

Wpływ podwyższonej aktywności słonecznej na pomiary GNSS

Palący problem

W ostatnich tygodniach wielu użytkowników precyzyjnych odbiorników GNSS na własnej skórze odczuło, jak bardzo Słońce może skomplikować prowadzenie pomiarów. A to dopiero początek utrudnień! Jak sobie z nimi radzić?

Jerzy Królikowski

Pod koniec lutego br. cała Polska zachwycała się pięknymi zdjęciami zorzy polarnej, która z zaskoczenia pojawiła się nad naszymi głowami. Choć zjawisko to zapiera dech w piersiach, w tym przypadku jego występowanie jest jednocześnie zwiastunem maksimum 25. cyklu aktywności słonecznej, a to oznacza problemy z korzystaniem z nawigacji satelitarnej.

Teoretycznie nie ma powodów do paniki. Wszak takie cykle zdarzają się regularnie co 11 lat, a poprzedni nie spowodował znaczących utrudnień w pomiarach. Sęk w tym, że bieżący cykl okazuje się znacznie silniejszy, niż dotychczas przewidywano. Dobrze pokazują to wykres na rys. 1. Gwoli wyjaśnienia: najprostszą miarą aktywności naszej gwiazdy jest liczba pojawiających się na niej plam – im więcej, tym aktywność wyższa. Otóż, w styczniu br. tych plam było blisko 150 – to więcej niż prognozowano nie tylko dla tego miesiąca, ale nawet dla maksimum całego cyklu, które nastąpi dopiero za dwa lata! Czyżby zatem najgorsze było dopiero przed nami?

• Rozbłyски i wyrzuty, czyli łyk teorii

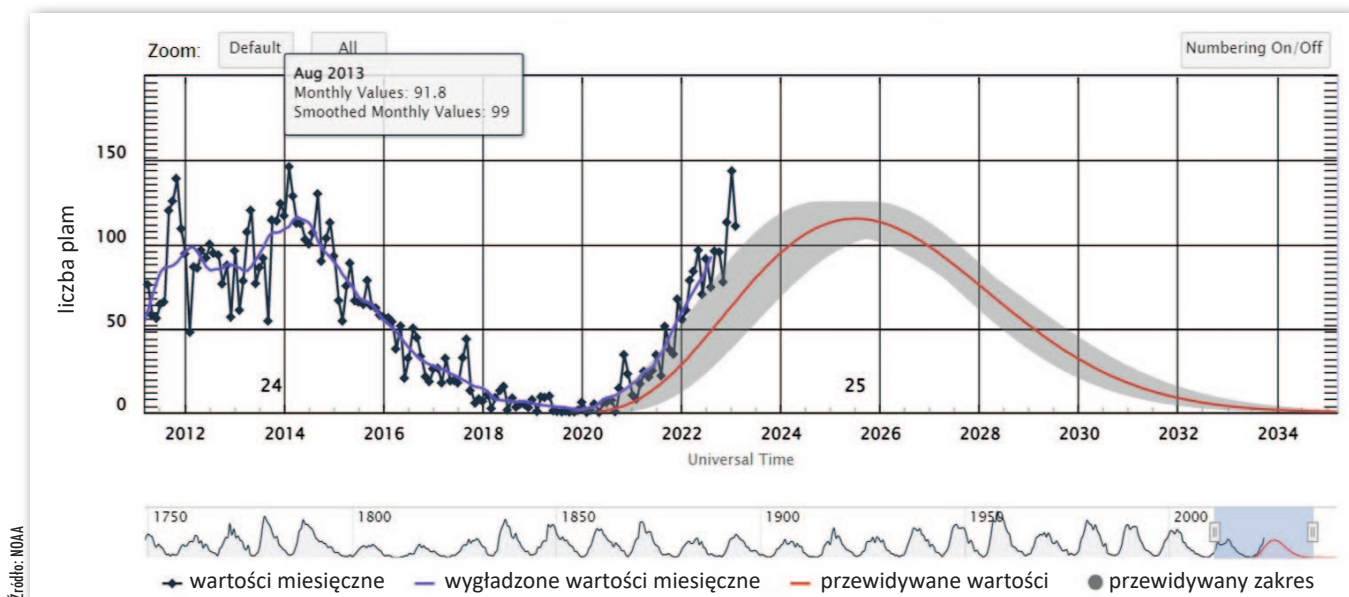
Wprawdzie źródłem problemów z pomiarami GNSS jest Słońce, ale tylko pośrednio. Podwyższona aktywność tej gwiazdy powoduje nie tylko plamy, ale także rozbłyски, czyli nagłe wydzielanie w atmosferze Słońca ogromnej ilości energii. Ich siła mierzona jest w skali logarytmicznej oznaczonej literami A, B, C, M oraz X, gdzie X oznacza rozbłyски najsilniejsze. Dodatkowo w obrębie każdej z tych klas używane są cyfry od 1 do 9. I tak np. rozbłyски X jest 10 razy silniejszy od M, a X3 jest 2 razy silniejszy od X2.

