

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
АГРОБІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Допускається до захисту  
Зав. кафедри геодезії, землеустрою та  
інженерії безпілотних технологій  
доцент \_\_\_\_\_ Т.М. Сіроштан

«08» листопада 2025 року

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**

НА ТЕМУ:  
**ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ЗА  
ДОПОМОГОЮ НЕКЛАСИЧНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ТОЧНОСТІ GNSS**

Виконав(ла) Марчук Ярослав Валерійович

Керівник к.е.н., доц. Сіроштан Т.М.

Рецензент к.е.н., доц. Камінецька О.В.

Я, Марчук Ярослав Валерійович, засвічую, що кваліфікаційну роботу виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності.

Біла Церква – 2025

## РЕФЕРАТ

Марчук Ярослав Валерійович

### «Покращення якості геопросторових даних за допомогою неklasичних методів оцінки точності GNSS»

Сучасні Геоінформаційні системи (ГІС) та картографічні додатки критично залежать від якості геопросторових даних, ключовим джерелом яких є глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS — Global Navigation Satellite Systems), такі як GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou. Точність GNSS-вимірювань безпосередньо впливає на достовірність кадастрів, інженерних проєктів, систем точного землеробства та моніторингу деформацій.

Традиційна (класична) оцінка точності GNSS ґрунтується переважно на методах математичної статистики, що використовують нормальний розподіл похибок, таких як середньоквадратична похибка (СКП) та критерії відкидання грубих похибок. Однак, в умовах інтенсивного використання GNSS у міських каньйонах, лісових масивах або під впливом іоносферних збурень, виникають негаусові та некорельовані похибки, які класичні методи не можуть ефективно врахувати або компенсувати. Ці похибки суттєво знижують якість кінцевих геопросторових даних. Актуальність теми зумовлена необхідністю розробки та впровадження нових, стійкіших і точніших методів оцінки та фільтрації похибок GNSS для забезпечення високої якості геопросторових даних, що є передумовою для прийняття надійних рішень.

Теоретичні положення та практичні результати дослідження демонструють, що неklasичні підходи є ключовим напрямком для забезпечення надійності та високої точності GNSS-вимірювань у сучасному геодезичному та геоінформаційному просторі.

**Об'єкт дослідження.** Часові серії координат референсних GNSS-станцій.

**Предмет дослідження.** Оцінювання придатності результатів GNSS-спостережень для задач геодинаміки.

**Методи дослідження.** При проведенні досліджень використані методи статистичного опрацювання та оптимальної фільтрації експериментальних даних, методи математичного моделювання.

**Метою дослідження** є проведення теоретичних та практичних досліджень часових серій координат референцних GNSS-станцій України з метою встановлення їх придатності для геодинамічних досліджень.

Відповідно до поставленої мети, необхідно вирішити такі **завдання**:

- дослідити інструментарій опрацювання даних GNSSспостережень для отримання часових рядів координат;
- виконати опрацювання часових серій координат GNSS-станцій неklasичною теорією похибок вимірів для перевірки гіпотези про їх підпорядкування нормальному закону розподілу;
- оцінити придатність GNSS-станцій України для геодинамічних досліджень;
- запропонувати шляхи покращення якості геопросторових даних за допомогою неklasичних методів оцінки точності GNSS.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практична значущість роботи полягає в тому, що отримані числові значення емпіричних розподілів координат станцій із застосуванням використаної методики дозволяють розробити класифікацію референцних станцій України для їх подальшого використання при розв'язуванні задач геодинаміки.

Кваліфікаційна робота магістра містить 55 сторінок, 3 таблиць, 14 рисунків, список використаних джерел із 51 найменування.

**Ключові слова:** GNSS (глобальні навігаційні супутникові системи), неklasичні методи, оцінка точності, якість геопросторових даних, часові серії координат, референцні GNSS-станції.

