left\| \begin{array}{c|c|c|c|c|c} \vec{V}(t_1) & 0 & \dots & 0 & \Phi(t_1) & H_{IF}^*(t_1) \\ \hline 0 & \vec{V}(t_2) & \dots & 0 & \Phi(t_2) & H_{IF}^*(t_2) \\ \hline \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline 0 & 0 & \dots & \vec{V}(t_k) & \Phi(t_k) & H_{IF}^*(t_k) \end{array} \right\|.$$

Можна представити останню систему рівнянь в іншому вигляді

$$\begin{aligned} \text{з урахуванням представлення } G_{\Sigma}(t_k) = \left\| \Phi(t_k) : \overset{*}{H}_{IF} \right\| \xrightarrow{d} \left[m(t) \times \{(n+1) + (g-1)\} \right]: \\ \hat{Q}(t_k) = \vec{V}(t_k) \cdot \eta_{NL}(t_k) + G_{\Sigma}(t_k) \cdot \left\| \begin{array}{c} \vec{\alpha} \\ \dots \\ \nabla \vec{N}_1 \end{array} \right\| + \delta \vec{Q}(t_k). \end{aligned} \quad (4.15)$$

Далі за відомою схемою будується float-рішення для параметрів, що шукаються:

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= K_{22} \cdot \sum_{j=1}^k G_{\Sigma}^T(t_j) \cdot P(t_j) \cdot \hat{Q}(t_j); \\ K_{22} &= \left[\sum_{j=1}^k G_{\Sigma}^T(t_j) \cdot P(t_j) \cdot G_{\Sigma}(t_j) \right]^{-1}; \\ P(t_j) &= W_{IF}(t_j) - W_{IF}(t_j) \cdot \vec{V}(t_j) \left[\vec{V}^T(t_j) \cdot W_{IF}(t_j) \cdot \vec{V}(t_j) \right]^{-1} \cdot \vec{V}^T(t_j) \cdot W_{IF}(t_j); \\ \hat{\eta}_{NL}(t_j) &= \left[\vec{V}^T(t_j) \cdot W_{IF}(t_j) \cdot \vec{V}(t_j) \right]^{-1} \cdot \vec{V}^T(t_j) \cdot W_{IF}(t_j) \cdot \left[\hat{Q}(t_j) - G_{\Sigma}(t_j) \cdot \hat{\mu} \right]. \end{aligned}$$

Для окремого випадку (4.15) матриця $G_{\Sigma}(t)$ має вигляд:

$$G_{\Sigma}(t_k) = \left\| \overset{*}{H}_{IF}(t_k) \right\|, \vec{\mu} = \nabla \vec{N}_1, \text{ а алгоритми оцінювання залишаються тими ж.}$$

Далі виведемо співвідношення для дискретної оцінки вектору $\nabla \vec{N}_1$.

Скористаємося перетвореннями аналізованої системи рівнянь.

$$1) W_{IF}(t_k) = K_{\vec{Q}}^{-1}(t_k) = V_{\vec{Q}}(t_k) \cdot V_{\vec{Q}}^T(t_k).$$

$$2) V_{\vec{Q}}^T(t_k) \cdot \hat{Q}(t_k) = V_{\vec{Q}}^T(t_k) \cdot \vec{V}(t_k) \cdot \eta_{NL}(t_k) + V_{\vec{Q}}^T(t_k) \cdot G_{\Sigma}(t_k) \cdot \mu + V_{\vec{Q}}^T \cdot \delta \vec{Q}(t_k).$$

або

$$\hat{\vec{q}}(t_k) = \|\vec{\alpha}(t_k)\| \cdot \eta_{NL}(t_k) + \|\beta(t_k)\| \cdot \vec{\mu} + \delta\vec{q}(t_k), \langle \delta\vec{q}(t_k) \cdot \delta\vec{q}^T(t_k) \rangle = E.$$

$$3) F(t_k) \cdot \hat{\vec{q}}(t_k) = F(t_k) \cdot \|\beta(t_k)\| \cdot \vec{\mu} + F(t_k) \cdot \delta\vec{q}(t_k).$$

$$4) F(t_k) = U(t_k) \cdot \Lambda(t_k) \cdot U^T(t_k); \Lambda(t_k) = \begin{Bmatrix} E_p & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix};$$

$$p = \text{rank}F(t_k) = \dim \hat{\vec{q}}(t_k) - 1.$$

В результаті отримуємо:

$$\begin{matrix} \hat{\vec{\gamma}} \\ [p] \end{matrix} (t_k) = R(t_k) \cdot \vec{\mu} + \delta\vec{\gamma}(t_k), K_{\vec{\gamma}}(t_k) = E_p.$$

$$5) \text{Об'єднана система рівнянь: } \hat{\vec{\gamma}} = R \cdot \vec{\mu} + \delta\vec{\gamma}.$$

Система нормальних рівнянь:

$$R^T \cdot \hat{\vec{\gamma}} = [R^T \cdot R] \cdot \vec{\mu} + R^T \cdot \delta\vec{\gamma}, K_{\vec{\chi}} = R^T \cdot R, \hat{\vec{\chi}} = P \cdot \vec{\mu} + \delta\vec{\chi}.$$

6) Скоригуємо останню систему рівнянь

$$V_{\vec{\chi}}^T \cdot \hat{\vec{\chi}} = V_{\vec{\chi}}^T \cdot P \cdot \vec{\mu} + V_{\vec{\chi}}^T \cdot \delta\vec{\chi}; \quad \vec{\mu} = \begin{Bmatrix} \vec{\alpha} \\ \dots \\ \|\nabla \vec{N}_1\| \end{Bmatrix}, \quad \hat{\vec{d}} = D_Q + \delta\vec{d},$$

або

$$\hat{\vec{d}} = D_Q \cdot \vec{\mu} + \delta\vec{d} = D_Z \cdot \vec{\alpha} + D_N \cdot \nabla \vec{N}_1 + \delta\vec{d}.$$

7) Тепер останню систему рівнянь необхідно «стиснути» (усунути невідомі $\vec{\alpha}$):

$$\begin{matrix} \hat{\vec{\gamma}}_N \\ [\dim \nabla \vec{N}_1] \end{matrix} = \begin{matrix} R_N \\ [\dim \nabla \vec{N}_1 \times \dim \nabla \vec{N}_1] \end{matrix} \cdot \nabla \vec{N}_1 + \delta \vec{\gamma}_N; \quad K_{\hat{\vec{\gamma}}_N} = E.$$

8) Сформуємо цільову функцію (ЦФ) та здійснюємо пошук дискретного цілісного/напівциклічного рішення для вектору $\nabla \vec{N}_1$:

$$\left[\hat{\vec{\gamma}}_N - R_N \cdot \nabla \vec{N}_1 \right]^T \cdot \left[\hat{\vec{\gamma}}_N - R_N \cdot \nabla \vec{N}_1 \right] \rightarrow \min_{\nabla \vec{N}_1} \Rightarrow \nabla \vec{N}_1.$$

9) Після отримання оцінок $\nabla \vec{N}_1$ отримуємо і оцінки $\nabla \vec{N}_2$:

$$\nabla \vec{N}_2 = \nabla \vec{N}_1 - \nabla \vec{N}_{wl}.$$

І у фіналі, повернувшись до (4.14), (4.15), отримаємо й оцінки вектору $\vec{\alpha}$:

$$\left[\hat{\vec{d}} - D_N \cdot \nabla \vec{N}_1 \right] = D_Z \cdot \vec{\alpha} + \delta \vec{d} \Rightarrow \hat{\vec{\alpha}} = \left[D_Z^T \cdot D_Z \right]^{-1} \cdot D_Z^T \cdot \left[\hat{\vec{d}} - D_N \cdot \nabla \vec{N}_1 \right];$$

$$K_{\hat{\vec{\alpha}}} = \left[D_Z^T \cdot D_Z \right]^{-1}.$$

4.2 Комбінації кодових та фазових інструментальних затримок сигналів у трактах GPS-супутників для реалізації fixed PPP-рішення. Приклади оцінки інструментальних похибок GPS-спостережень

Виконаємо обробку кодових і фазових спостережень мережі перманентних референцих GPS-станцій для оцінки корекцій інструментальних систематичних похибок в радіотрактах супутників GPS і залишкових ефемеридно-часових похибок, що повільно змінюються, з використанням ефемеридно-часової інформації IGS/CNES для реалізації дискретного РФН спостережень споживачів з підвищеною надійністю та мінімальним інтервалом ініціалізації/збіжності.

Для довільної мережі станцій та довільної станції « i » запишемо систему рівнянь GPS-спостережень (див. рівняння (2.1) – (2.7) у підрозділах 2.2 – 2.4) із важливими змінами (для цього розгляду). Зокрема, введемо функції $\psi_{1(2)}^j$, інструментальні кодові затримки, залишкові ефемеридно-часові похибки спостережень $\varepsilon^j(t)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\tilde{S}}_{C1}^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + b_{C1} - B_{C1}^j + \\ \quad + \varepsilon^j(t_k) + \delta \tilde{S}_{C1}^j(t_k) \\ \hat{\tilde{S}}_{C2}^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + \gamma^2(t_k) \cdot I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + b_{C2} - B_{C2}^j + \\ \quad + \varepsilon^j(t_k) + \delta \tilde{S}_{C2}^j(t_k) \\ \hat{\tilde{L}}_1^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) - I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \psi_1 - \psi_1^j - N_1^j \cdot \lambda_1 + \\ \quad + \varepsilon^j(t_k) + \delta \tilde{L}_1^j(t_k) \\ \hat{\tilde{L}}_2^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) - \gamma^2 \cdot I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \psi_2 - \psi_2^j - N_2^j \cdot \lambda_2 + \\ \quad + \varepsilon^j(t_k) + \delta \tilde{L}_2^j(t_k) \end{array} \right. \quad (4.16)$$

Як і раніше, передбачається, що у рівняннях (4.16) вже введені поправки: зміщення годин супутників, релятивістські поправки, геодинамічні поправки, корекції на зміщення фазового центру L_2 відносно фазового центру L_1 , поправки на варіації фазових центрів на обох частотах (для наземних приймальних антен), поправки на зміщення фазових центрів передаючих антен супутників GPS відносно їх центрів мас, корекції на «wind-up» ефект через обертання супутників GPS навколо своїх поздовжніх осей. Також введено модельні тропосферні затримки, а оцінювати передбачається лише поправки до зенітних тропосферних затримок (ЗТЗ). Крім того, вважаємо, що відомі корекції кодових затримок сигналів \hat{B}_{C1}^j і \hat{B}_{C2}^j в апаратурі супутників GPS; вони отримані або з IGS (відомі DCB), або з центру CNES. Також вважаємо, що відомі точні координати фазових центрів L_1, L_2 приймальних антен з СКП $_{\bar{x}} \approx 3 \div 5$ мм.

Величини b_{c_1}, b_{c_2} (інструментальні кодові затримки у приймачах), ψ_1, ψ_2 (інструментальні фазові затримки у приймачах), інструментальні фазові затримки у трактах супутників ψ_1^j, ψ_2^j описані раніше.

У загальному випадку, в системі рівнянь (4.16) невідомими є ψ_1^j, ψ_2^j та $\varepsilon^j(t)$ або їх лінійні комбінації. Інші невідомі або виключаються шляхом комбінування спостережень, або реконфігуруються та оцінюються разом із зазначеною першою групою невідомих.

Вважаємо, що на добовому інтервалі спостережень інструментальні похибки $\hat{B}_{c_1}^j, \hat{B}_{c_2}^j, \psi_1^j, \psi_2^j$ можуть включати довільну кількість циклів (з множниками $\lambda_{1(2)}$). Похибка, що повільно змінюється. $\varepsilon^j(t)$ може бути представлена або константою, або поліноміальною функцією низького ступеня (не вище 4-го – 5-го) на кожному проході j -го GPS-супутника. На добу може оцінюватися 2 – 3 оцінки $\varepsilon^j(t)$, тобто. ця змінна не є однією і тією ж на добу, а відноситься лише до конкретного проходу в зоні радіовидимості мережі станцій.

Безпосередньо, з урахуванням знання величин $\hat{B}_{c_1}^j$ та $\hat{B}_{c_2}^j$ (кодові затримки), шукатимемо оцінки таких комбінацій невідомих, які дозволять компенсувати вклади цих величин у комбінаціях «Melbourne-Wübbena» (MW) та «iono-free» (IF) спостережень споживачів.

Важливо відзначити, що подання (4.16) рівнянь спостережень довільної « i »-ї станції мережі з відомими (точними) координатами L_1 фазового центру антени повною мірою має відповідати й системі рівнянь споживачів. Подальші перетворення (4.16) також будуть ідентичні і для станцій, і для споживачів.

Складемо традиційні лінійні комбінації спостережень станції мережі.

Wide-Lane (WL) комбінація фазових спостережень:

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{WL}^j(t_k) &= \left[\frac{\hat{\tilde{L}}_1^j(t_k)}{\lambda_1} - \frac{\hat{\tilde{L}}_2^j(t_k)}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{WL} = \\ &= R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + \gamma \cdot I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf^j(t_k) + \psi_{WL} - \psi_{WL}^j - N_{WL}^j \cdot \lambda_{WL} + \varepsilon^j(t_k) + \delta \tilde{L}_{WL}^j(t_k) \end{aligned} \quad (4.17)$$

де

$$\begin{aligned} \psi_{WL} &= \left[\frac{\psi_1}{\lambda_1} - \frac{\psi_2}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{WL}; \quad \psi_{WL}^j = \left[\frac{\psi_1^j}{\lambda_1} - \frac{\psi_2^j}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{WL}; \\ N_{WL}^j &= N_1^j - N_2^j; \quad \lambda_{WL} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \end{aligned}$$

Code Narrow-Lane (NL) комбінація:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{NL}^j(t_k) &= \left[\frac{\hat{\tilde{S}}_{C1}^j(t_k)}{\lambda_1} + \frac{\hat{\tilde{S}}_{C2}^j(t_k)}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{NL} = \\ &= R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + \gamma \cdot I^j(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf^j(t_k) + b_{NL} - B_{NL}^j + \varepsilon^j(t_k) + \delta \tilde{S}_{NL}^j(t_k) \end{aligned} \quad (4.18)$$

де

$$b_{NL} = \left[\frac{b_{C1}}{\lambda_1} + \frac{b_{C2}}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{NL}; \quad B_{NL}^j = \left[\frac{B_{C1}^j}{\lambda_1} + \frac{B_{C2}^j}{\lambda_2} \right] \cdot \lambda_{NL}; \quad \lambda_{NL} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}.$$

Комбінація Melbourne-Wübbena (MW):

$$\begin{aligned} \hat{MW}(t_k) &= \tilde{S}_{NL}^j(t_k) - \tilde{L}_{WL}^j(t_k) = [b_{NL} - \psi_{WL}] - [B_{NL}^j - \psi_{WL}^j] + N_{WL}^j \cdot \lambda_{WL} + \\ &+ [\delta \tilde{S}_{NL}^j(t_k) - \delta \tilde{L}_{WL}^j(t_k)] = b_{MW} - B_{MW}^j + N_{WL}^j \cdot \lambda_{WL} + \delta \tilde{S}_{MW}^j(t_k) \end{aligned} \quad (4.19)$$

Зазначимо, що величини N_1^j , N_2^j , N_{WL}^j відносяться до конкретного проходу супутника (їх на добу може бути 2 або 3), тоді як величини затримок b_{C1} , b_{C2} , B_{C1}^j , B_{C2}^j , ψ_1 , ψ_2 , ψ_1^j , ψ_2^j , b_{NL} , B_{NL}^j , b_{MW} , B_{MW}^j не залежать від проходу та прийняті постійними на добу.

Фазова комбінація «Iono-Free» (IF):

$$\begin{aligned}
\hat{L}_{IF}^j(t_k) &= k_1 \cdot \hat{\tilde{L}}_1^j(t_k) - k_2 \cdot \Delta \hat{\tilde{L}}_2^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \\
&+ \underbrace{\left[k_1 \cdot \psi_1 - k_2 \cdot \psi_2 \right]}_{\psi_{IF}} - \underbrace{\left[k_1 \cdot \psi_1^j - k_2 \cdot \psi_2^j \right]}_{\psi_{IF}^j} - \left[N_1^j \cdot \lambda_{NL} + N_{WL}^j \cdot \frac{\lambda_{NL} \cdot \lambda_{WL}}{\lambda_2} \right] + \\
&+ \varepsilon^j(t_k) + \underbrace{\left[k_1 \cdot \delta \tilde{L}_1^j(t_k) - k_2 \cdot \delta \tilde{L}_2^j(t_k) \right]}_{\delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k)} = \quad . \quad (4.20) \\
&= R^j(t_k) + \Delta^{GPS}(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \psi_{IF} - \psi_{IF}^j - \left[N_1^j \cdot \lambda_{NL} + N_{WL}^j \cdot \frac{\lambda_{NL} \cdot \lambda_{WL}}{\lambda_2} \right] + \\
&+ \varepsilon^j(t_k) + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k)
\end{aligned}$$

Тут

$$k_1 = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} = \frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 1}; \quad k_2 = \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} = \frac{1}{\gamma^2 - 1}; \quad k_1 - k_2 = 1; \quad \gamma = \frac{77}{60};$$

$$k_1 \approx 2,54572778; \quad k_2 \approx 1,54572778.$$

Кодова комбінація IF:

$$\begin{aligned}
\tilde{S}_{IF}^j(t_k) &= k_1 \cdot \hat{\tilde{S}}_{C1}^j(t_k) - k_2 \cdot \hat{\tilde{S}}_{C2}^j(t_k) = R^j(t_k) + \Delta^{GPS} + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \\
&+ \left[k_1 \cdot b_{C1} - k_2 \cdot b_{C2} \right] - \left[k_1 \cdot B_{C1}^j - k_2 \cdot B_{C2}^j \right] + \varepsilon^j(t_k) + \delta \tilde{S}_{IF}^j(t_k) \quad (4.21)
\end{aligned}$$

Виконаємо оцінки корекцій комбінацій MW (див. вираз (4.19)). Для кожного проходу «j» розраховуємо середнє значення комбінацій $\hat{MW}_i^j = \langle M\tilde{W}_i^j(t_k) \rangle$; також розраховуємо і СКП оцінок. Тоді

$$M\hat{W}_i^j = b_{MW_i} - B_{MW}^j + N_{WLi}^j \cdot \lambda_{WL} + \delta M\tilde{W}_i^j.$$

Виділимо референційний (на добу) прохід, позначимо його «r». Для кожної станції «i» обчислимо різниці

$$\nabla M\hat{W}_i^{jr} = M\hat{W}_i^j - M\hat{W}_i^r = -\nabla B_{MW}^{jr} + \nabla N_{WLi}^{jr} \cdot \lambda_{WL} + \delta \nabla M\tilde{W}_i^{jr}.$$

Величини д.ч. $\underbrace{\{\nabla B_{MW}^{jr}\}_i}_{\omega_i^{jr}}$ і ∇N_{WLi}^{jr} є шуканими.

Виділимо з оцінок $\nabla M\hat{W}_i^{jr}$ шукані поправки $\hat{\omega}_i^{jr}$ та $\nabla \hat{N}_{WLi}^{jr}$ – для кожної станції « i » та проходів « jr ».

Аналізуємо для кожної пари « $j-r$ » проходів по всіх « i » «близькість» поправок $\hat{\omega}_i^{jr}$. «Близькі» поправки осереднюємо і матимемо для кожного проходу « j » (відносно « r ») середню оцінку $\langle \hat{\omega}^{jr} \rangle_i = \hat{\omega}^{jr}$. Цю оцінку можна застосувати до комбінацій MW будь-якої іншої станції мережі та переконатися в тому, що після корекції стійко оцінюється дискретне ціле ∇N_{WL}^{jr} . Оцінки $\nabla \hat{N}_{WL}^{jr}$ знадобляться на наступному етапі обробки для корекції IF_i^j - спостережень.

Розглянемо та перетворимо «безіоносферні» спостереження IF. Для цього використовуємо референцний супутник/прохід « r ».

Позначимо:

$$\begin{aligned} \nabla N_{WL}^{jr} &= N_{WL}^j - N_{WL}^r; \quad \nabla N_1^{jr} = N_1^j - N_1^r; \quad \nabla N_2^{jr} = N_2^j - N_2^r; \\ \nabla \psi_{IF}^{jr} &= \psi_{IF}^j - \psi_{IF}^r; \quad \nabla \psi_{IF}^{jr} = \left[k_1 \cdot \nabla \psi_1^{jr} - k_2 \cdot \nabla \psi_2^{jr} \right]; \\ \eta_{NL}(t_k) &= \Delta^{GPS}(t_k) + \psi_{IF} - \psi_{IF}^r - \left[N_1^r \cdot \lambda_{NL} + N_{WL}^r \cdot \frac{\lambda_{NL} \cdot \lambda_{WL}}{\lambda_2} \right]. \end{aligned}$$

Тоді:

$$\begin{aligned} \hat{L}_{IF}^j(t_k) &= R^j(t_k) + \eta_{NL}(t_k) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) - \nabla \psi_{IF}^{jr} - \\ &- \left[\nabla N_1^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \nabla N_{WL}^{jr} \cdot \frac{\lambda_{NL} \cdot \lambda_{WL}}{\lambda_2} \right] + \varepsilon^j(t) + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k) \quad . \end{aligned} \quad (4.22)$$

Маємо на увазі, що (4.22) відноситься до спостережень « i »-ї станції.

Позначивши

$$\nabla \bar{C}^{jr} = -\nabla \psi_{IF}^{jr} - \left[\nabla N_1^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \nabla N_{WL}^{jr} \cdot \frac{\lambda_{NL} \cdot \lambda_{WL}}{\lambda_2} \right] + \bar{\varepsilon}^j, \quad (4.23)$$

отримаємо

$$\hat{\tilde{L}}_{IF}^j(t_k) = R^j(t_k) + \eta_{NL}(t) + \Delta Z(t_k) \cdot mf_w^j(t_k) + \nabla \bar{C}^{jr} + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k). \quad (4.24)$$

Тепер необхідно отримати float-оцінки параметрів:

$$\vec{x} = \left\| x, y, z \right\|^T, \eta_{NL}(t), \Delta Z(t_k), \nabla \bar{C}^{jr} \quad (4.25)$$

за умов, що координати ГНСС-станцій \vec{x} відомі з похибками з СКП/RMS ~3–5 мм.

Отримавши оцінки (4.25), обчислимо для кожного рівняння (4.22) або (4.24) функції

$$\hat{\Phi}_i^j(t_k) = \hat{R}_i^j(t_k) + \hat{\eta}_{NLi}(t_k) + \Delta \hat{Z}_i(t_k) \cdot mf_{wi}^j(t_k) \quad (4.26)$$

і потім різниці (залишки):

$$\nabla \hat{\tilde{C}}_i^{jr}(t_k) = \hat{\tilde{L}}_{IFi}^j(t_k) - \hat{\Phi}_i^j(t_k) = -\nabla \psi_{IF}^{jr} - \left[\nabla N_{li}^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \nabla N_{WLi}^{jr} \cdot \frac{\lambda_{NL} \cdot \lambda_{WL}}{\lambda_2} \right] + \varepsilon_i^j(t_k) + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k), \quad (4.27)$$

де i - номер станції мережі.

Далі, знаючи величини ∇N_{WLi}^{jr} (з обробки комбінацій MW), скоригуємо (4.27):

$$\begin{aligned} \nabla \hat{\tilde{\Pi}}_i^{jr}(t_k) &= \nabla \hat{\tilde{C}}_i^{jr}(t_k) + \nabla \hat{N}_{WLi}^{jr} \cdot \frac{\lambda_{NL} \cdot \lambda_{WL}}{\lambda_2} = \\ &= -\nabla \psi_{IF}^{jr} - \nabla N_{li}^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \varepsilon_i^j(t_k) + \delta \tilde{L}_{IF}^j(t_k) \end{aligned} \quad (4.28)$$

Після дослідження залишків $\nabla \hat{\tilde{\Pi}}_i^{jr}(t_k)$ (та їх порівняння по станціях) приймається подальше рішення про використання $\nabla \hat{\tilde{\Pi}}_i^{jr}$ в якості поправок IF-спостережень споживачів.

Сформуємо рівняння поправок та визначимо корекції для споживачів із найкращою точністю.

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \hat{\Pi}_1^{jr}(t_k) = -\nabla \psi_{IF}^{jr} + \varepsilon_1^j(t_k) - \nabla N_{1(1)}^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \delta \tilde{L}_{IF1}^j(t_k) \\ \nabla \hat{\Pi}_2^{jr}(t_k) = -\nabla \psi_{IF}^{jr} + \varepsilon_2^j(t_k) - \nabla N_{1(2)}^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \delta \tilde{L}_{IF2}^j(t_k) \\ \dots \\ \nabla \hat{\Pi}_m^{jr}(t_k) = -\nabla \psi_{IF}^{jr} + \varepsilon_m^j(t_k) - \nabla N_{1(m)}^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \delta \tilde{L}_{IFm}^j(t_k) \end{array} \right.$$

Нехай станція «1» буде (умовно) референчною.

Сформуємо різниці $\rightarrow \nabla \hat{\Pi}^{jr}(t_k)$ між «*i*» та «1-ою» станціями:

$$\Delta \nabla \hat{\Pi}_{i1}^{jr}(t_k) = -\Delta \nabla N_{1(i1)}^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \delta \varepsilon_{i1}^j(t_k) + \delta \Delta \tilde{L}_{IF(i1)}^j(t_k),$$

$$\Delta \nabla N_{1(i1)}^{jr} = \nabla N_{1(i1)}^{jr} - \nabla N_{1(1)}^{jr}; \quad \delta \varepsilon_{i1}^j(t_k) = \varepsilon_i^j - \varepsilon_1^j.$$

Розрахуємо середні значення (за часом) отриманих подвійних різниць:

$$\Delta \nabla \hat{\Pi}_{i1}^{jr} = -\Delta \nabla N_{1(i1)}^{jr} \cdot \lambda_{NL} + \delta(\Delta \nabla \bar{\Pi}_{i1}^{jr}),$$

звідки

$$\Delta \nabla N_{1(i1)}^{jr} = \text{ц.ч.} \left\{ \frac{-\Delta \nabla \hat{\Pi}_{i1}^{jr}}{\lambda_{NL}} \right\} \text{ і залишки } \hat{\xi}_{i1}^{jr} = \nabla \Delta \bar{\Pi}_{i1}^{jr} + \Delta \nabla N_{1(i1)}^{jr} \cdot \lambda_{NL}.$$

Проводимо аналіз статистичних характеристик залишків $\hat{\xi}_{i1}^{jr}$ для всіх «*jr*» та «*i*». Якщо $\hat{\xi}_{i1}^{jr}$ розподілені за закону, близькому до нормального, та $3\sigma_{\hat{\xi}_{i1}^{jr}} \leq (3 \div 4)$ см (тобто, «надійно» менше напівциклу $\frac{\lambda_{NL}}{2}$), то РФН у споживача може бути виконано досить надійно (інтервал накопичення/ініціалізації необхідно оцінити).

Розглянемо приклади реалізації та верифікації розроблених алгоритмічних та програмних засобів оцінки й усунення інструментальних похибок GPS-спостережень.

При оцінці корекцій фазових інструментальних затримок сигналів використовувалися спостереження української мережі перманентних референцних станцій, що описані в п. 3.4.1. Оцінки корекцій фазових інструментальних затримок сигналів у трактах GPS-супутників з використанням спостережень української мережі перманентних референцних станцій отримані з використанням оцінок кодових затримок сигналів, що надаються IGS. При цьому передбачалися відомими з високою точністю (СКП/RMS $\approx 3 \div 5$ мм) координати середніх фазових центрів антен станцій на обох частотах-носіях.

З урахуванням зазначених умов оцінювалися такі комбінації шуканих невідомих у рівняннях спостережень референцних станцій, які дозволяють компенсувати вклади фазових інструментальних затримок у лінійних комбінаціях Melbourne-Wübbena (MW) та Iono-Free (IF) спостережень користувачів у ході рішення задачі РФН для WL- та IF-спостережень. Повні фазові інструментальні затримки включають і невідому кількість цілих циклів (з множниками довжин хвиль WL і IF комбінацій), однак це не є проблемою, тому що в ході РФН визначаються інтегральні значення фазових неоднозначностей після введення аналізованих корекцій у спостереження. У запропонованих та реалізованих процедурах оцінюються дробові частини фазових інструментальних затримок у лінійних комбінаціях спостережень MW та IF.

Необхідно відзначити, що в прийнятій автором схемі обробки аналізовані фазові корекції також включатимуть частку залишкових ефемеридно-часових похибок спостережень, що є позитивним фактором для підвищення надійності виконання РФН спостережень споживачів – при введенні таких корекцій у спостереження споживачів зазначені ефемеридно-часові похибки будуть частково компенсовані.

Для оцінки якості фазових корекцій, що оцінюються, були визначені і розраховані критерії їх якості. Відповідно до розробленої методики та алгоритмів оцінювання сформовані та проаналізовані оцінки дробових частин корекцій комбінацій MW та IF, розкиди відхилень дробових частин щодо середніх їх значень. Так, на рис. 4.1 показаний приклад поведінки у часі значень IF-корекцій (з компенсацією середнього) для 6-годинного проходу одного із супутників для всіх станцій (у метрах).

