

Wkraczając w erę multi-GNSS

Obecnie w przestrzeni kosmicznej znajduje się ponad 100 satelitów różnych systemów GNSS. Ich zbiorcze wykorzystanie niesie dużo korzyści, ale i problemów, szczególnie w aspekcie bardzo dokładnych pomiarów geodezyjnych.

**Radosław Zajdel,
Krzysztof Sośnica,
Grzegorz Bury, Tomasz Hadaś,
Kamil Kaźmierski**

Od ponad 20 lat Międzynarodowa Służba GNSS (International GNSS Service, IGS) rozwija produkty oparte na sygnałach rejestrowanym z satelitów GPS i GLONASS. Większości użytkowników systemy te w pełni wystarczają do zaspokojenia potrzeb związanych z pozycjonowaniem lub nawigacją. Początek XXI wieku to jednak okres gwałtownego rozwoju nowych rozwiązań w segmencie nawigacji satelitarnej. W 2005 r. Europejska Agencja Kosmiczna

w porozumieniu z Unią Europejską wystrzeliła pierwszego satelitę GIOVE (Galileo In-Orbit Validation Element), zapoczątkowując budowę globalnego systemu Galileo. Dwa lata później Chińska Republika Ludowa umieściła na orbicie Compass-M1 – pierwszy aparat własnego globalnego systemu BeiDou (dawniej COMPASS). Japonia oraz Indie tworzą natomiast niezależne systemy regionalne (odpowiednio QZSS oraz NavIC), które w niedalekiej przyszłości rzucą nowe światło na możliwości nawigacji w terenach mocno zurbanizowanych i zaludnionych. Konstelacja systemów nawigacyjnych to najszybciej powiększająca się grupa satelitów na orbicie okołozemskiej. W perspektywie kolejnej dekady użytkownik konstelacji multi-GNSS będzie mógł korzystać z sygnałów nadawanych przez blisko 100 aparatów.

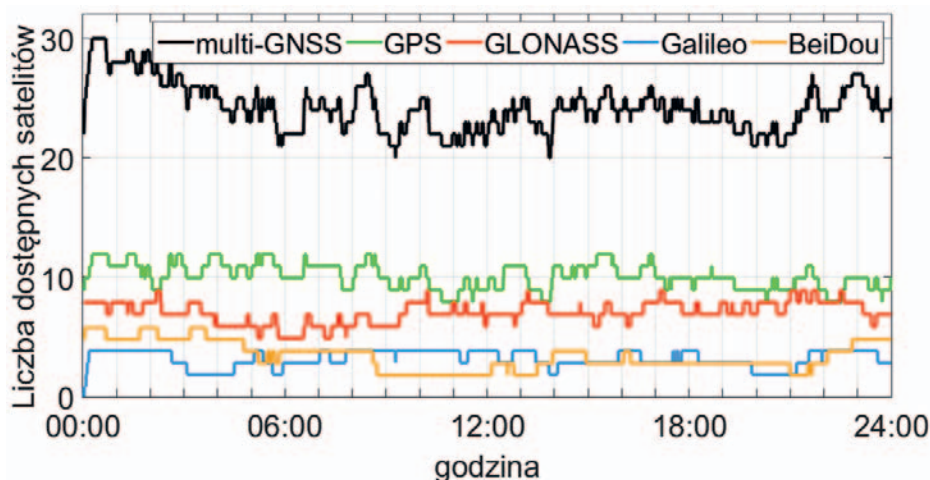
• GPS

Amerykański system GPS, budowany od lat 70. XX wieku, pełną operacyjność dla użytkownika cywilnego uzyskał na początku lat 90. Od tego czasu zdążył się już mocno zadomowić w społecznej świadomości. Jako najstarszy ze wszystkich wymienionych systemów uznawany jest za protoplastę współczesnej nawigacji satelitarnej. Konstelacja GPS nominalnie składa się z 24 satelitów na 6 orbitach kołowych. Pierwotnie system stworzony został w celach wojskowych, a sygnał dla użytkowników cywilnych był celowo degradowany. Z czasem jednak jego dostępność dla cywilów zwiększyła się. Obecnie doskonałe wsparcie producentów odbiorników i niska cena modułów obsługujących sygnał GPS sprawiły, że system ten jest szeroko wykorzystywany (w nawigacji samochodowej, mediach społecznościowych, rolnictwie precyzyjnym, GIS-ie czy kartografii).