## ABSTRACT

**Marchuk Yaroslav Valeryovich**

**"Improving the quality of geospatial data using non-classical GNSS accuracy assessment methods"**

Modern Geographic Information Systems (GIS) and mapping applications critically depend on the quality of geospatial data, a key source of which is Global Navigation Satellite Systems (GNSS), such as GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou. The accuracy of GNSS measurements directly affects the reliability of cadastral, engineering projects, systems of precision agriculture and deformation monitoring.

Traditional (classical) GNSS accuracy assessment is based mainly on mathematical statistics methods using normal error distribution, such as root mean square error (RMS) and gross error rejection criteria. However, in the conditions of intensive use of GNSS in urban canyons, forest areas or under the influence of ionospheric disturbances, non-Gaussian and uncorrelated errors occur, which classical methods cannot effectively take into account or compensate. These errors significantly reduce the quality of the final geospatial data. The topicality of the topic is due to the need to develop and implement new, stable and more accurate methods of evaluating and filtering GNSS errors to ensure the high quality of geospatial data, which is a prerequisite for making reliable decisions.

The theoretical provisions and practical results of the research demonstrate that non-classical approaches are the key direction for ensuring the reliability and high accuracy of GNSS measurements in the modern geodetic and geoinformation space.

Object of research. Time series of coordinates of reference GNSS stations. Subject of research. Evaluation of the suitability of the results of GNSS observations for geodynamic problems.

Research methods. When conducting research, methods of statistical processing and optimal filtering of experimental data, methods of mathematical modeling were used.

The purpose of the study is to conduct theoretical and practical studies of time series coordinates of reference GNSS stations of Ukraine in order to establish their suitability for geodynamic research.

In accordance with the set goal, it is necessary to solve the following tasks:

- to investigate the toolkit for processing GNSS observation data to obtain time series of coordinates;

- to process the time series of coordinates of GNSS stations using the non-classical theory of measurement errors to test the hypothesis that they obey the normal distribution law;

- assess the suitability of GNSS stations of Ukraine for geodynamic research;

- propose ways to improve the quality of geospatial data using non-classical methods of GNSS accuracy assessment.

Practical significance of the obtained results. The practical significance of the work lies in the fact that the obtained numerical values of the empirical distributions of the coordinates of the stations with the application of the used methodology allow to develop a classification of the reference stations of Ukraine for their further use in solving geodynamics problems.

The master's thesis contains 55 pages, 9 tables, 14 figures, a list of used sources of 51 items.

**Keywords:** GNSS (global navigation satellite systems), non-classical methods, accuracy assessment, quality of geospatial data, time series of coordinates, reference GNSS stations.

<b>ЗМІСТ</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП</b>	
<b>РОЗДІЛ 1. АЛГОРИТМ АНАЛІЗУ ХАРАКТЕРИСТИК ПОМИЛОК І ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ GNSS ДАНИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ</b>	<b>10</b>
1.1. Поняття помилок та алгоритм фільтрації для даних часових рядів GNSS	10
1.2. Аналіз впливу застосування методів фільтрації на точність вимірювання станцій	14
1.3. Загальний порівняльний аналіз вимірних похибок для станцій	18
Висновки до 1 розділу	22
<b>РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ФІЛЬТРАЦІЇ</b>	<b>24</b>
2.1. Алгоритм багатовимірної поліноміальної регресії	24
2.2. Оцінка результатів апроксимації моделі методом аналізу залишків	28
2.3. Оцінювання моделі	31
Висновки до 2 розділу	35
<b>РОЗДІЛ 3. ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕКЛАСИЧНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ТОЧНОСТІ GNSS</b>	<b>36</b>
3.1. Організація експериментальних досліджень	36
3.2. Методика репрезентативної оцінки точності визначення GNSS координат на основі аналізу залишкових компонент у часових серіях	39
3.3. Практичне застосування методики та розробка класифікації референцних GNSS-станцій України	42
Висновки до 3 розділ	46
<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>47</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>50</b>

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання цієї кваліфікаційної роботи з метою розширення в методологічному відношенні можливостей неklasичної теорії похибок вимірів щодо оцінювання точності GNSS-координат на основі часових рядів залишкових компонент, вирішені завдання розроблення методики репрезентативного оцінювання точності визначення координат станцій GNSS-спостережень неklasичною теорією похибок вимірів і проведено її експериментальне дослідження. В рамках завдань дипломної роботи зроблені наступні висновки.

