

Integracja obserwacji laserowych i mikrofalowych – pionierska metodologia opracowana przez Polaków

Układ z kosmosu



Naukowcy z Instytutu Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu już dziś zapowiadają, że realizacja przyszłych układów odniesienia odbywać się będzie w kosmosie.

**Grzegorz Bury,
Krzysztof Sośnica,
Radosław Zajdel,
Mateusz Drożdżewski,
Dariusz Strugarek**

Zadaniem globalnej geodezji jest zapewnienie dokładnego i stabilnego w czasie układu odniesienia, który stanowi referencję dla obserwacji ruchu płyt tektonicznych, zmian poziomu wód w oceanach czy precyzyjnej nawigacji. Układ ten jest także podstawą w realizacji prac geodezyjnych. Wymagania stawiane przez Globalny Geodezyjny System Obserwacyjny (Global Geodetic Observing System, GGOS) w odniesieniu do realizacji globalnych układów odniesienia mówią o zapewnieniu wewnętrznej precyzji na poziomie milimetra oraz o stabilności w czasie lepszej niż 0,1 mm/rok.

Obecnie globalny układ odniesień przestrzennych realizowany jest wyłącznie za pomocą technik kosmicznych i satelitarnych, tj.: globalnych nawigacyjnych systemów satelitarnych (Global Navigation Satellite Systems, GNSS), laserowych pomiarów odległości (Satellite Laser Ranging, SLR), interferometrii wielkobazowej (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) oraz orbitografii

dopplerowskiej i radiopozycjonowania zintegrowanego przez satelity (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, DORIS).

Wkład poszczególnych technik kosmicznych rozpatrywany jest osobno, natomiast ich połączenie odbywa się za pomocą pomierzonych lokalnie wektorów łączących (*local ties*) pomiędzy odbornikami poszczególnych technik w obserwatoriach na powierzchni Ziemi. Wektory te otrzymywane są na podstawie naziemnych obserwacji geodezyjnych pozyskiwanych instrumentami, takimi jak precyzyjne niwelatory oraz tachimetry. Obliczenia lokalnych wektorów łączących nie odbywają się jednak w sposób operacyjny, lecz raz na kilka lat, a obserwacje wykonuje się pomiędzy często niejednoznacznie identyfikowanymi centrami odbiorczymi instrumentów poszczególnych technik. Nie można bowiem dokładnie zidentyfikować punktu, w którym gromadzone są mikrofały. Ponadto wektory lokalne wyliczane są na podstawie pomiarów pomiędzy sensorami poszczególnych technik kolokowanymi wyłącznie w jednym obserwatorium.