Często, choć nie zawsze, rozbłyskom towarzyszą koronalne wyrzuty masy (CME) – olbrzymie obłoki plazmy trafiają w przestrzeń międzyplanetarną, i to one w największym stopniu kształtują tzw. pogodę kosmiczną. CME składają się głównie z elektronów i protonów z niewielkim dodatkiem jonów cięższych pierwiastków, jak hel, tlen i żelazo.

Dla naszej planety wyrzuty te nie stanowią bezpośredniego zagrożenia, bo zatrzymywane są przez magnetosferę. Mogą jednak powodować istotne zakłócenia ziemskiego pola magnetycznego, a przez to niekorzystnie oddziaływać na różne aspekty naszego życia – mówi-

my wówczas o tzw. burzach geomagnetycznych. Do ich najbardziej powszechnych skutków należą mniej lub bardziej dokuczliwe zakłócenia w łączności radiowej (rys. 2), choć w skrajnych przypadkach może dochodzić również do uszkodzenia i zmiany orbity satelitów czy nawet awarii sieci przesyłowych. Jedną z najsilniejszych tego typu burz zarejestrowano w roku 1859. Zorze polarne dostrzeżono wówczas nawet na Karaibach. Poza tym odnotowano indukowanie napięcia elektrycznego w liniach telegraficznych w Ameryce i Europie. Mniej silna burza z roku 1989 r. spowodowała natomiast wyłączenie sieci energetycznej w kanadyjskim Quebecu czy awarię tamtejszej giełdy papierów wartościowych.

Z punktu widzenia pomiarów satelitarnych najistotniejszy jest jednak wpływ Słońca na jonosferę. Tu dochodzi bowiem do refrakcji i dyfrakcji sygnałów przechodzących przez tę warstwę. Refrakcji geodetom objaśniać nie trzeba, dyfrakcja to z kolei rozpraszanie sygnałów prowadzące niekiedy do ich scyntylacji, czyli nagłych zmian amplitudy, fazy i kierunku rozchodzenia się fali. Obrazowo scyntylacja porównywana jest to do migotania gwiazd na nieboskłonie,



Rys. 1. Stwierdzona i prognozowana liczba plam słonecznych

tyłe że zamiast światła widzialnego „migoczą” fale radiowe. Stopień nasilenia tego zjawiska najczęściej wiązany jest ze wskaźnikiem TEC (*Total electron content*) odnoszącym się do całkowitej zawartości elektronów. Jego wielkość jest jednak bardzo zmienna i zależy nie tylko od aktywności Słońca, ale także od szerokości geograficznej oraz pory dnia i roku. Najwyższe wartości TEC notowane są z reguły w środku dnia, a także w strefie okołórównikowej oraz (na wyraźnie niższym poziomie) wokół biegunów. Jeśli zaś chodzi o pory roku, to w przypadku naszego kraju maksima występują jesienią i wiosną.

