



Fot. ESA

Oberpfaffenhofen w Bawarii – jedno z dwóch centrów zarządzania Galileo

Lepszy niż GPS

15 grudnia 2016 roku uruchomiono pierwsze usługi europejskiego systemu nawigacji satelitarnej Galileo. Co oznacza to dla geodetów i specjalistów od GIS-u, tłumaczą dr inż. MARCIN SZOŁUCHA oraz dr inż. GRZEGORZ NYKIEL

JERZY KRÓLIKOWSKI: Co kryje się pod terminem „inicjalne uruchomienie usług Galileo”?

Dr MARCIN SZOŁUCHA, kierownik Zakładu Geodezji Satelitarnej i Nawigacji Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT: Już przed 15 grudnia mogliśmy wykorzystywać sygnały Galileo w pomiarach, bo na polskim niebie widać od 3 do 5 satelitów tego systemu. W danych transmitowanych przez tę konstelację było jednak dużo zamieszania: poszczególne satelity były raz włączane, raz wyłączane, różne były charakterystyki nadawanych przezeń sygnałów, różna była ich jakość itp. Inicjalne uruchomienie polega na tym, że kończą się już eksperymenty na większą skalę, a użytkownicy dostają gotowy produkt, w którym wszystkie dane (np. efemerydy) mają służyć w normalnym trybie i nie spodziewamy się więk-



Dr inż. Marcin Szolucha



Dr inż. Grzegorz Nykiel

szych problemów z działaniem systemu. Nie oznacza to jednak końca testów. Użytkownik Galileo nie ma więc jeszcze gwarancji, że to, co odbiera, będzie w pełni wartościowe.

Czy Galileo daje nam coś więcej poza dodatkowymi satelitami widocznymi na niebie?

MS: Galileo nie jest po prostu kopią GPS czy GLONASS. Budowano go bowiem, bazując na doświadczeniach związanych z wieloletnią eksploatacją tych systemów, projektowanych przecież kilka dekad temu. W mojej ocenie główna zaleta Galileo tkwi w przyjętym modelu jonosfery. Wyjaśnijmy, że dla użytkowników nawigacji satelitarnej, którzy nie korzystają z żadnego zewnętrznego wspomaganie, model ten, transmitowany w depezy nawigacyjnej, stanowi jedyne źródło informacji o opóźnieniu jonosferycznym, które jest z kolei największym składnikiem budżetu błędów w pomiarach GNSS. Stosowany dotychczas w GPS model Klobuchara usuwał mniej więcej 50% tego zakłócenia. W przypadku Galileo redukcja powinna być większa, bo użyty tu model NeQuick jest zdecydowanie dokładniejszy. Podzielono go na regiony, dzięki czemu lepiej odzwierciedla lokalne charakterystyki jonosfery. Co istotne, korzyści z zastosowania tego rozwiązania odczuwają wszyscy użytkownicy systemu, przede wszystkim ci posługujący się podstawową częstotliwością E1, będącą odpowiednikiem L1 w GPS.

Dr GRZEGORZ NYKIEL, specjalista w zakresie technologii GNSS: Nawigując do pana pytania, nie deprecjonowałbym znaczenia dodatkowych satelitów. Każdy system satelitarny projektowany jest pod kątem konkretnego regionu, w którym ma być głównie użytkowany. Nie inaczej jest w przypadku Galileo – tu obszarem zainteresowania jest oczywiście Europa. W związku z tym o 1° względem GPS zwiększono kąt inklinacji orbit satelitów. Można powiedzieć, że to tylko jeden stopień, ale znacznie poprawia on widoczność satelitów na naszych szerokościach geograficznych oraz w Europie Północnej. Przekłada się to na wyższą jakość pomiarów np. w tzw. miejskim kanionie (*urban canyon*). Przypuśćmy, że zabudowa zasłania niebo do wysokości 30°. Jeśli korzystamy tylko z sygnałów GPS, prawdopodobieństwo wyznaczenia pozycji z wysoką dokładnością wynosi raptem kilkanaście procent. Gdy dołączymy Galileo na docelowym etapie budowy, rośnie ono aż do 90%. Dla geodetów to bardzo wymierny efekt.