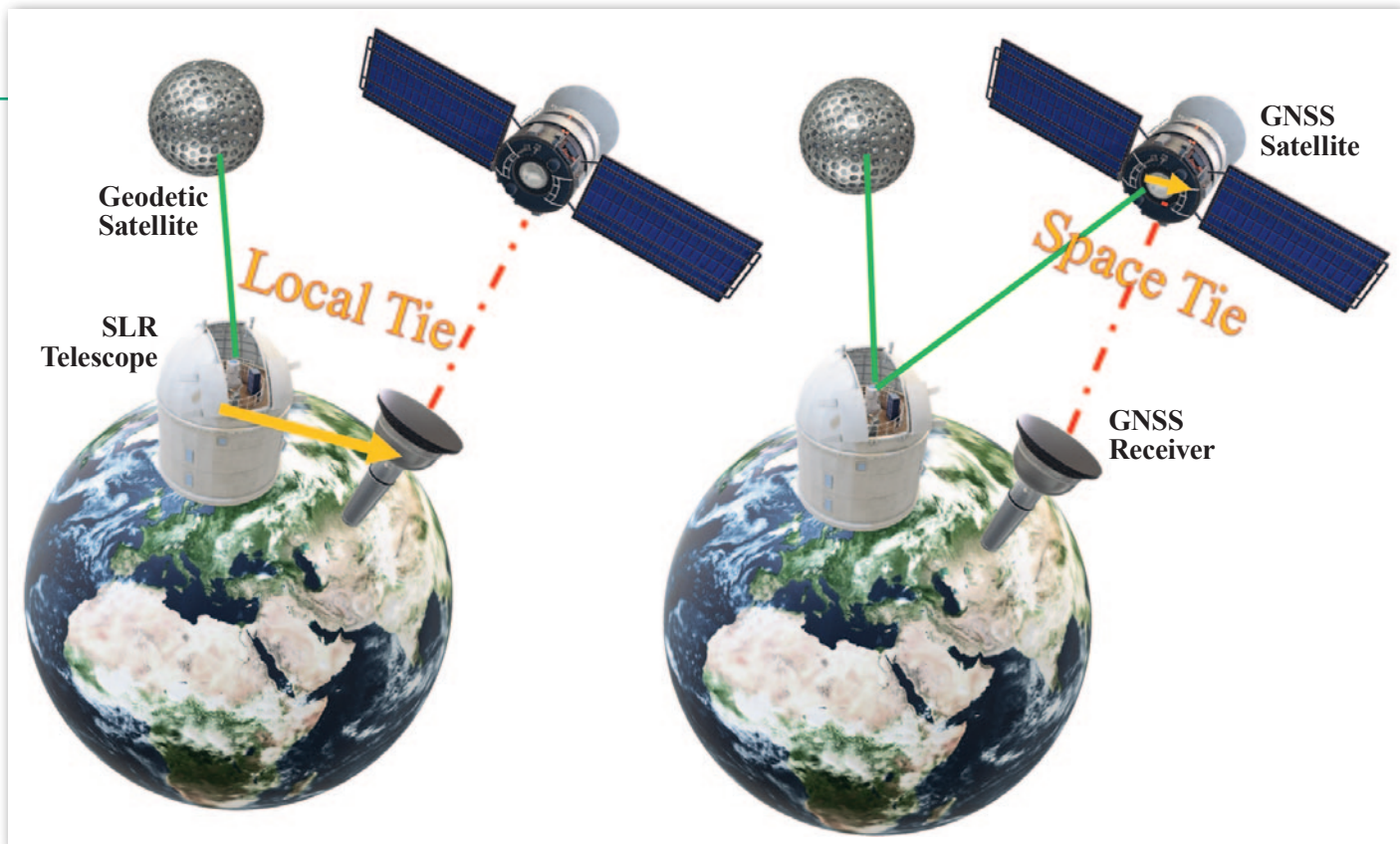
• Integracja na pokładzie satelitów

Nowoczesne satelity globalnych nawigacyjnych systemów satelitarnych GNSS, takich jak europejski Galileo, rosyjski GLONASS czy chiński BeiDou, wyposażone są w retroreflektory do pomiarów laserowych, które umożliwiają

naziemnym stacjom SLR śledzenie tych aparatów. W rezultacie satelity GNSS stanowią doskonałą platformę integrującą na pokładzie dwie techniki satelitarne – GNSS i SLR. Połączenie odbywa się za pomocą wektora w przestrzeni kosmicznej (*space tie*) pomiędzy centrum fazowym anteny transmitującej sygnał GNSS oraz centroidem retroreflektora SLR. Do tej pory obserwacje SLR do satelitów GNSS wykorzystywane były głównie jako niezależne narzędzie do walidacji precyzyjnych produktów orbit tych satelitów. Niestety, potencjał obserwacji laserowych do satelitów nawigacyjnych nie był uwzględniany przy tworzeniu globalnych układów odniesień przestrzennych ze względu na poziom komplikacji w przetwarzaniu danych pochodzących z dwóch zupełnie różnych technik geodezji satelitarnej: obserwacji mikrofalowych i laserowych.

