

WROCLAW UNIVERSITY OF ENVIRONMENTAL
AND LIFE SCIENCES

DOCTORAL DISSERTATION

**Satellite Laser Ranging to Low Earth Orbiters
for Orbit Validation and Determination
of Global Geodetic Parameters**

Author:
Dariusz STRUGAREK

Supervisor:
Prof. dr hab. inż. Krzysztof SOŚNICA
Co-Supervisors:
Dr Daniel ARNOLD (AIUB)
Dr inż. Grzegorz BURY (UPWr)

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

at the

Institute of Geodesy and Geoinformatics

March 17, 2022



WROCLAW UNIVERSITY
OF ENVIRONMENTAL
AND LIFE SCIENCES



INSTITUTE OF GEODESY
AND GEOINFORMATICS

Abstract

Description and understanding of the dynamic Earth system, which changes in time and space, are the main goals of the International Association of Geodesy. These goals are being pursued by improving three pillars of geodesy: rotation; geometry; and gravity of the Earth, which provide a conceptual and observational basis for the high-quality geodetic terrestrial reference frames and global geodetic parameters. The list of global geodetic parameters includes the Earth Orientation Parameters, gravity field coefficients, geocenter motion, and others.

The four basic satellite and space geodetic techniques used for deriving global geodetic parameters and realization of the International Terrestrial Reference Frames (ITRF) include: Satellite Laser Ranging (SLR), Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Global Navigation Satellite Systems (GNSS), and Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS). Satellite and space geodetic techniques are supported by Earth observation satellite mission data and supplementary terrestrial measurements, which significantly contribute to a better understanding of geodynamic processes and phenomena that occur in the Earth system.

There is no universal geodetic technique that can provide high-quality information on all global geodetic parameters. Different characteristics of particular geodetic techniques and satellite missions cause each to contribute more or less to the estimates of the parameters used for describing the Earth system. The SLR technique contributes mostly to the determination of the station coordinates, geocenter motion, coefficients of the Earth gravity field, physical constants, or Earth rotation parameters. So far, the SLR-based estimates of parameters employ only the measurements to dedicated spherical geodetic satellites, such as LAGEOS-1/2. However, the vast majority of SLR observations constitute the measurements to non-spherical geodetic satellites, i.e., the low Earth orbit satellites and GNSS navigational constellations. SLR observations to low Earth orbiters and navigational satellites are usually used for the independent validation of their orbits derived by GNSS and DORIS.

The continuous improvement, automatization, and enhancement of the SLR measurement systems improved the accuracy of SLR observations. The high-quality SLR data and GNSS-based precise orbit determination products of satellites create the possibility of widening the use of SLR observations to different types of satellites for other purposes.

The conducted research aims to provide the first analyses which use SLR observations to low Earth orbit satellites for the realization of reference frames and determination of global geodetic parameters, including geocenter motion, pole coordinates, and length-of-day parameter. The research includes: identifying systematic effects affecting SLR technique and GNSS-based orbit products; modeling systematic errors affecting SLR residuals; specifying the methodology and processing strategy for the integration and combination of SLR observations to different types of satellites; and providing precise station coordinates and global geodetic products.

The study confirms the superior quality of reduced-dynamic over kinematic method for the determination of GNSS-based orbits of satellites. It proposes new methods for identifying the time-bias errors in SLR measurements, by using ascending and descending satellite passes, investigating the detector-specific performance of SLR stations, and improving the SLR-based validation by mitigating SLR systematic effects, i.e., by estimating long-term range biases and tropospheric delay corrections. Finally, this research indicates that the SLR observations to low Earth orbit satellites and multi-satellite combination enable determination of station coordinates, geocenter motion, pole coordinates, and length-of-day. The quality of SLR-derived parameters is similar or improved w.r.t. the solutions based on the standard SLR approaches. The contribution of SLR observations to different types of satellites is successfully widened.

Keywords: Satellite Laser Ranging (SLR), low Earth orbiters (LEOs), GNSS, Galileo, terrestrial reference frames, SLRF, global geodetic parameters, Earth Rotation Parameters (ERP), geocenter motion, polar motion, length-of-day, long-term range bias, tropospheric delay correction, SLR-PPP

Streszczenie

Opis Ziemi oraz charakterystyka i zrozumienie zjawisk związanych z dynamiką naszej planety, które są zmienne zarówno w czasie jak i w przestrzeni, to główne cele Międzynarodowej Asocjacji Geodezji. Osiągnięcie tych celów dotyczy poprawy trzech, tzw. głównych filarów geodezji, jakimi są rotacja, geometria i pole grawitacyjne Ziemi, co stanowi konceptualne i obserwacyjne podstawy do wyznaczenia dokładnych międzynarodowych ziemskich układów odniesienia oraz globalnych parametrów geodezyjnych. Listę globalnych parametrów geodezyjnych wypełniają parametry orientacji Ziemi, współczynniki opisujące pole grawitacyjne Ziemi, współrzędne geocentrum, współrzędne bieguna i in.