Jeśli chodzi o inne zalety Galileo, warto wspomnieć, że wprowadzono tu istotną nowość w systemach GNSS – w miejsce



Komisarze Elżbieta Bieńkowska i Maroš Šefčovič uroczyste uruchamiają usługi Galileo

jednego sygnału na jednej częstotliwości teraz są dwa: tzw. *data* i *pilot*. Pierwszy zawiera depezy nawigacyjne, drugi jest natomiast tych danych pozbawiony.

Po co nam taki pusty sygnał?

GN: *Pilot* służy wyłącznie do wyznaczenia pseudoodległości między anteną odbiornika a antenami satelitów. Jego zastosowanie przekłada się na poprawę śledzenia sygnału. Dodajmy, że podobne rozwiązanie wdrażane jest w systemie GPS wraz z nowymi kanałami L2C i L5, a w przyszłości również L1C. Nie ma go natomiast jeszcze w systemach GLONASS i BeiDou.

Galileo wyróżnia także mnogość usług. Podstawowa to darmowa usługa otwarta (OS – open service).

MS: Twórcy rozwiązań nawigacyjnych dążą do tego, by ujednolicić chociaż tę jedną usługę. Jako że budowa poszczególnych systemów jest mocno rozciągnięta w czasie, osiągnięcie tego wspólnego mianownika jest bardzo trudne. Wyrazem dążenia do tego celu jest właśnie sygnał Galileo E1 oraz zapowiedź udostępnienia L1C w GPS.

GN: Tu pojawia się kolejna zaleta Galileo. Serwis OS będzie bowiem działał na dwóch częstotliwościach. Podstawowa to wspomniana E1, a oprócz tego także E5a. Jeśli będziemy odbierać je jednocześnie, możemy eliminować opóźnienie jonosferyczne prościej i skuteczniej niż w przypadku wspomnianego wcześniej modelu NeQuick. W rezultacie możliwe staje się wyznaczanie bezwzględnej pozycji z dokładnością około 4 metrów

w poziomie i 8 metrów w pionie. W stosunku do pomiarów jednoczęstotliwościowych oznacza to aż czterokrotną poprawę dokładności, i to bez wykorzystania żadnego zewnętrznego wspomaganie. Oczywiście, potrzebujemy do tego celu dwuczęstotliwościowego odbiornika, który jest znacznie droższy.

Czy w związku z uruchomieniem OS można się spodziewać, że wkrótce ruszy masowa produkcja sprzętu dwuczęstotliwościowego i dzięki temu będzie on dostępny w bardziej przystępnych cenach?

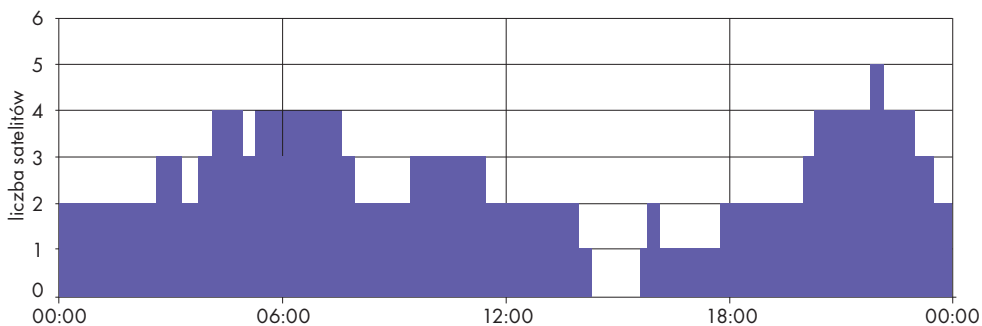
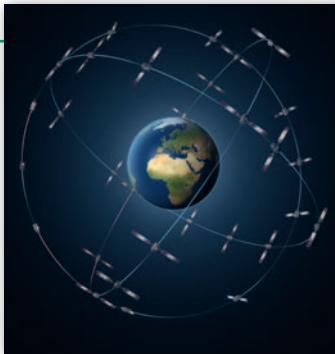
GN: Wśród producentów instrumentów cywilnych na razie nie widać intensywnych działań w tym kierunku, choć rynek ten zmienia się bardzo dynamicznie. Warto jednak pamiętać, że wprawdzie dwuczęstotliwościowe odbiorniki dają dużą przewagę, ale coraz popularniejsze staje się wspomaganie pomiarów satelitarnych (również jednoczęstotliwościowych) przez internet. Jest coraz więcej usług, które oferują w ten sposób np. modele jonosfery lub precyzyjne efemerydy satelitów.