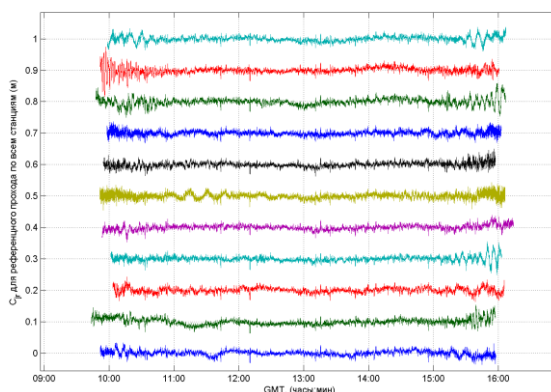


Рисунок 4.1 – Приклад поведінки у часі значень IF-корекцій

На зазначеному рисунку криві для різних станцій рознесені на 0,1 м (для зручності аналізу). Знизу вгору криві відносяться до станцій GLSV, DNRS, IZUM, KHAR, KTVL, MIKL, NIZH, POLV, SHAB, UMAN, ZPRS. З таких прикладів було констатовано, що корекції можуть бути апроксимовані константами.

На рис. 4.2 – 4.5 показані приклади розкидів (аномальні оцінки виключені) та гістограми відхилень дробових частин оцінок корекцій для комбінацій MW та IF відносно середніх їх значень (у циклах).

Інший надійний критерій оцінки якості оцінок IF-корекцій полягає в наступному. Якщо сформулювати різниці (у циклах) IF-корекцій для пар станцій, то отримані функції часу повинні змінюватись навколо цілих значень. Якщо це не виконується (відхилення від цілих значень значущі) для тих чи інших проходів або тих чи інших станцій, то такі оцінки відкидаються. Інакше неточні корекції призведуть до проблем під час виконання РФН. Тому

для практичних застосувань необхідно реалізувати автоматичні процедури оцінки та забезпечення якості MW та IF корекцій (див. також підрозділ 4.3).

Отримані результати свідчать про те, що максимальні (3 СКП) варіації дробових частин оцінок корекцій для комбінацій MW та IF розподілені за законом, близьким до нормального, і знаходяться в зоні довіри (не перевищують $\sim 0,23$ циклу відповідних довжин хвиль), що підтверджує можливість отримання надійного РФН при отриманні фінальних fixed PPP-рішень.

На рис. 4.6 наведено ілюстрацію підтвердження описаного критерію якості оцінок IF-корекцій для одного з проходів супутника SV25 GPS на добовому інтервалі 10.01.2013 р. для тих же самих одинадцяти станцій. З наведеного прикладу видно, що зазначені різниці (у циклах) варіюються навколо цілих значень. Це означає, що усереднені оцінки IF корекцій з високою точністю компенсують фазові інструментальні затримки сигналів у трактах GPS супутників.

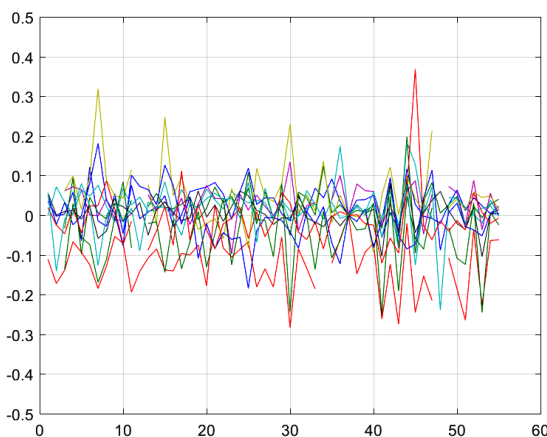


Рисунок 4.2 – Приклад відхилень дрібних частин оцінок корекцій для комбінацій MW ($\lambda=86,2$ см) від середніх значень

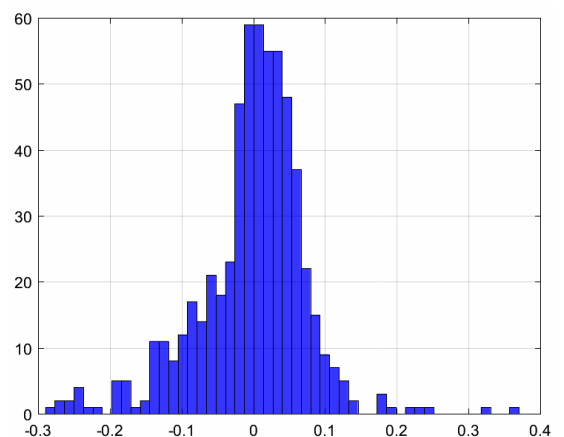


Рисунок 4.3 – Приклад гістограми відхилень дробових частин оцінок корекцій для комбінацій MW ($\lambda=86,2$ см) від середніх значень. Середнє – 0,002 циклу; $3RMS \approx 0,23$ циклу

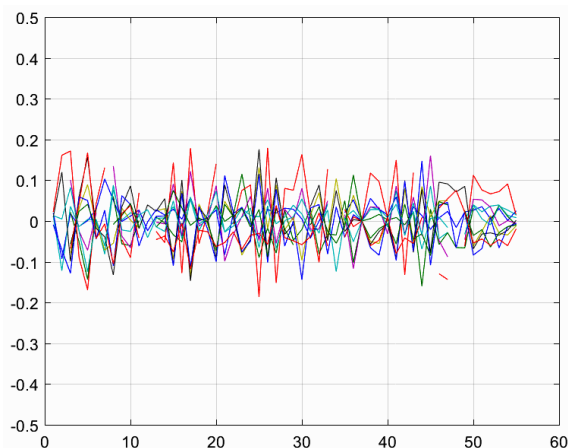


Рисунок 4.4 – Приклад відхилень дробових частин оцінок корекцій для комбінацій IF ($\lambda=10,7$ см) від середніх значень

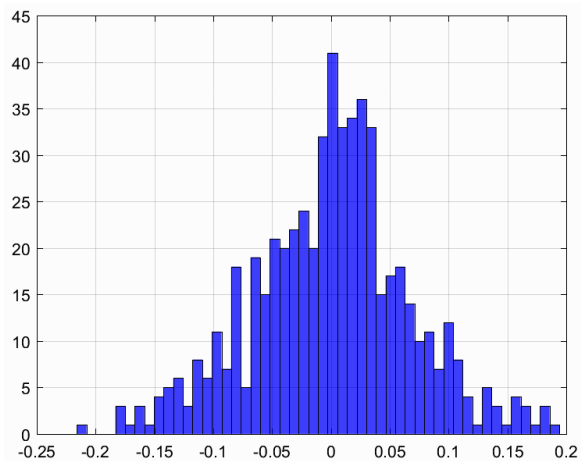


Рисунок 4.5 – Приклад гістограми відхилень дробових частин оцінок корекцій для комбінацій IF ($\lambda=10,7$ см) від середніх значень. Середнє - 0,0 циклу; $3\text{RMS} \approx 0,20$ циклу

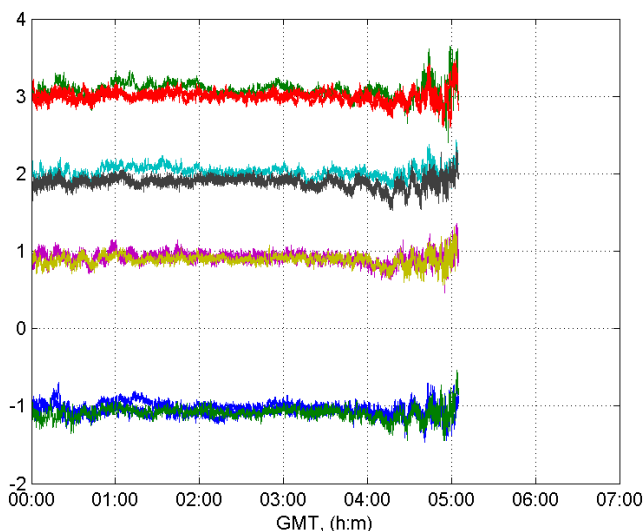


Рисунок 4.6 – Варіації дробових частин оцінок IF-корекції (для супутника SV25 GPS)

Результатом верифікації розроблених алгоритмічних та програмних засобів усунення інструментальних похибок GPS-спостережень стало представлено в наступних підрозділах підтвердження можливості досягнення надійного дискретного/цілочисельного РФН недиференціальних фазових спостережень та досягнення сантиметрової точності PPP-позиціонування

за відносно короткі інтервали часу як для наземних, так і космічних застосувань.

4.3 Розв'язання фазової неоднозначності WL-спостережень з використанням кодово-фазової комбінації Melbourne-Wübbena

При рішенні задач РФН у кодові та фазові спостереження вводилися оцінки корекцій інструментальних затримок у трактах GPS-супутників (див. підрозділ 4.2).

Як зазначено у розділі 2, дискретний/цілочисельний метод позиціонування PPP може бути реалізований лише за умови правильного та надійного РФН WL-спостережень різницевої частоти, а час отримання цілочисельного рішення значною мірою визначається часом отримання надійного РФН. У даній роботі для РФН WL-спостереження використовується кодово-фазова комбінація Melbourne-Wübbena. Ця комбінація є зашумленою, а її якість в основному визначається якістю кодових спостережень ГНСС-приймача. На рис. 4.7 показані різниці між MW-комбінаціями всіх супутників (на заданому інтервалі) відносно референцного $\nabla M\hat{W}_i^{jr}$.

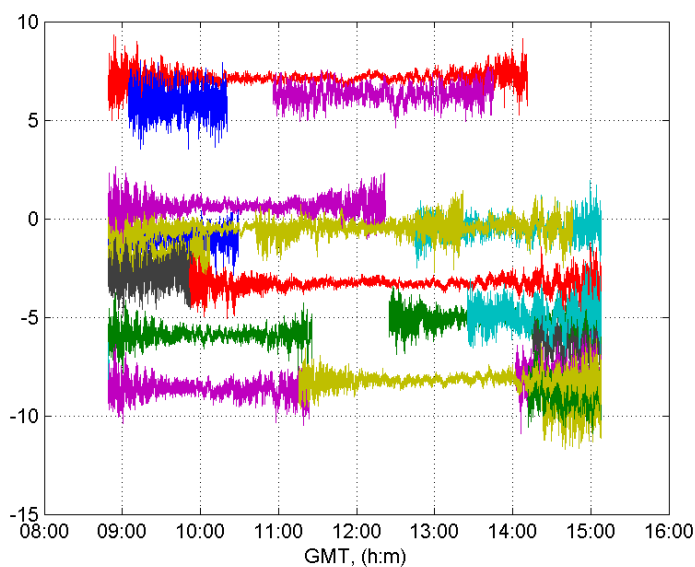


Рисунок 4.7 – різниці між MW-комбінаціями всіх супутників (на заданому інтервалі) відносно референцного

Як видно з рисунку, для отримання достовірних оцінок ∇N_{WL}^{jr} інтервали спостережень повинні бути досить довгими, щоб похибки кодованих спостережень були «добре» усередненими. Для коротких ділянок спостережень, особливо для «низьких» супутників з великими шумовими похибками та значними похибками багатопроменевості, можливе неправильне розв'язання неоднозначності WL-спостережень, що призведе до неможливості отримання дискретного/цілочисельного fixed PPP-рішення. Положення ускладнюються тим, що практично немає критеріїв правильного РФН WL-спостережень.

Для перевірки правильності розв'язання неоднозначності автором розроблено метод контролю та виправлення неоднозначностей, який полягає у наступному. РФН WL-спостережень виконується шляхом заокруглення математичного очікування кодово-фазових MW-комбінацій з введеними оцінками корекцій інструментальних затримок у трактах GPS-супутників. Математичне очікування розраховується по відлікам комбінацій, що не перевищують заданий поріг. Одночасно розраховується точність визначення математичного очікування (3σ) з урахуванням кореляції вимірювань. Для контролю правильності розв'язання неоднозначності використовуються наступні критерії:

- близькість математичного очікування до цілого;
- точність визначення математичного очікування (3σ).

У разі, якщо математичне очікування відрізняється від цілого більш, ніж на $\pm 0,35$ циклу або $3\sigma > (5/12) \cdot \lambda_{WL}$ (згідно з досвідом проведених автором експериментальних досліджень), оцінка неоднозначності вважається недостовірною і відповідна ділянка спостережень виключається з обробки.

Як показали дослідження, при використанні запропонованого методу досягається надійний контроль та виправлення неоднозначностей WL-спостережень.

Приклади-ілюстрації результатів дослідження надійності (ймовірності прийняття вірного рішення) РФН WL-комбінації спостережень наведено

на рис. 4.8 та 4.9 для спостережень станцій GLSV (Київ) та KTVL (сmt. Кацівелі, Крим) за 10 січня та 19 червня 2013 р. При цьому оцінювалася надійність РФН як із використанням традиційного підходу до обробки кодово-фазових комбінацій MW, так і з використанням запропонованого критерію оцінки якості поточного дискретного РФН-рішення для фазових комбінацій WL.

Як видно з наведених прикладів, надійне дискретне/цілочисельне РФН-рішення для WL-комбінацій фазових спостережень різницевої частоти досягається на інтервалах накопичення ~8–10 хвилин за умови контролю якості цих рішень з використанням запропонованого критерію.

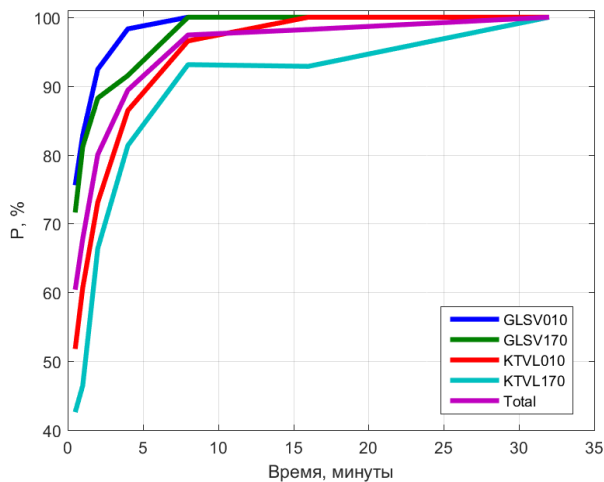


Рисунок 4.8 – Оцінка ймовірності правильного виконання РФН з використанням традиційного підходу

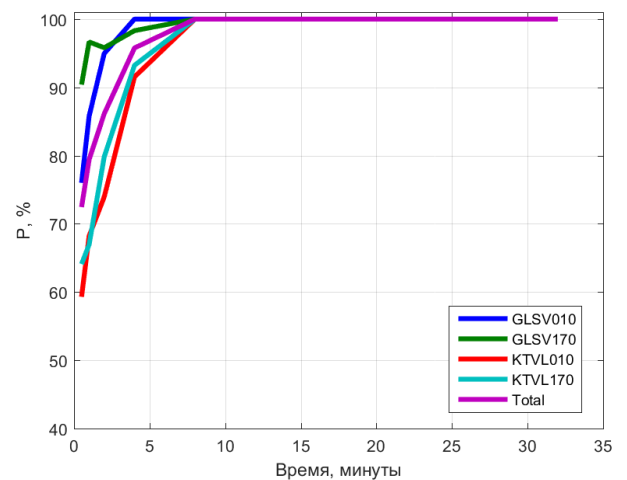


Рисунок 4.9 – Оцінка ймовірності правильного виконання РФН з використанням запропонованого критерію оцінки якості дискретних рішень

4.4 Рішення по вимірюванням фази різницевої частоти (WL-рішення)

Після успішного розв'язання фазової неоднозначності спостережень різницевої частоти можливе отримання самостійного рішення з вимірювань фази різницевої частоти (WL-рішення). Перевагою такого рішення є те, що це рішення є фазовим, а так як шуми і багатопроменевість фазових

спостережень істотно менше, ніж шуми і багатопрореневість кодових спостережень, то шумова складова WL-рішення істотно менша, ніж шумова складова рішення P1 і, тим більше, кодового безіоносферного рішення. Істотним недоліком WL-рішення є те, що для такого рішення потрібне точне знання іоносферної затримки. Як було показано в розділі 3, іоносферна затримка для наземних споживачів може бути розрахована за моделлю (модель Клобушара, модель GIM IONEX), або оцінена за двохчастотними спостереженнями. Для споживачів на борту НКА іоносферна поправка може бути оцінена тільки з використанням двохчастотних вимірювань. Похибки компенсації іоносферної затримки суттєво обмежують точність WL-рішення та призводять до появи стрибків у рішенні. На рис. 4.10 представлені нев'язання WL-рішення, отриманого для сеансу спостережень на борту НКА COSMIC за 10 січня 2013 р.

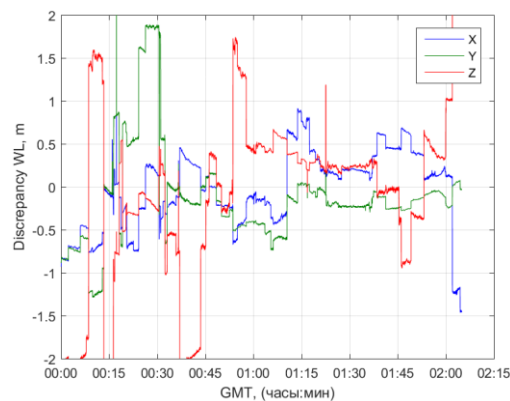


Рисунок 4.10 – Нев'язання WL-рішення, м

Стрибки у нев'язаннях рішення відбуваються у моменти зміни робочого сузір'я та пов'язані з залишковими похибками компенсації іоносферних похибок. Дане рішення може бути суттєво покращено шляхом усунення стрибків, аналогічно наведеній у [149] методиці усунення стрибків фазових спостережень. Ця методика була вдосконалена автором та адаптована для застосування до результатів позиціонування методом PPP. Отримане безстрибкове WL-рішення «підтягується» до кодово-фазового P1-рішення (див. підрозділи 3.3, 3.4). Таке рішення надалі називатимемо модифікованим WL-рішенням.

На рис. 4.11 представлені нев'язання модифікованого WL-рішення, отриманого для сеансу спостережень на борту НКА COSMIC за 10 січня 2013 р.

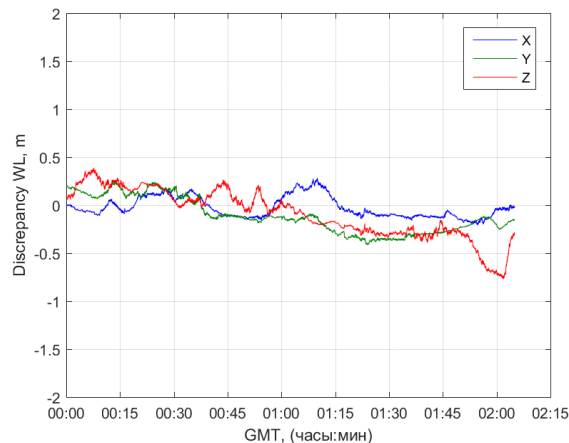


Рисунок 4.11 – Нев'язання модифікованого WL-рішення, м

Як випливає з отриманих результатів, таке модифіковане WL-рішення дає прийнятні результати і може бути використане і як самостійне рішення, і як проміжне («априорне») рішення для отримання подальшого фінального «безіоносферного» позиціонування НКА fixed-методом PPP. Похибка модифікованого WL-рішення визначається похибкою P1-рішення на поточному інтервалі, до якого «підтягується» WL-рішення без стрибків і залежить від величини поточного інтервалу.

На жаль, отримання модифікованого WL-рішення (у реалізації метода PPP) для наземних споживачів неможливе через значний вплив тропосферних затримок. При більш точній компенсації іоносферних похибок, наприклад, при використанні трьохчастотних вимірювань, точність рішення WL може бути істотно збільшена.

4.5 Цільові функції при реалізації дискретного РФН недиференціальних ГНСС-спостережень

Цільові функції мають важливі властивості. Їх форма, особливо поблизу правильної комбінації неоднозначностей, сильно залежить від багатьох факторів: точності попереднього кодового рішення, кількості супутників,

геометричних умов, інтервалу спостережень, рівня шумів, багатопробності, залишкових повільно змінюваних похибок спостережень тощо. За формою цільової функції можна судити про надійність виконання РФН. Чим точніше використовувані апіорна інформація та фазові спостереження, чим більша їх надмірність, тим огинаюча цільової функції стає більш опуклою і, відповідно, стає вищою ймовірність виділення правильного набору неоднозначностей із сукупності локальних мінімумів. На рис. 4.12 і 4.13 зображено типовий вид цільової функції з проміжними рішеннями різної точності. Цільова функція розрахована для спостережень НКА GRACE в околиці $[(-1) \div (+1)]$ від правильного набору цілочисельних значень неоднозначностей.

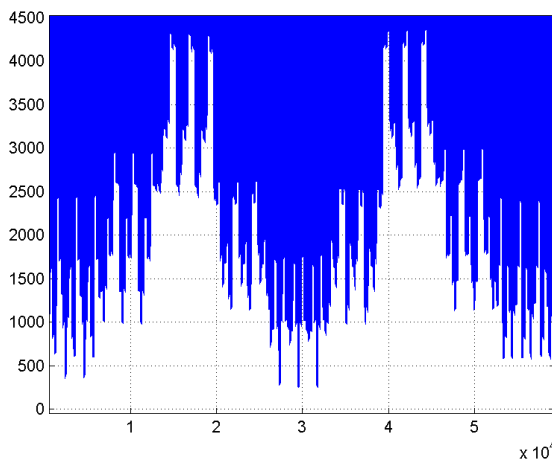


Рисунок 4.12 – Цільова функція при використанні P1-рішення в якості проміжного

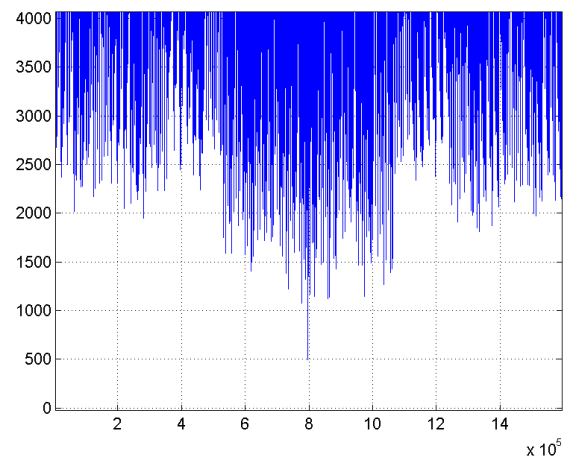


Рисунок 4.13 – Цільова функція при використанні модифікованого WL-рішення в якості проміжного

Незважаючи на те, що цільова функція на рис. 4.12 має опуклий характер, спостерігається значна кількість локальних мінімумів, які слабо відрізняються за величиною від «правильного» глобального мінімуму. Існує велика ймовірність того, що у даному випадку РФН не буде досягнуто. І хоча значення цільової функції для «правильного» і «неправильного» набору неоднозначностей відрізняються дуже незначно, для точного позиціонування відсутність РФН має катастрофічні наслідки – нев'язання рішення можуть досягати кількох метрів.

На рис. 4.13 цільова функція має єдиний чітко виражений мінімум, досягається надійне розв'язання фазової неоднозначності та реалізується fixed-метод PPP-позиціонування з найбільшою точністю.

Слід зазначити, що для методу PPP, на відміну від диференціального методу, цільова функція менш опукла, тому точність попереднього рішення набуває ключового значення для надійного розв'язання неоднозначності та отримання фінального рішення.

4.6 Результати тестування і дослідження запропонованої реалізації позиціонування наземних об'єктів fixed-методом PPP

Приклади порівняльних ілюстрацій експериментальних результатів обробки двохчастотних кодових та фазових GPS-спостережень з використанням float та fixed PPP-рішень для станцій GLSV (Київ) (10.01.2013 р.) та KTVL (сmt. Кацівелі, Крим) (19.06.2013 р.) представлені на рис. 4.14 – 4.23, де зображені нев'язання (в метрах) координатних рішень (у Грінвічській $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ та у місцевій топоцентричній $(\Delta N, \Delta E, \Delta U)$ системах координат) відносно еталонних значень.

Ілюстрації відображають результати точкових рішень після РФН на інтервалах накопичення: 1 година, 30 хвилин и 15 хвилин.

Під кожним рисунком наведено статистичні характеристики рішень – оцінки середніх рівнів нев'язань рішень відносно еталону (похибок позиціонування) з довірчими інтервалами 68%, 95%, 99,7%, а також оцінки середніх значень нев'язань.

Станція GLSV, 10.01.2013 р.

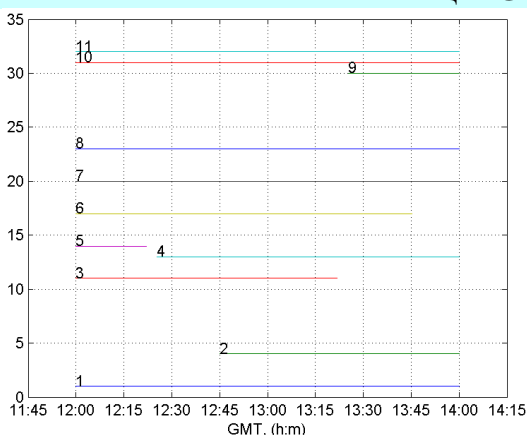


Рисунок 4.14 – Інтервали радіовидимості (після процесінгу GPS-спостережень)

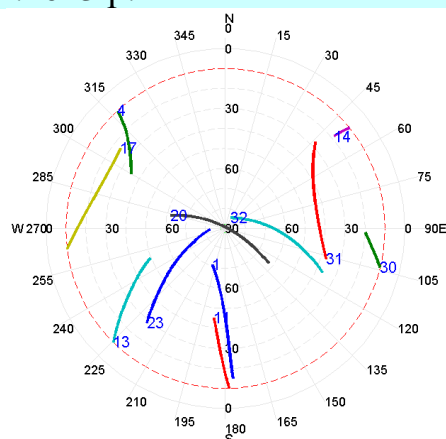
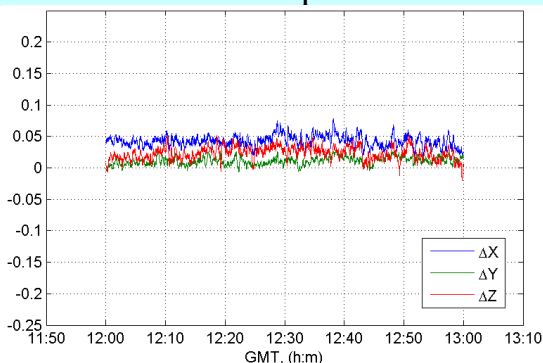


Рисунок 4.15 – «Рисунок неба» (радіовидимість супутників в системі координат «азимут – кут місця»)

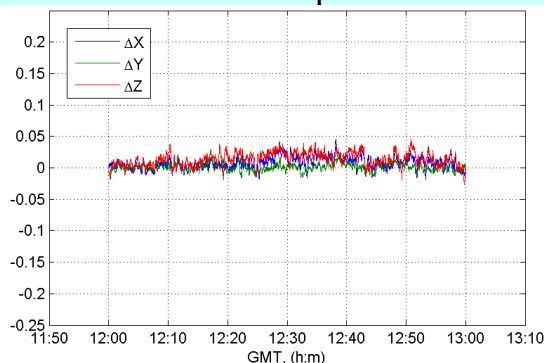
1 година

Float-рішення

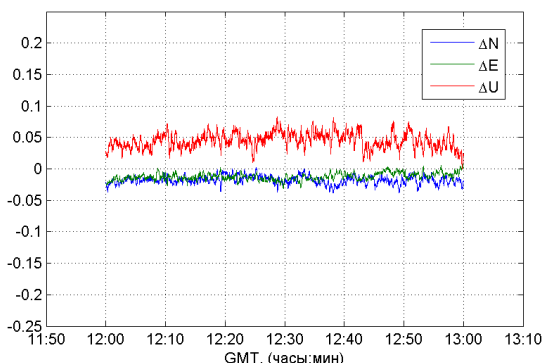
Fixed-рішення



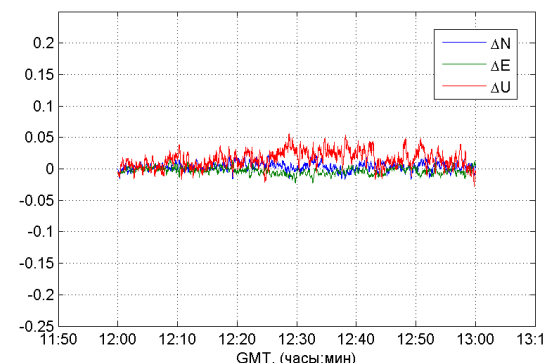
X: 68% - 0.0464, 95% - 0.0580, 99.7% - 0.0732, MX = 0.0427
 Y: 68% - 0.0140, 95% - 0.0220, 99.7% - 0.0270, MY = 0.0109
 Z: 68% - 0.0284, 95% - 0.0394, 99.7% - 0.0478, MZ = 0.0231



X: 68% - 0.0118, 95% - 0.0249, 99.7% - 0.0400, MX = 0.0075
 Y: 68% - 0.0058, 95% - 0.0124, 99.7% - 0.0172, MY = 0.0010
 Z: 68% - 0.0194, 95% - 0.0307, 99.7% - 0.0396, MZ = 0.0139



N: 68% - 0.0205, 95% - 0.0290, 99.7% - 0.0367, MN = -0.0179
 E: 68% - 0.0152, 95% - 0.0208, 99.7% - 0.0292, ME = -0.0123
 U: 68% - 0.0510, 95% - 0.0654, 99.7% - 0.0765, MU = 0.0448



N: 68% - 0.0072, 95% - 0.0144, 99.7% - 0.0198, MN = 0.0035
 E: 68% - 0.0062, 95% - 0.0117, 99.7% - 0.0205, ME = -0.0030
 U: 68% - 0.0217, 95% - 0.0373, 99.7% - 0.0496, MU = 0.0151

Рисунок 4.16 – Відхилення (нев'язання) фазових float та fixed PPP-рішень від еталонного, м

