

Od czego zależy dokładność wyznaczenia współrzędnych w GPS?

WALKA O MILIMETRY

System nawigacji satelitarnej GPS nie może być bezpośrednio stosowany do pomiarów geodezyjnych z uwagi na zbyt małą dokładność – typowo nawigacyjną – na poziomie kilku metrów. Najczęściej spotykanym rodzajem wspomaganie zewnętrznego, zwiększającego dokładność oraz niezawodność, są systemy różnicowe DGPS i RTK, których idea jest synchroniczne wykorzystanie obserwacji z co najmniej dwóch odbiorników.

MARIUSZ FIGURSKI

Od zarania dziejów nurtowały człowieka pytania, skąd jesteśmy, gdzie się znajdujemy i dokąd zmierzamy. Odpowiedzi poszukiwano w zjawiskach zachodzących na niebie, obserwując wschody i zachody Słońca, Księżycy i innych ciał. Z biegiem czasu człowiek potrafił określić powtarzalność zjawisk, a nawet przewidywać niektóre z nich. Wykorzystywał do tego celu m.in. budowle megalityczne, takie jak kromlechy Stonehenge czy piramidy w Egipcie. Jednocześnie powstawały pierwsze metody określania położenia obiektów na niebie i powierzchni Ziemi oraz wyznaczania trasy.

Przez stulecia doskonalono techniki i przyrządy pomiarowe, ale rewolucja nastąpiła dopiero po wynalezieniu przez J. A. Fleminga w 1904 r. lampy elektronowej (diody). Ona i jej pochodne stały się podstawą budowy pierwszych odbiorników i nadajników radiowych. Stosowano ją do wzmacniania słabych sygnałów na gra-

nicy szumu, np. w radarach, radioteleskopach i łączności satelitarnej na początku ery kosmicznej. Wtedy to narodziła się nowoczesna nawigacja, a pierwszym radiowym systemem nawigacyjnym był hiperboliczny LORAN wprowadzony do użytkowania w okresie II wojny światowej. Stosowano go w dwóch odmianach, najpierw LORAN A, a następnie LORAN C. Pozycja wyznaczona przez LORAN charakteryzowała się dokładnością rzędu 450 m, a zasięg ograniczony był geometrią rozmieszczenia radiolatarni. Dlatego kontynuowano prace nad stworzeniem systemu nawigacyjnego o znacznie większej niezawodności i zasięgu globalnym.

● TRANSIT I JEGO NASTĘPCY

Do zrealizowania tej koncepcji przyczyniło się wystrzelenie 4 października 1957 roku pierwszego sztucznego satelity Ziemi – Sputnika 1. Naukowcy amerykańscy z Uniwersytetu Johnsa Hopkinsa, prowadząc nasłuch transmisji radiowych satelity z zamianami rozkodowania sygnałów

telemetrycznych, zauważyli bardzo wyraźne „pływanie” częstotliwości nadawanych sygnałów. Analizy dowiodły, że jest to wynik efektu Dopplera wywołanego ruchem satelity względem miejsca obserwacji. Na podstawie odchylenia częstotliwości sygnałów po raz pierwszy wyliczono parametry ruchu sztucznego satelity Ziemi.

Niewątpliwie te przypadkowe obserwacje przyczyniły się do budowy TRANSIT – pierwszego globalnego systemu nawigacji satelitarnej wykorzystującego efekt Dopplera. Dla potrzeb marynarki wojennej Stanów Zjednoczonych (US Navy) opracował go ten sam zespół z Uniwersytetu Hopkinsa. Pierwsze pomysły testy systemu wykonano już w 1960 r., ale dopiero w 1967 r. udostępniono go użytkownikom cywilnym. TRANSIT składał się z 10 satelitów operacyjnych oraz 5 zapasowych i działał nieprzerwanie do 31 grudnia 1996 r. Specjalnie dla niego opracowano wiele nowych technologii, m.in. stabilizacji częstotliwości, synchronizacji odbiornika z zega-