Czy odbiornik GPS można przystosować do odbioru Galileo, np. poprzez aktualizację firmware'u?

MS: W przypadku odbiorników software'owych jest to teoretycznie możliwe, generalnie jednak potrzebna jest ingerencja w hardware. Wszystko dlatego, że choć częstotliwość dla kanału E1 jest taka sama jak w GPS L1, to w Galileo zastosowano kilka zupełnie innych rozwiązań elektronicznych, np. inną modulację sygnału.

GN: Na rynku pojawiają się już jednak pierwsze urządzenia wykorzystu-

Fot. Komisja Europejska



Satelity Galileo widoczne 28 grudnia 2016 r. nad Warszawą przynajmniej 5° nad horyzontem

jące do pozycjonowania system Galileo. Przykładem jest hiszpański smartfon BQ Aquaris X5 Plus.

Na ile dywagacje o wysokiej dokładności bazują na rzeczywistych pomiarach?

MS: Pierwsze wyznaczenie pozycji z wykorzystaniem tylko sygnałów Galileo odbyło się w marcu 2013 r., czemu zresztą towarzyszyła specjalna feta. Choć już na tej podstawie można było wyciągnąć pewne wnioski o dokładności tego systemu, to właściwie dopiero teraz, po inicjalnym uruchomieniu usług, możemy zacząć konkretne pomiary i testy. Na ich wyniki trzeba jednak trochę poczekać. Jak to bowiem w technice bywa, uzyskanie konkretnych rezultatów wymaga wielu sprawdzeń. Poza tym Galileo będzie jeszcze udoskonalany – dotyczy to np. modelu jonosfery, który na razie w poszczególnych regionach może mieć różną dokładność. Na marginesie: temat dokładności pomiarów GNSS jest w ogóle bardzo skomplikowany, bo na błąd składa się wiele czynników, takich jak liczba widocznych satelitów czy chwilowe warunki pomiaru.

Wróćmy do serwisów Galileo.

MS: Kolejny jest serwis bezpieczeństwa życia (*Safety of Life – SoL*) działający na kanale E5a. System nawigacyjny dopuszczony do stosowania np. w lotnictwie musi posiadać cechę integralności, czyli informować użytkownika o ewentualnym nieprawidłowym działaniu całego systemu lub poszczególnych satelitów. Aby się o tym dowiedzieć, korzystając z otwartej usługi bez żadnego wspomagania, musimy czekać nawet dwie godziny, aż przyjdą nowe efemerydy. Natomiast w przypadku SoL ten czas wyniesie maksymalnie 6 sekund! Podobne rozwiązanie już teraz oferuje europejski system wspomagania EGNOS, serwis Galileo powinien jednak działać znacznie sprawniej.

GN: Kolejny produkt to PRS (*Public Regulated Service*), czyli usługa regulowana publicznie przeznaczona dla uprawnionych służb ratunkowych czy porządkowych. Korzysta ona z kanałów E1 i E6. Jej zaletą wcale nie jest wyższa dokładność, która akurat nie różni się od usługi otwar-

tej. Wyróżnia ją natomiast stosowanie zamkniętego i kodowanego sygnału, który jest bardziej odporny na różnego rodzaju zakłócenia – zarówno celowe, jak i przypadkowe. To, a także zapewnienie integralności, przekłada się na lepszą dostępność tej usługi, w sytuacji gdy korzystanie z innych serwisów może być utrudnione.

MS: Jest również usługa poszukiwawczo-ratownicza (*SAR – Search And Rescue*), która będzie odczytywać sygnały alarmowe nadawane na określonej częstotliwości (406 MHz) i retransmitować je do odpowiednich centrów zarządzania. Uzupełnia ona działającą z powodzeniem od wielu lat system COSPAS-SARSAT.