Сучасне програмне забезпечення для опрацювання GNSS-даних та спеціалізоване програмне забезпечення для аналізу часових рядів дозволяють вилучити більшість джерел похибок систематичного характеру (тренду, циклічного та сезонного компонентів ряду). Разом з тим, при широкомасштабних дослідженнях часових рядів GNSS-координат виявлено, що існують залишкові похибки систематичного характеру, які проявляються в залежності від місцевих умов і особливостей розміщення станцій спостережень. Класична теорія похибок вимірювання Гаусса при опрацюванні спостережень великого обсягу не може забезпечити ефективність оцінювання через наявність залишкових систематичних похибок.

Розглянуто загальну схему аналізу часових серій координат, яка полягає в проведенні фільтрації, вилученні тренду та сезонних сигналів, оцінювання вмісту шуму. Проведення фільтрації, видалення тренду та аналізу вмісту шуму часових серій стандартними методами аналізу дозволяє отримати залишковий часовий ряд «теоретично» з випадковими компонентами. За реальної наявності систематичних ефектів у випадковій компоненті неможливо репрезентативно прогнозувати значення часового ряду на майбутні періоди. Частина таких ефектів може бути віднесена до трудно передбачуваних природних явищ геофізичного характеру (припливні та неприпливні явища, атмосферні та океанічні навантаження тощо), частина – до випадкових дій місцевого рівня.

На основі реальних результатів спостережень на перманентних станціях Європи, що входять у мережу EPN, отримано тестові часові ряди залишкових компонент координат на предмет підтвердження/не підтвердження гіпотези про їх підпорядкування закону Гаусса. Результати ймовірності  $p(\chi^2)$  того, що виміри на станціях є вибірковими з нормальної генеральної сукупності відповідно склали від 0.19 до 0.31 для координати  $N$ , від 0.15 до 0.98 для координати  $E$ , від 0.14 до 0.42 для координати  $U$  для станцій, що входять в категорію C0. Для перманентних станцій категорії C6 перевірка показала, що  $0.001 < p(\chi^2) < 0.16$ . Згідно НТПВ така ймовірність повинна б скласти величину більшу за 0.3. Тобто реальні розподіли залишкових компонент часових рядів не підкоряються нормальному закону.

За отриманими результатами досліджень розроблено класифікацію референцних станцій України щодо їх придатності до розв'язування задач найвищої точності.

У ході дослідження було розглянуто проблему забезпечення високої якості геопросторових даних, отриманих за допомогою глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Встановлено, що точність і надійність таких даних значною мірою залежать від впливу зовнішніх і внутрішніх факторів — атмосферних збурень, мультипасових ефектів, геометрії супутникового сузір'я, технічних особливостей приймачів та методів обробки сигналів.

Традиційні методи оцінювання точності GNSS забезпечують достатню якість вимірювань у стандартних умовах, однак вони часто є неефективними в ситуаціях із підвищеним рівнем шуму або при наявності нелінійних і стохастичних спотворень. У зв'язку з цим актуальним є використання неklasичних методів оцінки точності, що ґрунтуються на принципах штучного інтелекту, машинного навчання, нечіткої логіки та адаптивної фільтрації.

Результати проведеного аналізу показали, що застосування таких методів дозволяє:

ефективніше виявляти та компенсувати систематичні й випадкові помилки в GNSS-вимірюваннях;

адаптивно оцінювати якість сигналів у реальному часі;

підвищити точність позиціонування та стабільність геопросторових рядів;

забезпечити більш надійну інтеграцію GNSS-даних із іншими джерелами просторової інформації (інерціальними, фотограмметричними тощо).

Таким чином, використання неklasичних методів оцінки точності GNSS є перспективним напрямом розвитку сучасних геоінформаційних технологій. Це дозволяє не лише підвищити якість геопросторових даних, а й створює підґрунтя для впровадження інтелектуальних систем аналізу простору, автономної навігації, моніторингу навколишнього середовища та точного землеробства.