30 хвилин

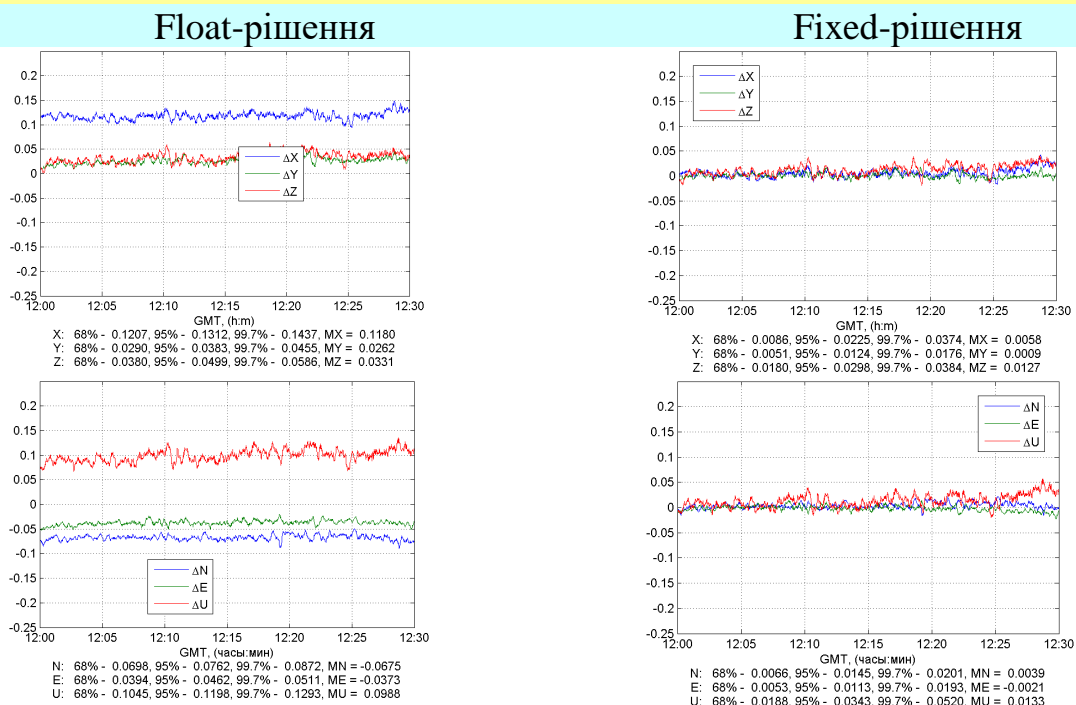


Рисунок 4.17 – Відхилення (нев'язання) фазових float та fixed PPP-рішень від еталонного, м

15 хвилин

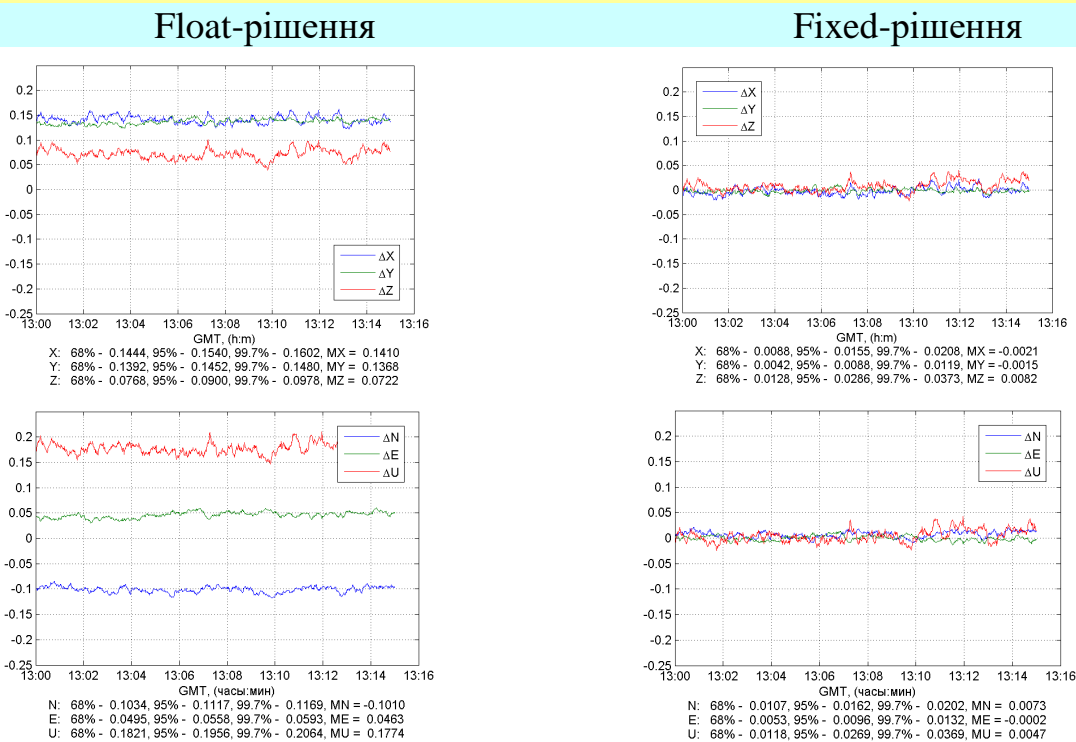


Рисунок 4.18 – Відхилення (нев'язання) фазових float та fixed PPP-рішень від еталонного, м

Станція KTVL, 19.06.2013 р.

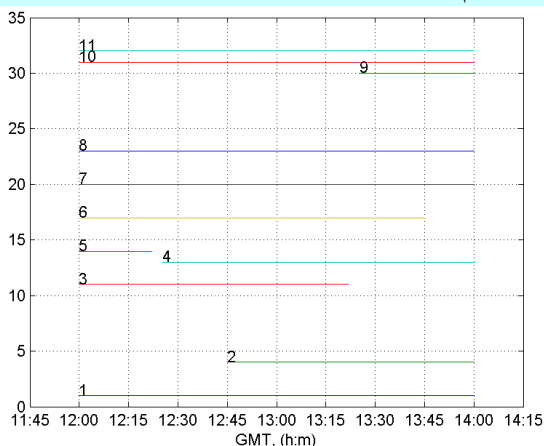


Рисунок 4.19 – Інтервали радіовидимості (після процесінгу GPS-спостережень)

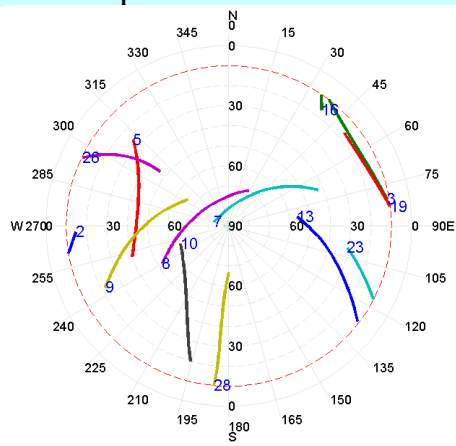
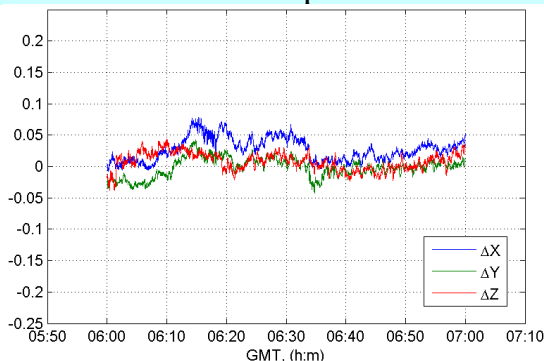


Рисунок 4.20 – «Рисунок неба» (радіовидимість супутників в системі координат «азимут – кут місця»)

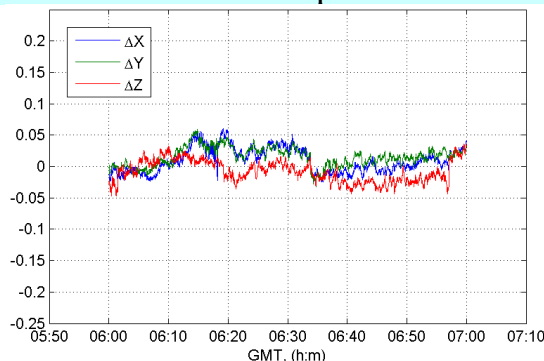
1 година

Float-рішення

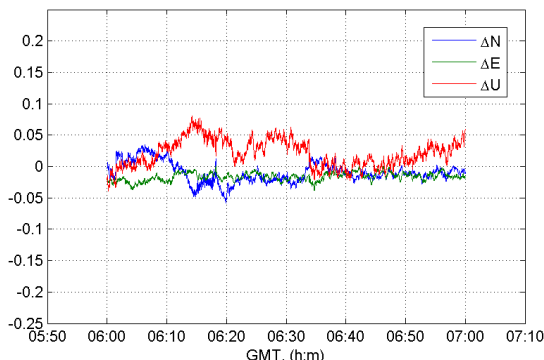
Fixed-рішення



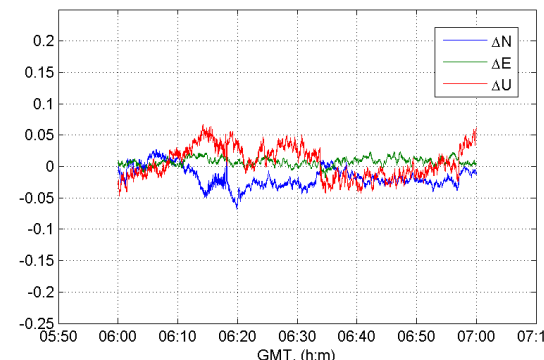
X: 68% - 0.0351, 95% - 0.0608, 99.7% - 0.0740, MX = 0.0273
 Y: 68% - 0.0159, 95% - 0.0307, 99.7% - 0.0391, MY = -0.0013
 Z: 68% - 0.0172, 95% - 0.0301, 99.7% - 0.0390, MZ = 0.0079



X: 68% - 0.0207, 95% - 0.0432, 99.7% - 0.0579, MX = 0.0095
 Y: 68% - 0.0230, 95% - 0.0404, 99.7% - 0.0554, MY = 0.0154
 Z: 68% - 0.0209, 95% - 0.0347, 99.7% - 0.0429, MZ = -0.0078



N: 68% - 0.0196, 95% - 0.0347, 99.7% - 0.0517, MN = -0.0097
 E: 68% - 0.0192, 95% - 0.0269, 99.7% - 0.0356, ME = -0.0164
 U: 68% - 0.0333, 95% - 0.0567, 99.7% - 0.0732, MU = 0.0212



N: 68% - 0.0260, 95% - 0.0404, 99.7% - 0.0611, MN = -0.0171
 E: 68% - 0.0104, 95% - 0.0183, 99.7% - 0.0228, ME = 0.0075
 U: 68% - 0.0277, 95% - 0.0470, 99.7% - 0.0603, MU = 0.0064

Рисунок 4.21 – Відхилення (нев'язання) фазових float та fixed PPP-рішень від еталонного, м

30 хвилин

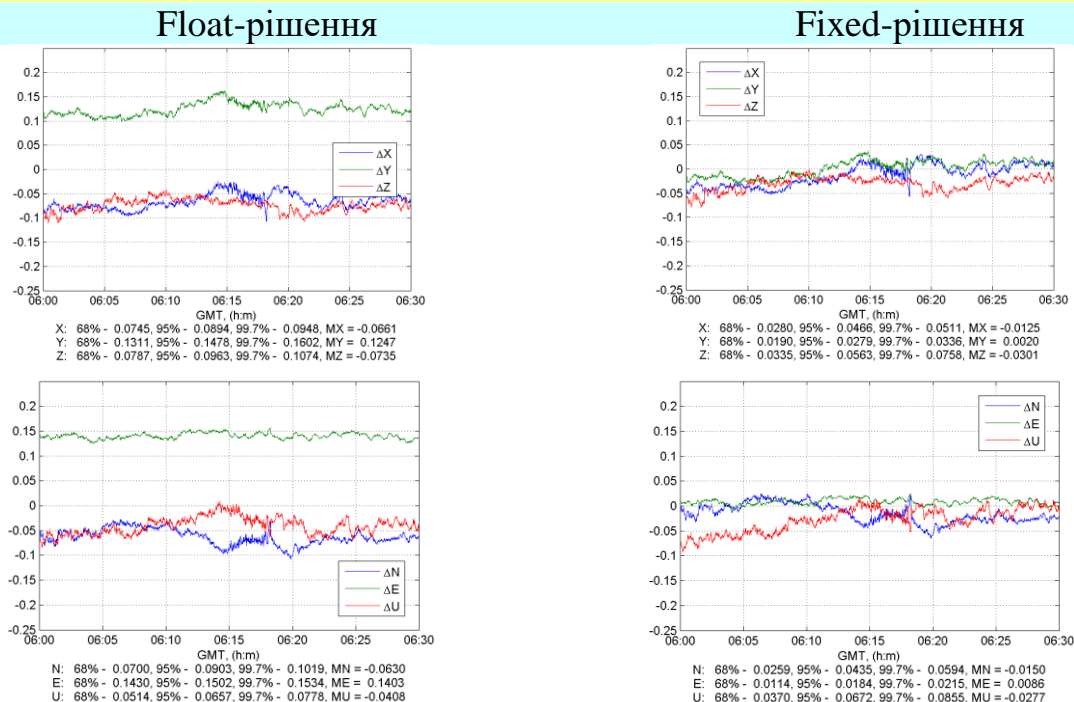


Рисунок 4.22 – Відхилення (нев'язання) фазових float та fixed PPP-рішень від еталонного, м

15 хвилин

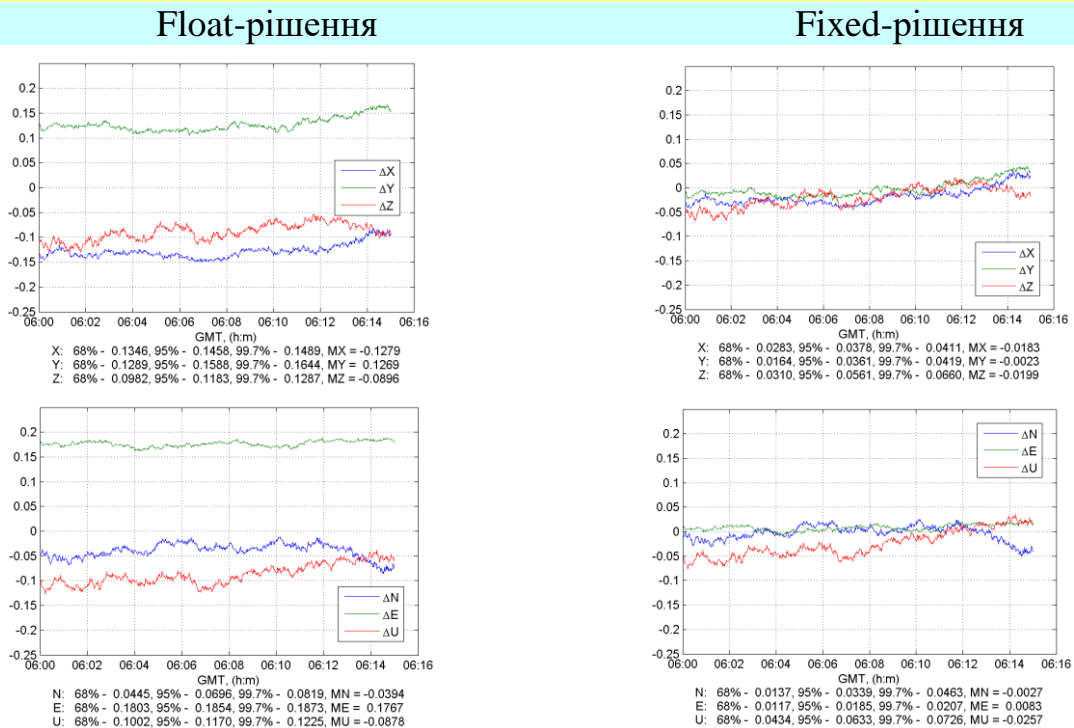


Рисунок 4.23 – Відхилення (нев'язання) фазових float та fixed PPP-рішень від еталонного, м

4.7 Результати тестування і дослідження запропонованої реалізації визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів fixed-методом PPP

Тестування розроблених алгоритмів отримання fixed PPP-рішень НКА проводилося з використанням реальних двохчастотних спостережень супутника GRACE-A за 10 січня та 19 червня 2013 р. Якість бортових спостережень НКА COSMIC для вирішення задачі, як зазначали й інші дослідники, виявилось незадовільною. Істотною проблемою обробки бортових спостережень НКА COSMIC були й обмеження радіовидимості, спричинені «бічною» орієнтацією бортових приймальних GPS-антен (для просвічування атмосфери Землі в частині нижньої півсфери), наслідком чого була поява інтервалів із значно погіршеним геометричним фактором.

Необхідно відзначити, що GPS-спостереження НКА COSMIC порівняно з НКА GRACE-A мали дві відмінні риси: а) темп спостережень становив 10 с (а не 1 с); б) підстроювання шкали часу бортового приймача до найближчої цілої GPS-секунди не здійснювалося і розбіжність шкал часу приймача та системного часу GPS для добових вимірювань 10.01.2013 р. змінювалося в межах 0,04–0,06 с, а для добових вимірювань 19.06.2013 р. – у межах 0,13–0,14 с.

Розрахунки еталонних траєкторій НКА GRACE проводилися за даними архівного файлу точної траєкторії у форматі SP3 за тими ж самими алгоритмами та програмами, що й траєкторії супутників ГНСС. Координати та складові вектору швидкості НКА розраховувалися на моменти часу прийому сигналів, розрахованих із модифікованого P1-рішення.

У ході обробки бортових спостережень НКА GRACE-A при отриманні fixed PPP-рішень для корекцій IF-спостережень використовувалися ті ж, раніше згадані в розділі 4.2, оцінки інструментальних фазових затримок сигналів на борту GPS-супутників, отримані за спостереженнями регіональної мережі перманентних станцій України. Як еталонні значення при апостеріорній оцінці

точності були використані оцінки поточних координат НКА GRACE-A (взяті з зазначеного вище архіву CDAAC) з декларованими похибками на рівні ~5 см.

Відповідно до прийнятої методології виконання дискретного/цілочисельного РФН (див. підрозділ 4.1) були виконані експерименти та отримані результати оцінки надійності РФН як WL-комбінацій фазових спостережень різницевої частоти (з використанням комбінації Melbourne-Wübbena), так і IF-комбінацій фазових спостережень.

Для дослідження IF-fixed рішень та оцінки інтервалів ініціалізації РФН вибиралися інтервали (дільниці) спостережень тривалістю 2 години, 1,5 години, 1 година, 45 хвилин та 30 хвилин. На кожному інтервалі проводилося отримання всіх видів PPP-рішень. Якщо на обраному інтервалі часу РФН не було зроблено, інтервал розширювався (або звужувався) до отримання правильного фіксованого рішення.

Для кожного інтервалу формувалися та аналізувалися всі рішення – модифіковане кодове P1-рішення, кодове «безіоносферне» IF-рішення, WL-рішення, фазове рішення за прирощенням IF-спостережень, фазові IF-float та IF-fixed рішення. При отриманні IF-float і IF-fixed рішень як проміжне («априорне») рішення використовувалося IF-рішення з прирощенням фаз, «посаджене» на кодове модифіковане рішення P1 на поточному інтервалі.

При виконанні РФН IF-спостережень та подальшого отримання дискретного/цілочисельного PPP-рішення здійснюються перетворення рівнянь спостережень, формування цільової функції та пошук її мінімуму на дискретній множині змінних. Задача може бути вирішена прямим перебором у заданих межах варіацій змінних. Однак при великій кількості супутників, що спостерігаються, і великому інтервалі невизначеності шуканих значень прямий перебір не представляється можливим. Для вирішення таких задач зазвичай використовуються різні модифікації LAMBDA-методу, які дозволяють суттєво зменшити діапазони переборів та отримати дискретне рішення за прийнятний інтервал часу.

Для рішення задачі пошуку дискретних рішень (крім процедури прямого перебору, коли це було можливо і доцільно) використовувався «швидкий» та ефективний пакет прикладних програм MILES (MATLAB package for solving Mixed Integer LEast Squares problems) (<http://www.cs.mcgill.ca/~chang/MILES.php>) [150, 151]. При використанні зазначених процедур пошуку мінімуму квадратичних форм з дискретними аргументами (в ході РФН), як показали дослідження, дуже важливо обмежувати діапазон пошуку дискретного рішення із залученням заокруглених float-оцінок та використовувати оцінку (за моделлю похибок) довірчих інтервалів областей переборів. Це суттєво обмежує ймовірність хибних рішень.

На рис. 4.24 – 4.71 (вісім груп рисунків) наведено приклади порівняльних ілюстрацій експериментальних результатів визначення координатних параметрів руху НКА GRACE-A на двох вибраних двогодинних інтервалах (8:30 – 10:38 та 15:30 – 17:45) із добових спостережень 19.06.2013.

На вказаних рисунках (по шість рисунків у групі) показано:

- зони радіовидимості супутників GPS з борту НКА GRACE-A і кількість супутників, що спостерігаються, значення геометричних факторів поточного робочого сузір'я супутників GPS для виділеного інтервалу спостережень;

- результати проміжних рішень – модифікованого кодового P1-рішення та фазового рішення по прирощенням IF-спостережень («підтягнутого» до P1-рішення);

- результати IF-float та IF-fixed PPP-рішень.

На рисунках зображені нев'язання (у метрах) координатних рішень (у Грінвічській системі координат) відносно еталонних значень.

Під кожним рисунком нев'язань наведено статистичні характеристики рішень – оцінки середніх рівнів нев'язань (похибок позиціонування) з довірчими інтервалами 68%, 95%, 99,7%, а також оцінки середніх значень нев'язань.

Інтервал спостережень 128 хвилин (8:30 – 10:38)

Ділянка 128 хвилин

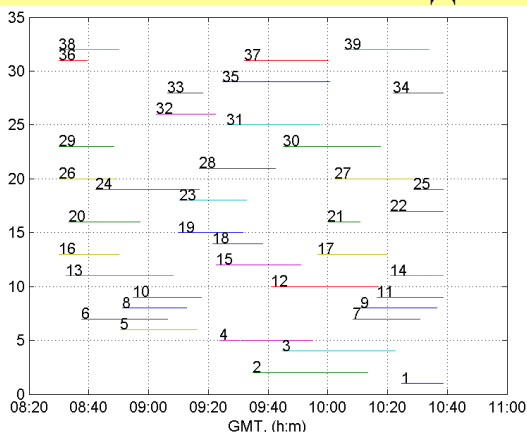


Рисунок 4.24 – Зони радіобачення супутників

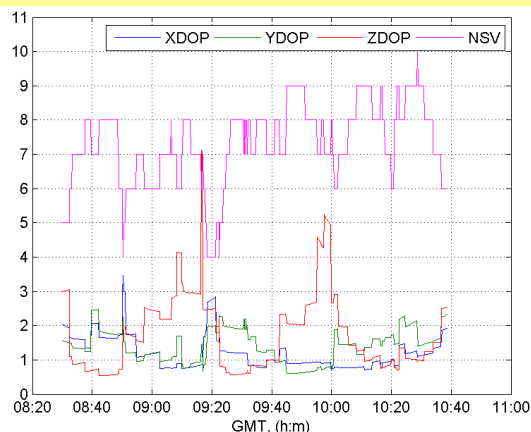


Рисунок 4.25 – Значення геометричних факторів

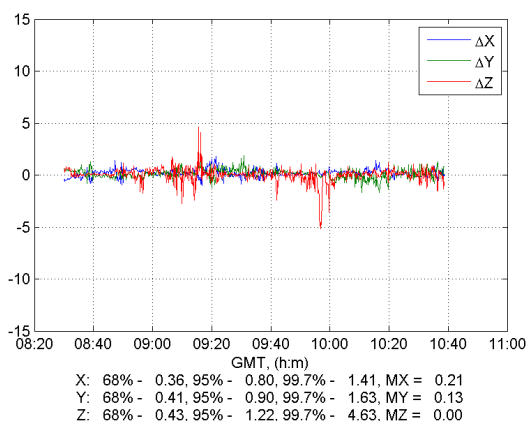


Рисунок 4.26 – P1-рішення

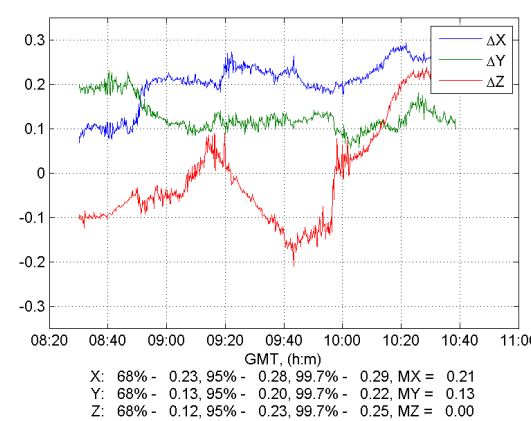


Рисунок 4.27 – Модифіковане WL-рішення

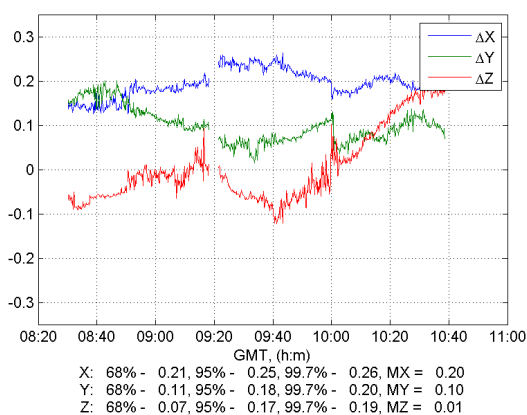


Рисунок 4.28 – IF-float рішення

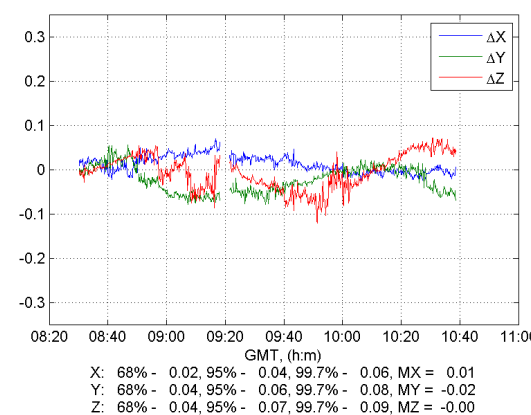


Рисунок 4.29 – IF-fixed рішення

Інтервал спостережень 128 хвилин (8:30 – 10:38)

Ділянка 90 хвилин

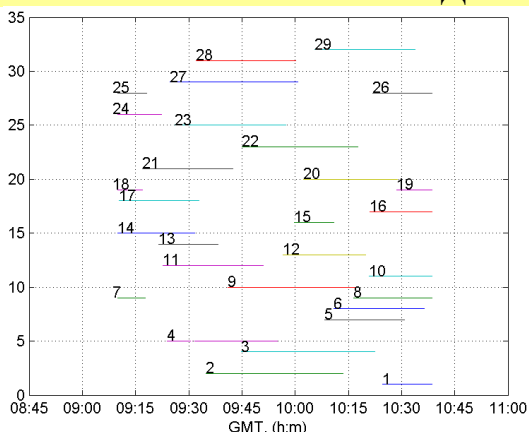


Рисунок 4.30 – Зони радіобачення супутників

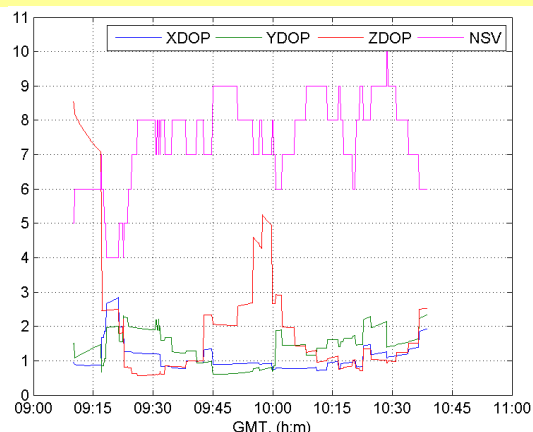


Рисунок 4.31 – Значення геометричних факторів

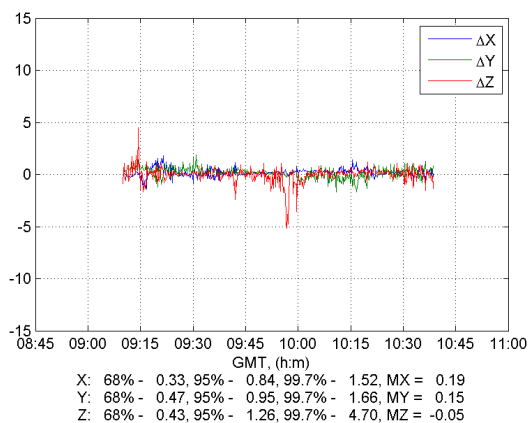


Рисунок 4.32 – P1-рішення

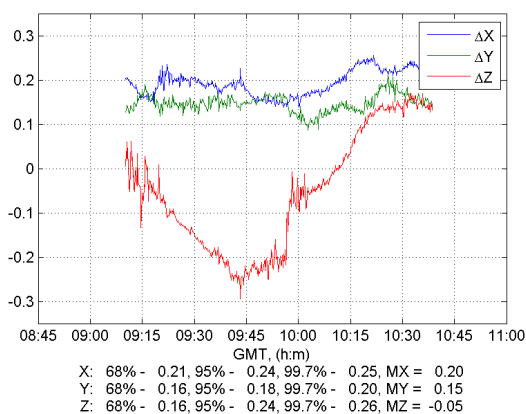


Рисунок 4.33 – Модифіковане WL-рішення

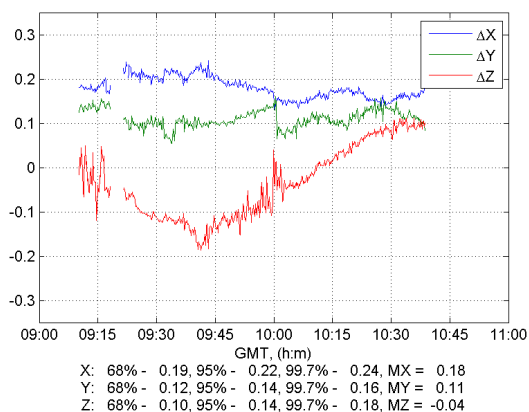


Рисунок 4.34 – IF-float рішення

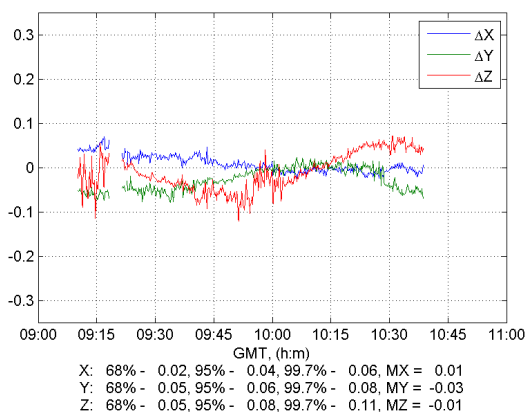


Рисунок 4.35 – IF-fixed рішення

Інтервал спостережень 128 хвилин (8:30 – 10:38)