Naszych czytelników z pewnością najbardziej interesuje usługa komercyjna.

MS: To płatny serwis pracujący na kanałach E6 i przeznaczonym wyłącznie dla tej usługi E5b. Zaoferuje on decymetrową dokładność pomiaru oraz w ograniczonym stopniu również transmisję wiadomości.

GN: Znaczna redukcja błędów jest nie tylko dzięki wykorzystaniu dwóch częstotliwości, ale także wyższej prędkości transmisji danych oraz udoskonalonych danych o jonosferze. Żeby jednak korzystać z tych zalet, trzeba będzie nie tylko wykupić abonament, ale również posiadać specjalny dwuczęstotliwościowy odbiornik śledzący zupełnie nowe częstotliwości oraz oferujący autoryzację użytkownika.

W typowych geodezyjnych pomiarach usługa ta raczej się nie sprawdzi?

GN: Należy podkreślić, że komercyjna usługa Galileo bazuje na pomiarze kodowym, tymczasem geodeci generalnie posługują się pomiarami fazowymi. Tak więc w ich przypadku kupowanie abonamentu na usługę komercyjną wydaje się niepotrzebne. Pomiary RTK można bowiem z powodzeniem prowadzić, bazując na otwartych sygnałach E1 i E5a, choć nie oczekujmy istotnego skoku dokładności w porównaniu z istniejącymi systemami.

MS: W związku z udostępnieniem usługi komercyjnej nie spodziewałbym się jakiegось przewrotu technologicznego w geodezji, który sprawi, że jak ktoś będzie mieć odbiornik w smartfonie, to

zostanie pełnoprawnym geodetą. W dalszym ciągu jest istotna różnica między pomiarem fazowym i kodowym, i do tych pierwszych cały czas będzie potrzebny specjalny, droższy odbiornik. Choć oczywiście postęp technologiczny sprawia, że stają się one coraz tańsze.

Użytkownicy ASG-EUPOS stosują dziś głównie kombinację sygnałów GPS i GLONASS. Docelowo sieć ta ma jednak bazować na systemach GPS i Galileo. Będą z tego jakieś korzyści?

MS: Na pewno. Sporym problemem w łączeniu obserwacji GPS i GLONASS jest inna elipsoida odniesienia. W przypadku GPS to WGS-84, a GLONASS – PZ-90.11. Istnieje oczywiście możliwość transformacji między układami na nich opartymi, ale każda transformacja wiąże się z pewnym błędem. W przypadku GPS i Galileo będzie on zminimalizowany, bo zarówno WGS-84, jak i stosowany w europejskim systemie *Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF)* bazują na ITRF. Możliwe jest więc precyzyjne przejście między tymi rozwiązaniami.

Drugi zysk związany jest z czasem. Zarówno w GPS, jak i GLONASS jest on bardzo precyzyjnie wyznaczany, ale zadbanie o wspólną skalę czasu jest utrudnione. W przypadku europejskiego systemu zawczasu o tym pomyślano, bo skale GPS i Galileo są bardzo spójne. Oba te elementy przełożą się na wyższą dokładność, ale dopóki nie mamy dużych doświadczeń pomiarowych, trudno powiedzieć, w jakim stopniu

GPS i Galileo łączy także wykorzystanie technologii wielodostępu CDMA, podczas gdy w GLONASS jest to FDMA. Czy ma to jakiegokolwiek znaczenie dla użytkowników?

MS: Raczej dla producentów sprzętu, którym komplikuje to projektowanie odbiorników. Wszystko sprowadza się do tego, że w przypadku CDMA sygnały nadawane są na jednej częstotliwości, a – mówiąc precyzyjniej – na jednym zakresie częstotliwości. W przypadku GLONASS każda para satelitów położonych po przeciwnych stronach globu korzysta z odrębnej częstotliwości. Od bloku GLONASS K2 ma się to jednak zmienić, bo zacznie być stosowany standard CDMA.

GN: Ciekawostką jest zastosowana w Galileo modulacja sygnałów BOC. Z jednej strony mocno komplikuje ona projektowanie sprzętu, ale z drugiej – pozwala nadawać na tej samej częstotliwości co inne systemy GNSS.