Konstelacja GPS przeszła wiele modernizacji. Aktualnie łączy w sobie trzy różne bloki satelitów II generacji (Block IIR, IIR-M oraz IIF), a w najbliższych latach możemy spodziewać się wprowadzenia pierwszych satelitów III generacji (Block III). Większość aparatów GPS nadaje sygnał na dwóch częstotliwościach (L1 i L2), przy czym z satelitów bloku IIF dostępna jest również częstotliwość L5. Specyfika sygnałów i kodów została zaprezentowana w tabeli.

• GLONASS

Rosyjski militarny system GLONASS był projektowany równolegle ze swoim amerykańskim odpowiednikiem. Mi-



Rys. 1. Widoczność satelitów dla stacji WROC, 6 lutego 2017 r.

Globalne i regionalne systemy satelitarne

System	Blok	Nadawane sygnały	Liczba satelitów na orbitach	Nominalna liczba satelitów	Płaszczyzny orbit	Typ orbity	Wysokość orbit [km]	Inklinacja [°]	Okres obiegu	Dokładność orbity* [mm]
GPS	IIR	L1 C/A, L1/L2 P(Y)	12	24	6	kołowa średnia	20 200	55	11 h 58 min	-
	IIR-M	L1 C/A, L1/L2 P(Y), L2C, L1/L2 M	7							-
	IIF	L1 C/A, L1/L2 P(Y), L2C, L1/L2 M, L5	12							-
GLONASS	M	L1/L2 C/A & P	23	24	3	kołowa średnia	19 132	65	11 h 16 min	Of: -8 RMS: 31
	M+	L1/L2 C/A & P,	1							Of: 25 RMS: 35
	K	L3	1 + (1)							Of: -12 RMS: 29
BeiDou-2	GEO	B1-2, B2, B3	5	razem 35: 27 MEO, 5 IGSO, 3 GEO	1	geostacjonarna	35 790	0-1	23 h 56 min	-
	IGSO		6		2	nachylona geosynchroniczna	35 790	53-58	23 h 56 min	Of: -28 RMS: 50
	MEO		4		3	kołowa średnia	21 529	56	12 h 53 min	Of: -9 RMS: 26
BeiDou-3	MEO	B1-2, B1, B2, B3ab	11		2 (te same co BeiDou-2)	nachylona geosynchroniczna	35 790	53-58	23 h 56 min	-
	IGSO		2							-
Galileo	IOV	E1, E6, E5a/b/ab	3 + (1)		27+3	3	kołowa średnia	23 225	55	14 h 05 min
	FOC		16	Of: -3 RMS: 26						
	FOC		2	mimośrodowa						
QZSS	IGSO	L1 C/A, L1C, L1 SAIF, L2C, L6 LEX, L5	3	7	1	nachylona mimośrodowa geosynchroniczna	32 000 - 40 000	41	23 h 56 min	Of: -15 RMS: 80
	GEO		1		1	geostacjonarna	35 790	0-1	23 h 56 min	-
NavIC	IGSO	L5/S SPS & RS	5	11	2	nachylona geosynchroniczna	35 790	29	23 h 56 min	-
	GEO		3		1	geostacjonarna	35 790	1	23 h 56 min	-