Ділянка 45 хвилин

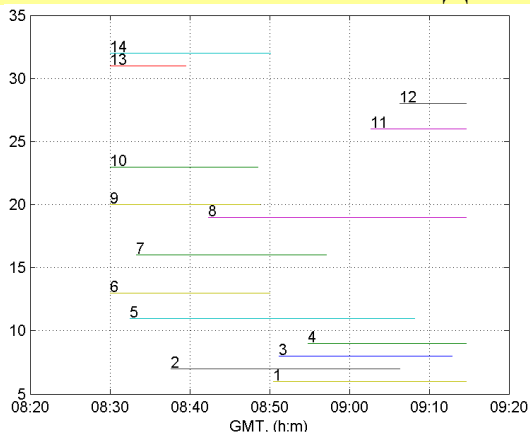


Рисунок 4.36 – Зони радіобачення супутників

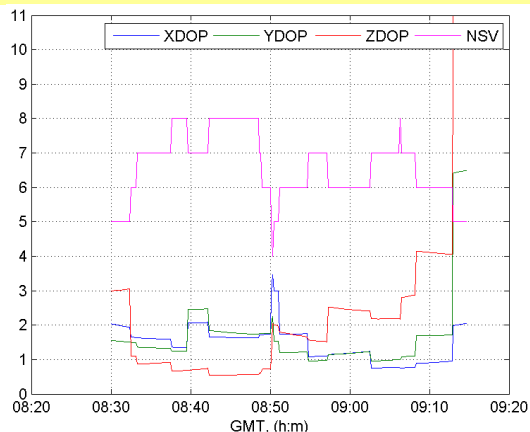
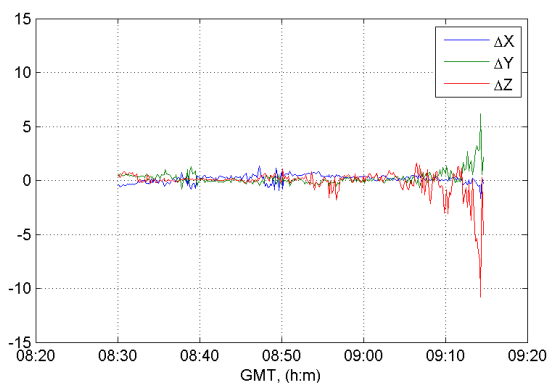
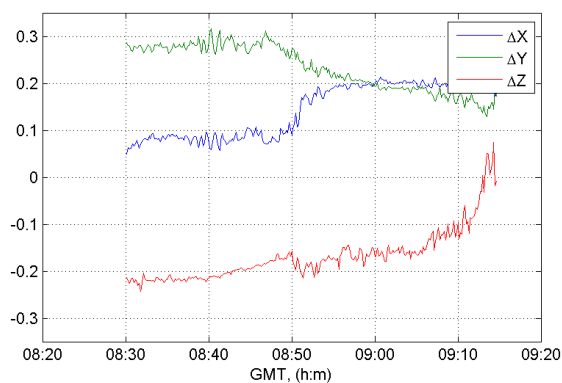


Рисунок 4.37 – Значення геометричних факторів



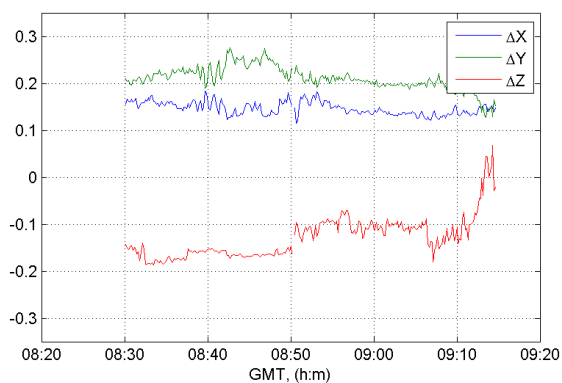
X: 68% - 0.38, 95% - 0.71, 99.7% - 1.37, MX = 0.14
 Y: 68% - 0.36, 95% - 1.10, 99.7% - 3.23, MY = 0.24
 Z: 68% - 0.44, 95% - 1.83, 99.7% - 7.41, MZ = -0.16

Рисунок 4.38 – P1-рішення



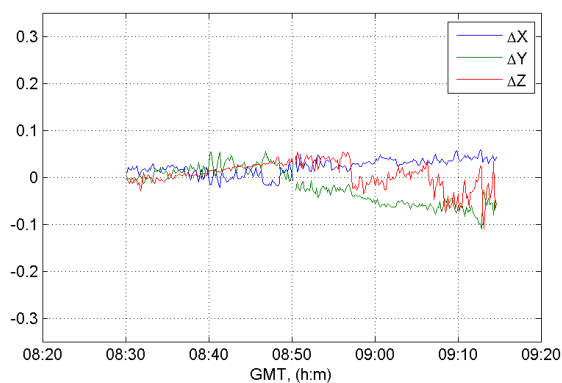
X: 68% - 0.20, 95% - 0.21, 99.7% - 0.22, MX = 0.14
 Y: 68% - 0.28, 95% - 0.30, 99.7% - 0.31, MY = 0.23
 Z: 68% - 0.20, 95% - 0.22, 99.7% - 0.23, MZ = -0.17

Рисунок 4.39 – Модифіковане WL-рішення



X: 68% - 0.16, 95% - 0.17, 99.7% - 0.18, MX = 0.15
 Y: 68% - 0.22, 95% - 0.25, 99.7% - 0.27, MY = 0.21
 Z: 68% - 0.16, 95% - 0.18, 99.7% - 0.19, MZ = -0.13

Рисунок 4.40 – IF-float рішення



X: 68% - 0.03, 95% - 0.05, 99.7% - 0.06, MX = 0.02
 Y: 68% - 0.05, 95% - 0.07, 99.7% - 0.10, MY = -0.02
 Z: 68% - 0.03, 95% - 0.06, 99.7% - 0.08, MZ = 0.01

Рисунок 4.41 – IF-fixed рішення

Інтервал спостережень 128 хвилин (8:30 – 10:38)
Ділянка 30 хвилин

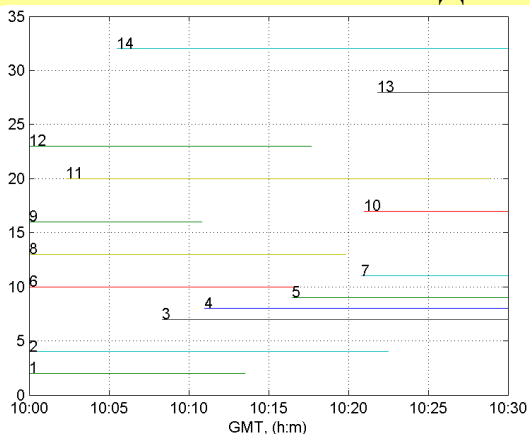


Рисунок 4.42 – Зони радіобачення супутників

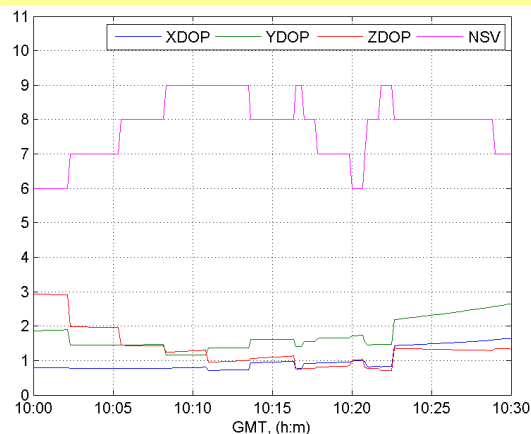


Рисунок 4.43 – Значення геометричних факторів

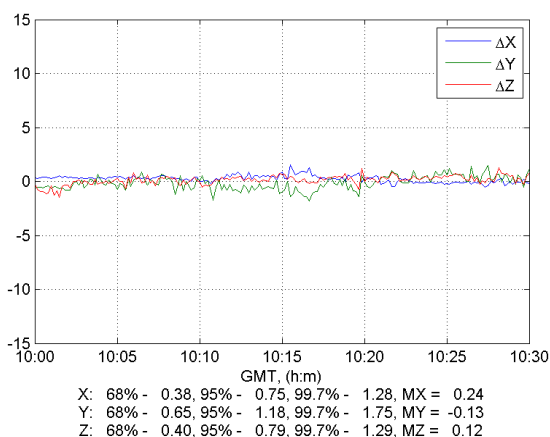


Рисунок 4.44 – P1-рішення

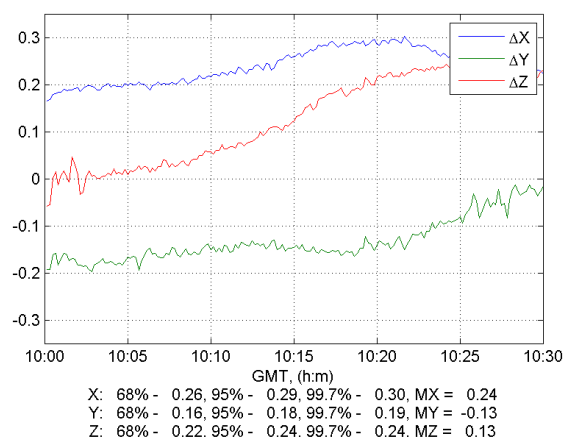


Рисунок 4.45 – Модифіковане WL-рішення

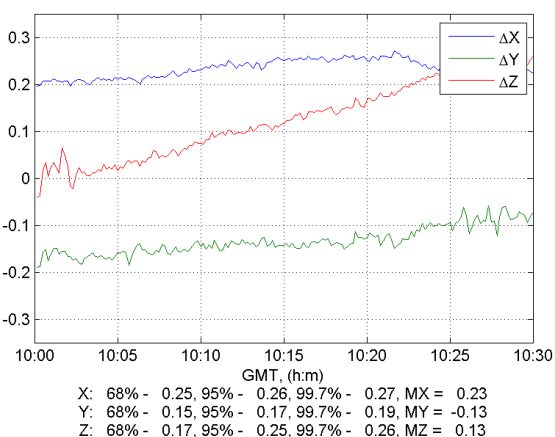


Рисунок 4.46 – IF-float рішення

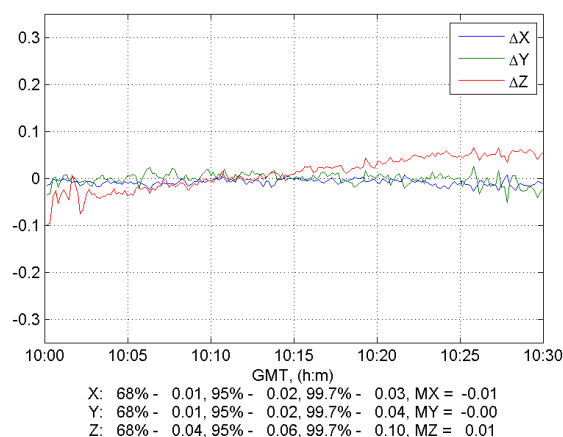


Рисунок 4.47 – IF-fixed рішення

Інтервал спостережень 135 хвилин (15:30 – 17:45)

Ділянка 135 хвилин

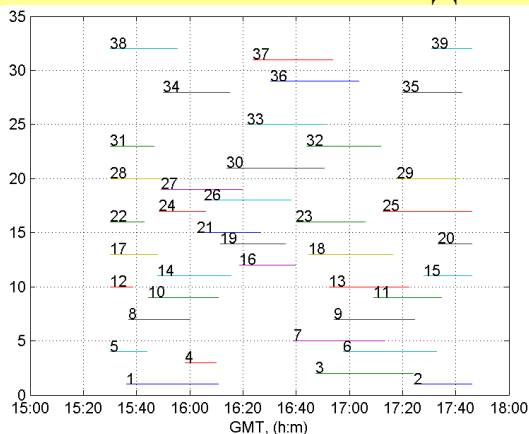


Рисунок 4.48 – Зони радіобачення супутників

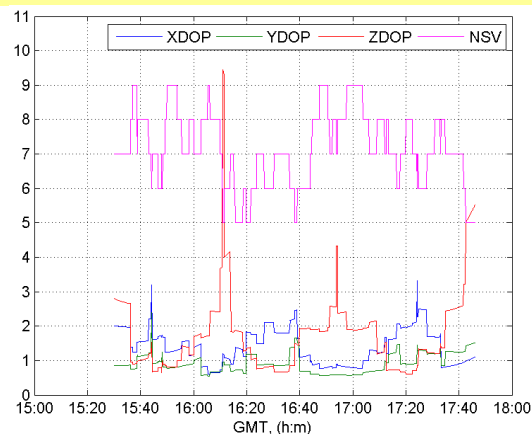


Рисунок 4.49 – Значення геометричних факторів

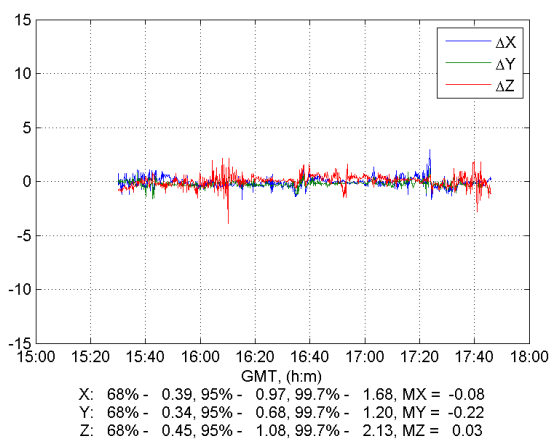


Рисунок 4.50 – P1-рішення

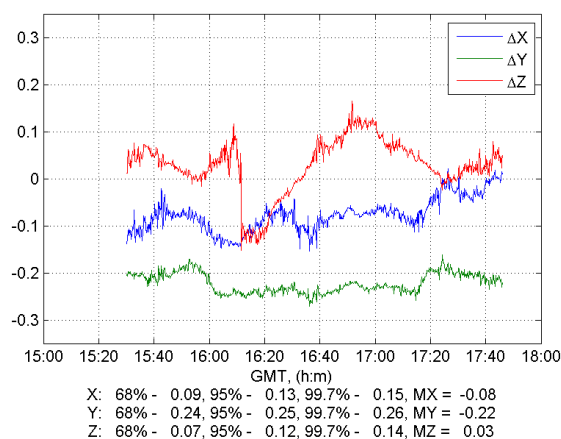


Рисунок 4.51 – Модифіковане WL-рішення

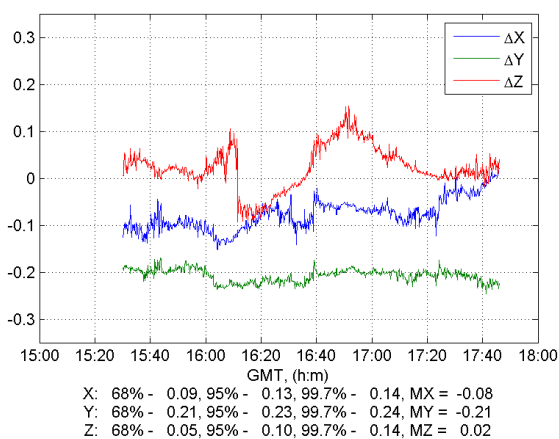


Рисунок 4.52 – IF-float рішення

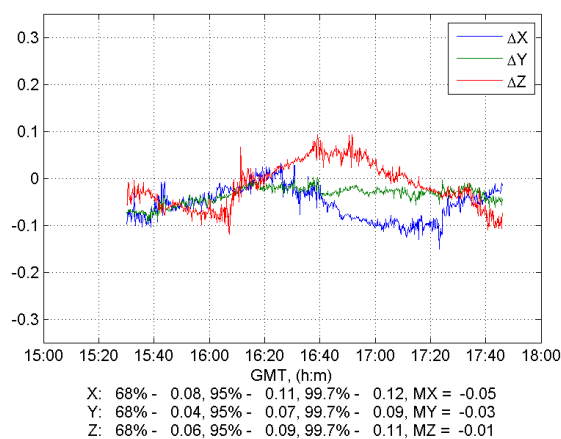


Рисунок 4.53 – IF-fixed рішення

Інтервал спостережень 135 хвилин (15:30 – 17:45)

Ділянка 60 хвилин

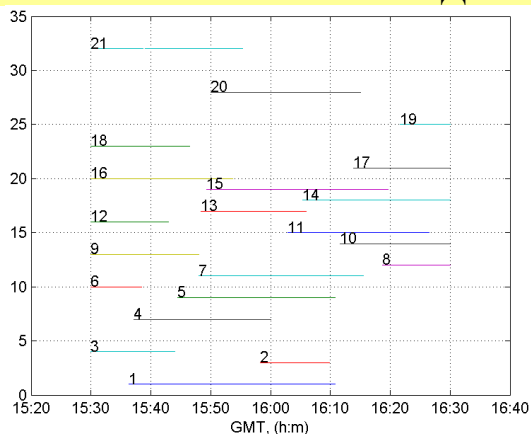


Рисунок 4.54 – Зони радіобачення супутників

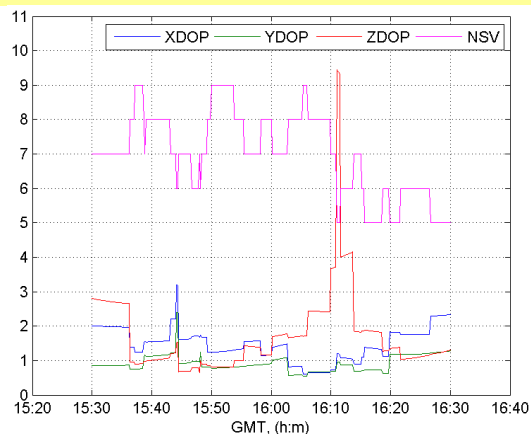


Рисунок 4.55 – Значення геометричних факторів

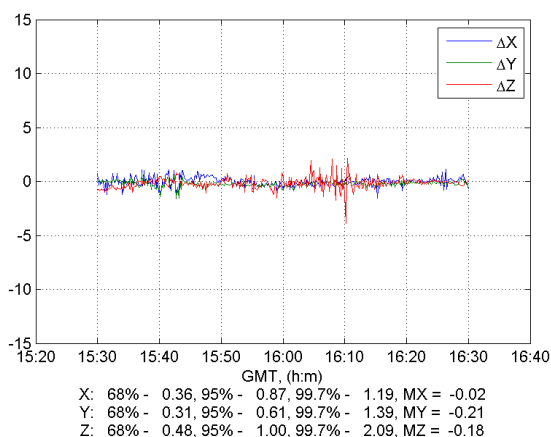


Рисунок 4.56 – P1-рішення

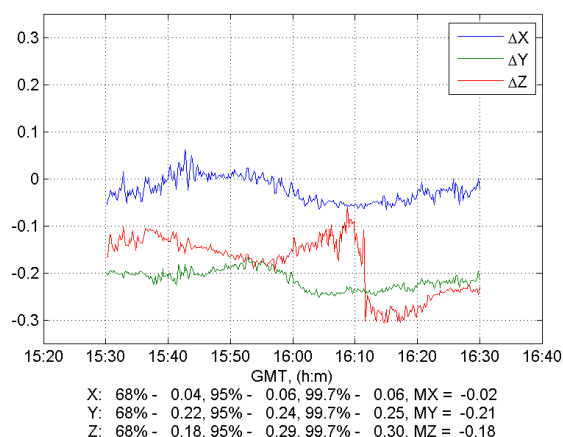


Рисунок 4.57 – Модифіковане WL-рішення

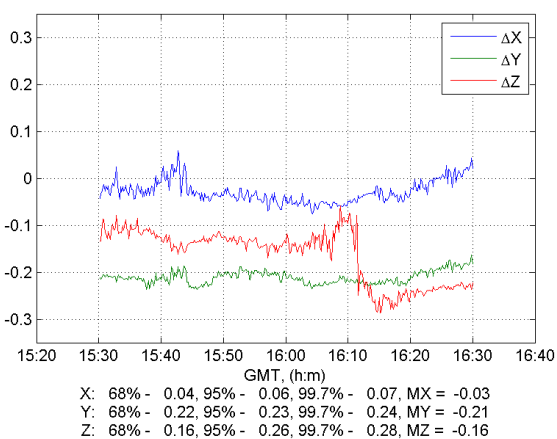


Рисунок 4.58 – IF-float рішення

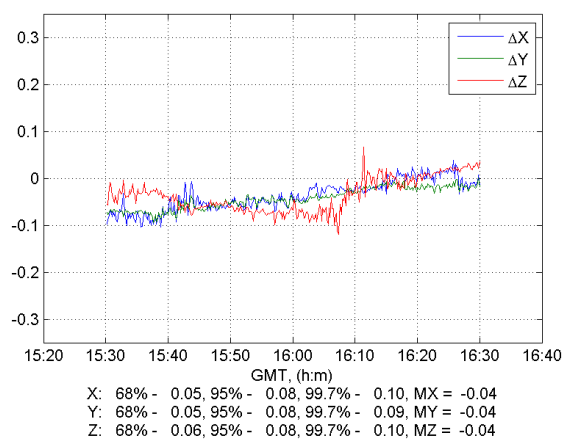


Рисунок 4.59 – IF-fixed рішення

Інтервал спостережень 135 хвилин (15:30 – 17:45)

Ділянка 30 хвилин

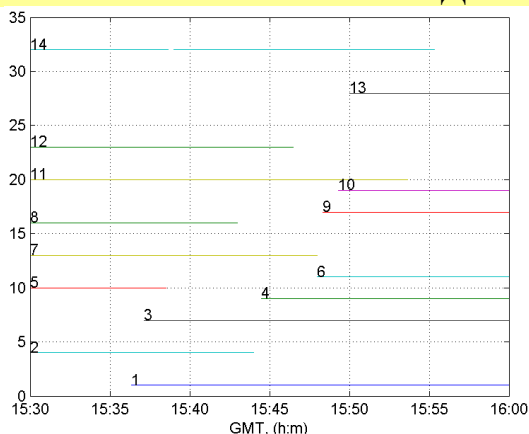


Рисунок 4.60 – Зони радіобачення супутників

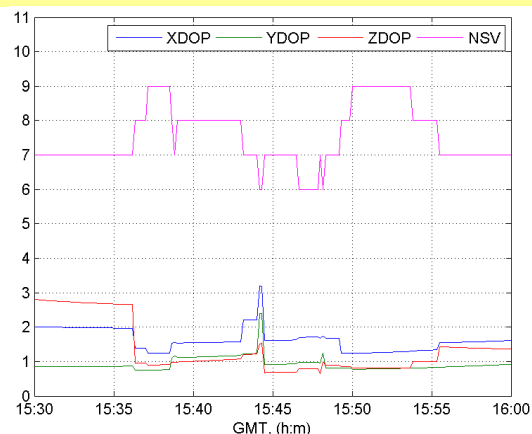


Рисунок 4.61 – Значення геометричних факторів

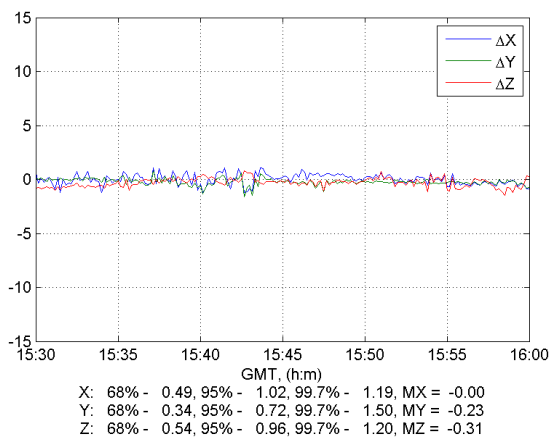


Рисунок 4.62 – P1-рішення

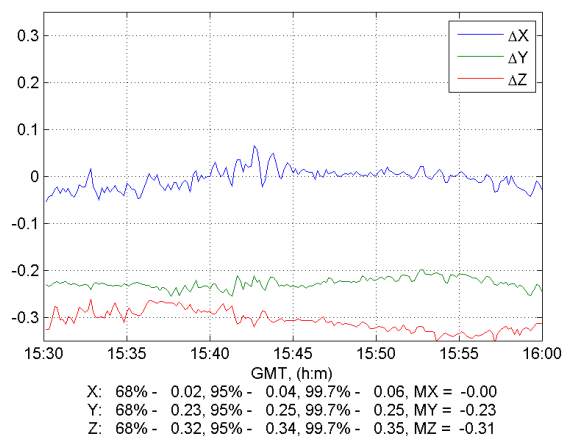


Рисунок 4.63 – Модифіковане WL-рішення

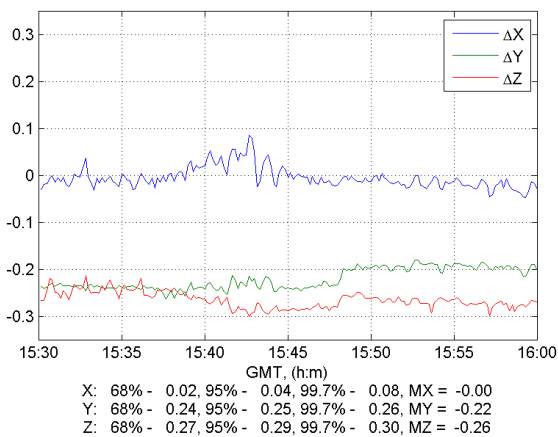


Рисунок 4.64 – IF-float рішення

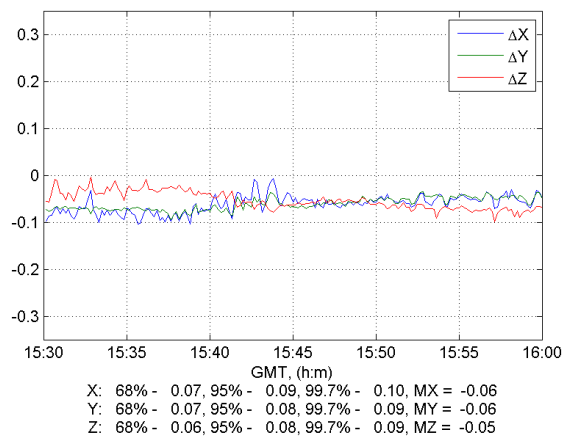


Рисунок 4.65 – IF-fixed рішення

Інтервал спостережень 135 хвилин (15:30 – 17:45)

