



Satelitarny system wyznaczania pozycji
w geodezji i nawigacji, cz. V

Błędy systemu, ośrodka i sprzętu

Uzyskanie wysokiej dokładności w technice GPS wymaga zastosowania specjalnych procedur obserwacyjnych i obliczeniowych. Na ostateczny wynik wpływają m.in.: • błędy systemu GPS, • błędy ośrodka i propagacji sygnału GPS, • błędy aparaturowe, • błędy wynikające z niewłaściwej geometrii konstelacji satelitów GPS, • błędy stosowanych technologii. Omówimy je w Alfabcie kolejno, wraz ze sposobami eliminacji lub zmniejszenia ich wpływu.

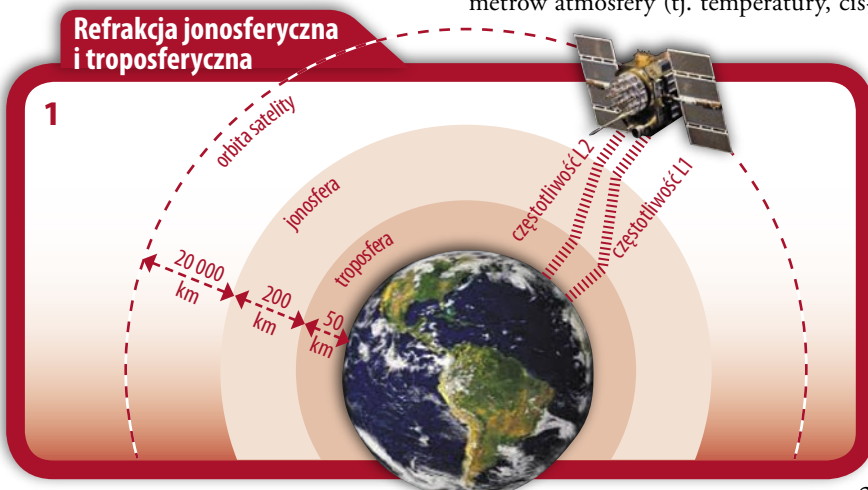
JANUSZ ŚLEDZIŃSKI

Listę zaczynamy od błędów samego systemu GPS, który należy do systemów dynamicznych, czyli wymaga znajomości położenia (współrzędnych) satelitów w momencie ich obserwacji. Niezbędne są zatem precyzyjne elementy orbit satelitów i dokładne procedury ekstrapolacji efermyd wyznaczanych na stacjach kontrolnych systemu. Do określania orbit potrzebna jest z kolei dobra znajomość pola grawitacyjnego. Wszystkie obserwacje wykonywane przez odbiorniki satelitarne GPS wymagają również rejestracji czasu, a zatem błędy systemu czasu GPS utrzymywanego przez zegary atomowe na stacjach dowodzenia i na satelitach oraz błędy transmisji tego czasu także wpływają na dokładność wyznaczania współrzędnych. Wpływ błędów systemu GPS można w dużej części usunąć przez zaawansowane modelowanie orbit oraz odpowiednie opracowanie obserwacji. W znacznym stopniu eliminowany jest on w technologiach różnicowych.

Omawiając błędy systemu GPS, trzeba wspomnieć o celowych degradacjach sygnałów satelitów GPS. Nie chcąc udostępnić pełnej wysokiej dokładności wszystkim użytkownikom, USA wprowadzały celowe degradacje sygnału emitowanego przez satelity GPS: SA (*selective availability*) i AS (*anti-spoofing*). Pierwsza z nich polegała na ograniczeniu do-