• Słońce a nawigacja satelitarna

Zjawiska w jonosferze już od dawna spędzają sen z powiek naukowcom zajmującym się nawigacją satelitarną, a także producentom i użytkownikom instrumentów GNSS. Głównym problemem jest oczywiście ich nieprzewidywalność oraz zmienność – zarówno w czasie, jak i przestrzeni – co utrudnia skuteczne modelowanie i eliminowanie ich wpływu. A wpływ ten objawia się głównie przez opóźnienie jonosferyczne. Polega ono na tym, że sygnały GNSS nie przechodzą przez tę warstwę atmosfery liniowo, co wprowadza istotne błędy w pomiarze odległości między odbiornikiem a satelitą. W niekorzystnych warunkach może to prowadzić do obniżenia dokładności wyznaczanych współrzędnych o kilka, a nawet kilkanaście metrów. W przypadku odbiorników jednoczęstotliwościowych (a więc zdecydowanej większości sprzętu amatorskiego) błąd ten próbuje się redukować mniej lub bardziej doskonałymi modelami. Jeśli zaś chodzi o sprzęt dwu- i wieloczęsto-

tliwościowy, sprawa jest prostsza, bo jednoczesny pomiar na różnych częstotliwościach pozwala skutecznie ograniczać wpływ jonosfery.

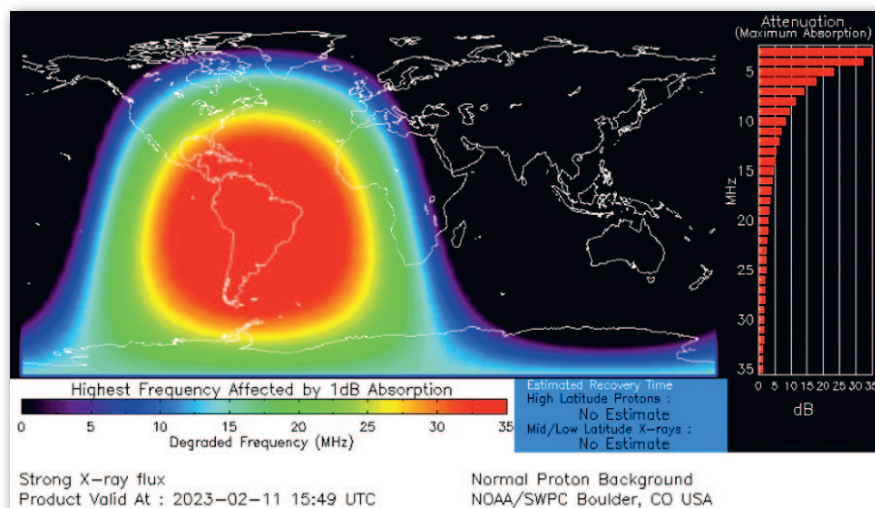
Sprawy się jednak znacznie komplikują, gdy mamy do czynienia z burzą geomagnetyczną i dochodzi do wspomnianych wcześniej scyntylacji – zniekształcenia sygnału stają się wówczas znacznie poważniejsze. Jakie mogą być tego konsekwencje dla użytkowników odbiorników GNSS-RTK? W najmniej poważnych przypadkach dochodzi do nieznacznego obniżenia dokładności. Przy silniejszych burzach trzeba się liczyć z problemami z wyznaczeniem nieoznaczoności fazy, to zaś może prowadzić do wydłużonego oczekiwania na „fiksa” lub nagłego przechodzenia do rozwiązania „float”. Znacznie bardziej niebezpiecznym zjawiskiem jest błędne rozwiązanie nieoznaczoności (tzw. *cycle slip*), które skutkuje przesunięciem wyznaczonych pozycji o war-

tość od kilkunastu centymetrów do nawet kilku metrów. Sytuacje te są o tyle niebezpieczne, że odbiornik ich nie wykrywa, błędnie deklarując poprawne rozwiązanie „fix” i centymetrową dokładność pomiaru.

