

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
АГРОБІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Спеціальність G18 «Геодезія та землеустрій»

Допускається до захисту
Зав. кафедри геодезії та землеустрою
доцент _____ Т.М. Сіроштан

«____» травня 2025 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

НА ТЕМУ:
**ЗАСТОСУВАННЯ НЕКЛАСИЧНОЇ ТЕОРІЇ ПОХИБОК ВИМІРІВ
ДЛЯ АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ СЕРІЙ ПЕРМАНЕНТНИХ
GNSS-СТАНЦІЙ УКРАЇНИ**

Виконала Руденко Наталія Вікторівна

Керівник к. екон. наук, доц. Сіроштан Т.М.

Рецензент к. екон. наук, доц. Камінецька О.В.

Я, Руденко Наталія Вікторівна, засвічую, що кваліфікаційну роботу виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності.

Біла Церква – 2025

РЕФЕРАТ

Руденко Наталія Вікторівна

" Застосування неklasичної теорії похибок вимірів для аналізу часових серій перманентних GNSS-станцій України "

В результаті багаторічних досліджень часових серій координат постійно діючих GNSS-мереж були виявлені зміни в координатах станцій спостережень, які корелюють з рухами земної кори. Як правило, ці зміни характеризуються постійним трендом і періодичними складовими. Дослідження трендів і періодичних складових часових серій вкрай важливо при геодинамічному моніторингу, оскільки дозволяє розрізняти рухи, пов'язані з природними (ендогенні та екзогенні) та техногенними процесами, і зміни, викликані іншими процесами, наприклад, роботою самої навігаційної системи.

Однак при проведенні аналізу часових серій координат виявлено, що мають місце деякі невраховані фактори в моделях, які застосовуються у програмному забезпеченні при опрацюванні GNSS-даних. Можуть також проявлятися впливи місцевих особливостей (гідрологічний режим, наявність перешкод супутниковим сигналам, стійкість геодезичного знаку тощо) у місці розташування станції спостережень, що обумовлює вибірковість цього процесу в окремих станціях. В цілому це означає, що навіть при наявності однакового обладнання і програм спостережень, довіра до результатів кожної окремої GNSS-станції може суттєво відрізнятися. Тому очевидно, що тільки індивідуальний підхід до кожної станції може виявити придатність її даних для подальшого геодинамічного аналізу.

Таким чином, вибір теми дослідження і її актуальність зумовлені необхідністю застосування сучасного математичного апарату для досліджень часових рядів з достатньо великим обсягом вибірки для їх якісного аналізу. Тому виявлення придатності перманентних та референцних GNSS-станцій до репрезентативного розв'язування задач геодинаміки є актуальною задачею.

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

Об'єкт дослідження. Часові серії координат референцних 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.

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 49 сторінок, 11 таблиць, 4 рисунки, список використаних джерел із 31 найменування.

Ключові слова: GNSS-спостереження, часові серії координат, геодезичні вимірювання, похибки вимірювань, перманентні GNSS-станції, некласичної теорії похибок вимірів.

ANNOTATION

Rudenko Natalia Viktorivna

"Application of non-classical measurement theory for analyzing time series of permanent GNSS-stations of Ukraine"

As a result of long-term studies of time series of coordinates of permanent GNSS-networks, changes in the coordinates of observations stations, which correlate with movements of the crust, have been identified. As a rule, these changes are characterized by a constant trend and periodic components. The study of trends and periodic components of time series is extremely important in geodynamic monitoring, since it allows to distinguish between natural (endogenous and exogenous) movements and man-made processes, and changes caused by other processes, such as the work of the navigation system itself.

However, when analyzing the time series of coordinates, there were some unaccounted factors in models that are used in software in the processing of GNSS-data. The influences of local features (hydrological regime, the presence of interference satellite signals, the stability of geodetic sign, etc.) at the location of the observation station, which causes the selectivity of this process in separate stations, may also be manifested. In general, this means that even in the presence of the same equipment and observation programs, trust in the results of each individual GNSS-station can be significantly different. Therefore, it is obvious that only an individual approach to each station can reveal the suitability of its data for further geodynamic analysis. Thus, the choice of the topic of research and its relevance are conditioned by the need to use a modern mathematical apparatus for research of time series with a sufficiently large sample for their qualitative analysis. Therefore, identifying the suitability of permanent and reference GNSS-stations to representatively solving geodynamics problems is an urgent task.