rem satelity za pomocą danych efemerydalnych czy kontroli i korekcji działania układów nawigacyjnych satelity przez naziemne stacje kontrolne. Satelity emitowały sygnały na dwóch częstotliwościach: 150 i 400 MHz. Ich dane były uaktualniane dwa razy dziennie przy okazji odbioru danych telemetrycznych przez stacje kontrolne. Dokładność nawigacyjna systemu była stopniowo poprawiana od 900 m (1962 r.) przez 185 m (1969 r.) do 36 metrów (1971 r.). Natomiast dokładność geodezyjna, wykorzystująca kilka lub kilkanaście przelotów satelitów w czasie kilku godzin, dochodziła do kilku decymetrów w układzie globalnym.

Podkreślić należy, że w Polsce bardzo intensywnie rozwijano technologie pomiarowe związane z systemem TRANSIT, czego wynikiem był dopplerowski odbiornik geodezyjny (DOG) opracowany i zbudowany przez naukowców z Centrum Badań Kosmicznych PAN. Polscy geodeci wykorzystywali odbiorniki do zakładania osnów geodezyjnych w kraju i za granicą.

RYS. 1. PLAN MODERNIZACJI SYSTEMU GPS



W listopadzie 1967 roku Związek Radziecki uruchomił pierwszego satelitę systemu nawigacyjnego Cyklon (Kosmos-192). Z niego wywodzi się rosyjski ratowniczy system lokalizacyjny KOMPAS. W maju tego samego roku marynarka USA umieściła na orbicie pierwszego satelitę serii TIMATION. W sumie w ZSRR opracowano i uruchomiono dwa systemy nawigacji satelitarnej, zbliżone koncepcyjnie do systemu TIMATION: wojskowy Cykada-M (6 satelitów, kryptonim Parus – żagiel) i cywilny Cykada (4 satelity). Projekt TIMATION od 1973 roku połączono z projektem USAF 621B, co dało początek systemowi DNSS (Defense Navigation Satellite System). Trzeci satelita DNSS był demonstratorem systemu GPS (Global Positioning System) Navstar.

Ten krótki przegląd nawigacyjnych technik pomiarowych można podsumować w ten sposób, że system TRANSIT pozwalał na wyznaczenie punktów z dokładnością kilku decymetrów, ale pod warunkiem wykonania bardzo czasochłonnego pomiaru. Ograniczenia te miały zostać wyeliminowane przez jego następcę, czyli GPS, który projektowany był zgodnie z mottem: „Potrzebujemy systemu, który pozwoli na nawigowanie w czasie rzeczywistym o każdej porze dnia i nocy na całej kuli ziemskiej”.

● BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA GPS

Global Positioning System, budowany od lat 80. ubiegłego stulecia, pierwotnie opra-

cowany był dla potrzeb wojskowych. Z uwagi na swoją wyjątkową funkcjonalność, polegającą na globalnym zasięgu i całkowicie automatycznych pomiarach położenia, znalazł powszechne zastosowanie w aplikacjach cywilnych. Stał się podstawą działania wielu urządzeń związanych np. z zapewnieniem bezpieczeństwa ludzi. Mimo olbrzymiej liczby implementacji cywilnych, system w dalszym ciągu posiada specyficzne zastosowania tylko dla wojska, które nie są powszechnie udostępniane.

Zasada działania GPS oparta jest na pomiarze czasu i obliczeniu drogi przebytej przez sygnał elektromagnetyczny od satelity poruszającego się po ściśle zdefiniowanej orbicie do anteny odbiornika. Zegary i system czasu determinują dokładność wykonanych pomiarów i z tego powodu systemy nawigacji satelitarnej często określane są jako PNT – Position-Navigation-Time. Olbrzymią zaletą systemów nawigacji satelitarnej jest to, że sygnały pozwalające określić położenie odbierane są w dowolnym momencie niezależnie od pory dnia i roku. Również warunki atmosferyczne nie mają większego wpływu na funkcjonowanie urządzeń i dokładność wyznaczonej pozycji. Nielimitowana jest także liczba użytkowników. Jedynym ograniczeniem systemu są przeszkody terenowe powodujące zanik sygnału nawigacyjnego lub jego zniekształcenie.