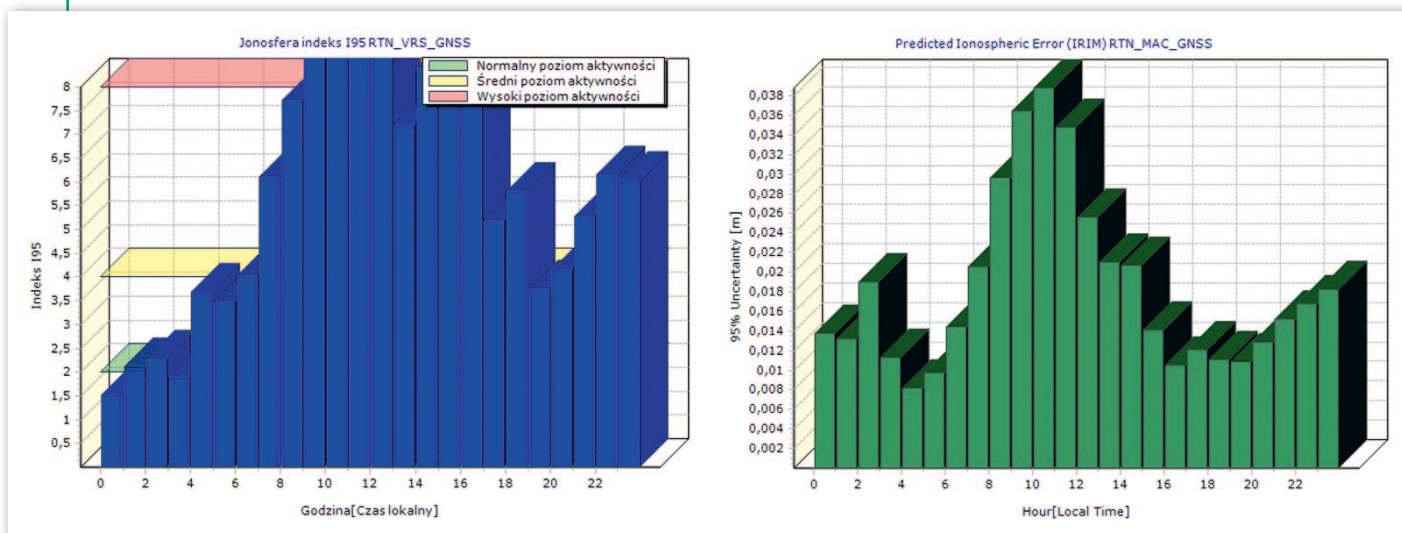
Z kolei w przypadku najsilniejszych burz trzeba się po prostu liczyć z dużymi zakłóceniami i brakiem możliwości pracy (szerzej temat zakłóceń opisaliśmy w GEODECIE 2/2022).

• Po pierwsze, trzymaj rękę na pulsie

Burzy geomagnetycznej powstrzymać się nie da, ale z pewnością nie jesteśmy wobec jej konsekwencji całkiem bezradni. Użytkownicy odbiorników GNSS powinni przede wszystkim zacząć regularnie sprawdzać stan pogody kosmicznej. Tu najprzystępniejszym narzędziem jest strona systemu ASG-EUPOS, gdzie po zalogowaniu uzyskamy dostęp do aktualnych i archiwalnych wykresów wskaźnika I95 (rys. 3). Wystarczy wiedzieć ty-



Rys. 2. Mapa zakłóceń sygnałów radiowych po silnym rozbłysku słonecznym z 11 lutego br.



Rys. 3. Przykładowe wykresy aktywności jonosfery oraz jej wpływu na dokładność pomiaru dostępne na stronie systemu ASG-EUPOS

le, że jego wartość powyżej 8 wskazuje na wysoki poziom aktywności jonosfery, co może niekorzystnie wpływać na pomiary GNSS. W takim przypadku warto rozważyć przełożenie pomiarów lub chociaż ich wnikliwe kontrolowanie. Na stronie ASG-EUPOS znajdziemy również wykresy prezentujące przewidywany wpływ aktywności jonosferycznej na dokładność odbiornika GNSS.