• Modelowanie orbit Galileo

Podstawą niezawodnego rozwiązania układów odniesienia na pokładzie satelitów nawigacyjnych jest informacja o ich położeniu. Trajektorię ruchu satelitów opisuje precyzyjna orbita. Naukowcy z Instytutu Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu opracowali hybrydową metodologię wyznaczania orbit satelitów Galileo, w której matematyczny model absorbuje wpływ ciśnienia słonecznego, albedo Ziemi (czyli fotonów odbitych



Schemat łączenia technik kosmicznych na Ziemi (po lewej) oraz na pokładzie satelitów Galileo (po prawej)

od powierzchni Ziemi), promieniowania termicznego Ziemi oraz fluktuacji w wietrze słonecznym.

Model orbit Galileo opracowany przez IGIg jest hybrydowy, co oznacza, że większość sił działających na satelitę powiązanych jest ze znanymi właściwościami konstrukcyjnymi satelitów, natomiast elementy, których właściwości zmieniają się w czasie (np. współczynnik rozproszenia fotonów przez panele słoneczne lub podmuchy wiatru słonecznego), modelowane są poprzez zbiór dodatkowych zmiennych wyliczanych wraz z parametrami keplerowskimi orbity opisującymi ruch satelity po orbicie eliptycznej lub kołowej.

Opracowanie modelu było możliwe po publikacji metadanych dla systemu Galileo zawierających szczegóły konstrukcji satelitów. Fotony padające na korpus satelity zazwyczaj są wypromieniowane w tym samym kierunku, natomiast fotony padające na cienkie panele słoneczne mogą być wypromieniowane we wszystkich kierunkach. Korpus satelity w modelu nazywa się „box”, natomiast panele to „wing”, a cały model uwzględniający korpus i panele to „box-wing”. Przy modelowaniu wzięto pod uwagę dokładny czas wchodzenia satelitów w cień Ziemi oraz jaka część tarczy słonecznej jest potencjalnie zasłonięta przez Księżyc z punktu widzenia satelity. Ponadto uwzględniono ciśnienie fotonów odbitych od powierzchni Ziemi ze zróżnicowaniem na pory roku oraz na rodzaj pokrycia powierzchni Ziemi (oceany, pokrywa lodowa, powierzchnia kontynentów).

Model obejmuje też mikroprzyspieszenia wynikające z ciągu anteny nadawczej wysyłającej sygnał nawigacyjny przez satelitę w kierunku Ziemi, które powodują przesunięcie satelity o około 10 mm na każde 100 W mocy sygnału (moc sygnału najnowszych Galileo to ponad 250 W). Pozostałe mikroprzyspieszenia, których nie można przewidzieć i wyliczyć precyzyjnie w postaci sił fizycznych, są uwzględniane za pomocą dodatkowych zmiennych dynamicznych liczonych wraz z parametrami keplerowskimi.

• Pomiar laserowe do satelitów

Poprzez uproszczenie i szeroką dostępność komponentów technika GNSS

staje się coraz bardziej popularna wśród użytkowników. Wydawałoby się zatem, że jest ona najintensywniej rozwijana również pod kątem badań naukowych. Jednakże to technika SLR zapewnia najmniej zaburzone pomiary odległości ze stacji naziemnych do sztucznych satelitów i Księżyca. Zainstalowane na sztucznych satelitach retroreflektory zbudowane są z pryzmatów, które odbijają impuls laserowy w tym samym kierunku, co kierunek padania wiązki. Umieszczane są na wszystkich satelitach, dla których wymagana jest znajomość dokładnej pozycji, na przykład w misjach altimetrycznych (jak Sentinel-3) służących do pomiaru zmian poziomu mórz i oceanów



Wizualizacja satelity Galileo na orbicie okołoziemskiej



Fot. Krzysztof Sosnička

Teleskop laserowy w Obserwatorium Zimmerwald w Szwajcarii w trakcie wykonywania pomiarów laserowych

wynoszących średnio 3,6 mm rocznie. Podobne urządzenia zainstalowali ponad 50 lat temu na Księżycu astronauty misji Apollo 11, a później Apollo 14 i 15. Reflektory znalazły się również na autonomicznych łazikach księżycowych, a detektory wiązki lasera uwzględniono na pokładzie satelity LRO krążącego wokół Srebrnego Globu.