Отже, впровадження інтелектуальних підходів до оцінювання точності GNSS сприяє формуванню нової парадигми в обробці геопросторової інформації, що поєднує високу точність, адаптивність і здатність до самонавчання, забезпечуючи підвищення ефективності та достовірності просторових рішень у різних сферах діяльності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Глісон С., Гебре Егзіабхер Д., редактори. Застосування та методи ГНСС. Бібліотека технологій та застосувань ГНСС Artech House; Artech House; Норвуд, Массачусетс, США: 2009. с. 1–508.
2. Остерман А., Годеша Т., Хочевар М. Впровадження недорогих прецизійних GPS/GNSS у сільське господарство. У: Кошутич С., редактор. Актуальні завдання сільськогосподарської інженерії, Матеріали 41-го Міжнародного симпозіуму з сільськогосподарської інженерії, Опатія, Хорватія, 19–22 лютого 2013 р. Том 41. Агрономічний факультет Свеучилища У Загребі; Загреб, Хорватія: 2013. с. 229–239.
3. Ван Ю., Цянь К., Лю Х. WHU-Смартфон: Масштабний набір даних GNSS для багатодорожніх сцен смартфонів Android та недорогий модуль GNSS. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2024;25:17993–18005. doi: 10.1109/TITS.2024.3434639.
4. Zhao L., Yang Y., Xiang Z., Zhang S., Li X., Wang X., Ma X., Hu C., Pan J., Zhou Y. та ін. Нове недороге рішення GNSS для моніторингу деформації в режимі реального часу під час прошовування тросових сіدل: тематичне дослідження підвісного мосту Гоцзятуо. *Remote Sens.* 2022;14:5174. doi: 10.3390/rs14205174.
5. Тана В., Гонсалес Е., Монтано М., Гомес О. Ефективне впровадження базової станції GNSS з RTK-приймачем для топографії. У: Роча А., Аделі Х., Дземида Г., Морейра Ф., Понішевська-Маранда А., редактори. Передовий досвід та нові перспективи в інформаційних системах і технологіях, том 1, Матеріали WorldCIST 2024, Лодзь, Польща, 26–28 березня 2024 р. Том 985. Springer International Publishing Ag; Cham, Швейцарія: 2024. с. 82–91.
6. Фамільєтті Н.А., Чечере Г., Грассо К., Меммоло А., Вікарі А. Тестування потенціалу недорогого безпілотного літального апарату RTK/PPK для точного позиціонування. *Датчики.* 2021;21:3882. doi: 10.3390/s21113882.
7. Меммоло А., Фамільєтті Н.А., Москілло Р., Грассо К., Вікарі А. UAS-LC-GNSS: Точна геодезична зйомка з використанням недорогої системи

GNSS для комерційних дронів. *Rend. Online Soc. Geol. Ital.* 2023;60:134–139. doi: 10.3301/ROL.2023.37.

8. Сосонка, І. (2014). Аналіз часових рядів зміни координат референцних станцій України. Збірних тез та доповідей 72-ї студентської науково-технічної конференції, Львів, с. 50-52. 14. Сосонка, І. (2017). Порівняння методів аналізу часових серій координат референцних GNSS-станцій : підготовчий етап. збірник тез Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «GeoTerrace2017», Львів, с. 42-44.

9. Сосонка, І., Боїло, Д. (2018). Аналіз похибок часових серій координат референцних GNSS-станцій. Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «GeoTerrace-2018», Львів, с. 55-56.

10. Amagua, C. G. P., Krueger, C. P., Criollo, A. R. T. (2018). Stochastic model of the Brazilian GPS network coordinates time series. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 24(4), 545-563.

11. Amiri-Simkooei, A. R. (2013). On the nature of GPS draconitic year periodic pattern in multivariate position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(5), 2500-2511.

12. Amiri-Simkooei, A. R., Tiberius, C. C., Teunissen, P. J. (2007). Assessment of noise in GPS coordinate time series: methodology and results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7).