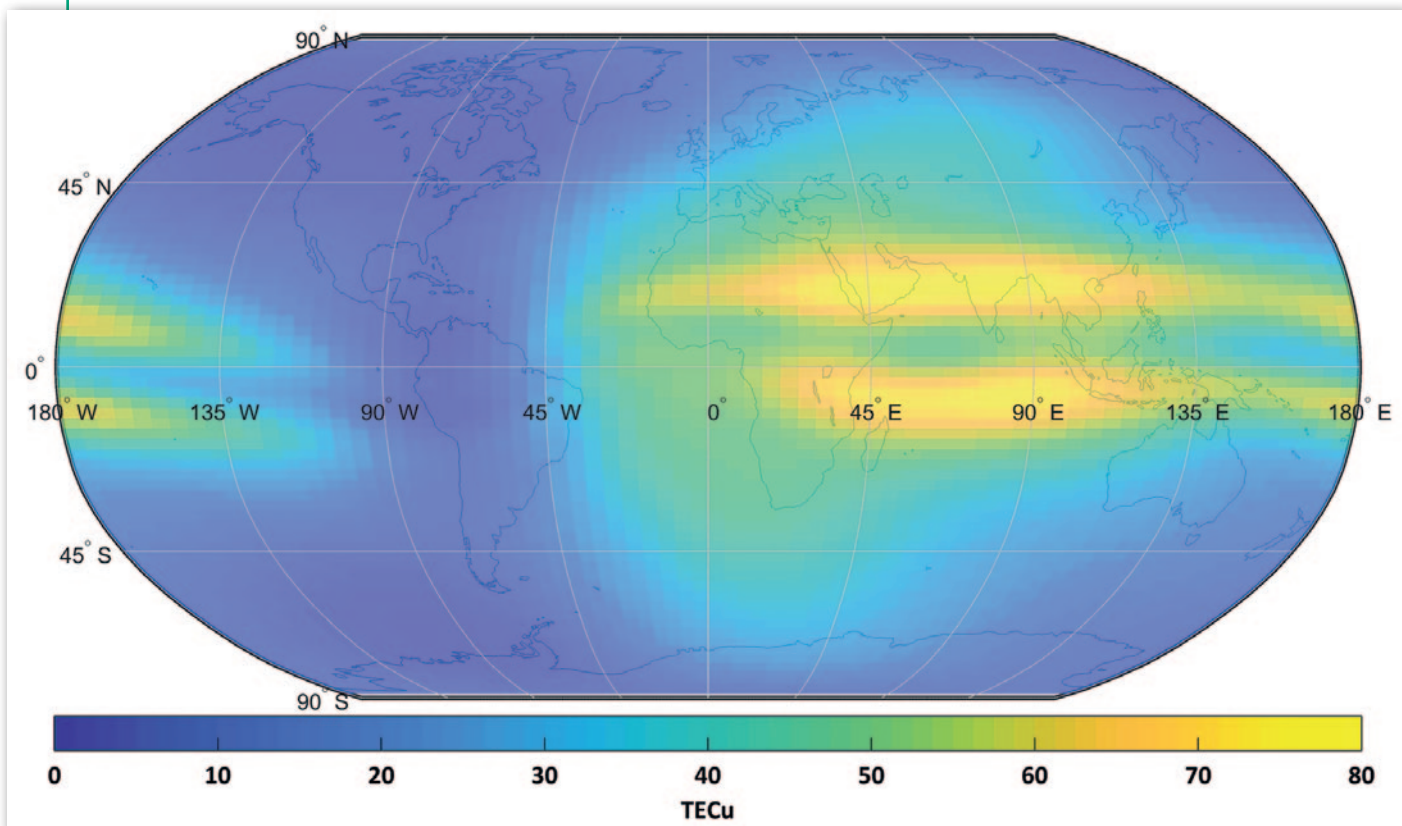
Ale te i podobne strony prezentują jedynie to, co już się dzieje. Jednak przed pomiarami warto też analizować dostępne powszechnie w internecie prognozy pogody kosmicznej – np. na stro-

nie NOAA Space Weather Prediction Center (www.swpc.noaa.gov). Uwagę zwróćmy tam choćby na informacje o prawdopodobieństwie wystąpienia rozbłysków klasy X czy silnych burz geomagnetycznych.