MS: Wyobraźmy sobie rozmowę trzech kierowców przez CB radio. Nie da się z tego nic zrozumieć. A w przypadku Galileo da się, i to w sytuacji, gdy na tej samej częstotliwości nadają 24 satelity i każdy używa dwóch sygnałów, *data i pilot*, a do tego dochodzą jeszcze inne systemy.

Do dyspozycji mamy już cztery systemy nawigacji: GPS, GLONASS, Galileo i chiński BeiDou. Warto korzystać z nich jednocześnie, czy tylko niepotrzebnie zwiększa to zużycie energii?

MS: O zasilanie nie ma się co martwić, bo odbiorniki są już bardzo energooszczędne. BeiDou jest projektowany pod kątem użytkowników z Azji, dlatego na razie u nas jego satelity są widoczne bardzo nisko. Nie mamy więc pełnej informacji o tym, jak funkcjonuje ten system. Z kolei w przypadku Galileo, tak jak wcześniej wspominałem, dopiero teraz możemy zacząć testy. Oczywiście da się symulować działanie obu tych systemów i wyciągać na tej podstawie jakieś wnioski, ale zawsze będą to tylko symulacje. Dopiero po dłuższym czasie pomiarów na rzeczywistych sygnałach możemy stwierdzić, czy mamy jakieś zyski ze stosowania wielu systemów jednocześnie. W przypadku pomiarów GPS + GLONASS swego czasu spodziewaliśmy się bardzo dużych korzyści. W praktyce okazały się one jednak ograniczone m.in. przez różnice między tymi systemami, o których już mówiłem. Natomiast dysponując większą liczbą satelitów, na pewno będziemy mieli zauważalny zysk związany z bezpieczeństwem pomiarów.

GN: Obserwowanie satelitów wszystkich dostępnych systemów GNSS w jednym czasie wiąże się z koniecznością posiadania odbiorników wyposażonych w dużą liczbę kanałów. Już w tej chwili w Warszawie można obserwować w jednym czasie ponad 40 satelitów, a przecież nie mamy jeszcze pełnej konstelacji Galileo czy BeiDou. Warto też pamiętać, że każdy z nich nadaje sygnały na 2-3 częstotliwościach, a odbiorniki, w zależności od sygnału, potrzebują nawet kilku kanałów, żeby taki sygnał odebrać. W związku z tym łatwo zauważyć, że aby mieć możliwość odbioru wszystkich systemów, będzie trzeba korzystać z odbiorników wyposażonych w kilkadziesiąt kanałów. To oczywiście przekłada się na cenę. Jednak biorąc pod uwagę zalety Galileo oraz wady innych systemów, wydaje się, że racjonalnym rozwiązaniem dla geode-

tów będzie wybór systemów GPS i Galileo. Przy pełnej konstelacji europejskiego systemu nie powinni oni narzekać ani na dostępność satelitów, ani na dokładność pomiarów.

Przy okazji uruchomienia Galileo sporo mówi się o pomiarach trzyczęstotliwościowych. Co one dają?

MS: Przede wszystkim możemy uzyskać jeszcze dokładniejsze dane o jonosferze niż przy dwóch częstotliwościach, podobnie zresztą jak w przypadku korzystania z sygnałów L1, L2 i L5 systemu GPS.

GN: Dzięki zastosowaniu nowych algorytmów możemy przede wszystkim skrócić czas inicjalizacji potrzebny do uzyskania wysokiej dokładności wymaganej w pomiarach geodezyjnych.

MS: Naukowcy cały czas pracują nad rozwiązaniami do pomiarów trzyczęstotliwościowych. Na razie bazują one na doświadczeniach z sygnałem GPS L5, ale trzeba jeszcze czasu, by je udoskonalić.

Ostatnio sporo dyskutuje się również o metodzie PPP (Precise Point Positioning) czasu rzeczywistego zapewniającej podobną dokładność jak RTK. Czy Galileo przyczyni się do jej udoskonalenia?