kładności emisji poprawki zegara satelity i jego współrzędnych, przez co pomiary stawały się mniej dokładne. W ramach drugiej, satelity GPS zaprzestają emisji kodu precyzyjnego P i zastępują go tajnym kodem Y, dostępnym tylko dla wojska. Degradację SA zniesiono w roku 2002 i władze USA nie przewidują jej ponownego włączenia. Z degradacją AS odbiorniki geodezyjne GPS radzą sobie poprzez specjalną procedurę opracowania sygnału odebranego z satelity. Polega ona na tym, że odbiornik – nie rozumiejąc kodu Y – wykorzystuje pewne podobieństwa do kodu P. Uzyskuje wówczas wyniki wyznaczeń o dokładności kodu P. Z kilku procedur służących do tego celu, najczęściej stosuje się *cross-correlation* (korelację ukośną) i *Z-tracking*. Dzięki temu w postprocessingu otrzymuje się wyniki o wysokiej precyzji.

Łatwiej jest zrozumieć wpływy błędów ośrodka, ale trudniej je wyznaczyć. Czynniki te powodują błędy, które organizatorzy kampanii pomiarowych muszą starannie analizować, planując obserwacje sieci GPS. Błędy ośrodka wynikają przede wszystkim z refrakcji, przy czym jest ona inna dla wyższej warstwy atmosfery – jonosfery, a inna dla niższej – troposfery (rys. 1). Wpływ jonosfery, którą charakteryzuje zmienne nasycenie elektronów (rys. 2), usuwamy prawie zupełnie przez pomiar odległości na dwóch odpowiednio dobranych częstotliwościach i tworzenie liniowych kombinacji wyników (w stosunku 9:7). Te operacje wykonują automatycznie wszystkie programy, za pomocą których opracowujemy wyniki. Wpływ troposfery, rozciągającej się do wysokości 50-70 km nad powierzchnią Ziemi, usuwamy przez wprowadzenie poprawki, którą oblicza automatycznie odbiornik satelitarny na podstawie zawartego w oprogramowaniu modelu atmosfery. Najprostszymi model (stacjonarny, tj. nieuwzględniający zmian atmosfery w czasie) to zespół trzech wzorów wyrażających zmianę podstawowych parametrów atmosfery (tj. temperatury, ciś-





2

nienia i gęstości) w funkcji wysokości. Ponieważ nie odpowiada on na ogół warunkom atmosfery w miejscu obserwacji GPS, zatem i poprawka obliczona przez instrument będzie błędna. Jeśli jednak wyznaczamy różnice współrzędnych punktów sieci (a nie same współrzędne), to model troposfery w sąsiednich punktach sieci w zbliżony sposób nie będzie przystawał do warunków atmosferycznych i obliczone poprawki będą obciążone podobnymi błędami, a więc z różnicy współrzędnych się wyeliminują. Ważna jest więc nie tyle poprawność modelu atmosfery, ile warunek, żeby dawał on takie same błędy na wszystkich mierzonych punktach. Jest to możliwe wtedy, gdy punkty nie są zbyt oddalone od siebie i panują na nich podobne warunki atmosferyczne. Nie ma jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, co to znaczy „zbyt oddalone”, gdyż zależy to od wielu zmieniających się czynników. Z praktyki ośrodków satelitarnych na całym świecie wynika, że do uzyskania centymetrowej dokładności różnicy wyznaczanych współrzędnych odległość między punktami nie powinna przekraczać 15-30 km. Można dodać, że bardziej zaawansowane programy obliczają poprawkę troposferyczną w dwóch częściach: *dry correction* – dla wyższej warstwy tzw. troposfery suchej i *wet correction* – dla niższej warstwy tzw. troposfery wilgotnej, w której występuje już para wodna.