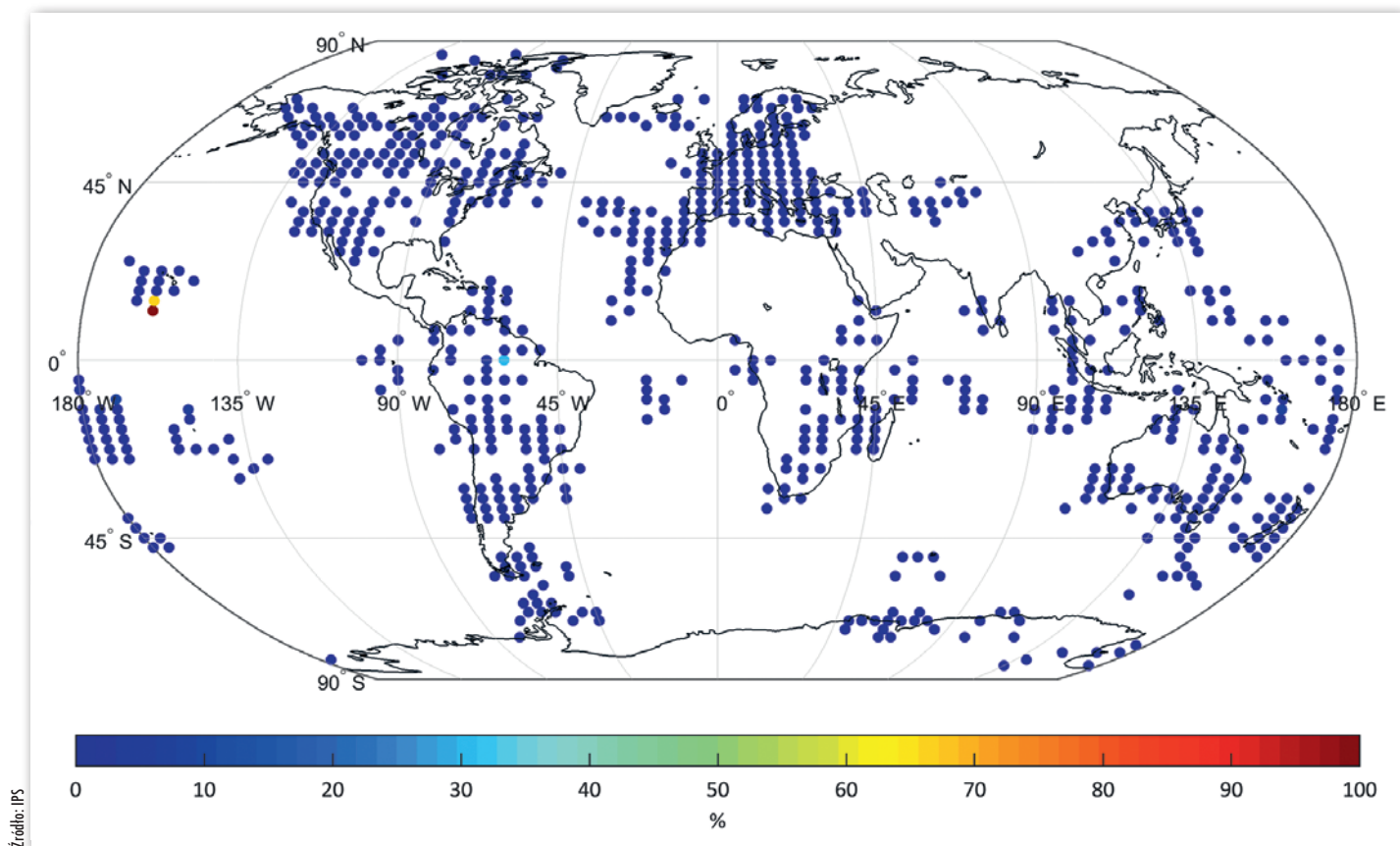
Godny polecenia jest również portal Ionosphere Prediction Service (IPS, ionospheric-prediction.jrc.ec.europa.eu) uruchomiony dzięki wsparciu Komisji Europejskiej. Znajdziemy w nim m.in. mapy pokazujące wartość wskaźnika TEC (rys. 4), spodziewany wpływ jonosfery na dokładność pomiarów GNSS czy prawdopodobieństwo utraty „fiksa” (rys. 5).

Serwis prezentuje zarówno dane aktualne, jak i krótkoterminowe prognozy. Co istotne, po bezpłatnym zalogowaniu możemy w nim ustawić automatyczne otrzymywanie alertów.

Oczywiście należy mieć na uwadze, że obecnie dysponujemy jedynie krótkoterminowymi prognozami kosmicznymi. Z kolei czas od stwierdzenia CME do zarejestrowania jej skutków na Ziemi wynosi z reguły kilkanaście godzin. Do dyspozycji naukowców jest też amerykański satelita DSCOVR znajdujący się stale między naszą planetą a Słońcem. Jest on w stanie mierzyć paramet-



Rys. 4. Przykładowa mapa prognozowanej wartości wskaźnika TEC



Rys. 5. Przykładowa mapa prawdopodobieństwa utraty „fiksa”

try wiatru słonecznego, który dotrze do Ziemi po około godzinie. Krótko mówiąc, czasu na jakąkolwiek reakcję mamy niewiele.