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

Object of study. Time series of coordinates of reference GNSS-stations.

The subject of the study. Evaluation of the suitability of GNSS-observations for geodynamics problems.

Research methods. The research uses methods of statistical processing and optimal filtration of experimental data, methods of mathematical modeling.

The bachelor's qualification work contains 49 pages, 11 tables, 4 figures, a list of sources used with 31 names.

Keywords: GNSS-surveillance, time series of coordinates, geodetic measurements, measurement errors, permanent GNSS-stations, non-classical measurement theory.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПРАЦЮВАННЯ GNSS-ДАНИХ ТА СТВОРЕННЯ ЧАСОВИХ СЕРІЙ КООРДИНАТ	9
1.1. Огляд методів досліджень часових серій координат	9
1.2. Методи опрацювання GNSS-спостережень	15
1.3. Функціональна модель часових серій координат	18
Висновки до 1 розділу	26
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ СЕРІЙ КООРДИНАТ	27
2.1. Просторово-часова фільтрація	27
2.2. Метод найменших квадратів	29
2.3. Оцінка максимальної правдоподібності	32
Висновки до 2 розділу	42
РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ НЕКЛАСИЧНОЇ ТЕОРІЇ ПОХИБОК ВИМІРІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ СЕРІЙ ПЕРМАНЕНТНИХ GNSS-СТАНЦІЙ УКРАЇНИ	43
3.1. Некласичний метод аналізу часових серій координат	43
3.2. Фундаментальні принципи неklasичної теорії похибок вимірів (НТПВ)	
3.3. Застосування НТПВ для аналізу часових серій перманентних GNSS-станцій України	48
Висновки до 3 розділу	50
ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54

ВИСНОВКИ

Отже, GNSS-технології (Global Navigation Satellite Systems) стали невід'ємною частиною сучасної геодезії, моніторингу деформацій та інших галузей, де потрібне високоточне позиціонування. Вони дозволяють отримувати координати з високою частотою і значною точністю, що робить їх ідеальними для створення часових серій. Проте, незважаючи на їхні переваги, GNSS-дані не є ідеальними і містять різноманітні похибки та шуми, що вимагають ретельного опрацювання.

Ефективність створення часових серій координат безпосередньо залежить від обраного методу опрацювання GNSS-даних. Існують різні підходи, кожен з яких має свої переваги та недоліки:

Статичні методи: забезпечують найвищу точність, але вимагають тривалих спостережень. Вони є основою для фундаментальних геодезичних мереж та моніторингу повільних деформацій.

Кінематичні методи: дозволяють отримувати координати в русі, що важливо для динамічних застосувань. Однак їхня точність, як правило, нижча за статичні, і вони більш чутливі до перешкод.

PPP (Precise Point Positioning): є потужним методом, який дозволяє отримувати високоточні координати за допомогою одного приймача, але потребує доступу до високоточних орбіт та годинникових поправок, а також тривалого часу конвергенції.

Диференціальні методи (RTK, DGNS): використовуються для підвищення точності в реальному часі або в постобробці шляхом використання даних з базових станцій.

Кожен метод має свої оптимальні сфери застосування, і їх вибір повинен базуватися на вимогах до точності, тривалості спостережень, доступності обладнання та необхідності роботи в реальному часі.

Залишкові систематичні похибки є одним з найбільших викликів при створенні точних часових серій. Ці похибки можуть бути викликані такими факторами, як:

Багатопрореневість: відбиття сигналу від навколишніх об'єктів.

Тропосферні та іоносферні затримки: зміни швидкості поширення сигналу в атмосфері.

Інструментальні похибки приймачів та антен.

Неточності в моделях земної кори та її деформацій.

Класичні методи статистичного аналізу часто не враховують складну природу цих похибок. У цьому контексті неklasична теорія похибок вимірювань відіграє критичну роль. Вона дозволяє:

Моделювати корельовані похибки: використовуючи такі підходи, як фільтри Калмана, ARMA-моделі, що враховують часову залежність похибок.

Застосовувати робастні методи: для мінімізації впливу викидів та аномалій у даних.

Ідентифікувати та компенсувати систематичні складові: що дозволяє виділити реальні рухи об'єкта від похибок вимірювань.

Застосування неklasичних підходів є необхідним для підвищення достовірності та точності часових серій координат, особливо при моніторингу малих деформацій або дослідженні геодинамічних процесів.