*Jako dokładność orbity przyjmujemy średni offset (Of) i błąd średniokwadratowy (RMS) rezydów SLR orbity MGEX (dostarczanej przez Centrum Wyznaczania Orbit w Europie) w okresie sierpień 2017 - marzec 2018. Źródło: Stowarzyszone Centrum Analiz Międzynarodowej Służby Pomiarów Laserowych do Satelitów Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (www.govus.pl)

mo osiągnięcia potencjału operacyjnego w końcu lat 90. kryzys finansowy zmusił Rosjan do czasowego zaniechania projektu. Odbudowa systemu zajęła im prawie 15 lat i dopiero na przełomie lat 2010 i 2011 ponownie uzyskał on pełną operacyjność. Konstelacja składa się z 24 satelitów umieszczonych na 3 kołowych orbitach. Z uwagi na niedawną modernizację konstelacja jest bardziej spójna niż w przypadku GPS i składa się głównie

z satelitów GLONASS-M nadających sygnał C/A i P na dwóch częstotliwościach L1 i L2. Na orbitę wystrzelono również 3 testowe satelity. Pierwszy z nich GLONASS-M+ nadaje sygnał na dodatkowej częstotliwości L3. Kolejną generację satelitów GLONASS zapoczątkowały dwa aparaty GLONASS-K, które obsługują nowe technologie (jak np. komunikacja między satelitami, laserowy transfer czasu, nadawanie sygnału na częstotliwo-

ści L3) oraz wyposażone są w bardziej precyzyjne zegary.

• Galileo

Galileo jest systemem nawigacyjnym stworzonym pod szyldem Unii Europejskiej i Europejskiej Agencji Kosmicznej. Aktualny sposób finansowania projektu sprawia, że jego współtwórcami są wszystkie kraje członkowskie UE, w tym Polska, która na Galileo prze-

znaczyła już blisko pół miliarda złotych. Europejski system, jako jedyny z wymienionych, jest tworzony z myślą o zastosowaniach cywilnych, a nie militarnych. Będzie składał się z 27 satelitów na 3 orbitach kołowych. Obecnie w przestrzeni kosmicznej znajdują się 22 aparaty, w tym 19 sprawnych. W 2014 r. z powodu problemów rakiety nośnej 2 aparaty wyniesiono na nieprawidłowe mocno mimośrodowe orbity, co dyskwalifikuje je z pełnej operacyjności nawigacyjnej. Obecność takich satelitów rzuca jednak nowe światło na wykorzystanie satelitów nawigacyjnych w celach naukowych, m.in. w badaniu efektów relatywistycznych. Ponadto jeden z aparatów przestał nadawać na jednej z dostępnych częstotliwości, przez co również musiał zostać wyłączony z użytku.

W skład konstelacji Galileo wchodzi dwie generacje satelitów: 4 satelity fazy walidacyjnej (In Orbit-Validation, IOV) oraz 18 satelitów bloku pełnej operacyjności (FOC – Full Operational Capability). Wszystkie nadają sygnał na aż 5 częstotliwościach dostępnych dla wszystkich użytkowników: E1, E6, E5a/b/ab (patrz tabela). Dodatkową zaletą jest kompatybilność systemów GPS i Galileo (między częstotliwościami E1 i E5a a L1 i L5), co przyniesie ogromne korzyści w przyszłych zastosowaniach konstelacji multi-GNSS i ograniczy problemy związane z integracją obu systemów. Galileo osiągnął częściową operacyjność w grudniu 2016 r., natomiast zakłada się, że z pełni możliwości systemu będziemy korzystać w 2020 r.

● BeiDou

Od 2000 r. Chińska Republika Ludowa stara się, aby militarny system nawigacyjny BeiDou osiągnął globalny zasięg działania. Koncepcja tego systemu zakładała regionalny priorytet dostępności w granicach Chin oraz krajów sąsiadujących, a następnie ekspansję w kierunku globalnej operacyjności. Pierwszy z wymienionych etapów (BeiDou-2) udało się ukończyć w 2012 r., co skutkowało otwarciem globalnego projektu BeiDou-3. W odróżnieniu od omówionych systemów BeiDou nie ogranicza się do satelitów umieszczonych na średnich orbitach kołowych (Medium Earth Orbit, MEO), ale wykorzystuje również aparaty na orbitach geostacjonarnych (Geostationary Earth Orbit, GEO) oraz nachylonych geosynchronicznych (Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO). Docelowo system będzie się składał z 27 satelitów MEO, 5 GEO i 3 IGSO. Zastosowanie aparatów GEO

i IGSO, które są stale widoczne nad terytorium Chin, zwiększa efektywność systemu w regionie Azji.

