

УДК 629.056.84

ТЕСТИРОВАНИЕ В УКРАИНЕ СЕРВИСА ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СТАТИЧЕСКОМ И КИНЕМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМАХ

В. М. КОНДРАТЮК, В. В. КОНИН, А. В. КУЦЕНКО, С. И. ИЛЬНИЦКАЯ

*Национальный авиационный университет,
Украина, Киев, 03058, пр-т Космонавта Комарова, 1*

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований сервиса TerraStar, который реализует технологии автономного точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning) в реальном времени. Сервис предоставляет высокоскоростные данные к орбитам и часам навигационных спутников GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou, полученные от более 100 наземных станций GNSS. Эти данные совместно с алгоритмами двухчастотного (многосистемного) навигационного приемника NovAtel со встроенной PPP-технологией TerraStar обеспечивают решения для высокоточного (4–40 см) определения координат. Данные передаются в навигационный приемник по радиоканалам геостационарных спутников.

Оценена точность заявленного позиционирования для Украины в сложных радионавигационных условиях (урбанистический каньон, г. Киева и Киевской области), что дополняет ряд существующих исследований точности сервиса TerraStar в разных регионах мира.

Изложена методика проведения экспериментов, содержащая процедуры инициализации, записи и сохранения данных навигационного приемника для последующего сопоставления с эталонной траекторией, сформированной с помощью программного обеспечения (ПО) GrafNav/GrafNet 8.70.

Определено, что точность оценки координат, полученных в постобработке методом PPP с использованием ПО GrafNav/GrafNet 8.70, соизмерима с точностью координат, оцененных приемником NovAtel OEM 719 в реальном времени с использованием информации от TerraStar.

Экспериментально подтверждено, что точность позиционирования в исследуемой области соответствует точности, заявленной провайдерами TerraStar, которая сохраняется в течение 5 мин при отсутствии данных TerraStar.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы; ГНСС; высокоточное позиционирование; экспериментальные исследования; NovAtel correct PPP; TerraStar; постобработка данных в GrafNav/GrafNet

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее время характеризуется стремительным внедрением технологий глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в различные области жизнедеятельности. Об этом говорит отчет Европейского ГНСС агентства GSA (GNSS Space Agency) [1].

Согласно последним маркетинговым исследованиям [1], глобальный доход по сервисам, использующим ГНСС, возрастет с 2015 по

2025 год на 150 млрд. евро. При этом, количество единиц ГНСС приемников (чипов) возрастет более чем в два с половиной раза, и составит около 9 млрд. единиц в 2025 году. Таким образом, на каждого человека будет приходиться более одного изделия, использующего ГНСС технологии.

Такое широкое распространение ГНСС обусловлено созданием и развитием систем GPS, WAAS (США), GLONASS, SDCM (Рос-

DOI: [10.20535/S0021347019100054](https://doi.org/10.20535/S0021347019100054)