To właśnie dzięki pomiarom laserowym do sztucznych i naturalnego satelity Ziemi dowiedzieliśmy się, ile wynosi stała grawitacji i masa Ziemi oraz jak zmienia się spłaszczenie Ziemi w czasie, możemy korygować i wyliczać popraw-

ki pozycji satelitów Galileo i GLONASS oraz zidentyfikowaliśmy, gdzie znajduje się środek masy Ziemi i jak przemieszcza się w czasie za sprawą np. topniejących lodowców na Grenlandii. Pomiarów laserowych do Księżycy pozwoliły odkryć, że oddala się on od Ziemi o 3,8 cm rocznie. Ponadto umożliwiły one dokładny opis wahań w ruchu Księżycy (czyli tzw. libracji) oraz zrewidowanie pochodzenia Srebrnego Globu.

● Trudna droga przez atmosferę

Według ostatnich odkryć naukowców z IIGiG dotychczasowe podejście do kory-

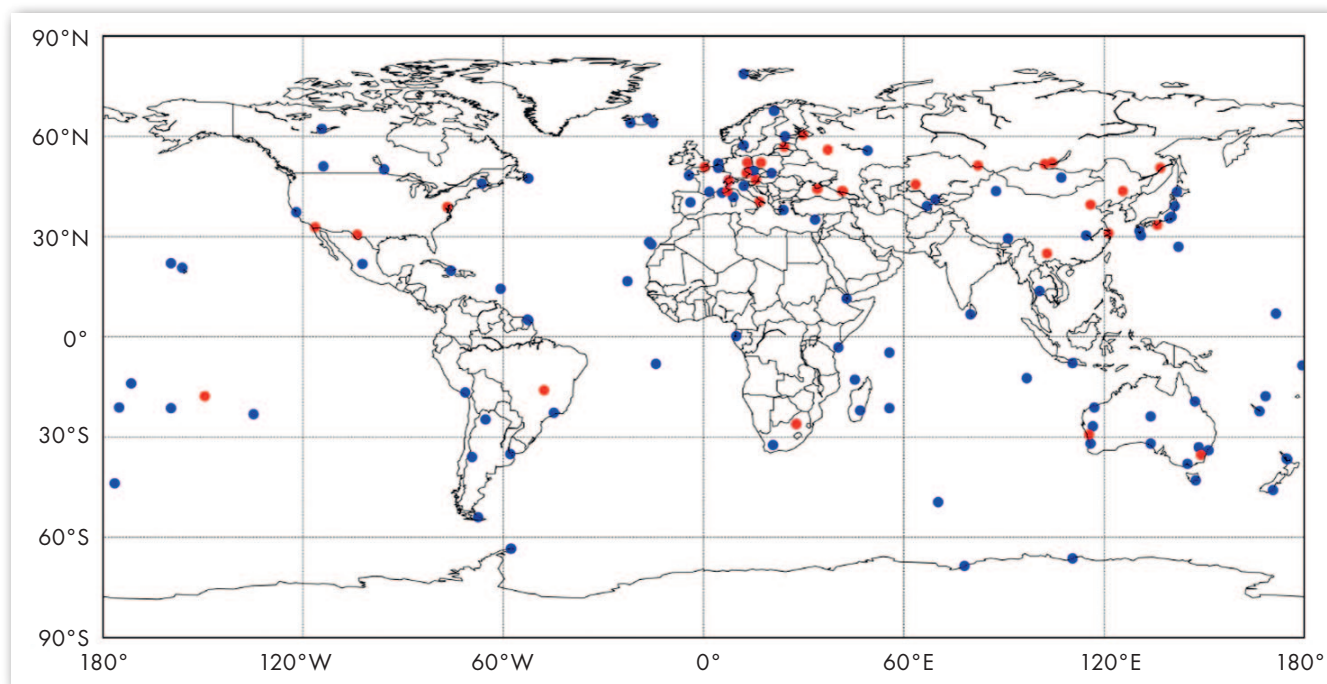
gowania błędów wynikających z opóźnienia wiązki laserowej w atmosferze było wadliwe. Jednocześnie badacze proponują zupełnie nowe rozwiązanie oparte na pomiarach meteorologicznych i grubości atmosfery, jaką musi pokonać laser w kierunku do satelity. Pomiarów laserowych bazują na rejestracji różnicy czasu pomiędzy momentem wysłania impulsu laserowego na stacji a momentem powrotu tego samego impulsu po tym, gdy zostanie odbity przez retroreflektor na sztucznym satelicie lub Księżycu. Podczas pomiaru wiązka laserowa przechodzi dwukrotnie przez atmosferę ziemską, gdzie ulega ugięciu i opóźnieniu. Technologia pomiarów laserowych pozwala na uzyskanie dokładności submilimetrowych, jednak błędy wyznaczenia opóźnienia wiązki laserowej w atmosferze są wielokrotnie większe i stanowią główne źródło błędów w pomiarach laserowych do satelitów.