Użytkownik BeiDou ma do dyspozycji sygnał na trzech częstotliwościach: B1, B2, B3ab (patrz tabela). Wprawdzie istnieją dokumenty opisujące strukturę sygnału systemu regionalnego, jednak najprawdopodobniej w przypadku systemu globalnego będzie ona inna. Mimo że BeiDou oferuje sporo potencjalnie ciekawych rozwiązań w dziedzinie nawigacji (tj. możliwość stosowania 3-częstotliwościowych algorytmów walidacyjnych sygnału nawigacyjnego), to nieujawnienie szczegółowych informacji powoduje, że prace nad wieloma zastosowaniami systemu są społeczności naukowej utrudnione.

● Systemy regionalne

Japonia i Indie budują systemy regionalne QZSS oraz NavIC jako niezależne wsparcie systemów globalnych. Oba rozwiązania bazują na satelitach umieszczonych na orbitach geosynchronicznych, co skutkuje zasięgiem ograniczonym do wybranego regionu. Satelity geosynchroniczne, w odróżnieniu od tych umieszczonych na orbitach kołowych średnich, bardzo dobrze sprawdzają się jednak w pozycjonowaniu na terenach silnie zurbanizowanych, o zagęszczonej zabudowie zdominowanej przez drapacze chmur. Sygnał nadawany przez satelity QZSS jest kompatybilny z systemem GPS, a system NavIC – zgodny z systemem GPS poprzez nadawanie sygnału na częstotliwości L5. Z powodu stosowania wyłącznie jednej częstotliwości – która bez dokładnych zewnętrznych modeli jonosfery daje niezadowalające dokładności w precyzyjnym pozycjonowaniu – wykorzystanie NavIC w zadaniach geodezyjnych jest utrudnione. Mimo że oba rozwiązania stworzono wyłącznie do współpracy z istniejącymi systemami globalnymi, społeczność multi-GNSS pracuje nad włączeniem zarówno QZSS, jak i NavIC do globalnych geodezyjnych produktów opartych na kombinowanych obserwacjach ze wszystkich dostępnych systemów nawigacyjnych.

● Potencjał multi-GNSS w pozycjonowaniu

Liczba sygnałów i częstotliwości, jaką w niedalekiej przyszłości będą w stanie rejestrować odbiorniki naziemne, otworzy przed użytkownikami zupełnie nowe możliwości. Kluczową rolę, jaką może odegrać multi-GNSS, jest zwiększenie prawdopodobieństwa określenia

wiarygodnej pozycji w kanionach miejskich, kopalniach odkrywkowych czy dolinach. Po wieloletnich badaniach nad obserwacjami i produktami dostarczonymi przez systemy GPS i GLONASS, nowe sygnały nawigacyjne tworzone są z jednej strony z myślą o zmniejszaniu wrażliwości na wielodrożność sygnału, z drugiej zaś – w taki sposób, aby zapobiec problemom z odbieraniem nawet słabego sygnału. Większa liczba satelitów i sygnałów nadawanych przez kolejne systemy skutkuje poprawą geometrii obserwacji, widoczną przez parametr rozmycia precyzji pozycjonowania (Dilution of Precision), co przekłada się na większą dokładność określania pozycji. Pomaga również w skróceniu czasu zbieżności, jaki możemy uzyskać w technice PPP (Precise Point Positioning).

Galileo wykorzystuje częstotliwości mniej zaszumione, które przekładają się na prawie trzykrotny wzrost dokładności pozycjonowania przy wykorzystaniu obserwacji kodowych. Z kolei obserwacje fazowe obciążone są większym szumem oraz większymi błędami związanymi z aktualną dokładnością orbit niż w przypadku GPS, co skutkuje potencjalnie gorszymi rezultatami w precyzyjnym pozycjonowaniu wykorzystywanym w geodezji. Jednak dzięki coraz nowszym modelom orbit oraz globalnemu rozmieszczeniu naziemnych stacji śledzących jakość wyznaczenia trajektorii ruchu satelitów Galileo już w 2018 r. może osiągnąć ten sam poziom co dla GPS.