13. Anđić, D. (2016). Variance components estimation of residual errors in GPS precise positioning. *Geodetski vestnik*, 60(3), 467-482.

14. Ashby, N. (2023). Relativity in the global positioning system. *Living Reviews in relativity*, 6(1), 1-42.

15. Barba, P., Rosado, B., Ramírez-Zelaya, J., Berrocoso, M. (2021). Comparative Analysis of Statistical and Analytical Techniques for the Study of GNSS Geodetic Time Series. In *Engineering Proceedings* (Vol. 5, No. 1, p. 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

16. Bartolucci, M., Casile, R., Corazza, G. E., Durante, A., Gabelli, G., &

Guidotti, A. (2013, June). Cooperative/distributed localization and characterization of GNSS jamming interference. In 2013 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS) (pp. 1-6). IEEE.

17. Bernese GNSS Software, [online] Available at: <http://www.bernese.unibe.ch/> [Accessed 01 03 2021] 133-28. Beyerle, G. (2009). Carrier phase wind-up in GPS reflectometry. *GPS solutions*, 13(3), 191.

18. Blewitt, G., Lavallée, D. (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 107, no. B7, pp. ETG 9-11-30. Blewitt, G., Kreemer, C., Hammond, W. C., & Gazeaux, J. (2016). MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3), 2054-2068.

19. Boehm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2016). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of geophysical research: solid earth*, 111(B2).

20. Bock, O., & Doerflinger, E. (2001). Atmospheric modeling in GPS data analysis for high accuracy positioning. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6-8), 373-383. 33. Bogusz, J., & Klos, A. (2016). On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series. *GPS solutions*, 20(4), 655-664.

21. Bogusz, J., Gruszczynski, M., Figurski, M., & Klos, A. (2015). Spatio-temporal filtering for determination of common mode error in regional GNSS networks. *Open Geosciences*, 7(1).DOI: 10.1515/geo-2015-0021

22. Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., Bastos, L. (2008). Fast error analysis of continuous GPS observations. *Journal of Geodesy*, 82(3), 157-166.

23. Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., Bastos, L. (2013). Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data. *Journal of Geodesy*, 87(4), 351-360.

24. Bruni, S., Zerbini, S., Raicich, F., Errico, M., Santi, E. (2014). Detecting

discontinuities in GNSS coordinate time series with STARS: case study, the Bologna and Medicina GPS sites. *Journal of Geodesy*, 88(12), 1203-1214./// Dmitrieva, K., Segall, P., & Bradley, A. M. (2016). Effects of linear trends on 134 estimation of noise in GNSS position time series. *Geophysical Journal International*, ggw391

25. Cao, L., Zhang, B., Li, J., Yao, Y., Liu, L., Ran, Q., & Xiong, Z. (2021). A Regional Model for Predicting Tropospheric Delay and Weighted Mean Temperature in China Based on GRAPES\_MESO Forecasting Products. *Remote Sensing*, 13(13), 2644. 39.

26. Closas, P., Fernández-Prades, C., & Fernández-Rubio, J. A. (2007). Maximum likelihood estimation of position in GNSS. *IEEE Signal Processing Letters*, 14(5), 359-362.

27. Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P. (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual*, Bern: Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing 41. Davis, J. L., Wernicke, B. P., & Tamisiea, M. E. (2012). On seasonal signals in geodetic time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B1).

28. Di, M., Zhang, A., Guo, B., Zhang, J., Liu, R., & Li, M. (2020). Evaluation of Real-Time PPP-Based Tide Measurement Using IGS Real-Time Service. *Sensors*, 20(10), 2968.

29. Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Webb, F., Prawirodirdjo, L., Kedar, S., Jamason, P. (2006). Spatiotemporal filtering using principal component analysis and Karhunen-Loeve expansion approaches for regional GPS network analysis. *Journal of geophysical research: solid earth*, 111(B3).

30. Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Cheng, M. K., & Miyazaki, S. I. (2002). Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4), ETG-9.