Ділянка 30 хвилин

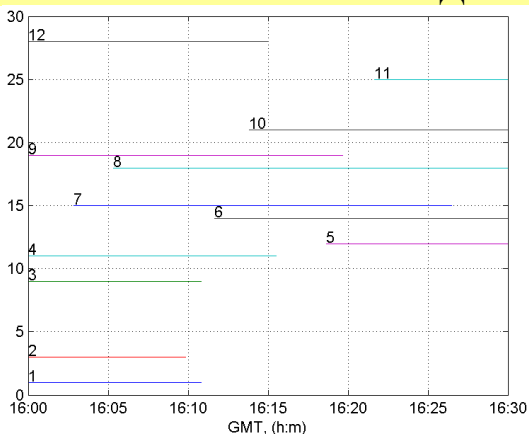


Рисунок 4.66 – Зони радіобачення супутників

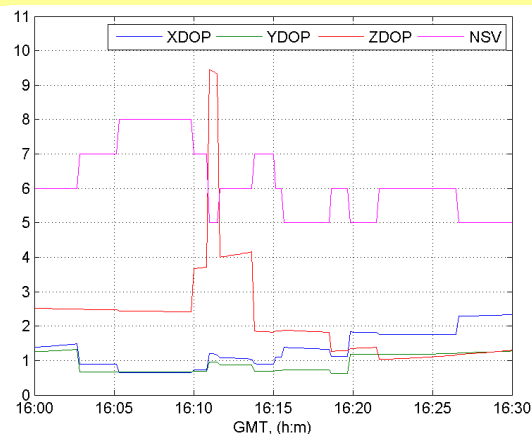


Рисунок 4.67 – Значення геометричних факторів

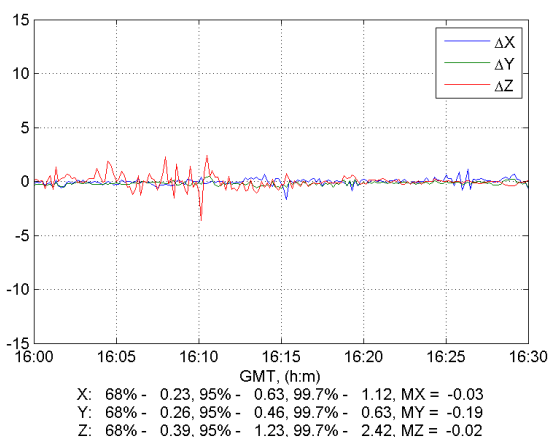


Рисунок 4.68 – P1-рішення

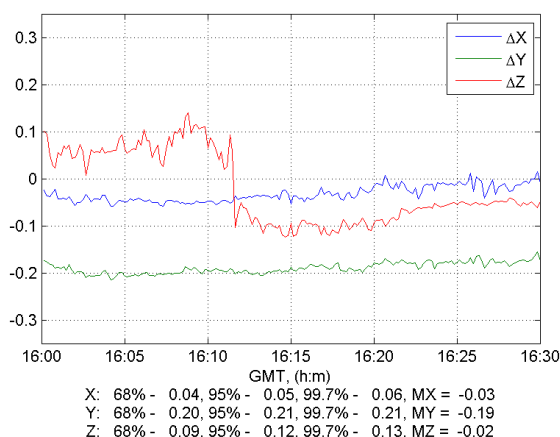


Рисунок 4.69 – Модифіковане WL-рішення

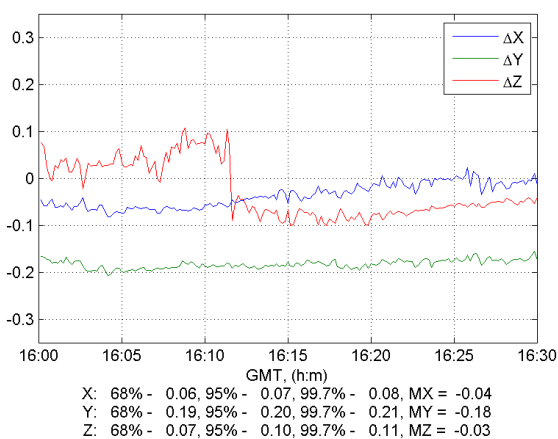


Рисунок 4.70 – IF-float рішення

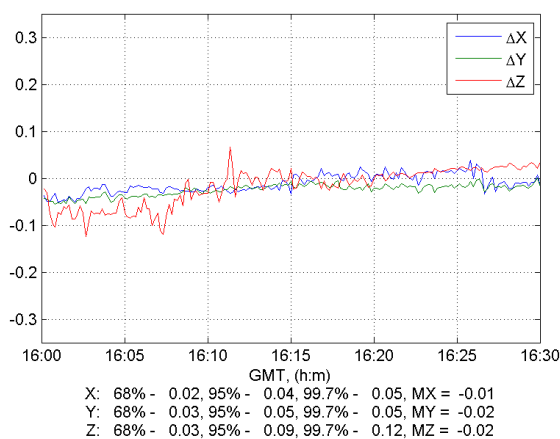


Рисунок 4.71 – IF-fixed рішення

4.8 Пропозиції щодо подальшого розвитку та вдосконалення високоточного позиціонування fixed-методом PPP

Як показали дослідження, успішне розв'язання фазової неоднозначності та реалізація fixed-режиму PPP-позиціонування неможливе без знання інструментальних кодових та фазових затримок сигналів у трактах GPS-супутників. В даний час відомо джерело інформації про оцінки фазових інструментальних затримок в апаратурі супутників GPS – французька космічна агенція CNES. Деякі аналітичні центри IGS також почали розповсюдження таких затримок, але комбінованого рішення IGS поки що немає [152]. У той же час, проведений попередній аналіз якості оцінок фазових інструментальних затримок, сформованих у центрі обробки CNES за 2013–2016 рр., показав, що добові варіації зазначених оцінок з великою ймовірністю можуть досягати неприйнятно значимих величин і правильне рішення РФН стає проблематичним. Тому (і у будь-якому іншому випадку) для реалізації fixed-режиму PPP-позиціонування доцільно мати власне (вітчизняне) джерело фазових інструментальних затримок в апаратурі супутників GPS. Як показали проведені дослідження, формування оцінок фазових інструментальних затримок можливе за спостереженнями регіональних мереж станцій, зокрема мережі перманентних станцій України, причому сформовані оцінки можуть бути використані як для наземних, так і для космічних застосувань [7, 39]. Тому доцільною є побудова центру збору та обробки інформації перманентних станцій України, який буде проводити оцінку фазових інструментальних затримок та їх передачу споживачам для реалізації fixed-режиму PPP-позиціонування.

Наступним важливим напрямком розвитку та вдосконалення fixed-режиму PPP є використання багаточастотних (двох- і, особливо, трьохчастотних) та мультисистемних спостережень. Використання трьохчастотних спостережень дозволить значно підвищити точність WL-рішення і використовувати його або як самостійне рішення, або як проміжне рішення високої точності при

реалізації fixed-режиму PPP-позиціонування для підвищення надійності роздільної здатності фазової неоднозначності і поліпшення точності позиціонування. Обробка трьохчастотних фазових спостережень дозволяє, як показано в закордонних роботах останніх років, зменшити інтервали ініціалізації дискретних/цілочисельних fixed PPP-рішень до ~1 хвилини й менше (з вірогідністю $P \approx 95\%$) [153, 154]. Використання мультисистемних (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) спостережень дозволить значно збільшити кількість спостережуваних супутників, покращити значення геометричного фактора, підвищити надійність вирішення фазової неоднозначності, зменшити час збіжності та підвищити точність fixed-режиму PPP-позиціонування.

Висновки по розділу 4

1. У розділі наведено результати удосконалення та реалізації fixed-методу PPP-позиціонування для різних умов проведення вимірювань.

2. Відмінними рисами удосконаленого методу та алгоритмів розв'язання фазової неоднозначності двохчастотних фазових GPS-спостережень fixed-методом PPP-позиціонування є:

- використання спеціально розробленої статистично коректної методики спільного оцінювання сукупності інформаційних та неінформаційних «заважаючих» (для того чи іншого етапу обробки) параметрів, яка дозволила формувати універсальним способом зручні для подальшої обробки результуючі рівняння мінімальної розмірності та цільові функції пошуку цілочисельних рішень для будь-яких наборів спостережень та режимів позиціонування (статичного та кінематичного);

- поетапне спільне оброблення всіх спостережень вибірки лінійних комбінацій кодових та фазових спостережень, включаючи однозначне згладжене кодово-фазове рішення (замість рівнянь кодових псевдовідстаней), рішення по прирощенням фази та IF спостереження;

- оптимальне використання додаткової інформації, що міститься в згладженому кодово-фазовому рішенні та рівняннях IF-спостережень, з метою

підвищення надійності РФН цілочисельного fixed WL-рішення різницевої частоти.

3. Для дискретних fixed PPP-рішень середній час ініціалізації (розв'язання фазової неоднозначності) у статичному режимі вимірювань становить ~15–20 хвилин, після чого похибки точкових оцінок координат не перевищують ~5 см.

4. Експериментальні дослідження показали, що з використанням розробленого fixed-методу PPP-позиціонування досягається стійке визначення координат НКА (безіоносферного PPP-рішення) з похибками $\sim 3 \div 5$ см ($P \approx 95\%$). Середні інтервали ініціалізації цілочисельних fixed PPP-рішень склали: ~30 хв. із ймовірністю $P \approx 67\%$, ~45–60 хв. з ймовірністю $P \approx 85\%$ та ~90–120 хв. з ймовірністю, близькою до 100%.

5. У ході виконаних досліджень визначено ключові умови надійного досягнення правильного рішення задачі РФН:

- повинні бути виключені аномалії та стрибки кодових та фазових спостережень; якість вимірювань (рівні багатопроменевості, шумів, залишкових динамічних похибок кодових та фазових спостережень тощо) має відповідати якості вимірювань сучасних багаточастотних приймачів геодезичного класу; тому ключове значення набуває контроль та забезпечення якості спостережень на етапі попередньої обробки спостережень (препроцесингу);

- для корекції використовуваних у ході РФН кодово-фазових та фазових лінійних комбінацій необхідно використовувати високоточні поправки кодових та фазових інструментальних затримок у трактах ГНСС-супутників; поправки формуються сервісними центрами обробки ГНСС-спостережень (чи самими користувачами) з допомогою глобальних чи регіональних мереж наземних референцних станцій;

- РФН фазової комбінації Wide-Lane різницевої частоти (WL) (з використанням комбінації Melbourne-Wübbena) необхідно виконати з максимально можливою надійністю, тому що в іншому випадку

на наступному етапі неможливо виконання РФН безіоносферної комбінації, фазових спостережень першої та другої частот-носіїв;

- доцільно використання модифікованого WL-рішення в якості проміжного (апріорного) рішення, тому що точності P1-рішення не завжди достатньо для надійного вирішення задачі РФН «Iono-Free» спостережень;

- для вирішення задач РФН необхідно використовувати спостереження, накопичені на рекомендованих (для конкретних режимів та умов спостережень) інтервалах збіжності/ініціалізації цілочисельних PPP fixed-рішень; для підвищення надійності РФН необхідно ввести обмеження на мінімальний кут місця (15°); доцільно виконувати надійне РФН для «високих» супутників, а потім – «дорозв'язувати» неоднозначність для низьких супутників, що залишилися;

- при виконанні РФН фазових спостережень, отриманих поблизу моря (або на морі), коли з високою ймовірністю можуть виникати значні зміни в часі (варіації) зенітної тропосферної затримки (ЗТЗ) (подібна поведінка ЗТЗ спостерігалася для приморської станції KTVL, коли протягом двох годин зміни ЗТЗ могли досягати ~ 6 см), яка оцінюється спільно з інформаційними параметрами під час РФН; також слід підібрати адекватний порядок моделі зміни ЗТЗ;

- для підвищення надійності РФН рекомендується використовувати спостереження кількох ГНСС, тобто використовувати мультисистемні приймачі.

Перелічені умови надійного досягнення правильного рішення задачі РФН справедливі як для наземних, так і для космічних додатків.

5. Проблемним питанням залишається верифікація/валідація правильності дискретних/цілочисельних рішень. Результати експериментів показують, що не завжди відомі традиційні критерії можуть бути надійною основою. Тому рекомендується:

- використовувати для кінематичних рішень інтервали накопичення ~ 90 – 120 хв.;

– обмежувати області пошуку цілочисельних рішень з використанням float-оцінок фазових неоднозначностей (і оцінок їх точності за моделлю похибок спостережень);

– використовувати максимально точні кодово-фазові «апріорні» рішення як початкові наближення.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача високоточного визначення параметрів руху НКА по бортовим спостереженням сигналів ГНСС шляхом удосконалення відомих і створення нових методів і алгоритмів обробки фазових і кодових ГНСС-спостережень в режимі PPP, включаючи нові методи розв'язання неоднозначності фазових вимірювань, що дозволяє виконувати позиціонування НКА на сантиметровому рівні точності.

Проведено достатню кількість експериментів: 6 сеансів реальних спостережень ГНСС-приймачів НКА COSMIC і GRACE, а також 47 сеансів спостережень мережі перманентних станцій України. Це підтверджує високий рівень достовірності отриманих теоретичних та експериментальних результатів дисертаційної роботи.

Головні результати дисертації в області теоретичних досліджень наступні.

1. Отримали подальший розвиток методи та алгоритми реалізації високоточних автономних (недиференціальних) координатних PPP-рішень, включаючи розв'язання початкових неоднозначностей фазових ГНСС-спостережень шляхом отримання «плаваючого» (float) та/або дискретного/цілочисельного (fixed) рішень і їхніх модифікацій як для вимірювань на борту низькоорбітальних космічних апаратів (НКА), так і для приземних вимірювань.

Запропоновані нові та вдосконалені методи і алгоритми реалізації PPP-позиціонування дозволяють більш надійно виконувати розв'язання фазової неоднозначності (РФН) спостережень на значно менших інтервалах збіжності/ініціалізації рішень та потім – виконувати позиціонування на сантиметровому рівні точності. Запропоновані методи та алгоритми, на відміну від відомих, мають ряд істотних особливостей і переваг.

По-перше, в даній роботі вперше запропоновано використовувати так звані «віртуальні» одинарні різниці недиференціальних ГНСС-спостережень з зручною репараметризацією оцінюваних параметрів, що дозволяє поєднати переваги обробки недиференціальних та різницевих спостережень, підвищити надійність реалізації РФН та точного PPP-позиціонування у порівнянні з відомими підходами, які зазвичай використовують або недиференціальні ГНСС-спостереження, або прями їх одинарні різниці (між ГНСС-супутниками робочого сузір'я).

По-друге, вперше запропонована оригінальна реалізація дискретного/цілочисельного РФН недиференціальних фазових ГНСС-спостережень для наземних та космічних умов вимірювань, яка, на відміну від відомого та найпоширенішого у світі LAMBDA-методу та інших методів РФН, за рахунок використання спеціальних процедур МНК-оцінювання, верифікації рішень, гнучкого перетворення систем рівнянь спостережень, а також простої репараметризації груп оцінюваних невідомих дозволяє більш надійно виконувати РФН.

По-третє, вперше запропоновані методи та алгоритми PPP-рішень, які в ході РФН в якості проміжного рішення використовують, на відміну від відомих підходів, не «безіоносферні» кодові псевдовідстані низької точності, а більш точне (у кілька разів) нове комбіноване кодово-фазове координатне рішення (на основі спільної обробки кодових спостережень першої частоти ГНСС і двохчастотних неоднозначних фазових «безгеометричних» ГНСС-спостережень), що також дає суттєве (на $\sim 20\div 30\%$) збільшення надійності РФН та зменшення інтервалу його досягнення (ініціалізації/збіжності PPP-рішення).

2. Розроблено новий більш ефективний алгоритм РФН спостережень різницевої частоти «Wide-Lane» (WL) з використанням лінійної комбінації спостережень Melbourne-Wübbena. Запропоновано новий підхід до формування порогових значень з метою більш надійної верифікації WL-рішень, який дозволяє надійно виконувати РФН за $8\div 10$ хвилин.

3. Для досягнення надійного дискретного/цілочисельного РФН при статичному та кінематичному PPP-позиціонуванні приземних об'єктів та НКА запропонована нова реалізація метода і алгоритмів оцінювання інструментальних фазових затримок в апаратурі супутників ГНСС (GPS), які можуть формуватися по спостереженням не тільки глобальних, а й регіональних мереж ГНСС-станцій (зокрема, української мережі перманентних станцій). При цьому, на відміну від відомих підходів, оцінки інструментальних фазових затримок супутників ГНСС виконуються для різницевої частоти (довжина хвилі $\sim 86,2$ см) і частоти фазових «безіоносферних» комбінацій (довжина хвилі $\sim 10,7$ см) і не розщеплюються на окремі затримки спостережень частот-носіїв, внаслідок чого ці оцінки абсорбують остаточні похибки ефемерид і годинників супутників, що в свою чергу, підвищує надійність дискретного/цілочисельного РФН та досяжність сантиметрової точності PPP-рішень при прийнятному рівні їх ініціалізації/збіжності.

Отримані результати дисертаційної роботи мають важливе практичне значення, а саме:

1. Виконано експериментальне тестування й проведено дослідження нових та удосконалених методів, алгоритмів і програмних модулів для вирішення завдань точного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів на прикладах НКА FORMOSAT-3/COSMIC (США, Тайвань) та GRACE (США, ФРН). При реалізації кінематичного методу (без використання моделей руху НКА) досягнута практично потенційна точність визначення їх параметрів траєкторій, яка відповідає найсучаснішим світовим досягненням і задовольняє найжорсткішим вимогам до точності визначення параметрів руху НКА для всіх існуючих та майбутніх космічних місій. Зокрема, експериментальні результати показали, що стійко досягається визначення координат НКА (PPP-рішення) з похибками, які не перевищують $\sim 10 \div 20$ см ($P \approx 95\%$) з використанням «плаваючого» методу РФН та $\sim 3 \div 5$ см ($P \approx 95\%$) з використанням дискретного методу РФН. Складові вектора

швидкості НКА визначаються з похибками, які не перевищують $\sim 1 \div 2$ мм/с ($P \approx 95\%$).

Для статичного режиму PPP-визначень приземних об'єктів похибки визначення координат на добовому інтервалі не перевищують ~ 8 мм ($P \approx 95\%$). При реалізації дискретного/цілочисельного РФН у статичному режимі позиціонування середній час ініціалізації становить $\sim 15 \div 20$ хвилин, після чого похибки точкових оцінок координат не перевищують $\sim 2 \div 5$ см. Для кінематичного режиму PPP-визначень похибки оцінок координат приземних об'єктів на інтервалі спостережень ~ 2 години не перевищують ~ 3 – 5 см по плановим координатам і ~ 7 – 8 см по висоті. Такі результати відповідають найкращим досягненням провідних наукових лабораторій світу.

2. Запропоновано й апробовано сукупність нових методів, алгоритмів та програмних модулів оцінки фазових інструментальних затримок в апаратурі супутників ГНСС на основі використання спостережень регіональних мереж ГНСС-станцій. З використанням отриманих поправок досягається РФН і отримання «безіоносферних» рішень сантиметрової точності не тільки для наземних об'єктів, а й для бортових вимірювань НКА.

3. Розроблений прототип програмного забезпечення обробки ГНСС-спостережень та позиціонування методом PPP може бути використаний для точного визначення параметрів руху НКА, включаючи супутники дистанційного зондування Землі, супутники радіолокаційної інтерферометрії SAR/InSAR, вітчизняні супутники типу «Січ» та супутники проекту «Іоносат».

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

– адаптація розроблених методів та алгоритмів для обробки мультисистемних (GPS, Galileo, ГЛОНАСС, BeiDou) ГНСС-спостережень з метою підвищення надійності і точності визначення параметрів руху НКА та позиціонування навколоземних об'єктів;

– адаптація розроблених методів та алгоритмів до роботи в умовах реального часу та реалізації режиму PPP RTK (Real Time Kinematic);

– адаптація та розвиток запропонованих методів і алгоритмів автономного статичного та кінематичного PPP-позиціонування сантиметрового рівня точності по трьохчастотним (багаточастотним) спостереженням сигналів кількох або всіх функціонуючих ГНСС з реалізацією дискретного/цілочисельного розв’язання фазової неоднозначності і мінімізації інтервалу ініціалізації/збіжності PPP-рішень до рівня ≤ 1 хв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жалило А.А., Флерко С.Н., Яковченко А.И. Мониторинг геометрической конфигурации многобазисной сети пунктов широкозонной дифференциальной подсистемы спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС// Космічна наука і технологія. – Т.5, № 1. – 1999. – С. 59-68. DOI: [10.15407/knit1999.01.059](https://doi.org/10.15407/knit1999.01.059).
2. Жалило А.А., Яковченко А.И. Способ реализации относительных геодезических определений по сигналам GPS/GLONASS с использованием float-обработки фазовых наблюдений// Известия ВУЗов.- Т.42, №12.- 1999. – С.55-61. DOI: [10.3103/S073527271999120092](https://doi.org/10.3103/S073527271999120092).
3. Ефимов С.К., Нестерович А.Г., Яковченко А.И. Аппаратура спутниковой навигации КА «Січ-1М» и «Микроспутник» // Космічна наука і технологія. – Т.7, № 4. – 2001. – С. 114-116.
4. Яковченко А.И. Учёт «wind-up»-эффекта в задачах высокоточного GPS-позиционирования // Радиотехника. – Выпуск №165 – 2011. – С.75-79.
5. Яковченко А.И. Основные источники и составляющие погрешностей ГНСС-наблюдений и их моделирование при реализации метода точного позиционирования PPP // Радиотехника. – Выпуск №169 – 2012. – С.315-330.
6. Жалило А.А., Яковченко А.И. Определение параметров траекторий низкоорбитальных космических аппаратов PPP-методом по результатам бортовых GPS-наблюдений. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». 2016. – № 184. С. 80 - 85.
7. Zhalilo A., Yakovchenko A. Development of PPP-method realization for low earth orbit satellite trajectory determination using on-board GPS-observations [Текст] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий (EJEET), – 2016. – №5/9 (83). – С.33-40. DOI: [10.15587/1729-4061.2016.81026](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81026).
8. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-метода определения параметров движения низкоорбитальных спутников по результатам бортовых GPS-

наблюдений. Украинский метрологический журнал. – 2017. – №1. – С.15-19. DOI: [10.24027/2306-7039.1.2017.101882](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2017.101882).

9. Жалило А.А., Дохов А.И., Катюшина Е.В., Васильева Е.М., Яковченко А.И. Лукьянова О.А. Разработка высокоточной системы определения траекторий космических аппаратов и других высокодинамичных объектов. Журнал «Прикладная радиоэлектроника». – 2017 г. – Т.16 №3-4. – С. 112-117.

10. Zhalilo A.A., Yakovchenko A.I. The realization technique and features of the GPS/GLONASS relative geodetic adjustment using float solution // Proceedings of the 2nd European symposium on GNSS'98. - Toulouse, France, October 20-23, 1998.- Tome 2. - IX-P-02. - P. 1-5.

11. Ефимов С.К., Иванов А.С. Хижняк В.В., Яковченко А.И. Аппаратура спутниковой навигации для ракет-носителей. Матер. II-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 13-14 июня 2002 г., Харьков: ХАИ, 2002.

12. Ефимов С.К., Иванов А.С., Хижняк В.В., Яковченко А.И. Применение бортовых приемников GPS для траекторных измерений ракет-носителей. Матер. III-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 12-13 июня 2003 г., Харьков: ХАИ, 2003.

13. Яковченко А.И., Лукьянов А.М., Аксюта Г.В. О результатах совместной проверки характеристик приемников фирмы Ashtech GG24 и Z18 на пункте контроля навигационного поля GNSS в АО «НИИРИ» (г. Харьков). Матер. III-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 12-13 июня 2003 г., Харьков: ХАИ, 2003.

14. Рудич А.В., Яковченко А.И., Ноздрин И.Г. Тестирование работы СКНОУ методом виртуальных тестовых радионавигационных приёмников. 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008. Сборник научных трудов. Том I. Международная конференция «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». Ч. 1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2008. – С.325-328.

15. Яковченко А.И. Результаты применения технологии точного позиционирования при обработке GPS-наблюдений. 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008. Сборник научных трудов. Том I. Международная конференция «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». Ч. 1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2008. – С.329-332.

16. Коньшева Г.Н., Нестерович А.Г., Рудич А.В., Яковченко А.И. Существующие и потенциальные возможности СКНОУ по обеспечению в реальном времени высокоточного определения координат потребителей навигационной информации на территории Украины. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2011. – С.16-17.

17. Коньшева Г.Н., Нестерович А.Г., Рудич А.В., Яковченко А.И. Оценка точности определения координат потребителя в кинематическом режиме при использовании информации СКНОУ. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2011. – С.29-31.

18. Яковченко А.И. Моделирование источников погрешностей при высокоточном GPS-позиционировании. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2011. – С.97-100.

19. Яковченко О.І. Застосування методу точного позиціонування при проведенні аварійно-рятувальних робіт. Збірник наукових праць

Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія і практика)». Національний університет цивільного захисту України – Харків, 12 березня, 2015.

20. Жалило А.А., Яковченко А.И. Определение параметров траекторий низкоорбитальных космических аппаратов PPP-методом по результатам бортовых GPS-наблюдений. Радиометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані. Міжнародний науковий семінар пам'яті Б.Л. Кащєєва до 96-річчя з дня народження - Україна, Харків, 15 березня 2016 р.

21. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-метода определения параметров движения низкоорбитальных спутников по результатам бортовых GPS-наблюдений – X Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка». Збірник тез доповідей конференції, м. Харків, 5-7 жовтня 2016 р., с. 71.

22. Жалило А.А., Дохов А.И., Катюшина Е.В., Яковченко А.И., Лукьянова О.А., Васильева Е.М. Высокоточная многофункциональная система определения траекторий летательных аппаратов авиационных, ракетных и космических комплексов. Збірник тез доповідей 17 науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 07 – 08 вересня 2017 р, с. 151-153.

23. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-технологий статического и кинематического ГНСС-позиционирования. 6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017. Конференция «РАДИОЛОКАЦИЯ. СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИЯ. РАДИОМОНИТОРИНГ». Сборник научных трудов. - Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, Издательство «Точка», 2017. – С.216-219.

24. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Катюшина О.В., Лук'янова О.О. Поточний стан розробки багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань. Збірник тез доповідей ХІХ науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 05 – 06 вересня 2019 р, с. 99-100.

25. Zhalilo O.O., Dokhov O.I., Yakovchenko O.I. Multi-positional phase system of trajectory measurements and experimental confirmation of its accuracy using GPS-observations of the ukrainian reference stations. Матер. III-ї наук.-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» 12 - 13 вересня 2019 року, Київ, НЦУВКЗ, С.105-106.

26. Zhalilo O.O., Yakovchenko O.I. LEOS trajectory determination using the on-board GPS-observations and PPP-technologies of their processing. Матер. III-ї науково-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» 12 - 13 вересня 2019 року, Київ, НЦУВКЗ, С.107.

27. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І. Експериментальне підтвердження точності багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань «Вега-V» з використанням GPS-спостережень референцних станцій України. Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. Матер. VII наук.-техн. конф., м. Київ, 9-10 жовтня 2019 р., с. 308-309.

28. Жалило А.А., Яковченко А.И. PPP-технологии точного GPS-позиционирования. Результаты разработок ХНУРЭ 2014-2019 г.г. Метрология, информационно-измерительные технологии и системы (МИИТС-2020). Матер. VII Международной научн.-техн. конф. – Харьков, 2020. – С. 31. DOI: [10.24027/2306-7039.1A.2020.193279](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1A.2020.193279).

29. Жалило А.А., Дохов А.И., Яковченко А.И. Автономное (PPP) и дифференциальное (DGPS) кинематическое позиционирование. Сравнение точности на примере обработки бортовых GPS-наблюдений самолёта АН-158. Метрология, информационно-измерительные технологии и системы (МИИТС-2020). Матер. VII Международной научн.-техн. конф. – Харьков, 2020. – С. 33. DOI: [10.24027/2306-7039.1A.2020.193279](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1A.2020.193279).

30. Дохов О.І., Жаліло О.О., Літус Ю.П., Тевяшев А.Д., Шостко І.С., Яковченко О.І. Розробка полігонного комплексу радіотехнічних та квантово-оптичних систем траєкторних вимірювань. Збірник XX науково-технічної

конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 78-79.

31. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Літус Ю.П., Катюшина О.В., Лук'янова О.О., Медведський М.М., Пап В.О. Реалізація ГНСС-технології автономної PPP-навігації високодинамічних об'єктів з використанням корекцій SBAS. Збірник XX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 85.

32. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Медведський М.М. Калібрування та контроль точності багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань. Збірник XX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 85-86.

33. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І. Траєкторні визначення приземних літальних апаратів з використанням бортових GPS-спостережень, проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. Матер. VIII наук.-техн. конф., м. Київ, 15 жовтня 2020 р., С.115-116.

34. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Літус Ю.П., Катюшина О.В., Лук'янова О.О., Медведський М.М., Пап В.О. Можливості автономної PPP-навігації навколосезонних високодинамічних об'єктів по сигналах ГНСС. Збірник XXI науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 2 – 3 вересня 2021 р, с. 99-101.

35. Створення технологій побудови багатофункціонального радіотехнічного комплексу для екологічного моніторингу // Звіт про НДР (заключний) – № ДР 0114U002697. – Харків, 2015, 274 с.

36. Створення системи збору, обробки та аналізу наземних і бортових космічних GPS/ГЛОНАСС спостережень для моніторингу, досліджень й моделювання повного електронного вмісту іоносфери у рамках міжнародного проекту «Іоносат-Мікро». Етап 3. Створення та експериментальне дослідження

алгоритмів обробки й аналізу бортових космічних ГНСС-спостережень для визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів та наступного моделювання повного електронного вмісту іоносфери // Звіт про НДР ГАО НАН України – ДР № 0115U002688. – Київ, 2015. 39 с.

37. Дослідження повного електронного вмісту іоносфери при спільному використанні диференціального та автономного методів обробки спостережень в регіональних мережах перманентних ГНСС-станцій // Звіт про НДР ГАО НАН України – ДР № 0116U004311С. – Київ, 2016. 68 с.

38. Розробка нових інформаційно-вимірювальних систем і технологій координатно-часового і метеорологічного забезпечення та зв'язку // Звіт про НДР (заключний) – № ДР 011U002541. – Харків, 2017, 246 с.

39. Удосконалення методів усунення інструментальних похибок іоносферних затримок ГНСС-спостережень з метою підвищення точності моделювання ПЕВ // Звіт про НДР ГАО НАН України – № ДР 0117U001440С. – Київ, 2017, 58 с.

40. Розробка нової концепції та шляхів створення високоточної системи траєкторних вимірювань параметрів руху високодинамічних літальних апаратів // Звіт про НДР (остаточний) – № ДР 0117U002530, – Харків, 2018, 56 с.

41. Створення високоточної багатопозиційної фазової системи «Вега-V» для визначення траєкторій навколоземних високодинамічних об'єктів (БФСТВ). Етап 2. Дослідження шляхів реалізації методів і засобів калібрування і контролю точності багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань «Вега-V». Проведення оптичних спостережень об'єктів навколоземного космічного простору // Звіт про НДР ГАО НАН України – ДР № 0119U000673. – Київ, 2019. 305 с.