Większość nowych systemów nawigacyjnych nadaje sygnał na przynajmniej trzech częstotliwościach, co daje nowe możliwości w opracowaniu sygnału GNSS, szczególnie w modelowaniu opóźnienia jonosferycznego. Nowe podejścia możemy również zastosować m.in. w ocenie jakości sygnału oraz wyznaczaniu nieoznaczoności fazowej sygnału zarówno w rozwiązaniach różnicowych, jak i PPP.

Jeżeli wykonujemy pozycjonowanie absolutne, a nie różnicowe, to dokładność, jaką możemy osiągnąć w technice GNSS, jest uzależniona od jakości pomiaru czasu na satelicie. Stosowane na najnowszych satelitach GPS atomowe zegary rubidowe (RAFS), a także pasywne masery wodorowe (PHM) na satelitach Galileo zapewniają dziesięciokrotnie lepszy standard stabilności pomiaru czasu niż w przypadku zegarów cezowych stosowanych np. na satelitach GLONASS. W perspektywie osiągniętej dokładności pomiarów daje to możliwość stosowania techniki PPP nawet z dokładnością milimetrową.

● Potencjał systemów multi-GNSS w naukach o Ziemi

Opisywane systemy – oprócz oczywistego zastosowania w nawigacji i pozycjonowaniu – odgrywają znaczącą rolę w realizacji geodezyjnych układów odniesienia i badaniach Ziemi jako planety. W geodezji satelitarnej opisu Ziemi możemy dokonać za pomocą globalnych parametrów geodezyjnych, w tym m.in. parametrów orientacji Ziemi, współrzędnych referencyjnych stacji naziemnych, modeli opisujących troposferę i zawartość wolnych elektronów w jonosferze, współrzędnych centrum masy Ziemi (tzw. geocentrum) oraz zmienności pola grawitacyjnego w postaci parametru charakteryzującego spłaszczenie Ziemi. Na tle pozostałych geodezyjnych technik satelitarnych – np. interferometrii wielkobazowej VLBI, pomiarów laserowych do satelitów SLR czy dedykowanych misji satelitarnych – zakres zastosowań techniki GNSS jest bardzo szeroki. Precyzyjne wyznaczanie wyżej wymienionych parametrów, a także obserwacja ich zmian w czasie dają nam niezwykle wartościowe informacje dotyczące procesów geologicznych i geofizycznych zachodzących w systemie ziemskim (na temat ruchów tektonicznych, posejsmicznych i izostatycznych, zmian hydrologicznych, wstrząsów sejsmicznych, cyrkulacji mas powietrza, długookresowych zmian wilgotności atmosfery, zmian poziomów wód czy topnienia lodowców).

Wykorzystanie konstelacji multi-GNSS zapewnia różnorodność obserwacji dzięki zastosowaniu wielu częstotliwości i różnych kombinacji liniowych. Niebagatelne znaczenie ma także urozmaicona geometria rozmieszczenia satelitów na orbicie, szczególnie w odniesieniu do parametrów, takich jak: kąt nachylenia płaszczyzny orbity w stosunku do równika (tzw. kąt inklinacji), wysokość nad powierzchnią Ziemi, mimośrodowość i okres obiegu. Niewykluczone, że zastosowanie w konstelacji multi-GNSS satelitów na orbitach mimośrodowych (Galileo), geostacjonarnych czy nachylonych geosynchronicznych (BeiDou, QZSS) przyczyni się w przyszłości do znaczącej poprawy wyznaczania globalnych parametrów geodezyjnych. Do tej pory musieliśmy polegać wyłącznie na satelitach umieszczonych na orbitach kołowych.