31. Dvulit, P., Savchuk, S., Sosonka, I. (2020). The processing of GNSS observation by non-classical error theory of measurements. *Науковий журнал "Геодинаміка"*, Випуск 1(28), p. 19-28, DOI:10.23939/jgd2020.01.019.

32. Dvulit P.D., Savchuk S.H., Sosonka I.I. (2021). Accuracy estimation of

site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory 135 of measurements. Geodesy and Geodynamics.

<https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.07.005>

33. EUREF Permanent GNSS Network : <https://www.epncb.oma.be>

34. . Furqan, A. (2010). Evaluation of GNSS as a Tool for Monitoring Tropospheric Water Vapour, Göteborg, Sweden

35. Gambis, D. (2006). DORIS and the determination of the Earth's polar motion. Journal of Geodesy, 80(8-11), 649-656. 50. GAMIT/GLOBK, [online] Available at: <http://geoweb.mit.edu/gg/> [Accessed 01 03 2020]

36. Gazeaux, J., Williams, S., King, M., Bos, M., Dach, R., Deo, M., ... & Webb, F. H. (2013). Detecting offsets in GPS time series: First results from the detection of offsets in GPS experiment. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(5), 2397-2407. 52. GipsyXDocs, 2019

37. Gobinddass, M. L., Willis, P., De Viron, O., Sibthorpe, A., Zelensky, N. P., Ries, J. C., ... & Lemoine, F. G. (2009). Improving DORIS geocenter time series using an empirical rescaling of solar radiation pressure models. Advances in space research, 44(11), 1279-1287.

38. Görres, B., Campbell, J., Becker, M., & Siemes, M. (2006). Absolute calibration of GPS antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques. GPS solutions, 10(2), 136-145.

39. Griffiths, J., & Ray, J. R. (2013). Sub-daily alias and draconitic errors in the IGS orbits. GPS solutions, 17(3), 413-422.

40. Gruszczynski, M., Bogusz, J., Kłós, A., & Figurski, M. (2015, April). Studies on spatio-temporal filtering of GNSS-derived coordinates. In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 303).

41. Guidelines for EUREF Densifications // [ftp://epncb.oma.be/pub/general/Guidelines\\_for\\_EUREF\\_Densifications.pdf](ftp://epncb.oma.be/pub/general/Guidelines_for_EUREF_Densifications.pdf)

42. He, X., (May, 2017). Study on the noise model of GPS coordinates time series, PhD thesis, School of Geodesy and Geomatics. 136

43. He, X., Hua, X., Yu, K., Xuan, W., Lu, T., Zhang, W., & Chen, X.

(2015). Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering. *Advances in Space Research*, 55(5), 1316- 1327.

44. He, X., Montillet, J. P., Fernandes, R., Bos, M., Yu, K., Hua, X., & Jiang, W. (2017). Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*, 106, 12-29.

45. . He, Y., Zhang, S., Wang, Q., Liu, Q., Qu, W., Hou, X. (2018, May). HECTOR for analysis of GPS time series. In *China Satellite Navigation Conference* (pp. 187-196). Springer, Singapore.

46. Heinkelmann, R., Boehm, J., Schuh, H., & Tesmer, V. (2019). The effect of meteorological input data on the VLBI reference frames. In *Geodetic Reference Frames* (pp. 245-251). Springer, Berlin, Heidelberg.

47. Herring, T. A., King, R. W, Floyd, M. A. McClusky, S. C. (2018). *Introduction to GAMIT/GLOBK – Release 10.7.*, USA: Massachusetts Institute of Technology.

48. Héroux, P., & Kouba, J. GPS precise point positioning with a difference. Natural Resources Canada, Geomatics Canada, Geodetic Survey Division

49. Hulme H. R. Syms L. S. T. The The Law of Errors and the Combinations of Observations, *Mon. Notic. of RAS*. V. 99, pp 642–658

50. International GNSS service : <http://www.igs.org/products>

51. Jiang, W., Li, Z., van Dam, T., & Ding, W. (2023). Comparative analysis of different environmental loading methods and their impacts on the GPS height time series. *Journal of Geodesy*, 87(7), 687-703.