Opóźnienie wiązki laserowej w kierunku do satelity jest wyliczane na podstawie wartości ciśnienia atmosferycznego, temperatury i wilgotności powietrza mierzonych na stacji laserowej. Zauważono jednak, że niektóre sensory podają błędne wartości meteorologiczne ze względu na błędy w kalibracji albo degradację dokładności w czasie. Koszt budowy stacji laserowej wykonującej pomiary do satelitów to kilkanaście milionów dolarów, natomiast koszt stacji meteorologicznej



Fot. Krzysztof Sosnička

Teleskop laserowy, antena GNSS, stacja meteorologiczna oraz antena do interferometrii wielobazowej w Obserwatorium Geodezyjnym Wettzell



Sieć stacji GNSS (punkty niebieskie) oraz SLR (punkty czerwone) wykorzystana w eksperymencie naukowców z IGiG

wspomagającej pomiary to zaledwie kilka tysięcy. Mimo to nie wszystkie stacje posiadają odpowiednie stacje meteorologiczne gwarantujące pomiary o najwyższej dokładności. Błąd barometru o wielkości 5 hPa przekłada się na błąd wyznaczenia opóźnienia wiązki laserowej w zenicie równy 12 mm, co może się przełożyć na błąd wyznaczenia wysokości stacji rzędu 20 mm. Tak duże błędy nie pozwalają na monitorowanie np. zmian wysokości poziomu mórz i oceanów, gdyż przekraczają wielkość mierzoną.

• Nowa skuteczna metoda

Metodą stosowaną dotychczas do eliminacji błędów w pomiarach laserowych było wyliczanie tzw. opóźnień sprzętowych. Opóźnienia te są niezależne od kierunku pomiaru do satelity i jego wysokości nad horyzontem – stanowią stałą wartość, o którą należy poprawić każdy pomiar laserowy, aby uzyskać rzeczywistą odległość pomiędzy stacją a satelitą. Opóźnienia sprzętowe wynikają nie tylko z atmosfery ziemskiej, ale także z opóźnień na obwodach i detektorach stacji laserowej oraz wadliwej kalibracji systemu pomiarowego.