Różnorodność konstelacji jest niezwykle ważna przy próbie wyeliminowania czynników orbitalnych w produktach GNSS. Przykładowo jednym z głównych problemów w wyznaczaniu parametrów



Rys. 2. Strona startowa serwisu GOVUS

ruchu obrotowego Ziemi z zastosowaniem wyłącznie satelitów GPS jest rezonans w stosunku 2:1 pomiędzy okresem orbitalnym satelitów GPS wynoszącym pół doby gwiazdowej a obrotem Ziemi wokół własnej osi. Rezonans ten nie występuje w przypadku systemu Galileo.

● Natłok trudności

Liczne częstotliwości, sygnały i systemy czasu niosą za sobą równie dużo korzyści, co problemów, szczególnie w aspekcie bardzo dokładnych pomiarów geodezyjnych. Satelity, oprócz parametrów nadawanych sygnałów, różnią się budową (kształtem, rozmiarem korpusu i układem paneli słonecznych, własnościami materiałów wierzchnich), a także specyficznymi technologiami (np. sposobem orientacji satelity na orbicie w układzie Słońce–Ziemia–satelita). Powoduje to liczne trudności w tworzeniu uniwersalnych modeli orbit precyzyjnych (orbit wyznaczanych najczęściej w trybie postprocessingu na podstawie sygnału satelity), w tym w modelowaniu czynników perturbujących lot satelity, jak np. wpływ ciśnienia promieniowania słonecznego.

Międzynarodowa Służba GNSS obecnie nie dostarcza oficjalnych produktów orbit precyzyjnych (tzn. produktów opisujących ruch lub położenie satelitów) dla rozwiązania wielosystemowego zawierającego konstelacje satelitów Galileo, BeiDou, QZSS i NavIC. Jest to spowodowane głównie problemem w uzyskaniu dla wszystkich systemów dokładności porównywalnej z operacyjnymi produktami (tj. GPS i GLONASS).

Różnice w jakości można zauważyć nie tylko pomiędzy systemami, ale również pomiędzy kolejnymi blokami/generacjami satelitów wewnątrz systemów

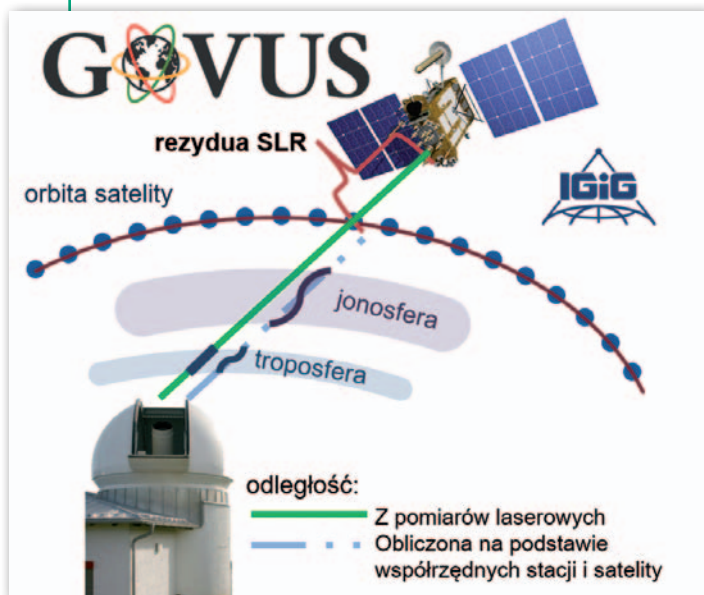
(patrz tabela). W 2011 r. zainicjowana została specjalna grupa robocza IGS MGEX (multi-GNSS Pilot Project), której głównym zadaniem jest przygotowanie służby IGS do pełnej operacyjności multi-GNSS i wyeliminowanie większości błędów systematycznych z dostarczanych produktów.

Wpływ na rozwój multi-GNSS mają nie tylko podmioty IGS, ale również cała społeczność użytkowników aktywnie zaangażowanych w inicjatywę MGEX. Są wśród nich naukowcy z Instytutu Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, którzy w ostatnich latach rozwijają narzędzia WARP i GOVUS do przetwarzania danych multi-GNSS.