© В. М. Кондратюк, В. В. Конин, А. В. Куценко, С. И. Ильницкая, 2019

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. European GNSS Agency, *GNSS Market Report*, Issue 5, 2017. URI: https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss_market_report_2017_-_surveying.pdf.
2. Соколов, С.В.; Каменский, В.В.; Ковалев, С.М. "Стохастическая оценка эфемерид навигационных спутников на возмущенных орбитах," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 61, № 8, с. 452–463, 2018. DOI: [10.20535/S0021347018080034](https://doi.org/10.20535/S0021347018080034).
3. Мохд, К.Д.; Ачанта, Д.С.; Налам, В.К.; Пант, Т.К. "Сравнение методов оценки ТЕС при использовании сигналов S1 и L5 спутниковой системы навигации IRNSS," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 61, № 7, с. 398–410, 2018. DOI: [10.20535/S0021347018070038](https://doi.org/10.20535/S0021347018070038).
4. Kutsenko, O.; Ilnytska, S.; Konin, V. "Investigation of the residual tropospheric error influence on the coordinate determination accuracy in a satellite landing system," *Aviation*, Vol. 22, No. 4, p. 156-165, Dec. 2018. DOI: [10.3846/aviation.2018.7082](https://doi.org/10.3846/aviation.2018.7082).
5. Мартынюк, С.Е.; Василенко, Д.А.; Дубровка, Ф.Ф.; Лауш, А.Г. "Микрополосковая антенная решетка для помехоустойчивых спутниковых навигационных систем," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 58, № 3, с. 3–15, 2015. DOI: [10.20535/S0021347015030012](https://doi.org/10.20535/S0021347015030012).
6. Конин, В.В.; Шишков, Ф.А. "Автономная навигация космических сервисных аппаратов на геостационарной орбите по сигналам ГНСС," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 59, № 12, с. 43–49, 2016. DOI: [10.20535/S0021347016120049](https://doi.org/10.20535/S0021347016120049).
7. Gunning, K.; Blanch, J.; Walter, T. "SBAS corrections for PPP integrity with solution separation," *Proc. of 2019 Int. Tech. Meeting of The Institute of Navigation*, 28-31 Jan. 2019, Virginia, USA. 2019, pp. 707-719. DOI: [10.33012/2019.16739](https://doi.org/10.33012/2019.16739).
8. Nie, Z.; Zhou, P.; Liu, F.; Wang, Z.; Gao, Y. "Evaluation of orbit, clock and ionospheric corrections from five currently available SBAS L1 services: Methodology and analysis," *Remote Sensing*, Vol. 11, No. 4, p. 411, 2019. DOI: [10.3390/rs11040411](https://doi.org/10.3390/rs11040411).
9. Kuzmenko, N. S.; Ostroumov, I. V.; Marais, K. "An accuracy and availability estimation of aircraft positioning by navigational aids," *Proc. of 2018 IEEE 5th Int. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC*, 16-18 Oct. 2018, Kyiv, Ukraine. IEEE, 2018, pp. 36-41. DOI: [10.1109/MSNMC.2018.8576276](https://doi.org/10.1109/MSNMC.2018.8576276).
10. Ostroumov, I. V.; Kuzmenko, N. S. "Accuracy assessment of aircraft positioning by multiple radio navigational aids," *Telecommun. Radio Engineering*, Vol. 77, No. 8, p. 705-715, 2018. DOI: [10.1615/telecomradeng.v77.i8.40](https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v77.i8.40).
11. Kharchenko, V.; Mukhina, M. "Correlation-extreme visual navigation of unmanned aircraft systems based on speed-up robust features," *Aviation*, Vol. 18, No. 2, p. 80-85, 2014. DOI: [10.3846/16487788.2014.926645](https://doi.org/10.3846/16487788.2014.926645).
12. Mukhina, M. P.; Demchenko, D. M. "Analysis of visual correlation-extreme methods of UAV navigation," *2013 IEEE 2nd Int. Conf. Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proc., APUAVD*, 15-17 Oct. 2013, Kyiv, Ukraine. IEEE, 2013, pp. 213-216. DOI: [10.1109/APUAVD.2013.6705329](https://doi.org/10.1109/APUAVD.2013.6705329).
13. NovAtel CORRECT with PPP using TerraStar Corrections. APN-061 Rev K., 2019. URI: <https://www.novatel.com/assets/Documents/Bulletins/APN061-NovAtelCORRECT-withTerraStar.pdf>.
14. "Precise Positioning with NovAtel CORRECT Including Performance Analysis," *NovAtel White Paper*, April 2015. URI: <https://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/NovAtel-CORRECT-PPP.pdf>.
15. Jokinen, A.; Ellum, C.; Webster, I.; Shanmugam, S.; Sheridan, K. "NovAtel CORRECT with precise point positioning (PPP): Recent developments," *Proc. of 31st Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS + 2018*, Sept. 2018, Miami, USA. IEEE, 2018, pp. 1866-1882. DOI: [10.33012/2018.15824](https://doi.org/10.33012/2018.15824).
16. Zhalilo, A.; Yakovchenko, A. "Development of PPP-method realization for low Earth orbit satellite trajectory determination using on-board GPS-observations," *Eastern-European J. Enterprise Technol.*, Vol. 5, No. 9, p. 33-40, 2016. DOI: [10.15587/1729-4061.2016.81026](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81026).
17. Cai, C.; Gao, Y.; Pan, L.; Zhu, J. "Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and GALILEO," *Advances Space Res.*, Vol. 56, No. 1, p. 133-143, 2015. DOI: [10.1016/j.asr.2015.04.001](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.04.001).
18. Pan, L.; Zhang, X.; Li, X.; Li, X.; Lu, C.; Liu, J.; Wang, Q. "Satellite availability and point positioning accuracy evaluation on a global scale for integration of GPS, GLONASS, BeiDou and GALILEO," *Advances Space Res.*, Vol. 63, No. 9, p. 2696-2710, 2019. DOI: [10.1016/j.asr.2017.07.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.07.029).
19. Guo, J.; Li, X.; Li, Z.; Hu, L.; Yang, G.; Zhao, C.; D Fairbairn,.; Watson, D.; Ge, M. "Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture," *Precision Agriculture*, Vol. 19, No. 5, p. 895-911, 2018. DOI: [10.1007/s11119-018-9563-8](https://doi.org/10.1007/s11119-018-9563-8).
20. Kazmierski, K. "Performance of absolute real-time multi-GNSS kinematic positioning," *Artificial Satellites*, Vol. 53, No. 2, p. 75-88, 2018. DOI: [10.2478/arsa-2018-0007](https://doi.org/10.2478/arsa-2018-0007).
21. Xia, F.; Ye, S.; Xia, P.; Zhao, L.; Jiang, N.; Chen, D.; Hu, G. "Assessing the latest performance of GALILEO-only PPP and the contribution of GALILEO to multi-GNSS PPP," *Advances Space Res.*, Vol. 63, No. 9, p. 2784-2795, 2019. DOI: [10.1016/j.asr.2018.06.008](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.06.008).
22. Jokinen, A.; Ellum, C.; Webster, I.; Masterson, S.; Morley, T. "NovAtel CORRECT with precise point

positioning (PPP) for high accuracy kinematic applications,” *Proc. of 28th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GNSS + 2015, Sept. 2015, Florida, USA, 2015, pp. 1123-1152. URI: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=12846>.

