

WROCLAW UNIVERSITY OF ENVIRONMENTAL
AND LIFE SCIENCES

DOCTORAL DISSERTATION

**Determination of Global Geodetic Parameters
Using the GPS, GLONASS, and Galileo
Satellite Systems**

Author:
Radosław ZAJDEL

Supervisor:
Prof. dr hab. inż. Krzysztof SOŚNICA
Co-Supervisor:
Dr inż. Kamil KAŻMIERSKI

*A thesis submitted in fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Philosophy*

at the

Institute of Geodesy and Geoinformatics

February 17, 2021



WROCLAW UNIVERSITY
OF ENVIRONMENTAL
AND LIFE SCIENCES



INSTITUTE OF GEODESY
AND GEOINFORMATICS

Abstract

Geodesy is responsible for providing the mathematical description of the state of the planet Earth through a set of measurements and global geodetic parameters. Thanks to the observations of geodetic parameters and their temporal changes, we can monitor dynamic phenomena occurring in the Earth system, i.e., mass redistribution and momentum exchange between oceans, atmosphere, hydrosphere, and solid Earth. The determination of global geodetic parameters is possible thanks to the use of satellite and space geodetic techniques, especially Satellite Laser Ranging (SLR), Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS), satellite altimetry, e.g., Jason-1/2/3 and TOPEX/Poseidon missions and other dedicated satellite missions, e.g., Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE, GRACE Follow-On), Swarm, ICESat-2, or Sentinel missions.

There is no universal geodetic technique that can provide high-quality information on all global geodetic parameters. Different characteristics of particular geodetic techniques or satellite missions cause each to be more or less sensitive to specific changes in the Earth system or susceptible to errors in the data processing. The GNSS community delivers global and technique-specific products, such as station coordinates, Earth rotation parameters, orbits, geocenter coordinates, clocks, biases, atmospheric and ionospheric delays, which are inherently affected by different systematics and spurious signals. The latter may result, among other things, from errors in orbit modeling and observation geometry, which arise from orbital characteristics of GNSS constellations and the distribution of a global network of ground sites.

So far, the excellent majority of research studies on the GNSS-based global geodetic parameters relied on GPS. To a limited extent, global parameters based on GLONASS were exploited, as well. In recent years, the world has experienced a prominent change in the landscape of satellite navigation. Aside from the obvious access to independent positioning, navigation, and timing, the advent of the new GNSS has provided revolutionary opportunities in applied sciences, extending GPS capabilities with the whole range of multi-GNSS constellations. Comparison of global geodetic parameters based on different GNSS constellations gives us an excellent tool to identify systematic errors and signals attributed to the individual navigation systems. Research of this type has not been possible so far, taking into account the incomplete operability of systems, i.e., GLONASS or Galileo, the gradual adaptation of ground network of receivers to track new multi-GNSS signals, and inhomogeneous quality of GNSS precise orbits.

There are currently several key factors justifying research in this area, especially with the use of Galileo. The ground-based GNSS infrastructure allows tracking the signals of new GNSS systems, including Galileo, through a global well-distributed network of stations. In 2017, the European GNSS Agency disclosed relevant information about the Galileo satellites, which introduced an opportunity to upgrade existing processing methods, e.g., modeling non-gravitational perturbation forces. Additionally, the Galileo system has a much weaker resonance between the satellite revolution period and the Earth rotation period than the GPS satellites, which allows for a broader perspective on studying the rotation of the Earth.

In the Ph.D. thesis, the series of analyses were undertaken to verify the research hypothesis:

"The use of the Galileo system allows improving the quality of determination of fundamental global geodetic parameters, such as pole coordinates, Length-of-Day, and geocenter motion, and consequently enhances the realization of the GNSS-based terrestrial reference frames."

The conducted research aims to provide the first analyses of this kind characterizing the products of global geodetic parameters using observations of GPS, GLONASS, and Galileo systems. The work also conveys information on the systematic errors in the GNSS-based products resulting from the individual satellite systems GPS, GLONASS, and Galileo. Improving the quality of geodetic parameters is a direct step towards understanding temporal and spatial changes in the Earth system and ensuring the stability of global terrestrial reference frames.

Keywords: GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, SLR, global geodetic parameters, Earth Rotation, polar motion, length-of-day, geocenter motion, terrestrial reference frames

Streszczenie

Głównym zadaniem geodezji jako nauki w ujęciu globalnym jest matematyczny opis stanu planety Ziemi poprzez zbiór globalnych parametrów geodezyjnych. Dzięki globalnym parametrom geodezyjnym i obserwacjom ich czasowych zmian jesteśmy w stanie monitorować dynamiczne zjawiska zachodzące w systemie ziemskim t.jk. redystrybucja mas oraz wymiana momentu pędu pomiędzy ośrodkami ciekłymi, stałymi i gazowymi Ziemi. Wyznaczanie globalnych parametrów geodezyjnych jest możliwe dzięki wykorzystaniu satelitarnych i kosmicznych technik geodezyjnych takich jak pomiary laserowe do satelitów (SLR, ang. Satellite Laser Ranging), interferometria wielkobazowa (VLBI, ang. Very Long Baseline Interferometry), globalne nawigacyjne systemy satelitarne (GNSS, ang. Global Navigation Satellite Systems), Dopplerowski system wyznaczania orbit z zintegrowanym pozycjonowaniem satelitarnym (ang. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, DORIS), altimetria satelitarna np. misje Jason-1/2/3, TOPEX-Poseidon, oraz inne dedykowane misje satelitarne, np. Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE, GRACE Follow-On), Swarm, ICESat-2, czy Sentinel.