GN: W przypadku PPP nie eliminujemy błędów – tak jak w RTK – poprzez zwykłe różnicowanie, ale na podstawie dostarczanych do odbiornika precyzyjnych danych np. o orbitach satelitów czy opóźnieniach występujących w atmosferze. Ponadto wciąż pozostają do wyznaczenia wartości nieoznaczoności. To powoduje, że na rozpoczęcie dokładnych pomiarów czasem możemy czekać nawet kilka godzin, choć cały czas trwają prace nad nowymi produktami i algorytmami, które – w sprzyjających warunkach obserwacyjnych – umożliwiają skrócenie tego czasu do kilkadziesiąt minut. Każda nowa częstotliwość i każdy dodatkowy satelita sprawią jednak, że ten czas będzie coraz krótszy. Dlatego Galileo udoskonalił te pomiarowe, choć tylko do pewnego stopnia.

MS: Można założyć, że rozwój nowych algorytmów będzie coraz bardziej skracać ten czas zbieżności. Kto pamięta, jak kiedyś wykonywało się pomiary metodą kinematyczną, ten wie, że najpierw trzeba było stanąć na punkcie o określonych współrzędnych, zainicjalizować pomiar i prowadzić go bez utraty sygnałów satelitarnych. Ale wszystkie te ograniczenia rozwiązał algorytm OTF (*On The Fly*). Podobna zmiana powinna się dokonać w przypadku PPP.

Czy polscy naukowcy interesują się Galileo?

MS: Tak, prowadzonych jest wiele badań zarówno w ramach bieżącej działalności poszczególnych ośrodków, jak

Kręta droga do Galileo

Gdy w grudniu 1999 roku Komisja Europejska oficjalnie zaakceptowała program Galileo, zakładano, że wspólnotowy system nawigacji, przewyższający technologicznie GPS i GLONASS, będzie w pełni operacyjny już w 2008 roku. Na przeszkodzie stanęły jednak finanse. Władze w Brukseli liczyły na to, że do programu dorzucą się prywatne firmy, miał być bowiem realizowany w formule partnerstwa publiczno-prywatnego. W związku z brakiem chętnych do takiej współpracy w 2008 roku KE zdecydowała, że system zostanie całkowicie sfinansowany ze środków UE. Do tego czasu jedynym większym sukcesem programu było wystrzelenie w 2005 roku testowego satelity GIOVE-A. Trzy lata później na orbicie znalazł się również GIOVE-B. Zabezpieczenie finansowania sprawiło, że program Galileo wreszcie nabrał rozpędu i w październiku 2011 roku udało się wystrzelić dwa pierwsze operacyjne satelity tego systemu, a kolejne starty odbywały się w odstępach kilku-kilkunastomiesięcznych. W ich trakcie nastąpił jeden poważny incydent – w sierpniu 2014 roku z powodu usterki w rakiecie nośnej Sojuz dwa aparaty wyniesiono na orbitę eliptyczną zamiast kołowej. Do dziś nie wiadomo, czy satelity te da się włączyć do konstelacji Galileo. Ogłoszenie pełnej operacyjności europejskiego systemu nawigacji ma nastąpić w 2020 roku. Całkowity koszt budowy Galileo ma przekroczyć 10 mld euro.

i projektów Europejskiej Agencji Kosmicznej. Mocno są w te prace zaangażowane np.: Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Politechnika Warszawska oraz Centrum Badań Kosmicznych PAN. Trudno mi jednak powiedzieć coś więcej o ich badaniach, bo dopóki w czasopiśmie nie ukażą się końcowe wyniki projektów, to naukowcy raczej nie zdradzają szczegółów swoich przedsięwzięć.

GN: Jeśli chodzi o projekty ESA, to polski wkład z reguły dotyczy kwestii związanych z analizą i obróbką danych oraz algorytmami przetwarzania sygnałów nawigacyjnych, przy czym nie ograniczają się one wyłącznie do Galileo, ale również do łącznego wykorzystania wszystkich rozwiązań GNSS.

MS: Zagadnienie to intensywnie zgłębiamy również w WAT. Spore możliwości w tym zakresie daje nam nasz symulator GNSS [patrz *GEODETA* 4/2016], który pozwala badać zarówno obecne konfiguracje satelitów, jak i te, które będą dostępne dopiero w przyszłości. Ciekawych i praktycznych tematów do badań nam więc nie brakuje.

Rozmawiał Jerzy Królikowski