Подальший розвиток методів опрацювання GNSS-даних та створення часових серій координат буде зосереджений на:

Інтеграції з іншими сенсорами: комбінація GNSS з інерціальними системами, лазерними сканерами для підвищення точності та надійності.

Використанні машинного навчання та штучного інтелекту: для автоматичного виявлення аномалій, оптимізації параметрів опрацювання та прогнозування поведінки похибок.

Розробці більш досконалих моделей атмосфери: для точнішої компенсації тропосферних та іоносферних затримок.

Роботі з новими супутниковими системами: використання сигналів від Galileo, BeiDou, QZSS для підвищення кількості спостережень та покращення геометрії.

У роботі виявлено, що кореляція між окремими станціями мереж може досягати значних величин, через що часові серії містять похибки загального

режиму (Common Mode Errors, CME), які можуть бути вилучені широким спектром класичних методів. Використання просторово-часової фільтрації, методу найменших квадратів, оцінки максимальної правдоподібності дозволяють зменшити вплив цих похибок в середньому на 40%. Проте подальший аналіз отриманих часових серій, наприклад при порівнянні різних періодів спостережень, у деяких випадках показав, що результати значно відрізняються в залежності від обраного методу опрацювання, що вказує на наявність залишкових похибок, виявити які класичними методами неможливо.

Застосування неklasичної теорії похибок вимірів передбачається при математичному опрацюванні великих обсягів спостережень, оскільки вони не підкоряються нормальному закону розподілу. Апробація НТПВ для перманентних станцій мереж IGS та EPN, розташованих на території України показала, що ймовірність P того, що виміри є вибілковими із нормальної генеральної сукупності відповідно змінюються в межах від 0.001 до 0.92. А це означає, що реальні розподіли похибок вимірів не підпорядковуються нормальному закону, але узгоджуються в рамках застарілих класичних уявлень про закон розподілу похибок великого обсягу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бідюк, П. І., Романенко, В. Д., & Тимошук, О. Л. (2010). Аналіз часових рядів.
2. Вікіпедія : https://uk.wikipedia.org/wiki/Часовий_ряд
3. Двуліт, П. Д., Джунь, Й. В., (2017). Застосування методів неklasичної теорії похибок для абсолютних вимірювань галілеєвого прискорення. Геодинаміка: науковий журнал, (1 (22)), 7-15.
4. Двуліт, П., Сосонка, І. (2020). Некласичний підхід до моделювання похибок просторових координат GNSS-вимірів. Збірник наукових праць учасників Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції в математичному моделюванні і його програмному забезпеченні», Рівне, с. 5-8.
5. Савчук С., Проданець І.І., Калинич І.В. Перша мережа активних референцних станцій в Україні ZAKPOS. Етапи становлення та початок діяльності // Геопрофіль. – 2010. – № 1. – С.16-23
6. Савчук, С., Сосонка, І. (2014). Аналіз щоденних комбінованих розв'язків мережі референцних GNSS станцій України. Науковий вісник Ужгородського університету, Випуск 3, Ужгород, с. 43-47.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Bernese GNSS Software, [online] Available at: <http://www.bernese.unibe.ch/> [Accessed 01 03 2021]
11. Beyerle, G. (2009). Carrier phase wind-up in GPS reflectometry. GPS

solutions, 13(3), 191.

12. 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

13. 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.

14. Boehm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006). 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).

15. 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.

16. 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.

17. 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

18. 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.

19. 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.

20. 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 estimation of noise in GNSS position time series. *Geophysical Journal International*, ggw391

21. 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.

22. 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.

23. 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

24. 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).

25. 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.

26. 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).

27. 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.

28. 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.

29. Rózsa, S., Ambrus, B., Juni, I., Ober, P. B., & Mile, M. (2020). An advanced residual error model for tropospheric delay estimation. *GPS Solutions*, 24(4), 1-15.

30. Santamaría-Gómez, A., Bouin, M. N., Collilieux, X., & Wöppelmann, G. (2011). Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B1).

31. Savchuk, S., Khoptar, A., Sosonka, I. (2020). Processing of a regional network of GNSS stations by the PPP method. *Wybrane aspekty zabezpieczenia nawigacji lotniczej, Seria wydawnicza "Problemy współczesnej nawigacji"*, Część 2, pp. 159-170.