Istnieją cztery satelitarne i kosmiczne geodezyjne techniki pomiarowe wykorzystywane do realizacji międzynarodowych ziemskich układów odniesienia i wyznaczenia globalnych parametrów geodezyjnych. Są to laserowe pomiary odległości (Satellite Laser Ranging, SLR), interferometria wielkobazowa (Very Long Baseline Interferometry, VLBI), globalne nawigacyjne systemy satelitarne (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) oraz satelitarny system oparty na zjawisku Dopplera (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, DORIS). Wykorzystuje się także dane pomiarowe dostarczane przez różne misje satelitarne i pomiary na powierzchni Ziemi, które w znacznym stopniu wpływają na lepsze poznanie procesów i zjawisk zachodzących na naszej planecie.

Nie ma uniwersalnej techniki geodezyjnej dostarczającej precyzyjnych danych do opisu wszystkich globalnych parametrów geodezyjnych. Zróżnicowana charakterystyka poszczególnych technik geodezyjnych oraz misji satelitarnych wpływa na stopień wykorzystania danych danej techniki do wyznaczenia poszczególnych parametrów opisujących Ziemię. Technika SLR wykorzystywana jest głównie do wyznaczenia współrzędnych stacji pomiarowych, badania ruchu geocentrum, pola grawitacyjnego Ziemi, wyznaczenia wartości stałych fizycznych czy też parametrów opisujących rotację Ziemi. Do tej pory, wyznaczenie parametrów przy użyciu techniki SLR opierało się na pomiarach do dedykowanych kulistych satelitów geodezyjnych, takich jak LAGEOS-1/2. Jednakże znakomita większość pomiarów SLR stanowi pomiary do satelitów innych niż kuliste geodezyjne, tj. aktywnych satelitów na niskich orbitach czy też satelitów nawigacyjnych. Pomiary te wykorzystuje się wyłącznie do walidacji orbit satelitów niskich i nawigacyjnych, wyznaczonych technikami GNSS i DORIS.

Ciągły postęp, automatyzacja i rozwój systemów pomiarowych SLR poprawiły dokładność obserwacji techniki SLR. Bardzo dobra jakość danych SLR jak i precyzyjne mikrofalowe orbity satelitów na niskich orbitach i nawigacyjnych wskazują możliwość rozszerzenia wykorzystania tych danych także do innych celów.

Przeprowadzone badania po raz pierwszy podejmują temat wykorzystania obserwacji SLR do satelitów na niskich orbitach i nawigacyjnych w celu realizacji międzynarodowych globalnych układów odniesienia i wyznaczenia globalnych parametrów geodezyjnych, tj., współrzędnych

geocentrum, ruchu bieguna, i parametru opisującego eksces długości doby. Analizy zawierają: identyfikację efektów systematycznych wpływających na technikę SLR i precyzyjne mikrofalowe orbity satelitów; modelowanie błędów systematycznych zawartych w rezyduach SLR; specyfikację metodologii i strategii obliczeniowych wykorzystanych do integracji i kombinacji obserwacji SLR do satelitów różnych typów; dostarczenie precyzyjnych współrzędnych stacji pomiarowych i globalnych parametrów geodezyjnych.

Rozprawa doktorska potwierdziła lepszą jakość metody zredukowanej-dynamicznej nad kinematyczną w celu wyznaczenia mikrofalowych orbit satelitów. Zaproponowano nowe podejścia dotyczące: identyfikacji błędów pomiaru czasu na stacjach SLR, wykorzystując analizę przelotów wstępujących i zstępujących satelity; sprawdzenia jakości danych laserowych zależnych od detektorów zamontowanych na stacjach SLR; poprawy walidacji orbit satelitów wykorzystując modelowanie błędów systematycznych, tj., długookresowej poprawki opóźnienia sprzętowego (long-term range bias) i korekty modelowego opóźnienia troposferycznego (tropospheric delay correction). Badania wskazały możliwość wykorzystania pomiarów SLR do satelitów na niskich orbitach, a także kombinacji opartej o satelity różnych typów do wyznaczenia współrzędnych stacji, ruchu geocentrum, współrzędnych bieguna i parametru opisującego eksces długości doby. Jakość otrzymanych parametrów jest zbliżona lub poprawiona względem dotychczas wykorzystywanych metod opartych o technikę SLR. Wykorzystanie obserwacji SLR do satelitów różnych typów zostało skutecznie rozszerzone.

Słowa kluczowe: laserowe pomiary odległości (SLR), niskoorbitujące satelity (LEO), GNSS, Galileo, ziemskie układy odniesienia, SLRF, globalne parametry geodezyjne, parametry ruchu obrotowego Ziemi (ERP), ruch geocentrum, ruch bieguna, długość doby (LoD), korekta odległości (long-term range bias), korekta opóźnienia troposferycznego (tropospheric delay correction), SLR-PPP