● Polskie sukcesy

W marcu 2017 r. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu uzyskał status Stowarzyszonego Centrum Analiz Międzynarodowej Służby Pomiarów Laserowych do Satelitów. Wrocławska uczelnia dostarcza wyniki walidacji orbit systemów multi-GNSS techniką laserowych pomiarów odległości SLR. Ponadto prowadzi serwis internetowy www.govus.pl (rys. 2) z wizualizacjami wyników tej walidacji dla systemów Galileo, GLO-NASS, BeiDou i QZSS.

Technika SLR zaczęła być stosowana w latach 60. XX wieku z myślą o niezależnym wsparciu misji satelitarnych poprzez pomiary laserowe wykonywane na rozmieszczonych na świecie stacjach laserowych. Emitowany przez nie sygnał laserowy odbijany jest przez dedykowany reflektor zwrotny umieszczony na satelicie, a następnie rejestrowany jest z powrotem na stacji laserowej. W ten sposób otrzymujemy niezależną od sygnału GNSS i bardzo dokładną informa-



Rys. 3. Koncepcja walidacji orbit GNSS z wykorzystaniem techniki SLR (obserwacji laserowych)

cję o odległości między stacją laserową a śledzonym satelitą. Walidacja orbit GNSS (rys. 3) z wykorzystaniem obserwacji laserowych SLR jest możliwa wyłącznie dla satelitów, które wyposażone są w retroreflektory, a więc dla satelitów wszystkich konstelacji oprócz GPS, którego tylko 2 testowe aparaty posiadały retroreflektory. Walidacja SLR jest niezwykle cennym źródłem danych dotyczącym orbit precyzyjnych, stąd wkład tej techniki i serwisu www.govus.pl w rozwój produktów multi-GNSS jest niezwykle istotny.

Serwis pozwala na ocenę jakości produktów finalnych orbit precyzyjnych udostępnianych w ramach inicjatywy MGEX. Użytkownik tych produktów może on-line ocenić ich przydatność, wyeliminować ze swoich obliczeń satelity

inicjatyw multi-GNSS zrzeszone centra analiz, jak np. Francuska Agencja Kosmiczna, udostępniają testowe produkty dla systemów Galileo, BeiDou oraz QZSS.

Projekt GNSS-WARP rozwijany jest od 2012 r. Jak pisano w GEODECIE 12/2017, technika RT-PPP z powodzeniem zaczyna konkurować z dobrze znaną środowisku geodezyjnemu techniką RTK. Algorytmy przetwarzania multi-GNSS, rozwijane m.in. przez twórców GNSS-WARP, przybliżają nas do wyeliminowania największych słabości techniki RT-PPP. Obecne badania nad integracją obserwacji multi-GNSS skupiają się m.in. na koncepcji wagowania obserwacji w pozycjonowaniu wielosystemowym, skracaniu czasu inicjalizacji rozwiązania czy algorytmice w obliczaniu

dysfunkcyjne czy dokonać dowolnej innej analizy, wykorzystując wiele dostępnych opcji (rys. 4).