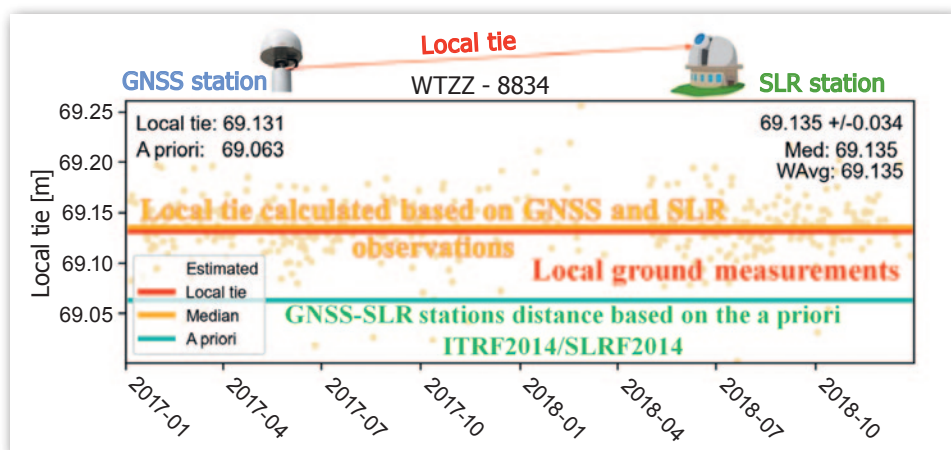
Naukowcy z IGiG zaproponowali zupełnie innowacyjne podejście do korygowania opóźnienia wiązki laserowej w atmosferze. Podejście opiera się na uwzględnieniu grubości warstw atmosfery, przez które przechodzi laser. Do wyznaczenia wartości opóźnienia lasera wykorzystuje się odczyty meteorologiczne na stacji, do których wyliczana jest poprawka zależna od wysokości satelity nad horyzontem oraz od początkowej

wartości opóźnienia wiązki lasera. W zaproponowanej metodzie analizuje się wszystkie pomierzone odległości na wszystkich stacjach i wylicza dla każdej stacji poprawki wprost proporcjonalne do opóźnienia wiązki lasera wynikającego z bezpośrednich pomiarów meteorologicznych i grubości atmosfery, którą musi pokonać laser. Poprawkę meteorologiczną wystarczy wyznaczać raz na tydzień dla każdej stacji laserowej, dzięki czemu obliczenia pozostają stabilne nawet dla stacji z niewielką liczbą zarejestrowanych pomiarów laserowych do satelitów. Metoda opracowana przez polski zespół pozwala na skuteczną eliminację od 75 do 90% błędów systematycznych w pomiarach laserowych wynikających z błędów opóźnienia atmosferycznego.

• Integracja na pokładzie satelitów GNSS

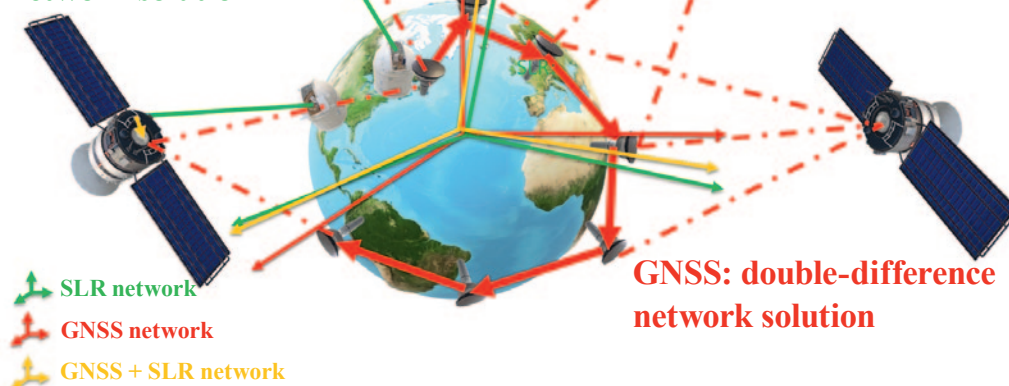
Dysponując metodologią wyznaczania precyzyjnych orbit satelitów GNSS oraz technologią przetwarzania obserwacji SLR, naukowcy z IGiG we współpracy z Politechniką w Monachium (TUM) wykorzystali kombinację technik mikrofalowej (GNSS) i laserowej (SLR) na pokładzie satelitów nawigacyjnych do realizacji globalnych ziemskich układów odniesienia na pokładzie satelitów Galileo i GLONASS.