• Po drugie, korzystaj z nowych technologii

Skoro cykle słoneczne powtarzają się co 11 lat, jest oczywiste, że dla producentów odbiorników GNSS problemy z tym związane nie są żadną nowością. Generalnie można powiedzieć, że im nowszy instrument, tym lepiej powinien sobie radzić ze skutkami zjawisk w jonosferze. Spore znaczenie ma tu choćby śledzenie wszystkich dostępnych systemów GNSS i nadawanych przez nie wiadomości nawigacyjnych – w precyzyjnych odbiornikach wchodzących na rynek jest to już w zasadzie standard. Przed rozpoczęciem pomiarów warto się jednak upewnić, że odbieranie wszystkich tych sygnałów jest odblokowane.

Ale jeszcze większe znaczenie niż sama liczba śledzonych sygnałów ma liczba wykorzystywanych jednocześnie częstotliwości. Jak wspomnieliśmy, w typowych warunkach odbiorniki dwuczęstotliwościowe pozwalają dość skutecznie eliminować wpływ jonosfery, ale przy burzy geomagnetycznej zdecydowanie lepiej poradzi sobie sprzęt trzyczęstotliwościowy, a więc korzystający

z sygnałów GPS L1/L2C/L5, BeiDou B1/B2/B3 oraz Galileo E1/E5/E6. Kwestia ta jest o tyle istotna, że na rynku wciąż nie brak odbiorników dwuczęstotliwościowych w bardzo atrakcyjnych cenach.

Spore znaczenie mają również autorskie algorytmy przetwarzania wiadomości nawigacyjnych, które potrafią skutecznie wykręcić niekorzystny wpływ jonosfery i go wyeliminować lub choćby zminimalizować. Niemal każdy producent płyt GNSS chwali się wdrożeniem tego typu rozwiązań. Niestety, mają one charakter „czarnej skrzynki”, najczęściej opakowanej w niewiele mówiącą marketingową nazwę. Przeciętnemu użytkownikowi trudno zatem stwierdzić, czym konkretnie algorytmy te się różnią.

Przy wysokiej aktywności Słońca uważę warto jednak zwracać nie tylko na sprzęt satelitarny, ale również na źródło korekt. Lepiej korzystać z poprawek powierzchniowych, a nie tych wyznaczanych na podstawie obserwacji tylko z jednej stacji bazowej/referencyjnej. Zwracamy ponadto uwagę, dla ilu systemów GNSS i sygnałów są one generowane. Dbajmy również o możliwość jak najkrótsze wektory, czyli odległości do stacji referencyjnych. W ramach dmuchania na zimne warto również wyeliminować z pomiarów satelity znajdujące się najniżej nad horyzontem.

• Umiesz liczyć, licz na siebie

Oczywiście, należy mieć świadomość, że żaden, nawet najlepszy i najdroższy odbiornik nie zagwarantuje pełnej ochrony przed wpływem aktywności słonecznej. Eksperymenty z zakłócaniem (GEODETA 2/2022) dobitnie pokazują bowiem, że każdy odbiornik kiedyś i tak w końcu „pęka”.

Nie pozostaje nam zatem nic innego, jak stosowanie zasady ograniczonego zaufania. W jej ramach przede wszystkim pamiętajmy o pomiarach kontrolnych na punkcie o znanych współrzędnych. Róbmy je znacznie częściej, niż wymagają tego standardy geodezyjne, najlepiej minimum raz po każdym złapaniu „fiksa”.

Warto również ostrożnie planować pomiary. Sprawdzajmy prognozy pogody kosmicznej i jeśli są niekorzystne, przełożmy wyjście w teren. A po powrocie do biura warto przejrzeć archiwalne dane o aktywności jonosfery i jeśli wskaźniki były wysokie, wnikliwie przeanalizować otrzymane współrzędne.

Jak bardzo 25. cykl da się nam we znaki, tego nikt nie przewidzi. Pewne jest, że przed użytkownikami odbiorników GNSS kilkanaście niełatwych miesięcy. Wystarczy jednak trzymać się kilku podstawowych zasad i jednocześnie poślikować się nowymi technologiami, by po tym okresie pozostały w nas jedynie miłe wspomnienia związane z zorzami.

Jerzy Królikowski