23. DeSanto, J. B.; Chadwell, C. D.; Sandwell, D. T. “Kinematic post-processing of ship navigation data using precise point positioning,” *J. Navigation*, Vol. 72, No. 3, p. 795-804, 2019. DOI: [10.1017/S0373463318000887](https://doi.org/10.1017/S0373463318000887).

24. Romero-Andrade, R.; Zamora-Maciuel, A.; Uriarte-Adrián, J. D. J.; Pivot, F.; Trejo-Soto, M. E. “Comparative analysis of precise point positioning processing technique with GPS low-cost in different technologies with academic software,” *Measurement*, Vol. 136, p. 337-344, 2019. DOI: [10.1016/j.measurement.2018.12.100](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.100).

25. De Groot, L.; Infante, E.; Jokinen, A.; Kruger, B.; Norman, L. “Precise positioning for automotive with mass market GNSS chipsets,” *Proc. of 31st Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GNSS + 2018, Sept. 2018, Miami, USA, 2018, pp. 596-610. DOI: [10.33012/2018.16003](https://doi.org/10.33012/2018.16003).

26. Laurichesse, D.; Banville, S. “Innovation: Instantaneous centimeter-level multi-frequency precise point positioning,” *GPS World J.*, Vol. 29, No. 4, April 2018. URI: <https://www.gpsworld.com/innovation-instantaneous-centimeter-level-multi-frequency-precise-point-positioning/>.

27. Харченко, В.П.; Жалило, А.А.; Кондратюк, В.М.; Конин, В.В.; Куценко, А.В.; Сушко, В.Г.; Шелковенков, Д.А.; Шокало, В.М. “GPS-навигация и геодезическая съемка — результаты экспериментальной верификации технологии OmniSTAR,” *Научный вестник ГосНИИ АЭРОНАВИГАЦИЯ*, № 7, С. 28–36, 2007. URI: <http://er.nau.edu.ua:8080/handle/NAU/25602>.

28. Konin, V. V.; Kutsenko, O. V.; Lukianenko, E. O.; Ilnytska, S. I. “Experimental investigation of

multi-GNSS in static mode,” *Proc. of 2018 IEEE 5th Int. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC*, 16-18 Oct. 2018, Kyiv, Ukraine. IEEE, 2018, pp. 179-182. DOI: [10.1109/MSNMC.2018.8576274](https://doi.org/10.1109/MSNMC.2018.8576274).

29. Kharchenko, V. P.; Kondratyuk, V. M.; Ilnytska, S. I.; Kutsenko, O. V. “Recommendations to UAV navigation system test validation and some practical results,” *Proc. of 2014 IEEE 3rd Int. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC*, 14-17 Oct. 2014, Kyiv, Ukraine. IEEE, 2014, pp. 31-34. DOI: [10.1109/MSNMC.2014.6979723](https://doi.org/10.1109/MSNMC.2014.6979723).

30. Kutsenko, O. V.; Ilnytska, S. I.; Kondratyuk, V. M.; Konin, V. V. “Unmanned aerial vehicle position determination in GNSS landing system,” *Proc. of 2017 IEEE 4th Int. Conf. Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, APUAVD*, 17-19 Oct. 2017, Kyiv, Ukraine. IEEE, 2017, pp. 79-83. DOI: [10.1109/APUAVD.2017.8308781](https://doi.org/10.1109/APUAVD.2017.8308781).

31. TerraStar® Correction Services. URI: <https://www.novatel.com/products/terrarstar-gnss-corrections/#contentTab1>.

32. Introducing NovAtel Connect™. URI: https://www.novatel.com/assets/documents/papers/introducing_novatel_connect.pdf.

33. Waypoint products group, A NovAtel Precise Positioning Product, *GrafNav/GrafNet, GrafNav Static. User Manual*, OM-20000165, Rev.4, 2018. URI: <https://www.novatel.com/assets/Documents/Waypoint/Downloads/GrafNav-GrafNet-User-Manual-870.pdf>.

34. Grewal, M. S.; Weill, L. R.; Andrews, A. P. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*. NY: Wiley, 2001. DOI: [10.1002/0471200719](https://doi.org/10.1002/0471200719).

35. Булашев, С. В. *Статистика для трейдеров*. М.: Компания Спутник+, 2003. 245 с.

Поступила в редакцию 29.03.2019

После доработки 16.09.2019

Принята к публикации 10.10.2019