W opracowaniu wykorzystano obserwacje mikrofalowe z satelitów systemów GPS, GLONASS i Galileo oraz obserwacje laserowe do satelitów Galileo oraz GLONASS. Celem wyznaczania spój-



Wektory łączące kolokowane stacje GNSS (WTZZ) i SLR (8834) w obserwatorium w Wettzell (Niemcy). Pomarańczowe punkty to dobowe obliczenie połączenia stacji GNSS i SLR, pomarańczowa linia – mediana dystansu pomiędzy stacjami SLR i GNSS. Czerwona linia odpowiada pomiarom terenowym, a zielona linia – odległości otrzymanej w wyniku obliczeń wykonanych na podstawie współrzędnych a priori w układzie ITRF2014

SLR: zero-difference network solution



Schemat łączenia technik kosmicznych na pokładzie satelitów Galileo i warunkowania sieci stacji GNSS oraz SLR

nego układu odniesienia realizowanego przez dwie sieci stacji reprezentujące niezależne techniki przeprowadzono testy optymalnego warunkowania. Warunkowanie to bazuje na nałożeniu na sieci stacji GNSS i SLR tzw. warunków minimalnych na przesunięcie (warunek zerowej translacji), rotację (warunek zerowej rotacji) czy skalę układu odniesienia (warunek zerowej zmiany skali układu).

Badania naukowców z IGIg wykazały, że najlepszym wariantem jest spójne nałożenie warunków minimalnych: zerowej rotacji oraz translacji na obie sieci stacji GNSS i SLR. Zaproponowali oni również zmodyfikowane podejście do wyliczania opóźnień sprzętowych. Do klasycznego podejścia, w którym wpływ opóźnień wyznaczany jest wyłącznie z wykorzystaniem obserwacji laserowych do satelitów GNSS, dołożono wpływ obserwacji laserowych do satelitów geodezyjnych oraz wpływ samych obserwacji GNSS, minimalizując błędy systematyczne techniki SLR.

Ponadto zbadano możliwość przenoszenia orientacji układu tworzonego przez sieć techniki GNSS reprezentowaną przez ponad 100 odbiorników na sieć realizowaną przez kilkanaście stacji SLR za pośrednictwem satelitów nawigacyjnych. Jakość połączenia obserwacji na satelitach GNSS wynosi 40–50 mm dla pojedynczego pomiaru oraz kilka milimetrów, gdy zgrupować się pomiary z wielu tygodni obserwacji. Na podstawie wektorów łączących obie techniki na pokładzie satelitów GNSS odtworzone zostały lokalne wektory pomię-

dzy wybranymi stacjami SLR i GNSS, zapewniając długookresową stabilność połączenia i zgodność z pomiarami lokalnymi na poziomie 3 mm.

• Niezależnienie od pomiarów naziemnych

Rozwiązanie globalnych układów odniesienia na pokładzie satelitów GNSS stanowi alternatywę dla klasycznej metody, dając możliwość częściowego uniezależnienia od pomiarów naziemnych. Pionierska metodologia opracowana przez naukowców z UPWr i TUM może z powodzeniem zostać wykorzystana w przyszłych realizacjach międzynarodowych ziemskich układów odniesienia (International Terrestrial Reference Frames, ITRF) i służyć do precyzyjnych obserwacji Ziemi. Co więcej, integracja obserwacji laserowych i mikrofalowych pozwala na dokładniejsze wyznaczenie zmienności długości doby, jak również na połączenie stacji sieci znajdujących się na różnych kontynentach za pomocą wektorów znajdujących się w przestrzeni kosmicznej na pokładzie satelitów GNSS.