42. Науково-технічне обґрунтування можливостей GNSS-технології в режимі PPP (Precise Point Positioning) для автономного визначення положень навколоземних високодинамічних об'єктів в складі багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань». Етап 2020 року // Звіт про НДР (остаточний) ГАО НАН України – № ДР 0120U102223. – Київ, 2020, 233 с.

43. Науково-технічне обґрунтування можливостей GNSS-технології в режимі PPP (Precise Point Positioning) для автономного визначення положень

навколоземних високодинамічних об'єктів в складі багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань». Етап 2021 року // Звіт про НДР (остаточний) ГАО НАН України – № ДР 0121U109921. – Київ, 2021, 170 с.

44. Космический проект «Ионосат-Микро» : монография / Под общ. ред. С.А. Засухи, О.П. Фёдорова. — К.: Академперіодика, 2013. — 218 с., 22 с. ил.

45 Gao, Y., Y. Zhang and K. Chen (2006). Development of a real-time single-frequency Precise Point Positioning system and test results. Proceedings of ION GNSS 2006, 26-29 September, Fort Worth, Texas, pp. 2297-2303.

46. Le, A. and C. Tiberius (2006). Single-frequency precise point positioning with optimal filtering. GPS Solutions, Vol. 11. No. 1, pp. 61-69.

47. Cai, C., Gao, Y., 2013. Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning. GPS Solut, 17(2), 223-236.

48. Li, B., Zang, N., Ge, H., Shen, Y.: Single-frequency PPP models: analytical and numerical comparison. J. Geod. 93(12), 2499–2514 (2019).

49. Kouba, J. and P. Héroux (2001). Precise point positioning using IGS orbit and clock products. GPS Solution, Vol. 5. No. 2, pp. 12-28.

50. Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз, Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика; Пер. з англ. третього вид. під ред. Я. С. Яцківа. — Київ: Наук, думка, 1995.—380 с.

51. Teunissen, Peter (Editor); Montenbruck, O (Editor). / Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, 2017. 1327 p.

52. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография : в 2 т. — М. : Картогеоцентр, 2005. — Т. 1.

53. Конин В.В., Харченко В.П. Системы спутниковой радионавигации /В.В. Конин, В.П. Харченко; Национальный авиационный университет. – К.: Холтех, 2010. – 510 с.

54. Zumberge, J.F., M.B. Hefflin, D.C. Jefferson, M.M. Watkins and F.H. Webb (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research, Vol. 102, No. B3, pp. 5005-5018.

55. Bisnath, S. and R.B. Langley (2002). High-precision platform-independent positioning with a single GPS receiver. *Navigation*, Vol. 29, No. 3, pp. 161-169.
56. Keke Zhang, Xingxing Li, Jiaqi Wu, Yongqiang Yuan, Xin Li, Xiaohong Zhang, Wei Zhang. Precise orbit determination for LEO satellites with ambiguity resolution: Improvement and comparison. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 2021, Volume 126, Issue 9. DOI: [10.1029/2021JB022491](https://doi.org/10.1029/2021JB022491).
57. Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system. *Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci.* 2022;98(2):49-71. DOI: [10.2183/pjab.98.004](https://doi.org/10.2183/pjab.98.004).
58. Dixon, K. (2006). StarFire™: A global SBAS for sub-decimeter precise point positioning. *Proceedings of ION GNSS 2006*, Fort Worth, Texas, pp. 2286-2296.
59. Bisnath, S., D. Wells and D. Dodd (2003). Evaluation of commercial carrier phase-based WADGPS services for marine applications. *Proceedings of ION GPS/GNSS 2003*, 9-12 September, Portland, Oregon, pp. 17-27.
60. Arroyo-Suarez, E.N., J.L. Riley, G.F. Glang and D.L. Mabey (2005). Evaluating a global differential GPS system for hydrographic surveying. *ION GPS 2005*, 13-16 September, Long Beach, CA, pp. 1500-1506.
61. Gao, Y., A. Wojciechowski and K. Chen (2005). Airborne kinematic positioning using precise point positioning methodology. *Geomatica*, Vol. 59, No. 1, pp. 275-282.
62. Gao Y., S. Skone, K. Chen, N.A. Nicholson and R. Muellerschoen (2004). Real-time sensing atmospheric water vapor using precise GPS orbit and clock products. *Proceedings of ION GNSS 2004*, 21-24 September, Long Beach, California, pp. 2343-2352.
63. Segall, P. and J.L. Davis, GPS applications for geodynamics and earthquake studies, *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, 25, 301-36, 1997.
64. Zhu S, Reigber CH, König R (2004). Integrated adjustment of CHAMP GRACE and GPS data. *J Geod* 78(1-2):103-108. DOI: [10.1007/s00190-004-0379-0](https://doi.org/10.1007/s00190-004-0379-0).
65. Rocken, C., Johnson, J., Van Hove, T., Iwabuchi, T. Atmospheric water vapor and geoid measurements in the open ocean with GPS. *Geophys. Res. Lett.* 32 (12), L12813. DOI: [10.1029/2005GL022573](https://doi.org/10.1029/2005GL022573), 2005.

66. Calais, E., Ebinger, C., Hartnady, C., Nocquet, J.M., 2006. Kinematics of the East African Rift from GPS and earthquake slip vector data. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.* 259, pp. 9–22.
67. Liu, Z., Li, M., 2013. The first PPP-based GPS water vapor real-time monitoring system in pearl-river-delta region, China. in: *Proceedings of China Satellite Navigation Conference*.
68. Kao, S., Chen, Y., Ning, F., 2014. A mars-based method for estimating regional 2D ionospheric VTEC and receiver differential code bias. *Adv. Space Res.* 53 (2), 190-200.
69. Li, X., Ge, M., Zhang, Y., Wang, R., Klotz, J., Wickert, J., Schuh, H., 2013a. Real-time co-seismic displacements from tightly-integrated processing of high-rate GNSS and strong motion data. *EGU 2013, April Vienna, Austria*.
70. RM Abd El Wadood, A Mousa, AI El-Hattab, M Rabah, AA Elkoushy (2021). Using PPP-GNSS technique for detecting surface motion due to earthquake shaking based on time-domain analysis. *Port-Said Engineering Research Journal* 25 (1), 32-40. DOI: [10.21608/pserj.2020.35670.1052](https://doi.org/10.21608/pserj.2020.35670.1052).
71. Ge M, Gendt G, Rothacher M, Shi C, Liu J. 2008. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. *J Geodesy.* 82:389–399.
72. Geng J, Chen X, Pan Y, Zhao Q (2019) A modified phase clock/bias model to improve PPP ambiguity resolution at Wuhan University. *J Geod* 93(10):2053–2067. DOI: [10.1007/s00190-019-01301-6](https://doi.org/10.1007/s00190-019-01301-6).
73. Collins, P., Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities, *Proceedings of the institute of navigation national technical meeting 2008, January 2008, San Diego, CA.* pp. 720–732.
74. Laurichesse, D.; Mercier, F.; Berthias, J.P.; Broca, P.; Cerri, L. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. *Navigation* 2009, 56,135–149.

75. Geng, J., Teferle, F. N., Shi, C., Meng, X., Dodson, A. H., & Liu, J. (2009). Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data. *GPS Solutions*, 13(4), 263–270.
76. Liu J, Gu D, Ju B, Shen Z, Lai Y, Yi D (2016). A new empirical solar radiation pressure model for BeiDou GEO satellites. *Adv Space Res* 57:234–244. DOI: [10.1016/j.asr.2015.10.043](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.10.043).
77. Li, P., Zhang, X., Guo, F., 2016b. Ambiguity resolved precise point positioning with GPS and BeiDou. *J. Geod.* 91 (1), 25-40.
78. Geng J, Shi C (2017) Rapid initialization of real-time PPP by resolving undifferenced GPS and GLONASS ambiguities simultaneously. *J Geodesy* 91(4):361–374. DOI: [10.1007/s00190-016-0969-7](https://doi.org/10.1007/s00190-016-0969-7).
79. Li, X.; Zhang, X. Improving the estimation of uncalibrated fractional phase offsets for PPP ambiguity resolution. *J. Navig.* 2012, 65, 513–529.
80. Geng J, Meng X, Dodson AH, Teferle FN. 2010. Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison. *J Geodesy*. 84:569–581.
81. Li, X., Zhang, X., Ge, M., 2011. Regional reference network augmented precise point positioning for instantaneous ambiguity resolution. *J. Geod.* 85 (3), 151-158.
82. Li J, Fu Q, Huo J, Wang D, Yang W, Bian Q, et al. Tethered balloon-based black carbon profiles within the lower troposphere of Shanghai in the 2013 East China smog. *Atmospheric Environment* 2015; 123: 327-338.
83. Collins, P.; Bisnath, S.; Lahaye, F.; Héroux, P. Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing. *Navigation* 2010, 57, 123–135.
84. Shi J. and Y. Gao (2010) Analysis of the integer property of ambiguity and characteristics of code and phase clocks in PPP using a decoupled clock model, *Proceedings of ION/GNSS 2010*, 21-24 September 2010, Portland, OR.
85. Shi, J., 2012. Precise Point Positioning integer ambiguity resolution with decoupled clocks. PhD thesis, University of Calgary, Canada.
86. Collins P., J. Henton, Y. Mireault, P. Héroux, M. Schmidt, H. Dragert, and S. Bisnath (2009) Precise Point Positioning for real-time determination of co-seismic crustal

motion, Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009), Savannah, GA, September 2009, pp. 2479- 2488.

87. Melgar, D., Melbourne, T. I., Crowell, B. W., Geng, J., Szeliga, W., Scrivner, C., et al. (2019). Real-time high-rate GNSS displacements: Performance demonstration during the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes. *Seismological Research Letters*, 91(4), 1943– 1951. DOI: [10.1785/0220190223](https://doi.org/10.1785/0220190223).

88. Laurichesse D, Mercier F, Berthias JP, Bijac J. 2008. Real time zero-difference ambiguities fixing and absolute RTK. Proceedings of the 2008 Institute of Navigation National Technical Meeting; Fairfax, VA; p. 747–755.

89. Laurichesse D, Privat A. 2015. An open-source PPP client implementation for the CNES PPP-WIZARD demonstrator. Proceedings of the Institute of Navigation GNSS; 2015 Sep; Tampa, FL.

90. Geng J, Meng X, Dodson A H and Teferle F N (2010): Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison, *Journal of Geodesy*, Vol. 85, No. 9, pp. 569-581.

91. Shi J, Gao Y. 2014. A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods. *GPS Solut.* 18:519–528.

92. Mervart, Leos, Lukes, Zdenek, Rocken, Christian, Iwabuchi, Tetsuya, Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time, Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008, pp. 397-405.

93. Zhang, B., Teunissen, P. J. G., and Odijk, D. (2011). A novel un-differenced PPP-RTK concept. *J. Navig.*, 64(S1), S180–S191.

94. Li B, Shen Y, Feng Y, Gao W, Yang L (2014) GNSS ambiguity resolution with controllable failure rate for long baseline network RTK. *J Geod* 88:99–112.

95. Li, P., Zhang, X., 2014. Precise point positioning with partial ambiguity fixing. *Sensors* 15 (6), 13627-13643.

96. Huber K, Hinterberger F, Lesjak R and Weber R (2014): Real-time PPP with ambiguity resolution – Determination and Application of Uncalibrated Phase Dealys,

Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014, 1 (2014), S. 976 – 985.

97. Verhagen, S., Teunissen, P.J.G., Van der Marel, H., Li, B., 2011. GNSS ambiguity resolution: which subset to fix? In: Proceedings of International Global Navigation Satellite Systems Society, IGNSS Symposium 2011, pp. 1-15.

98. Parkins, A. Increasing GNSS RTK availability with a new single-epoch batch partial ambiguity resolution algorithm. *GPS Solut.* 2011, 15, 391–402.

99. Shi, J.; Gao, Y. A fast integer ambiguity resolution method for PPP. In Proceedings of the ION GNSS, Nashville, TN, USA, 17–21 September 2012; pp. 3728–3734.

100. A3 J. Couba, A guide to using International GNSS service (IGS) products - <http://www.igs.org/igs/scb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>, 2009.

101. J.T. Wu, S.C. Wu, G.A. Hajj, W.I. Bertiger, and S.M. Lichten, Effects of antenna orientation on GPS carrier phase - *Man. Geodetica* 18, pp. 91-98, 1993.

102. IERS Conventions (2010). Gérard Petit and Brian Luzum. (IERS Technical Note; 36).

103. Bao Cheng Zhang, Ji Kun Ou, Yun Bin Yuan and Shi Ming Zhong, Yaw attitude of eclipsing GPS satellites and its impact on solutions from precise point positioning - *Chinese Science Bulletin* Volume 55, Number 32, 3687-3693.

104. Amir Allahviridi-Zadeh, Kan Wang, Ahmed El-Mowafy. Precise Orbit Determination of LEO Satellites Based on Undifferenced GNSS Observations. *Journal of Surveying Engineering* 2022, Vol 148 (1).

105. Gao, Y. and X. Shen (2001). Improving convergence speed of carrier phase based Precise Point Positioning. Proceedings of ION GPS 2001, 12-14 September, Salt Lake City, Utah, pp. 1532-1539.

106. Héroux, P., Y. Gao, J. Kouba, F. Lahaye, Y. Mireault, P. Collins, K. Macleod, P. Tétreault and K. Chen (2004). Products and applications for Precise Point Positioning - Moving towards real-time. Proceedings of ION GNSS 2004, 21-24 September, Long Beach, California, pp. 1832-1843.

107. Sunil Bisnath, John Aggrey, Garrett Seepersad and Maninder Gill. Innovation: Examining precise point positioning now and in the future, GPS World, March 2018.

108. Zumberge, J.F., M.B. Heflin, D.C. Jefferson, M.M. Watkins and F.H. Webb (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research, Vol. 102, No. B3, pp. 5005-5018.

109. Wubben, G., M. Schmitz and A. Bagg (2005). PPP-RTK: Precise Point Positioning using state-space representation in RTK networks. Proceedings of ION GNSS 2005, 13-16 September, Long Beach, California, pp. 2584-2594.

110. Dixon, Charles S., Morrison, Russell G., GNSS Local Integrity Augmentation ... Future Standards for User Communication Links, Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005), Long Beach, CA, September 2005, pp. 311-321.

111. Global Breakthrough in PPP Technology: RTK From the Sky. RTK accuracy and instant convergence worldwide – HEXAGON, White Paper. November 2020, Calgary, Alberta, Canada. – 8 pp.

112. Gao Y., Shen X. A new method for carrier phase based precise point positioning. Navigation, Vol. 49, No.2, 2002, pp. 109-116.

113. Kouba, J. (2009) A guide to using International GNSS service (IGS) products [Электронный ресурс] / Kouba, J. // Режим доступа: \www/ URL: <http://acc.igs.org/UsingIGSProductsVer21.pdf>, 2009. – 35 p.

114. Bisnath, S. (2008) Current state of precise point positioning and future prospects and limitations [Text] / Bisnath, S., Gao Y. // International. Association of Geodesy Symposia. – 2008, № 133, – pp. 615–623.

115. Martín, A. (2011) PPP Technique Analysis Based on Time Convergence, Repeatability, IGS Products, Different Software Processing, and GPS+GLONASS Constellation [Text] / Martín, A., Anquela, A., Capilla, R., Berné, J. // Journal of Surveying Engineering. – 2011.– Vol. 137, № 3, pp. 99–108.

116. Bisnath S., Collins P. (2012) Recent developments in Precise Point Positioning. Geomatica, Vol.66, No.2, 2012, - pp.375-385.

117. Pan Li, Xiaohong Zhang, Xiaodong Ren, Xiang Zuo, Yuming Pan (2016)

Generating GPS satellite fractional cycle bias for ambiguity-fixed precise point positioning. *GPS Solution*, October 2016, Volume 20, Issue 4, pp 771–782. DOI: [10.1007/s10291-015-0483-z](https://doi.org/10.1007/s10291-015-0483-z).

118. Siyao Wang, Bofeng Li, Xingxing Li, Nan Zang (2018) Performance analysis of PPP ambiguity resolution with UPD products estimated from different scales of reference station networks. *Advances in Space Research*, Volume 61, Issue 1, January 2018, P. 385-401. DOI: [10.1016/j.asr.2017.09.005](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.005).

119. Mohamed Abdel-Salam, Yang Gao, and Xiaobing Shen. Analyzing the Performance Characteristics of a Precise Point Positioning System. – Portland. *ION GPS 2007*. – pp. 1893-1899.

120. Дослідження повного електронного вмісту іоносфери при спільному використанні диференціального та автономного методів обробки спомтережень в регіональних мережах перманентних ГНСС-станцій: – Звіт про НДР. Головна астрономічна обсерваторія (ГАО НАНУ). Держ. реєстр. № 0116U004311С.- Київ: 2016. - 69 с. Іл.49. Бібліограф. С.65-69 (25 назв).

121. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А. Трубников С.А. Математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковой навигационной системы GPS. Стандартный режим. – М.: Механико-математический факультет МГУ, 2001. – 120 с.

122. ANTEX: The Antenna Exchange Format, Version 1.4 - <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/antex14.txt>.

123. The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-c) - <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/sp3c.txt>.

124. IERS Conventions (2003). Dennis D. McCarthy and Gérard Petit. (IERS Technical Note; 32).

125. Leandro R.F. Precise Point Positioning with GPS. A new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis. *Geodesy and Geomatics Engineering*. Technical report No.267. April 2009.

126. Колосов М.А., Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. – М.: Сов. радио, 1976. – 220 с.

127. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. (1969) - Распространение радиоволн при космической связи // Издательство «Связь», М.–1969. 156 с.

128. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/ Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA/DO-229D. – December 13, 2006.

129. Schüler T. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation / T. Schüler // Dissertation, Schriftenreihe 73, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München. – February 2001. – 364 p.

130. Niell A.E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths / A.E. Niell // Journal of Geophysical Research. – vol. 101, no. B2. – 1996. – pp. 3227-3246.

131. Дицкий И.В. Развитие методов и алгоритмов разрешения неоднозначности и устранения скачков фазовых измерений в задачах точного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: дис. канд. техн. наук по спец. 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы // И.В. Дицкий – Харьков, 2014. – 206 с., 5 приложений.

132. Nykiel G., Figurski M. (2016) Precise Point Positioning Method Based on Wide-lane and Narrow-lane Phase Observations and Between Satellites Single Differencing // Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, January 25 - 28, 2016, Monterey, California, 2016, pp. 1055–1066.

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

134. Желанов А.А. Развитие метода и алгоритмов обработки фазовых наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем в задачах высокоточного кинематического позиционирования: дис. канд. техн. наук по спец. 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы // А.А. Желанов. – Харьков, 2011.- 157 с., 4 приложения.

135. Zhalilo A.A. New Effective Method of Eliminating Cyclic Phase Slips during Double-Frequency Kinematic GNSS Observations / A.A. Zhalilo, I.V. Ditskiy // Allerton Press, Inc RADIOELECTRONICS AND COMMUNICATIONS SYSTEMS. – USA, 2011. –VOL. 54, №8. – pp. 415–425.

136. Жалило А.А. Усовершенствованный метод разрешения фазовой неоднозначности двухчастотных дифференциальных фазовых ГНСС-наблюдений [Текст] / Жалило А.А., Дицкий И.В. // Радиотехника : всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. – 2012. – № 169. – С. 277–301.

137. Дицкий И.В. Разрешение фазовой неоднозначности двухчастотных дифференциальных фазовых ГНСС-наблюдений и высокоточное позиционирование на базовых удалениях до 1000 км [Текст] / Дицкий И. В. // Радиотехника : всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. – 2014. – № 179. – С. 99–106.

138. Жалило, А.А. Основные результаты разработок ХНУРЭ в области высокоточного ГНСС-позиционирования [Текст] / Жалило А.А., Дицкий И.В., Бессонов Е.А., Желанов А.А. // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: матер. 5-го Междунар. радиоэлектронного форума, 14-17 октября 2014 г. – Х., 2014. – Т. 1, ч. 2. – С. 62–65.

139. Бессонов Е.А. Усовершенствование сетевых методов оценки и учета ионосферных и тропосферных задержек сигналов ГНСС в задачах точного позиционирования: дис. канд. техн. наук по спец. 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы // Е.А. Бессонов – Харьков, 2015. – 253 с., 11 приложений.

140. Жалило А.А. Методический подход и алгоритмы реализации дифференциального метода спутниковой навигации по наблюдениям сети контрольных станций / А.А. Жалило // Космічна наука і технологія. НКА і НАН України. – Киев, 1999. – т.5, №5/67. – С. 33–44.

141. Дослідження повного електронного вмісту іоносфери при спільному використанні диференціального та автономного методів обробки спостережень в регіональних мережах перманентних ГНСС-станцій // Науково-технічний звіт ГАО НАН України – ДР № 0116U004311С. – Київ, 2016, 68 с.

142. Features and service performance of multifunctional software toolkit «OCTAVA» for processing and analysis of GPS/GNSS observations : зб. праць міжн. конф. [«GEOS 2007»], (Прага, 1-3 квітня 2007 р.) / Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography - Prague: Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography, 2007. – С. 102-110.

143. «OCTAVA»: многофункциональный программный инструментарий обработки и анализа GPS/GNSS наблюдений : матеріали 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.319-321.

144. Шелковенков Д.О. Результаты экспериментальных исследований точности траекторных GPS/GNSS вимірювань при виконанні аерофотозйомки з використанням програмних комплексів «OCTAVA» та «GRAFNAV/GRAFNET™» / Д.О. Шелковенков, О.О. Желанов, О.О. Жаліло // Всеукраинский научно-технический сборник «Радиотехника». – 2008. – Вып. 152. – С. 172-184.

145. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов.радио, 1978 – 384 с.

146. Chen, W. Error correction models and their effects on GPS precise point positioning [Text] / W. Chen, C. Hu, S. Gao, Y. Chen, X. Ding // Survey Review. – 2009. – Vol. 41, Issue 313. – P. 238–252. DOI: [10.1179/003962609x390139](https://doi.org/10.1179/003962609x390139).

147. Shi, J. Analysis of the integer property of ambiguity and characteristics of code and phase clocks in PPP using a decoupled clock model [Text] / J. Shi, Y. Gao // Proceedings of ION/GNSS 2010, 2010. – P. 2553–2564.

148. Дослідження повного електронного вмісту іоносфери при спільному використанні диференціального та автономного методів обробки спостережень в регіональних мережах перманентних ГНСС-станцій // Науково-технічний звіт ГАО НАН України – ДР № 0116U004311С. – Київ, 2016, 68 с.

149. 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.

150. MILES: MATLAB package for solving Mixed Integer LEast Squares problems – by Xiao-Wen Chang, and Tianyang Zhou, School of Computer Science, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, in *GPS Solutions*, Volume 11, Number 4, November 2007, pp. 289-294.

151. Chang X-W, Zhou T (2006) MILES: MATLAB package for solving Mixed Integer LEast Squares problems, Theory and Algorithms. Users' Guides (<http://www.cs.mcgill.ca/~chang/software.php>).

152. Banville, S.; Geng, J.; Loyer, S.; Schaer, S.; Springer, T.; Strasser, S. On the interoperability of IGS products for precise point positioning with ambiguity resolution. *J. Geod.*; 2020; 94, 10. DOI: [10.1007/s00190-019-01335-w](https://doi.org/10.1007/s00190-019-01335-w).

153. Carrier-phase Ambiguity Resolution: Handling the Biases for Improved Triple-frequency PPP Convergence – by D. Laurichesse in *GPS World*, April 2015, pp. 49-54.

154. Instantaneous centimeter-level multi-frequency precise point positioning – by Denis Laurichesse and Simon Banville in *GPS World*, July 2018, pp. 42-47.

ДОДАТОК А
МОДЕЛЮВАННЯ ПОВІЛЬНО ЗМІНЮВАНИХ ПОХИБОК
НЕДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ ГНСС-СПОСТЕРЕЖЕНЬ,
ЯКІ ПІДДАЮТЬСЯ ПРОГНОЗУВАННЮ

А.1 Похибки ефемеридно-часового забезпечення

Для підвищення точності позиціонування в режимі PPP використовуються точні ефемериди. Точні ефемериди – це продукт постобробки ГНСС-спостережень, які поширюються службою IGS у вигляді добових файлів у форматі SP3 [A1]. Файли містять координати центру мас супутників і розбіжності бортових шкал часу супутників і системної шкали часу ГНСС, розраховані з інтервалом 15 хвилин. Координати центру мас супутника на будь-який час в межах доби можуть бути отримані шляхом інтерполяції даних, записаних у файлі, з використанням поліномів Лагранжа.

Нехай на моменти часу t_i є значення функції $f(t_i)$. Тоді значення функції в точці t обчислюється за формулою

$$F(t) = \sum_{i=1}^n L_i(t) f_i(t_i), \text{ де } L_i = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{t - t_j}{t_i - t_j}, \quad (\text{A.1})$$

n – ступінь згладжуючого полінома Лагранжа.

Як значення функції $f(t_i)$ використовуються координати або розбіжності бортової шкали часу і шкали часу системи. Дослідження показали, що для забезпечення міліметрової точності розрахунку координат (методична похибка) необхідно використовувати поліном не нижче 9-го ступеня [A2]. Для інтерполяції розбіжності бортової шкали часу необхідно використовувати поліном Лагранжа не нижче 3-го ступеня.

При використанні точних ефемерид в форматі SP3 отримують хороші результати визначення координат супутника, але розбіжності шкал часу супутника і шкали часу системи визначаються гірше, тому що розбіжності шкал часу не є гладкою функцією і важче піддаються інтерполяції. Для підвищення точності визначення розбіжностей бортових шкал часу супутників і системної шкали часу використовуються файли годинників (*.clk) в форматі RINEX. На відміну від файлу точних ефемерид в форматі SP3, де дані записуються з інтервалом 15 хвилин, в файлі (*.clk) інтервал запису становить 5 хвилин або навіть 30 секунд, що дозволяє отримати набагато точніші результати. При цьому використовується той же алгоритм інтерполяції по методу Лагранжа.

При використанні точних ефемерид необхідно враховувати той факт, що в файлі точних ефемерид наводяться координати центру мас супутника, в той час як в математичній моделі ГНСС-спостережень використовуються координати фазового центру антен. Тому координати центру мас супутника повинні бути перераховані в координати фазового центру антени.

На рис. А.1 зображена орієнтація супутника в просторі і бортова система координат супутника.

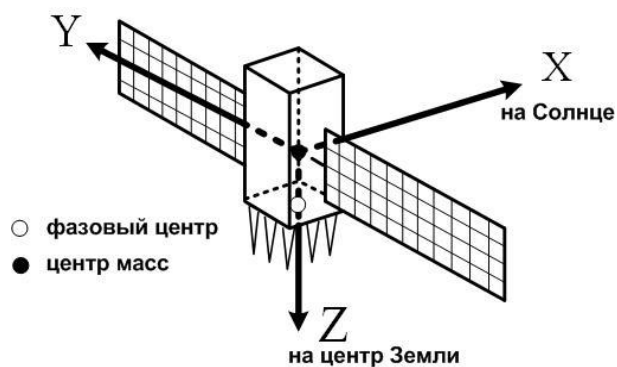


Рисунок А.1

Вісь Z системи координат супутника спрямована до центру мас Землі, вісь Y направлена уздовж осі обертання сонячних панелей і збігається

з векторним добутком осі Z і напрямку на Сонце. Ось X спрямована на Сонце і доповнює систему до правої.

Величини зсувів фазового центру антен для всіх супутників систем ГЛОНАСС і GPS можуть бути отримані з файлів IGS в форматі ANTEX. При врахуванні зміщення фазового центру антени супутника обчислюється корекція, яка дорівнює проекції вектору зміщення фазового центру на напрям від супутника до приймача. Таким чином, для розрахунку величини зсуву необхідно знати координати Сонця на момент випромінювання. Крім того, при реалізації PPP-позиціонування необхідно враховувати різну поведінку супутників під час перебування їх в тіні Землі [A3, A4]. На рис.А.2 зображені інтервали часу, коли супутники GPS знаходяться в тіні Землі (за даними 11 грудня 2008 р.).

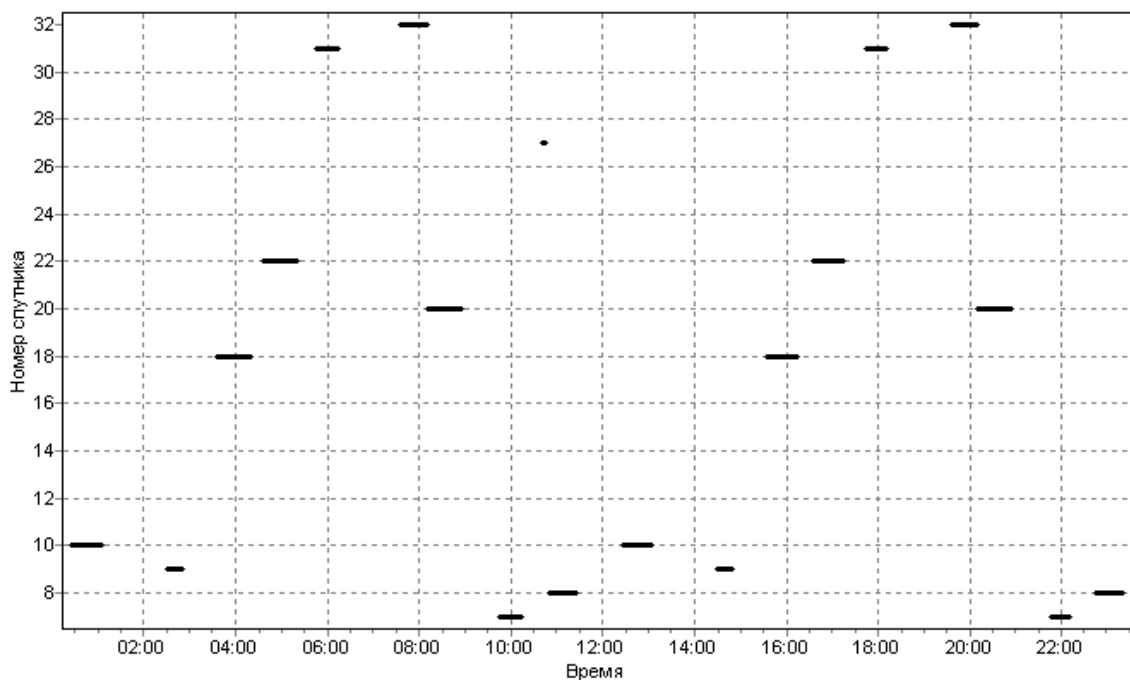


Рисунок А.2

Сонячні батареї супутників GPS BLOCK IIR завжди орієнтовані в бік Сонця, незалежно від того, освітлений супутник або знаходиться в тіні Землі, тому координати фазового центру антени можуть бути розраховані.