Nie istnieje uniwersalna technika geodezyjna, która byłaby w stanie dostarczyć wysokiej jakości informacji na temat wszystkich globalnych parametrów geodezyjnych. Wynika to z odmiennych charakterystyk poszczególnych technik i misji satelitarnych, które w mniejszym lub większym stopniu są wrażliwe na zmiany danych aspektów systemu ziemskiego oraz błędów w procesie wyznaczania parametrów geodezyjnych. W przypadku techniki GNSS produkty t.jk współrzędne stacji, parametry ruchu obrotowego Ziemi, orbity, współrzędne geocentrum są podatne na wpływ różnego rodzaju efektów systematycznych i pozornych sygnałów. Te mogą wynikać m.in. z błędów w modelowaniu orbit oraz geometrii obserwacji, na którą składają się charakterystyka orbitalna konstelacji GNSS oraz rozmieszczenie globalnej sieci stacji.

W technice GNSS dotychczasowe badania opierały się o wykorzystanie konstelacji GPS i GLONASS. Z drugiej strony, w ostatnich latach prężnie rozwijały się kolejne systemy nawigacyjne, w tym europejski system satelitarny Galileo. Kolejne systemy nawigacyjne, oprócz niezależności w dziedzinie lokalizacji, dostarczyły również rewolucyjnych możliwości w naukach stosowanych, rozszerzając możliwości systemu GPS o całą gamę konstelacji multi-GNSS. Porównanie globalnych parametrów geodezyjnych wyznaczanych na podstawie różnych konstelacji GNSS daje nam narzędzie do identyfikacji błędów systematycznych i sygnałów charakterystycznych dla poszczególnych systemów nawigacyjnych. Badania tego typu nie były dotychczas możliwe biorąc pod uwagę niepełną operacyjność systemów t.jk. GLONASS czy Galileo, przystosowanie odbiorników naziemnych do śledzenia nowych sygnałów multi-GNSS, oraz niejednorodną jakość orbit precyzyjnych nowych typów satelitów.

Aktualnie istnieje kilka kluczowych czynników uzasadniających przeprowadzenie badań w tym zakresie, szczególnie z wykorzystaniem systemu Galileo. Ciągła modernizacja naziemnej infrastruktury stacji śledzących sygnały GNSS umożliwiła śledzenie sygnałów nowych systemów GNSS, w tym Galileo, przez globalną, dobrze rozmieszczoną sieć stacji.

Informacje dotyczące specyfiki systemu Galileo (metadane) są sukcesywnie publicznie udostępniane w odróżnieniu od systemów militarnych t.jk. GPS czy GLONASS. Dostępność tak szczegółowych aspektów technicznych dotyczących systemu Galileo daje możliwość rozwoju m.in. nowych rewolucyjnych metod modelowania niegrawitacyjnych sił perturbujących. Dodatkowo, system Galileo posiada o wiele słabszy rezonans okresu obiegu z ruchem obrotowym Ziemi niż system GPS, co pozwala na szersze możliwości badania ruchu obrotowego Ziemi.

W przewodzie doktorskim podjęto analizy mające na celu zweryfikowanie postawionej hipotezy badawczej:

„Wykorzystanie systemu Galileo umożliwia poprawę jakości wyznaczania fundamentalnych globalnych parametrów geodezyjnych, takich jak współrzędne bieguna ziemskiego, eksces długości doby, ruch geocentrum, a w konsekwencji poprawia realizację ziemskich układów odniesienia.”

Celem prowadzonych badań jest dostarczenie pierwszych tego typu analiz charakteryzujących produkty globalnych parametrów geodezyjnych wykorzystując obserwacje systemów GPS, GLONASS i Galileo. Dodatkowo, wykonane prace dostarczyły informacji na temat błędów systematycznych technik GNSS wynikających z wykorzystania poszczególnych systemów satelitarnych GPS, GLONASS oraz Galileo. Podstawowe badania z zakresu poprawy globalnych parametrów geodezyjnych oraz poprawy spójności technik obserwacyjnych są kluczowe w rozwoju dyscypliny naukowej reprezentowanej przez geodezję. Zwiększenie jakości parametrów geodezyjnych jest bezpośrednim krokiem zarówno do poprawy globalnych układów odniesienia jak i zrozumienia czasowych i przestrzennych zmian zachodzących w systemie ziemskim.

Słowa kluczowe: GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, globalne parametry geodezyjne, ruch obrotowy Ziemi, ruch bieguna, długość doby, ruch geocentrum, ziemskie układy odniesienia