Dr inż. Grzegorz Bury,
prof. Krzysztof Sośnica,
dr inż. Radosław Zajdel,
mgr inż. Mateusz Drożdżewski,
mgr inż. Dariusz Strugarek

Instytut Geodezji i Geoinformatyki,
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Literatura

Więcej o badaniach prowadzonych w IGIg UPWR można przeczytać w następujących artykułach naukowych:

- Bury G., Sośnica K., Zajdel R., Strugarek D., Hugentobler U., 2021: Geodetic Datum Realization Using SLR-GNSS Co-Location Onboard Galileo and GLONASS. „Journal of Geophysical Research: Solid Earth”. doi: 10.1029/2021JB022211;
- Bury G., Zajdel R., Sośnica K., 2019a: Accounting for perturbing forces acting on Galileo using a box-wing model. „GPS Solutions”. doi: 10.1007/s10291-019-0860-0;
- Bury G., Sośnica K., Zajdel R., 2019b: Multi-GNSS orbit determination using satellite laser ranging. „Journal of Geodesy” 93:2447–2463. doi: 10.1007/s00190-018-1143-1;
- Bury G., Sośnica K., Zajdel R., Strugarek D., 2020: Toward the 1-cm Galileo orbits: challenges in modeling of perturbing forces. „Journal of Geodesy”. doi: 10.1007/s00190-020-01342-2;
- Bury G., Sośnica K., Zajdel R., Strugarek D., Hugentobler U., 2021: Determination of precise Galileo orbits using combined GNSS and SLR observations. „GPS Solutions”. doi: 10.1007/s10291-020-01045-3;
- Drożdżewski M., Sośnica K., 2021: Tropospheric and range biases in Satellite Laser Ranging. „Journal of Geodesy”. doi: 10.1007/s00190-021-01554-0;
- Drożdżewski M., Sośnica K., Zus F., Balidakis K., 2019: Troposphere delay modeling with horizontal gradients for satellite laser ranging. „Journal of Geodesy” 93:1853–1866. doi: 10.1007/s00190-019-01287-1;
- Strugarek D., Sośnica K., Zajdel R., Bury G., 2021: Detector-specific issues in Satellite Laser Ranging to Swarm-A/B/C satellites. „Measurement” 182:109786. doi: 10.1016/j.measurement.2021.109786;
- Zajdel R., Sośnica K., Drożdżewski M., Bury G., Strugarek D., 2019: Impact of network constraining on the terrestrial reference frame realization based on SLR observations to LAGEOS. „Journal of Geodesy” 93:2293–2313. doi: 10.1007/s00190-019-01307-0;
- Zajdel R., Sośnica K., Bury G., 2021: Geocenter coordinates derived from multi-GNSS: a look into the role of solar radiation pressure modelling. „GPS Solutions”. doi: 10.1007/s10291-020-01037-3;
- Zajdel R., Sośnica K., Bury G., 2017: A New Online Service for the Validation of Multi-GNSS Orbits Using SLR. „Remote Sensing” 9:1049. doi:10.3390/rs9101049.

Badania te zrealizowano dzięki środkom Narodowego Centrum Nauki w ramach grantów: „Wyznaczanie precyzyjnych orbit satelitów GNSS na podstawie kombinowanych rozwiązań laserowych oraz mikrofalowych” (kierownik Grzegorz Bury), „Wyznaczanie globalnych parametrów geodezyjnych z wykorzystaniem systemu satelitarnego Galileo” (kierownik Krzysztof Sośnica), „Zintegrowane ziemskie układy odniesień przestrzennych oparte o laserowe pomiary odległości do satelitów geodezyjnych, teledetekcyjnych oraz GNSS” (kierownik Krzysztof Sośnica).