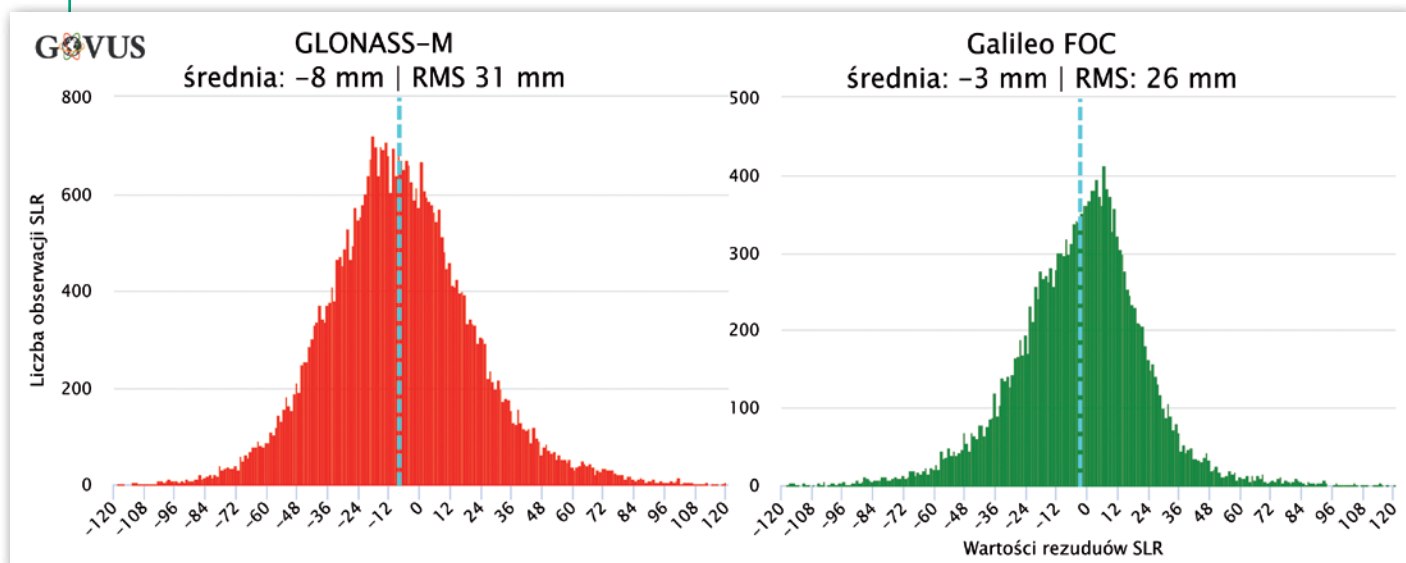
Narzędzie GNSS-WARP (Wrocław Algorithms for Real-time Positioning) służy do przetwarzania obserwacji multi-GNSS w technice PPP czasu rzeczywistego (Real Time Precise Point Positioning, RT-PPP). Od 2013 r. IGS transmituje strumień czasu rzeczywistego produktów orbit i poprawek zegarów dla satelitów GPS i GLO-NASS. W ramach

nieoznaczoności fazowej w pozycjonowaniu czasu rzeczywistego.

• Przyszłość multi-GNSS

Najbliższe lata otwierają przed użytkownikami systemów nawigacyjnych nowe możliwości i perspektywy. Do kluczowych możemy zaliczyć: poprawę precyzji i niezawodności wyznaczania pozycji przez zwiększenie ilości niezależnych danych z wielu konstelacji, redukcję błędów systematycznych, poprawę geometrii obserwacji, nowe kierunki rozwoju algorytmów multi-GNSS. Obiecującą przedstawia się również najbliższa przyszłość systemu Galileo, który najbardziej interesuje członków Unii Europejskiej. W maju br. zostały aktywowane cztery kolejne satelity. Dzięki temu liczba aparatów europejskiego systemu wzrosła do 22. Galileo napotyka jednak pewne trudności związane ze stabilnością zegarów atomowych, zasilaniem jednego satelity oraz tym, że jedna para satelitów została umieszczona na orbitach mimośrodowych. Problemy napotykają również operatorzy innych systemów nawigacyjnych, ale mimo to w następnych latach będziemy świadkami rosnącego znaczenia konstelacji multi-GNSS, poprawy jakości produktów orbit precyzyjnych, stopniowego wdrażania kolejnych systemów w operacyjne produkty IGS, zwiększonego wsparcia dla odbiorców naziemnych, bardziej zaawansowanych algorytmów obliczeniowych i rozwoju oprogramowania. Wszystko to pozwoli efektywnie korzystać w pełni z zalet konstelacji multi-GNSS.

Radosław Zajdel, dr hab. Krzysztof Sońnica,
Grzegorz Bury, dr Tomasz Hadaś, Kamil Kaźmierski
Instytut Geodezji i Geoinformatyki
Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu



Rys. 4. Przykład analizy wyników walidacji SLR orbit multi-GNSS przeprowadzonej w serwisie GOVUS. Histogramy reziduów SLR dla satelitów GLONASS-M oraz Galileo FOC. Okres: sierpień 2017 – marzec 2018