Поведінка супутників GPS BLOCK II/IIA є більш складною. Якщо супутник освітлений, його сонячні батареї спрямовані в бік Сонця. При заході супутника в тінь Землі сонячні датчики вже не можуть контролювати положення супутника і починається рискання осі X супутника навколо осі Z. Рискання проводиться по складному закону, моделювання якого вельми ускладнене. Супутник може перебувати в тіні до 60 хвилин (див. рис. А.2). Після виходу супутника з тіні починається процес відновлення орієнтації супутника, в результаті чого сонячні батареї знову будуть спрямовані в бік Сонця. Цей період може тривати до 30 хвилин. Таким чином, при спостереженнях супутників GPS BLOCK II/IIA є ділянки тривалістю до 90 хвилин, на яких поворот супутника, а значить, і положення фазового центру, не можуть бути точно розраховані. На цих ділянках спостерігаються збільшені похибки визначення координат фазового центру антени і розбіжності шкал часу супутника і системного часу. Це може привести до значного зниження точності позиціонування в режимі PPP, тому ці ділянки повинні бути виключені з обробки. В даний час угруповання GPS містить 11 супутників BLOCK II/IIA, і цей фактор обов'язково повинен бути врахований в математичному та програмному забезпеченні обробки ГНСС спостережень, щоб виключити появу аномальних результатів координатних визначень.

На рис. А.3 зображені складові різниці відстаней до супутників GPS для станції КНАR (м. Харків), розраховані по бортовим і точним ефемеридам на 11 грудня 2011 р.

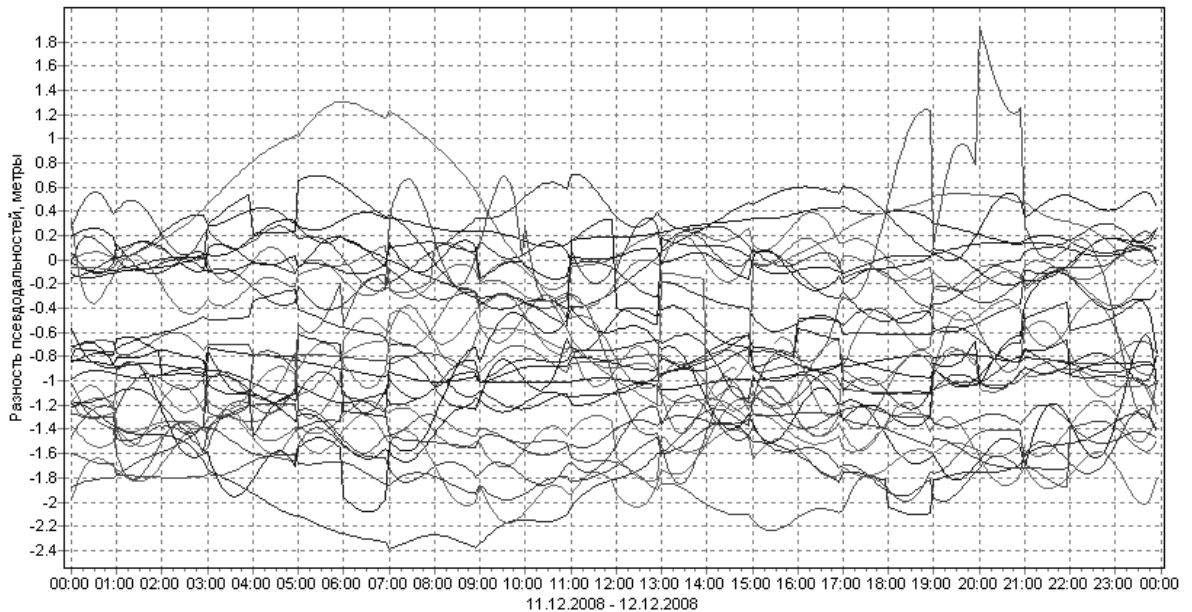


Рисунок А.3

При розрахунках враховувалися зміщення фазового центру антен від центру мас. Як впливає з рис. А.3, похибка псевдовідстані, обумовлена неточним знанням координат супутника, досягає величини 2,5 м.

А.2. «Wind-up»-ефект

Супутники GPS передають радіосигнали з правою круговою поляризацією, отже, фаза хвилі-носія, що спостерігається, залежить від взаємної орієнтації антен супутника і приймача [А3, А5]. Наприклад, здійснення одного обороту будь-який з антен – супутника або приймача – навколо її осі призведе до зміни фази хвилі-носія на величину одного циклу (однієї довжини хвилі). Це явище і називається ефектом накручування фази хвилі-носія («wind-up»-ефект) [А5]. Покладемо, що антена приймача не обертається і залишається орієнтованою в фіксованому напрямку. Для підтримки енергії живлення бортової апаратури супутників їх сонячні панелі повинні бути завжди орієнтовані в бік Сонця (вісь X на рис. А4), в той час як передавальна антена супутника спрямована в центр Землі (вісь Z).

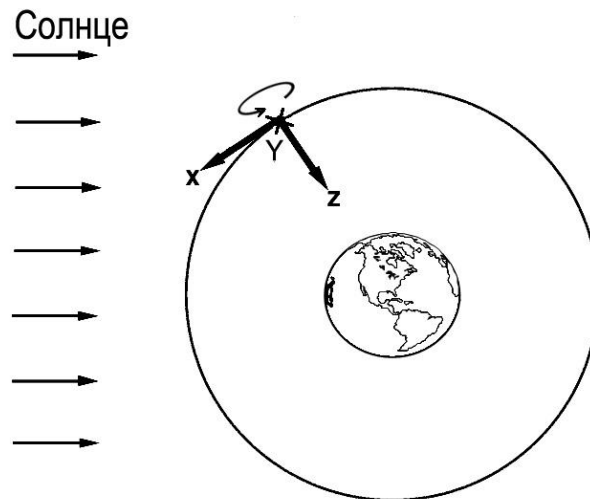


Рисунок А.4

У разі, коли супутник перетинає уявну лінію, що з'єднує Сонце і Землю, спостерігаються періоди більш швидкого обертання супутника, так звані «опівденний» (коли супутник розташований між Сонцем і Землею) і «опівнічний» (коли супутник розташований в тіні Землі) розвороти. При цьому антена супутника менш ніж за півгодини робить розворот на 180° , що призводить до різкої зміни фази спостережуваних сигналів на половину довжини хвилі.

Згідно [А5], корекція фази (в радіанах) може бути обчислена з скалярного (\cdot) і векторного (\times) добутку:

$$\Delta\varphi = \text{sign}(\zeta) \text{Cos}^{-1}(\bar{D}' \cdot \bar{D} / |\bar{D}'| |\bar{D}|), \quad (\text{A.2})$$

де:

$\zeta = \hat{k} \cdot (\bar{D}' \times \bar{D})$, \hat{k} – одиничний вектор супутник – приймач і \bar{D}', \bar{D} – ефективні дипольні вектори супутника і приймача, обчислені за поточним одиничним вектором положення корпусу супутника $(\hat{x}', \hat{y}', \hat{z}')$ і місцевим одиничним вектором приймача, позначеному $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$:

$$\begin{aligned} \bar{D}' &= \hat{x}' - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}') - \hat{k} \times \hat{y}', \\ \bar{D} &= \hat{x} - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}) + \hat{k} \times \hat{y}. \end{aligned}$$

Безперервність між сусідніми спостереженнями фази повинна забезпечуватися додаванням члена $\pm 2\pi$.

На рис. А.5 зображена залежність «wind-up»-ефекту для частоти L1 GPS від часу для всіх супутників робочого сузір'я, розрахована за співвідношенням (А.2) для станції, розташованої в м Харків на 11 грудня 2008 р.

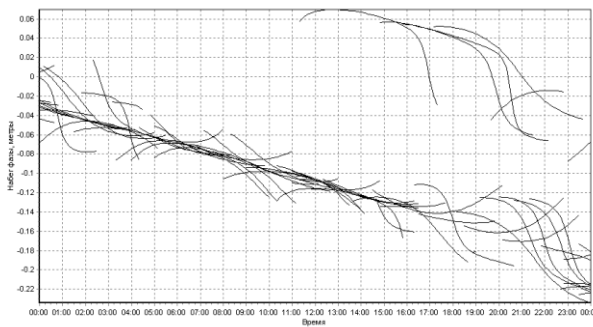


Рисунок А.5

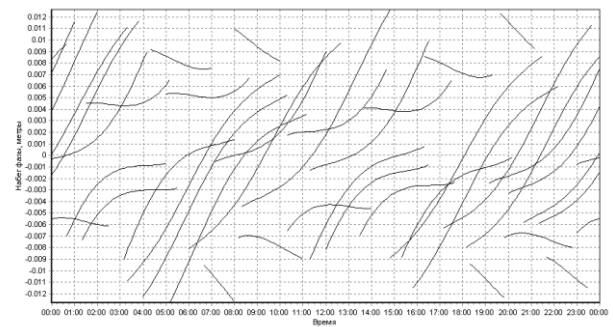


Рисунок А.6

Як впливає з аналізу кривих на рис. А.5, протягом інтервалів спостереження супутників спостерігаються значні (до 10 см) зміни фазової псевдовідстані, викликані зміною орієнтації передавальної антени супутника. Чітко видно періоди розворотів супутників, що викликають швидку зміну фази хвилі-носія за відносно короткий проміжок часу.

Для позиціонування в диференціальному режимі з відстанями між станціями до кількох сотень кілометрів поправкою, викликаною «wind-up»-ефектом, можна знехтувати. Однак при обробці фазових спостережень на великих базових відстанях різниця поправок може досягати значних величин і обов'язково повинна враховуватися. На рис. А.6 зображена різниця набігів фаз за рахунок «wind-up»-ефекту для двох станцій, що знаходяться на відстані 4000 км один від одного. Дані висновки добре узгоджуються з результатами, представленими в роботах [А3, А5].

При реалізації PPP-позиціонування необхідно враховувати описану вище різну поведінку супутників під час перебування їх в тіні Землі і виході з тіні. Положення супутників GPS BLOCK IIR, а значить, і «wind-up»-ефект, можуть бути легко розраховані, в той час як при спостереженнях супутників GPS

BLOCKII/IIA є ділянки тривалістю до 90 хвилин, на яких «wind-up»-ефект не може бути розрахований. По можливості при обробці спостережень в режимі PPP такі ділянки вимірювальної інформації повинні бути виключені з обробки.

А.3 Земні припливи

«Тверда» Земля насправді є досить гнучкою для того, щоб реагувати на ті ж гравітаційні сили, які викликають океанські припливи. Періодичні вертикальні і горизонтальні зміщення, викликані припливами, представлені сферичними гармоніками ступеня і порядку (n, m) , які характеризуються числами Лява і Шида [А6]. Ефективні значення цих чисел слабо залежать від широти і частоти припливів і повинні враховуватися, якщо потрібно отримати точність позиціонування 1 мм. Однак для 5-міліметрової точності необхідне застосування тільки членів корекції припливів і висоти другого порядку [А6]. При цьому зміщення приймача, викликане земними припливами, в декартових координатах $\Delta\vec{r}^T = |\Delta x, \Delta y, \Delta z|$ може бути розраховане за формулою [А3]:

$$\Delta\vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} \frac{r^4}{R_j^3} \left\{ \left[3l_2(\hat{R}_j \cdot \hat{r}) \right] \hat{R}_j + \left[3\left(\frac{h_2}{2} - l_2\right)(\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \hat{r} \right\} + \left[(-0.025m \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot \cos(\Theta_g + \lambda)) \right] \cdot \hat{r}, \quad (\text{A.3})$$

де GM, GM_j – гравітаційні параметри Землі, Місяця ($j = 2$) і Сонця ($j = 3$); r, R_j – геоцентричні вектору стану станції, Місяця і Сонця з відповідними одиничними векторами \hat{r}, \hat{R}_j відповідно, l_2 і h_2 – номінальні безрозмірні числа Лява і Шілда другого порядку (близько 0.609 і 0.085); φ, λ – широта і довгота місця, позитивна на схід, і Θ_g – гринвічський зоряний час. Припливна корекція (А.3) може досягати величини 30 см в радіальному напрямку і 5 см в горизонтальному. Вона складається з постійного зміщення, що залежить від широти, і періодичної частини з переважно півдобовою і добовою зміною

амплітуди. Періодична частина в основному осереднюється для статичного позиціонування протягом 24-годинного періоду. Проте, постійна частина, яка досягає 12 см в середніх широтах (в радіальному напрямку), залишається в такому положенні і при 24-годинному усередненні. Постійні припливні спотворення, відповідно до прийнятого ITRF угоди, також повинні враховуватися [А6], тобто повинна застосовуватися повна корекція (А.4), яка включає як постійні, так і періодичні припливні зміщення, щоб бути сумісними з ITRF (так званою «Tide-free») референцною системою. Навіть при усередненні протягом тривалого періоду часу, зневага припливною корекцією (А.4) при абсолютному позиціонуванні може привести до систематичних помилок до 12 см і 5 см в радіальному і північному напрямку відповідно. Зміщення в напрямку на північ, схід і по вертикалі можуть бути легко отримані множенням рівняння (А.3) на відповідні одиничні вектори.

На рис. А.7 зображені зміщення станції КНАR (м. Харків), викликані припливами земної поверхні в напрямку на північ, схід і по висоті, розраховані за формулою (А.3) на 1 червня 2011р.

При використанні диференціального режиму на коротких базових лініях (до 100 км), станції мають майже ідентичні припливні зміщення, так що припливами земної поверхні можна знехтувати.

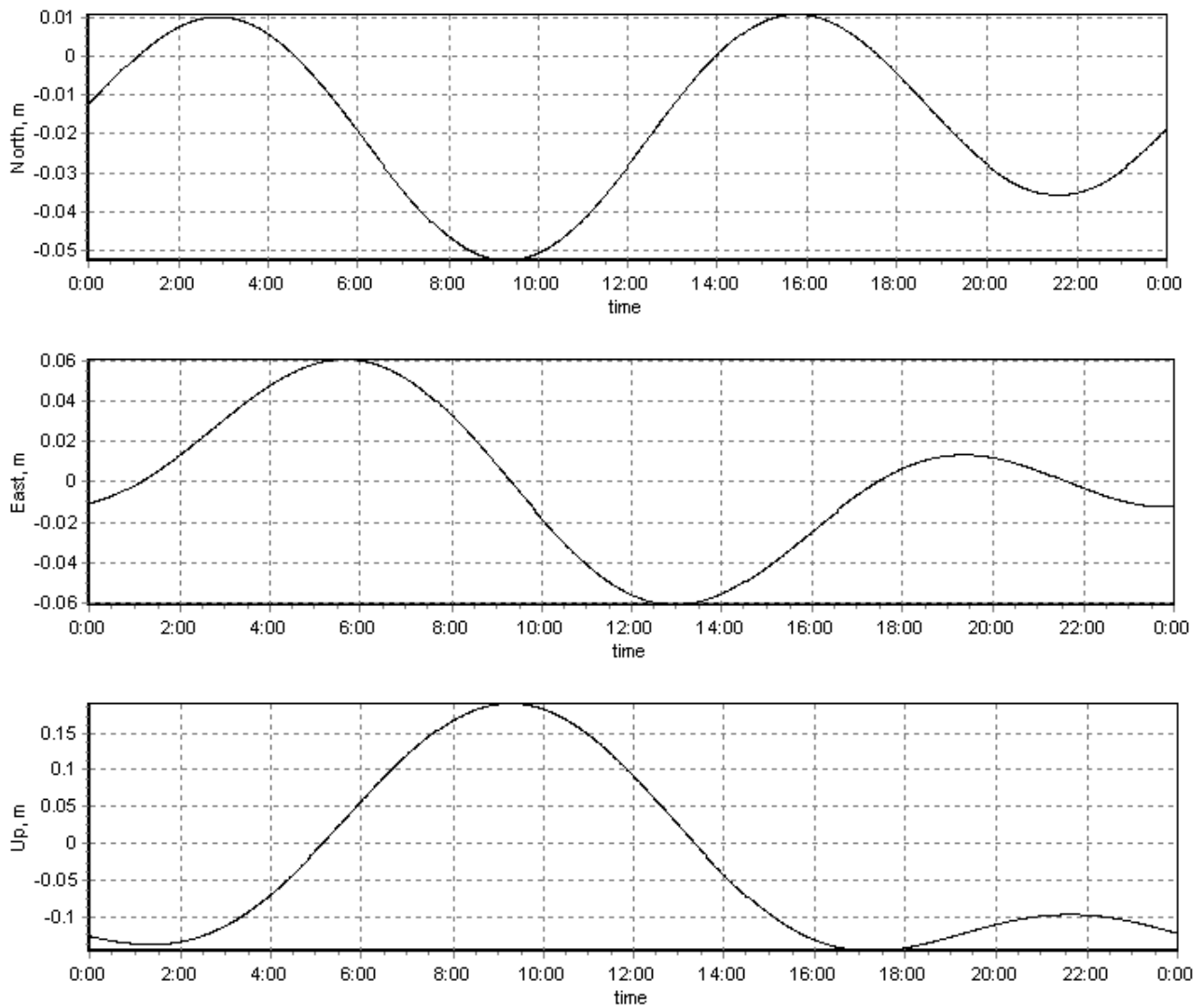


Рисунок А.7

А.4 Океанічні припливи

Океанічні припливи – це деформації поверхні Землі під впливом припливних мас океанів. Під час припливів океанів відбувається рух великих мас води, які викликають періодичний перерозподіл навантаження на дно океану. Так як Земля не є жорсткою, вона деформується під впливом такого навантаження. Це призводить до нахилу і зсуву станції у вертикальній і горизонтальній площині. Океанічні припливи викликаються гравітаційним тяжінням Місяця і Сонця, і оскільки їх рух несинхронний, океанічні припливи можуть бути описані як сума кількох припливних хвиль, кожна з яких має свій

власний період. Для розрахунків використовуються 11 періодів (гармонік) з найбільшою амплітудою [А6].

Океанічні припливи схожі на припливи земної поверхні, в них переважають добові і півдобові періоди, і вони не мають постійної частини. Зсуви, викликані океанічними припливами, на порядок менше, ніж зсувів припливів земної поверхні, і вони більш локалізовані. Найбільш сильно океанічні припливи проявляються на ділянках земної кори, розташованих в безпосередній близькості від океану. Для станцій, розташованих усередині материків, далеко від океанів, при тривалих інтервалах спостереження (більше 24 годин) океанічними припливами можна знехтувати. Але для точного кінематичного позиціонування або точного статичного позиціонування в прибережних районах з короткими інтервалами спостережень (значно менше 24 годин) ці ефекти необхідно брати до уваги. Крім того, ці ефекти повинні враховуватися при оцінці зенітної тропосферного затримки і в додатках, де потрібна точна оцінка годинників, навіть якщо станція знаходиться далеко від океану (далі 1000 км) і при тривалих інтервалах спостереження, інакше ці похибки увійдуть в оцінку зенітної тропосферного затримки і параметрів годинників

Зсуви, викликані океанічними припливами, можуть бути розраховані за наступною формулою [А6]:

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{c_j} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{c_j}), \quad (\text{A.4})$$

де:

f_j і u_j – коефіцієнти, що залежать від широти і довготи місячного вузла. З похибкою 1-3 мм можна покласти $f_j = 1$ і $u_j = 0$. Підсумовування по j являє собою 11 припливних хвиль, які позначені $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_f, M_m$ і S_{SA} ; ω_j і χ_j – кутові швидкості і астрономічний аргумент на час $t = 0 \text{ год.}$, які відповідають j -й компоненті припливної хвилі.

Аргументи χ_j наведені в [А6]. Амплітуди і фази A_{c_j} і Φ_{c_j} для конкретних станцій в радіальному напрямку, напрямку на північ і схід, були отримані з використанням глобальної моделі припливів океанів, а також бази даних берегових ліній. Таблиця амплітуд і фаз A_{c_j} і Φ_{c_j} станцій ITRF приведена в [А7]. Значення амплітуд і фаз A_{c_j} і Φ_{c_j} для будь-якої станції можуть бути отримані за допомогою on-line сервісу [А8].

На рис. А.8 і рис. А.9 представлені зміщення, викликані океанічними припливами, розраховані за формулою (А.4) з використанням таблиць для станцій KSMV (Kashima, префектура IBARAKI, Японія) і GLSV (м.Київ, Україна).

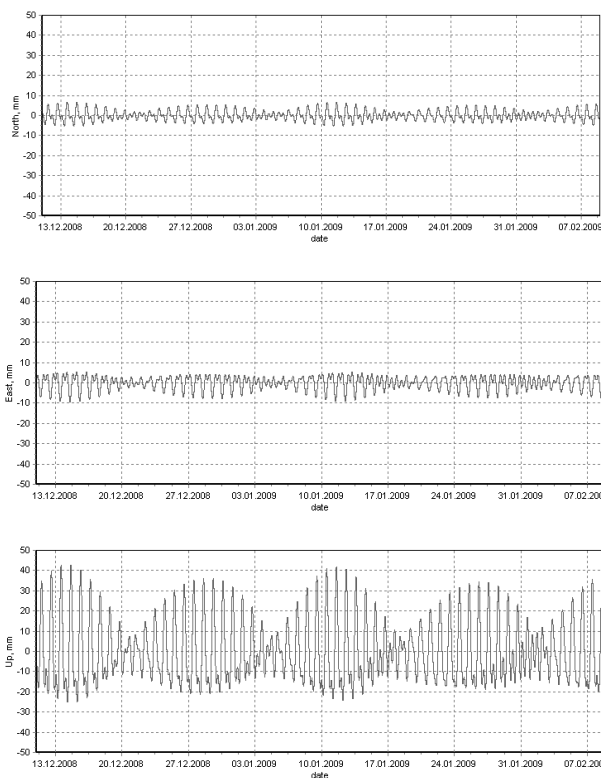


Рисунок А.8

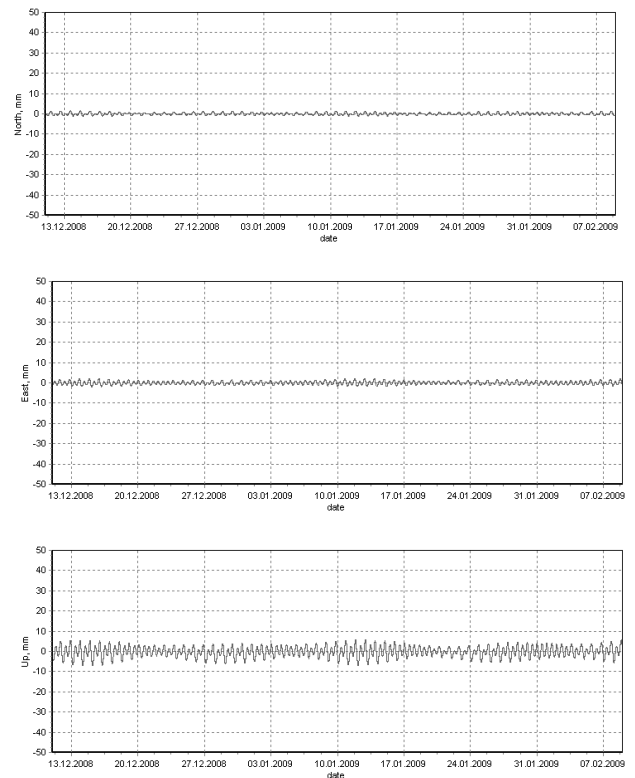


Рисунок А.9

Як впливає з наведених рисунків, зміщення, викликані океанічними припливами для станції KSMV, розташованої на березі океану, можуть досягати значної величини – 50 мм. Зміщення станції GLSV набагато менше – до 10 мм. Зміщення станцій, розташованих далеко від океанів, сильно

корельовані навіть для станцій, розташованих далеко одна від одної. Таким чином, для розрахунків зміщень таких станцій досить використовувати дані амплітуд і фаз A_{c_j} і Φ_{c_j} для найближчої перманентної станції з таблиці [A7]. У разі, коли найближча станція розташована на значній відстані, особливо в прибережних районах, необхідно розрахувати індивідуальні дані амплітуд і фаз A_{c_j} і Φ_{c_j} , знаючи наближене розташування станції, за допомогою on-line сервісу [A8] і скористатися ними для розрахунку зміщень. При обробці в диференціальному режимі зсуви, викликані океанічними припливами, практично повністю компенсуються, і поправка на океанічні припливи може не враховуватися.

A.5 Полярні припливи

Полярні припливи – це періодичні зміщення осі обертання Землі, викликані змінами гравітаційного потенціалу Землі під впливом Сонця і Місяця. Поправки по широті, довготі і висоті (в міліметрах), викликані полярними припливами, можна приблизно розрахувати за формулою:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= -9\text{Cos}2\varphi \left[(X_p - \bar{X}_p) \text{Cos}\lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \text{Sin}\lambda \right], \\ \Delta\lambda &= 9\text{Sin}\varphi \left[(X_p - \bar{X}_p) \text{Sin}\lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \text{Cos}\lambda \right], \\ \Delta h &= -33\text{Sin}2\varphi \left[(X_p - \bar{X}_p) \text{Cos}\lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \text{Sin}\lambda \right],\end{aligned}\tag{A.5}$$

де $(X_p - \bar{X}_p)$ і $(Y_p - \bar{Y}_p)$ – відхилення координат полюса від середнього значення (\bar{X}_p, \bar{Y}_p) в секундах дуги (середні значення полюса наведені в [A6]). На відміну від земних припливів і океанічних припливів, середнє значення полярних припливів не дорівнює нулю на інтервалі 24 години. Вони поступово змінюються в залежності від руху полюса і мають переважно сезонний і Чендлеровській (~ 430 діб) періоди. Оскільки рух полюса може досягати 0,8

секунди дуги, максимальне зміщення за рахунок полярних припливів може досягати близько 25 мм у висоту і близько 7 мм в горизонтальному напрямку.

Для розрахунку поправок, зумовлених полярними припливами, необхідно знати положення полюса на епоху спостережень. Ці дані можуть бути отримані з файлів даних обертання Землі (*.egr), які формуються разом з файлами точних ефемерид SP3.

На рис. А.10 і рис. А.11 наведені зміщення, викликані полярними припливами, розрахованими за формулою (А.5), для станцій GLSV (м.Київ, Україна) і UZHL (м.Ужгород, Україна).

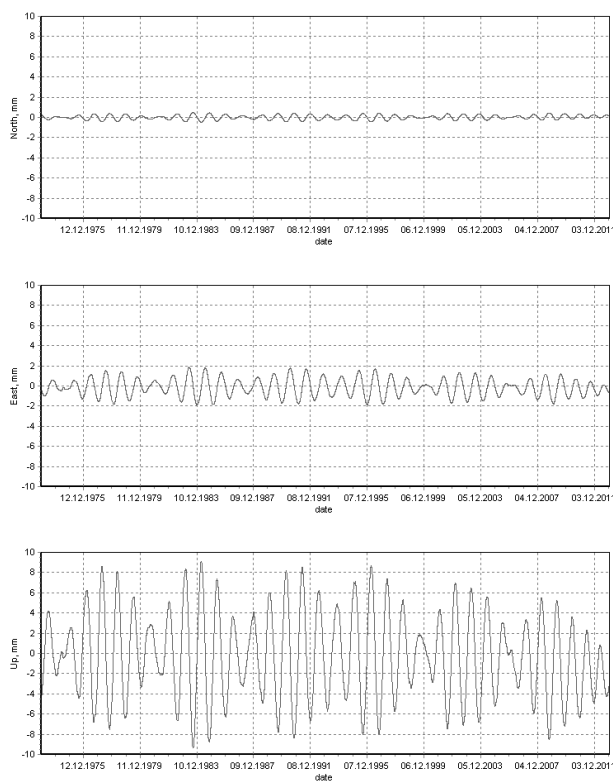


Рисунок А.10

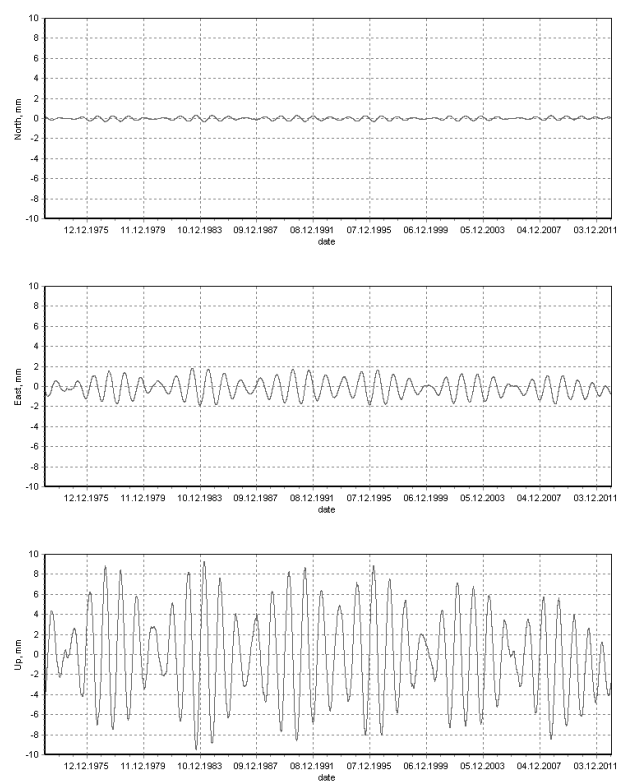


Рисунок А.11

З рисунків випливає, що зміщення станцій GLSV і UZHL, обумовлені полярними припливами, досягають 10 мм по висоті і 2 мм в плані, тому повинні враховуватися при обробці в режимі PPP. У той же час, різниця зсувів для даних станцій досягає 4 мм по висоті і 1 мм в плані, тому при високоточних великобазових відносних визначеннях дані поправки також необхідно

враховувати. Зсуви, обумовлені полярними припливами, є повільно змінюваною функцією – за добу зміна відбувається на долі міліметра, тому вони не можуть бути усереднені на добовому інтервалі спостережень.