Do grupy błędów ośrodka należy także wielodrożność sygnału polegająca na tym, że do odbiornika satelitarnego dociera jednocześnie sygnał bezpośrednio z satelity i sygnał odbity od różnych obiektów na Ziemi znajdujących się w sąsiedztwie (rys. 3). Niekiedy sygnał odbity jest nawet bardziej intensywny od sygnału dochodzącego z satelity i w takich przypadkach instrument może przerwać rejestrowanie sygnału. Następuje wówczas tzw. zanik cykli (*cycle slip*). Aby uchronić się od tego błędu, trzeba starannie wybierać sta-

nowiska, unikać sytuowania ich w pobliżu dużych płaskich konstrukcji, dachów (szczególnie blaszanych), ścian, ale także bezpośrednio przy spokojnej tafli jezior lub innych zbiorników wodnych. Podczas obserwacji nie należy parkować samochodu tuż obok stanowiska, karoseria może bowiem odbijać sygnały satelitarne. Zalecane są anteny zawierające ekrany tłumiące sygnały odbite (obecnie używane anteny są w nie zazwyczaj wyposażone). Wielodrożność sygnału dla konkretnego projektowanego stanowiska można wyznaczyć za pomocą specjalnych pomiarów testowych. Zmniejszenie wpływu tego błędu można też osiągnąć, wydłużając czas obserwacji na stanowisku. Stwierdzono bowiem, że ma on charakter cykliczny o okresie około pół godziny.

Metody wyeliminowania błędów aparaturowych. Aparatura umieszczona na satelitach GPS i odbiorniki – choć produkowane przez firmy mające duże doświadczenie i dysponujące najnowocześniejszymi rozwiązaniami technologicznymi – nie są wolne od błędów. Wiele z nich eliminuje się poprzez różnicowanie obserwacji. Pro-



gramy, za pomocą których opracowujemy wyniki, tworzą pewne liniowe kombinacje obserwacji wykonanych w tym samym czasie na różnych stanowiskach, przez co pozbywamy się błędów zegara satelity (tzw. pierwsze różnice) i odbiornika (tzw. drugie różnice). Zastosowanie takich procedur powoduje, że szczerkowe błędy aparaturowe, takie jak niestabilność częstotliwości generatorów na satelicie i w odbiorniku, błędy transmisji i zliczania czasu, błędy dokonywania korelacji sygnału satelitarnego i generowanego przez odbiornik (*replica code*) przy pomiarach kodowych i pomiaru fazy w pomiarach fazowych możemy uznać za znikomo małe i nie uwzględniać ich w analizach praktycznych wyznaczeń.

Ale są również błędy aparaturowe, które musimy brać pod uwagę przy rozpatrywaniu błędów pomiarów GPS. Jednym z zasadniczych urządzeń używanych przez użytkowników systemu GPS jest antena odbiornika. O jakości anten satelitarnych świadczy stałość położenia tzw. centrum fazowego anteny, tj. punktu, od którego mierzy się odległość do satelity (odgrzywa ono podobną rolę jak ognisko układu aparatury optycznej, gdzie następuje skupienie całego dochodzącego lub wychodzącego sygnału). Centrum fazowe anteny powinno zajmować stałe położenie i nie może być zależne od kierunku przychodzącego sygnału GPS. Pewne błędy szczerkowe centrum fazowego anteny występują w antenach każdej firmy, stąd w pomiarach różnicowych należy w miarę możliwości stosować anteny tej samej firmy na obu końcach mierzonych linii (cięciw), a także przestrzegać tej samej orientacji anten na wszystkich mierzonych stanowiskach (strzałka na ekranie anteny powinna być na samo zorientowana).

Innym błędem aparaturowym jest tzw. szum odbiornika. Wskazuje on zdolność urządzenia do wykonywania pomiaru kodowego i fazowego. Stosunek intensywności sygnału do szumu danego instrumentu opisuje współczynnik SNR (*signal-to-noise-ratio*), który można odczytać z odbiornika GPS. Wartość współczynnika SNR zależy od rodzaju anteny, wysokości satelity nad horyzontem, a także od mocy sygnału satelity i waha się od kilku (2-5) do kilkudziesięciu (do ok. 50).

PROF. JANUSZ ŚLEDZIŃSKI JEST PRACOWNIKIEM
NAUKOWYM INSTYTUTU GEODEZJI WYŻSZEJ
I ASTRONOMII GEODEZYJNEJ
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