А.6 Нерівномірності фазових характеристик антен

Фазова діаграма спрямованості антен супутників і приймачів нерівномірна і залежить від кутів, під якими сигнали випромінюються (в антені супутника) і приймаються (в антені приймача). Фазові діаграми спрямованості отримують в результаті калібрування антен. Результати калібрування антен наводяться в файлі ANTEX [А9]. Файл регулярно оновлюється і містить дані всіх антен супутників за весь період спостережень.

Поряд зі зміщенням фазового центру антени супутника відносно центру мас в файлі ANTEX наводяться результати варіацій фазового центру антен супутників GPS і ГЛОНАСС, отримані в результаті калібрування. Залежністю нерівномірності діаграми спрямованості від азимута нехтують і наводяться результати калібрування тільки в залежності від надірного кута (надірний кут – це кут між напрямком «супутник – центр Землі» і напрямом «супутник – приймач»). Результати калібрування для частот L1 і L2 в файлі збігаються як для супутників GPS, так і для супутників ГЛОНАСС.

Нижче наводяться результати досліджень нерівномірності фазової діаграми спрямованості антен для сеансу спостережень 11 грудня 2008 р, проведеного на станції GLSV (м. Київ).

На рис. А.12 і рис. А.13 наведені результати розрахунків надірного кута для супутників GPS і ГЛОНАСС відповідно.

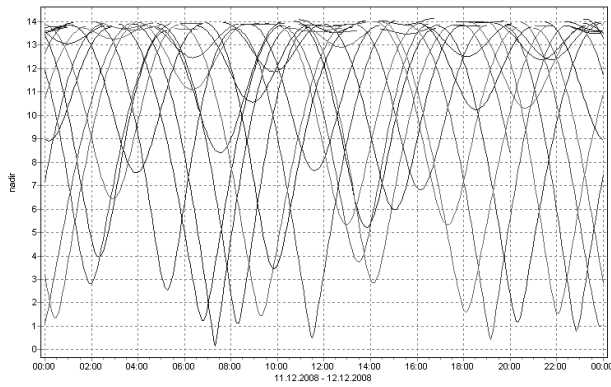


Рисунок А.12

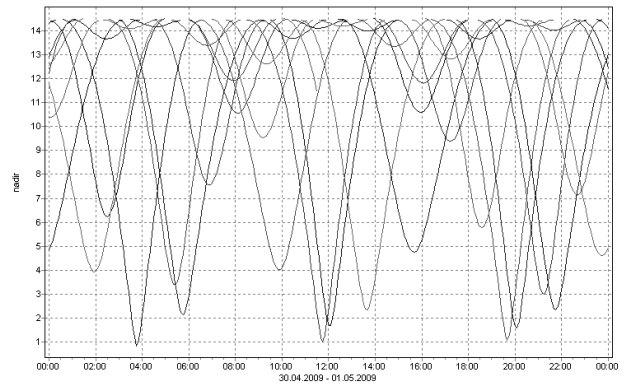


Рисунок А.13

Як впливає з рисунків, за умови, що супутники спостерігаються під мінімальним кутом місця 0° , надірний кут змінюється в діапазоні $0..14^\circ$ для супутників GPS і $0..14,5^\circ$ для супутників ГЛОНАСС.

На рис. А.14 і рис. А.15 наведено поправки в псевдовідстані (в метрах), обумовлені нерівномірністю фазової діаграми спрямованості антен супутників GPS і ГЛОНАСС відповідно.

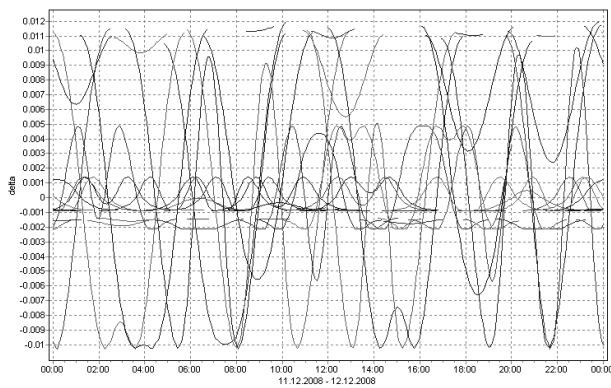


Рисунок А.14

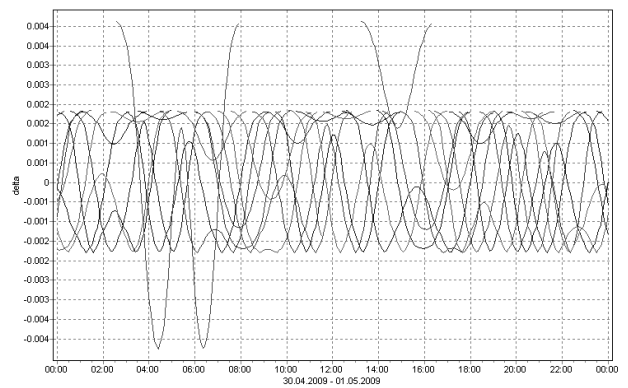


Рисунок А.15

Аналіз отриманих результатів показує, що поправка в псевдовідстань, обумовлена нерівномірністю фазової діаграми спрямованості антен супутників, може змінюватися в межах декількох сантиметрів і повинна враховуватися в програмах обробки ГНСС-спостережень в режимі PPP. Оскільки поправка залежить тільки від надірного кута, який для близько розташованих станцій

відрізняється дуже незначно, при диференціальних визначеннях даний вид похибок практично повністю компенсується.

Оскільки за даними файлу ANTEX [A9] результати калібрування антен супутників для частот L1 і L2 збігаються, поправки в псевдовідстані будуть компенсуватися при формуванні комбінацій спостережень на частотах L1 і L2. Поправки в псевдовідстані, обумовлені нерівномірністю фазової діаграми спрямованості антен супутників ГЛОНАСС, мають меншу величину, ніж поправки для супутників GPS.

Антени GPS-приймачів мають спеціальну мітку, яка повинна бути орієнтована на північ. При установці перманентних станцій це правило виконується, але для антен «роверних» приймачів, особливо рухомих, антена по азимуту може бути орієнтована в довільному напрямку, тому залежністю від азимута можна знехтувати.

Результати калібрування антен приймачів наводяться в файлі ANTEX. У файлі наводяться два види залежностей діаграми спрямованості: залежність тільки від кута місця і залежність як від кута місця, так і від азимута. Результати наводяться окремо для частот L1 і L2 (для двохчастотних антен) і окремо для GPS і ГЛОНАСС (для двосистемних антен).

Крім того, у файлі наводяться зміщення фазових центрів антен на частотах L1 і L2 окремо для GPS і ГЛОНАСС щодо референційної точки антени (Antenna Reference Point, ARP).

На рис. А.16 наведено приклад залежності варіацій фазового центру антени, отриманий за даними, наведеними в файлі ANTEX.

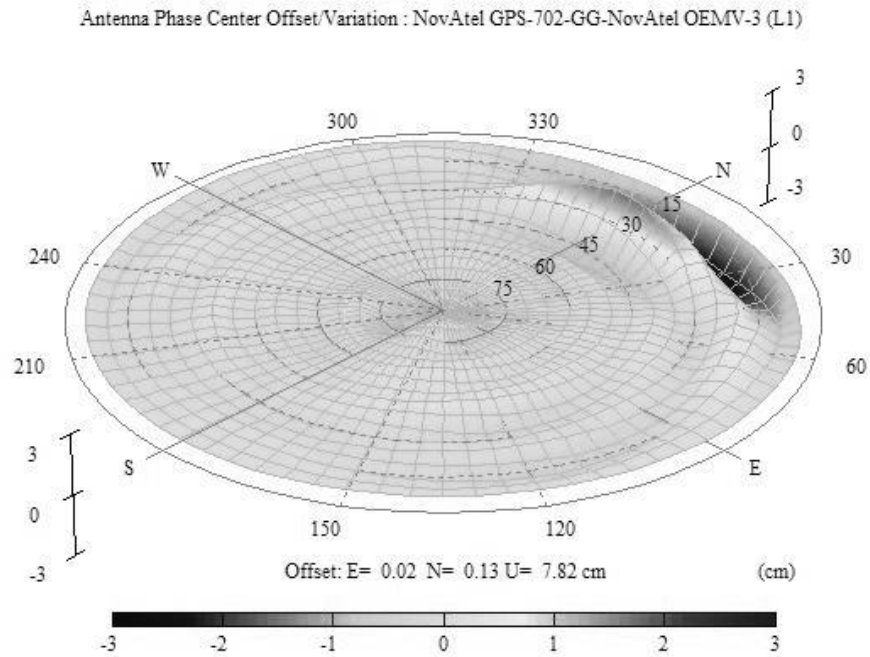


Рисунок А.16

Розрахунок поправок на нерівномірність фазової характеристики антен приймачів аналогічний розрахунку поправок на нерівномірність фазової характеристики антен супутників.

Нижче наведено зведені результати аналізу похибок ГНСС-спостережень. У табл. А.1 наведені максимальні значення похибки псевдовідстаней в режимі PPP. У табл. А.2 наведені максимальні зміщення наземної станції по висоті і в площині горизонту в режимі PPP.

Таблиця А.1 – Максимальні значення похибок псевдовідстаней

Джерело похибки	Максимальна похибка псевдовідстані, мм
Похибки ефемеридного забезпечення (при використанні бортових ефемерид)	2500
Похибки ефемеридного забезпечення (при використанні точних ефемерид)	70
«Wind-up»-ефект (для частоти L1 GPS)	190
Нерівномірність фазових характеристик антен супутника	12
Нерівномірність фазових характеристик антен приймача	30

Таблиця А.2 – Максимальні зміщення наземної станції

Джерело похибки	Максимальне зміщення станції	
	по висоті, мм	в площині горизонту, мм
Земні припливи	300	70
Океанічні припливи	50	10
Полярні припливи	25	7

«Wind-up»-ефект в табл. А.1 розраховувався для частоти L1 GPS.

Похибки, обумовлені нерівномірністю фазової характеристики антен приймачів, залежать від типу антени. Значення в табл. А.1 розраховане для антени NovAtel GPS-702GG.

Величина океанічних припливів залежить від віддаленості станції від океанів. Дані в табл. А.2 отримані для станції, розташованих в середині Євразійського континенту.

Як випливає з наведених результатів, розглянуті похибки досягають значних величин і для досягнення сантиметрової точності в режимі PPP повинні обов'язково враховуватися.

Досвід зарубіжних досліджень і практичне підтвердження можливостей PPP показали, що після введення наведених поправок залишкова похибка не перевищує декількох міліметрів.

Перелік посилань до Додатку А

A1. The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-c) - <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/sp3c.txt>.

A2. Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтнеггер, Д. Коллінз. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика – Пер. з англ. третього вид. під ред. Я.С. Яцківа. – Київ: Наукова думка, 1995. – 380 с.

A3 J. Couba, A guide to using International GNSS service (IGS) products - <http://www.igs.org/igscb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>, 2009.

A4. Bao Cheng Zhang, Ji Kun Ou, Yun Bin Yuan and Shi Ming Zhong, Yaw attitude of eclipsing GPS satellites and its impact on solutions from precise point positioning - Chinese Science Bulletin Volume 55, Number 32, 3687-3693.

A.5. J.T. Wu, S.C. Wu, G.A. Hajj, W.I. Bertiger, and S.M. Lichten, Effects of antenna orientation on GPS carrier phase - Man. Geodetica 18, pp. 91-98, 1993.

A.6. IERS Conventions (2003). Dennis D. McCarthy and Gérard Petit. (IERS Technical Note; 32).

A.7. <ftp://maia.usno.navy.mil/conv1996/chapter7/olls25.blq>.

A.8. <http://froste.oso.chalmers.se/loading>.

A9. ANTEX: The Antenna Exchange Format, Version 1.4 - <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/antex14.txt>.

ДОДАТОК Б
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора –
головний конструктор ДП «ЗАО НДІРВ»
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник



О.М. Зайченко

2016 р.

А К Т

про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття ступеня кандидата технічних наук
Яковченка Олександровича Івановича

Комісія у складі: Голови комісії – Головного наукового співробітника, доктора технічних наук, професора Піскоржа В.В., членів комісії – головного спеціаліста, кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Даніліна А.Б., головного спеціаліста Іванова О.С. склала цей Акт про те, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи «Розвиток методів високоточного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів по бортовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем» Яковченка Олександра Івановича, представленої на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук, використані у науковій діяльності ДП «ЗАТ НДІРВ» та встановила наступне.

1. Наукові та практичні результати дисертації використані при виконанні ДКР «Розробка прецизійної апаратури просторово-часової прив'язки об'єктів за сигналами супутникових радіонавігаційних систем «ГЛОНАСС» та «NAVSTAR»» (шифр «Прив'язка», 1992–1996 р.р., державний реєстраційний номер 0195U015604, 1992 р.); НДР «Розробка апаратури супутникової навігації космічних апаратів» (1995 р., державний реєстраційний номер 0195U023338); НДР «Впровадження–КНЗ» (2008–2012 р.р., державний реєстраційний номер 0108U000047Д), ДКР «Система космічного навігаційно-часового забезпечення України» (шифр «Навігація», 1998–2004 р.р.), ДКР «Навігація» Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем» («Навігація-Розвиток» Розвиток мережі ККС та Центру контролю навігаційного поля, модернізація програмно-технічних засобів, забезпечення дослідної експлуатації) (2008–2012 р.р., державний реєстраційний номер 0108U008567). Запропонована дисертантом вдосконалена методика визначення місцеположення, нові та вдосконалені алгоритми обробки ГНСС–інформації були використані при розробці вбудованого програмного забезпечення навігаційної апаратури,

програмного забезпечення післясеансної обробки ГНСС-інформації та програмного забезпечення Центру контролю навігаційного поля Системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України.

2. Комісія відмічає доцільність використання положень, розробок і практичних рекомендацій кандидатської дисертації Яковченка О.І. при розробці методичного та програмного забезпечення високоточних координатних визначень по сигналах глобальних навігаційних супутникових систем.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався у зв'язку з науковим призначенням результатів.

Акт складено для пред'явлення в спеціалізовану вчену раду, а також не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.


Голова комісії:

Головний науковий співробітник
ДП „ЗАО НДІРВ”, д.т.н., професор


_____  В.В. Піскорж

Члени комісії:

Головний спеціаліст
ДП „ЗАО НДІРВ”, к.т.н., с.н.с.

_____  А.Б. Данілін

Головний спеціаліст ДП „ЗАО НДІРВ”

_____  О.С. Іванов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Головної астрономічної
обсерваторії НАН України,
академік НАН України



Я.С. Яцків

2016 р.

про впровадження результатів дисертації
на здобуття ступеня кандидата технічних наук
Яковченка Олександра Івановича

Комісія у складі:

Медведського Михайла Михайловича – зав. відділу (відділ астрометрії та космічної геодинаміки ГАО НАН України), к.ф.-м.н., старший науковий співробітник, голова комісії,

Ємець Аделі Іванівни – заступника завідувача відділом астрометрії та космічної геодинаміки ГАО НАН України, молодший науковий співробітник, член комісії,

Ішенко Марини Вікторівни – наукового співробітника Центру аналізу ГНСС-спостережень ГАО НАН України (відділ астрометрії та космічної геодинаміки ГАО НАН України), к.ф.-м.н., член комісії,

склала дійсний акт про те, що наукові й практичні результати дисертаційної роботи «Розвиток методів високоточного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів по бортовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем» Яковченка О.І., представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, використані в науковій діяльності Головної астрономічної обсерваторії НАН України й установила наступне:

1. Положення, розробки, результати натурних експериментів і науково-практичні рекомендації кандидатської дисертації використані при виконанні НДР «Створення системи збору, обробки та аналізу наземних і бортових GPS/ГЛОНАСС спостережень для моніторингу, дослідження й моделювання повного електронного вмісту іоносфери у рамках міжнародного проекту «Іоносат-Мікро». Етап 3 – Створення та експериментальне дослідження алгоритмів обробки й аналізу бортових космічних ГНСС-спостережень для визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів та наступного моделювання повного електронного вмісту іоносфери» (2015р., ДР № 0115U002688) та НДР «Дослідження повного електронного вмісту іоносфери при спільному використанні диференціального та автономного методів обробки спостережень в регіональних мережах перманентних ГНСС-станцій» (2016 р., ДР № 0116U004311С).


2. Яковченко О.І. розробив алгоритми розрізнення фазової неоднозначності та автономного точного позиціонування низькоорбітальних космічних апаратів по бортовим спостереженням сигналів GPS методом PPP (Precise Point Positioning), алгоритми оцінки та корегування невідомих складових фазових іоносферних спостережень для створення більш точної регіональної моделі повного електронного вмісту іоносфери. Виконав експериментальне відпрацювання алгоритмів та відповідних програмних засобів обробки спостережень.

3. Комісія відзначає доцільність використання положень, розробок і практичних рекомендацій кандидатської дисертації Яковченка О.І. при розробці методичного й програмно-математичного забезпечення точного ГНСС-позиціонування.

Голова комісії

 **М.М. Медведський**

Члени комісії

 **А.І. Ємець**

 **М.В. Ішенко**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-методичної роботи
Харківського національного університету
радіоелектроніки

д.т.н., професор І.В. Рубан

м.п.

« 29 »

2018 р.



А К Т

про впровадження результатів дисертації
на здобуття ступеня кандидата технічних наук
Яковченка Олександра Івановича

Комісія у складі:

Антіпова Івана Євгенійовича – завідувача кафедри КРІСТЗІ ХНУРЕ, д.т.н., професора, голови комісії,**Должикова Володимира Васильовича** – д.ф.-м.н., професора, члена комісії,**Карташова Володимира Михайловича** – завідувача кафедри МІРЕС ХНУРЕ, д.т.н., професора, члена комісії,

склала дійсний акт про те, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи «Розвиток методів високоточного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних апаратів по бортовим спостереженням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем» Яковченка Олександра Івановича, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, використані в науковій діяльності Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ) та встановила наступне:

1. Положення, розробки, результати натурних експериментів і науково-практичні рекомендації кандидатської дисертації використані при виконанні НДР «Створення технологій побудови багатофункціонального радіотехнічного комплексу для екологічного моніторингу» (2014-2015 рр., № ДР 0114U002697) та НДР «Розробка нових інформаційно-вимірювальних систем і технологій координатно-часового і метеорологічного забезпечення та зв'язку» (2016-2017 рр., № ДР 011U002541).

2. Яковченко О.І. розробив алгоритми розрізнення фазової неоднозначності та алгоритми статичного і кінематичного ГНСС-позиціонування сантиметрової точності методом PPP (Precise Point Positioning), в тому числі алгоритми точного позиціонування низькоорбітальних космічних апаратів по бортовим спостереженням сигналів GPS. Виконав експериментальне відпрацювання алгоритмів та відповідних програмних засобів обробки спостережень.

3. Комісія відмічає доцільність використання положень, розробок і практичних рекомендацій кандидатської дисертації Яковченка О.І. при подальшому удосконаленні методів, алгоритмів і програмного забезпечення точного ГНСС-позиціонування.

Голова комісії

І. Є. Антіпов

Члени комісії

В. В. Должиков

В. М. Карташов

ДОДАТОК В

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Жалило А.А., Флерко С.Н., Яковченко А.И. Мониторинг геометрической конфигурации многобазисной сети пунктов широкозонной дифференциальной подсистемы спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС // Космічна наука і технологія. – К.: – Т.5, № 1. – 1999. – С. 59-68. DOI: [10.15407/knit1999.01.059](https://doi.org/10.15407/knit1999.01.059).

2. Жалило А.А., Яковченко А.И. Способ реализации относительных геодезических определений по сигналам GPS/GLONASS с использованием float-обработки фазовых наблюдений // Известия ВУЗов. – К.: – Т.42, №12. – 1999. – С.55-61. DOI: [10.3103/S073527271999120092](https://doi.org/10.3103/S073527271999120092).

3. Ефимов С.К., Нестерович А.Г., Яковченко А.И. Аппаратура спутниковой навигации КА «Січ-1М» и «Микроспутник» // Космічна наука і технологія. – К.: – Т.7, № 4. – 2001. – С. 114-116.

4. Яковченко А.И. Учёт «wind-up»-эффекта в задачах высокоточного GPS-позиционирования // Радиотехника. Х.: – Выпуск №165 – 2011. – С.75-79.

5. Яковченко А.И. Основные источники и составляющие погрешностей ГНСС-наблюдений и их моделирование при реализации метода точного позиционирования PPP // Радиотехника. Х.: – Выпуск №169 – 2012. – С.315-330.

6. Жалило А.А., Яковченко А.И. Определение параметров траекторий низкоорбитальных космических аппаратов PPP-методом по результатам бортовых GPS-наблюдений // Радиотехника. Х.: –2016. – № 184. С. 80 - 85.

7. Zhalilo A., Yakovchenko A. Development of PPP-method realization for low earth orbit satellite trajectory determination using on-board GPS-observations [Текст] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий (EJET). Х.: – 2016. – №5/9 (83). – С.33-40. DOI: [10.15587/1729-4061.2016.81026](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81026).

8. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-метода определения параметров движения низкоорбитальных спутников по результатам бортовых

GPS-наблюдений. Украинский метрологический журнал. Х.: – 2017. – №1. – С.15-19. DOI: [10.24027/2306-7039.1.2017.101882](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2017.101882).

9. Жалило А.А., Дохов А.И., Катюшина Е.В., Васильева Е.М., Яковченко А.И. Лукьянова О.А. Разработка высокоточной системы определения траекторий космических аппаратов и других высокодинамичных объектов. Журнал «Прикладная радиоэлектроника». Х.: – 2017 г. – Т.16 №3-4. – С. 112-117.

10. Zhalilo A.A., Yakovchenko A.I. The realization technique and features of the GPS/GLONASS relative geodetic adjustment using float solution // Proceedings of the 2nd European symposium on GNSS'98. - Toulouse, France, October 20-23, 1998.- Tome 2. - IX-P-02. - P. 1-5.

11. Ефимов С.К., Иванов А.С. Хижняк В.В., Яковченко А.И. Аппаратура спутниковой навигации для ракет-носителей. Матер. II-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 13-14 июня 2002 г., Харьков: ХАИ, 2002.

12. Ефимов С.К., Иванов А.С., Хижняк В.В., Яковченко А.И. Применение бортовых приемников GPS для траекторных измерений ракет-носителей. Матер. III-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 12-13 июня 2003 г., Харьков: ХАИ, 2003.

13. Яковченко А.И., Лукьянов А.М., Аксюта Г.В. О результатах совместной проверки характеристик приемников фирмы Ashtech GG24 и Z18 на пункте контроля навигационного поля GNSS в АО «НИИРИ» (г. Харьков). Матер. III-й научн.-практ. конф. «Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине». 12-13 июня 2003 г., Харьков: ХАИ, 2003.

14. Рудич А.В., Яковченко А.И., Ноздрин И.Г. Тестирование работы СКНОУ методом виртуальных тестовых радионавигационных приёмников. 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008. Сборник научных трудов.

Том I. Международная конференция «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». Ч. 1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2008. – С.325-328.

15. Яковченко А.И. Результаты применения технологии точного позиционирования при обработке GPS-наблюдений. 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008. Сборник научных трудов. Том I. Международная конференция «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». Ч. 1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2008. – С.329-332.

16. Коньшева Г.Н., Нестерович А.Г., Рудич А.В., Яковченко А.И. Существующие и потенциальные возможности СКНОУ по обеспечению в реальном времени высокоточного определения координат потребителей навигационной информации на территории Украины. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2011. – С.16-17.

17. Коньшева Г.Н., Нестерович А.Г., Рудич А.В., Яковченко А.И. Оценка точности определения координат потребителя в кинематическом режиме при использовании информации СКНОУ. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I. Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2011. – С.29-31.

18. Яковченко А.И. Моделирование источников погрешностей при высокоточном GPS-позиционировании. 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011). Сборник научных трудов. Том I.

Конференция «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». Ч. 2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2011. – С.97-100.

19. Яковченко О.І. Застосування методу точного позиціонування при проведенні аварійно-рятувальних робіт. Збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія і практика)». Національний університет цивільного захисту України – Харків, 12 березня, 2015.

20. Жалило А.А., Яковченко А.И. Определение параметров траекторий низкоорбитальных космических аппаратов PPP-методом по результатам бортовых GPS-наблюдений. Радиометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані. Міжнародний науковий семінар пам'яті Б.Л. Кащеева до 96-річчя з дня народження - Україна, Харків, 15 березня 2016 р.

21. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-метода определения параметров движения низкоорбитальных спутников по результатам бортовых GPS-наблюдений – X Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка». Збірник тез доповідей конференції, м. Харків, 5-7 жовтня 2016 р., с. 71.

22. Жалило А.А., Дохов А.И., Катюшина Е.В., Яковченко А.И., Лукьянова О.А., Васильева Е.М. Высокоточная многофункциональная система определения траекторий летательных аппаратов авиационных, ракетных и космических комплексов. Збірник тез доповідей 17 науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 07 – 08 вересня 2017 р, с. 151-153.

23. Жалило А.А., Яковченко А.И. Реализация PPP-технологий статического и кинематического ГНСС-позиционирования. 6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017. Конференция «РАДИОЛОКАЦИЯ. СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИЯ.

РАДИОМОНИТОРИНГ». Сборник научных трудов. - Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, Издательство «Точка», 2017. – С.216-219.

24. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Катюшина О.В., Лук'янова О.О. Поточний стан розробки багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань. Збірник тез доповідей ХІХ науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 05 – 06 вересня 2019 р, с. 99-100.

25. Zhalilo O.O., Dokhov O.I., Yakovchenko O.I. Multi-positional phase system of trajectory measurements and experimental confirmation of its accuracy using GPS-observations of the ukrainian reference stations. Матер. III-ї наук.-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» 12 - 13 вересня 2019 року, Київ, НЦУВКЗ, С.105-106.

26. Zhalilo O.O., Yakovchenko O.I. LEOS trajectory determination using the on-board GPS-observations and PPP-technologies of their processing. Матер. III-ї науково-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» 12 - 13 вересня 2019 року, Київ, НЦУВКЗ, С.107.

27. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І. Експериментальне підтвердження точності багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань «Вега-V» з використанням GPS-спостережень референціальних станцій України. Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. Матер. VII наук.-техн. конф., м. Київ, 9-10 жовтня 2019 р., с. 308-309.

28. Жалило А.А., Яковченко А.И. PPP-технологии точного GPS-позиционирования. Результаты разработок ХНУРЭ 2014-2019 г. г. Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи (МІВТС-2020). Матер. VII Міжнародної наук.-техн. конф. – Харків, 2020. – С. 31. DOI: [10.24027/2306-7039.1A.2020.193279](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1A.2020.193279).

29. Жалило А.А., Дохов А.И., Яковченко А.И. Автономное (PPP) и дифференциальное (DGPS) кинематическое позиционирование. Сравнение точности на примере обработки бортовых GPS-наблюдений самолёта АН-158.

Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи (МІВТС-2020). Матер. VII Міжнародної наук.-техн. конф. – Харків, 2020. – С. 33. DOI: [10.24027/2306-7039.1A.2020.193279](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1A.2020.193279).

30. Дохов О.І., Жаліло О.О., Літус Ю.П., Тевяшев А.Д., Шостко І.С., Яковченко О.І. Розробка полігонного комплексу радіотехнічних та квантово-оптичних систем траєкторних вимірювань. Збірник XX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 78-79.

31. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Літус Ю.П., Катюшина О.В., Лук'янова О.О., Медведський М.М., Пап В.О. Реалізація ГНСС-технології автономної PPP-навігації високодинамічних об'єктів з використанням корекцій SBAS. Збірник XX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 85.

32. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Медведський М.М. Калібрування та контроль точності багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань. Збірник XX науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 03 – 04 вересня 2020 р, с. 85-86.

33. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І. Траєкторні визначення приземних літальних апаратів з використанням бортових GPS-спостережень, проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. Мат. VIII наук.-техн. конф., м. Київ, 15 жовтня 2020 р., С.115-116.

34. Жаліло О.О., Дохов О.І., Яковченко О.І., Літус Ю.П., Катюшина О.В., Лук'янова О.О., Медведський М.М., Пап В.О. Можливості автономної PPP-навігації навколосемних високодинамічних об'єктів по сигналах ГНСС. Збірник XXI науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» ДНВЦ ЗСУ, м. Чернігів, 2 – 3 вересня 2021 р, с. 99-101.