Budowa systemu GPS oparta jest na konstelacji wyspe-

cializowanych satelitów (segment kosmiczny), podlegających ciągłej kontroli poprzez stacje naziemne (segment kontroli) przekazujące do satelitów dane niezbędne do utrzymania dokładności wyznaczanych współrzędnych przez użytkowników (segment użytkowy).

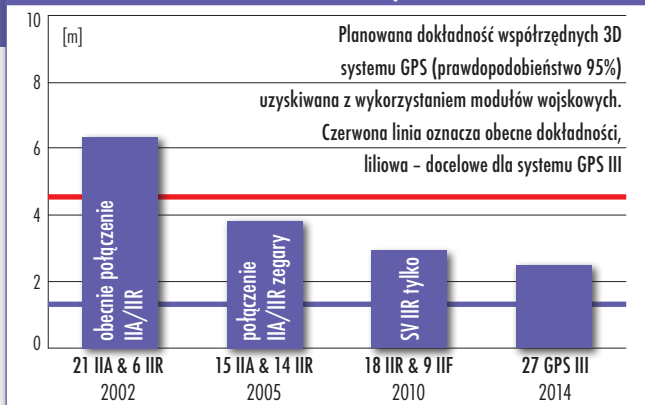
Segment kosmiczny GPS składa się z co najmniej 24 satelitów, w tym 3 aktywnych aparatów zapasowych. W praktyce liczba dostępnych satelitów jest większa, i tak na początku 2009 roku konstelacja obejmuje 32 satelity gotowe do pracy. Są one rozmieszczone na sześciu orbitach prawie kołowych, co najmniej po cztery na każdej, na wysokości około 20 200 km. Płaszczyzny orbit nachylone są pod kątem ok. 55 stopni do równika, co oznacza, że obserwator znajdujący się w przedziale szerokości geograficznych ± 55 stopni może obserwować satelity GPS przelatujące przez zenit. Na większych szerokościach nie jest to możliwe, a na biegunach satelity są obserwowane tylko do wysokości ok. 55 stopni nad horyzontem (powyżej jest tzw. strefa martwa). Zważywszy na fakt, że o dokładności pomiaru decyduje chwilowa geometria satelitów na sferze niebieskiej (jest ona najlepsza, gdy jeden satelita znajduje się w zenicie i trzy pozostałe w płaszczyźnie horyzontu w odległości co 120 stopni), na biegunie wyznaczenie współrzędnych przez system GPS powinno być obciążone największym błędem, co potwierdzają doświadczenia.

Czas obiegu orbity jest równy połowie doby gwiazdowej. Użytkownik na Ziemi zaobserwuje tę samą konstelację satelitów codziennie prawie o tej samej porze. Każdego dnia powtarza się ona o cztery minuty wcześniej z powodu różnicy długości doby słonecznej i gwiazdowej. Satelity rozmieszczone są tak, że co najmniej 5 z nich powinno być widocznych z każdego punktu Ziemi z prawdopodobieństwem 0,9996. Taka konfiguracja umożliwia, z małymi wyjątkami, wyznaczenie współrzędnych dowolnego miejsca na powierzchni globu. Na nielicznych i niewielkich obszarach wyznaczenie pozycji trójwymiarowej jest niemożliwe w okresie nie dłuższym niż około 20 minut w ciągu doby.

● MODERNIZACJA GPS

System GPS nie jest konstrukcją „zamkniętą”. Prowadzone są prace modernizacyjne, które mają zwiększyć dokładność i dostępność sygnałów satelitarnych. Z uwagi na duże uzależnienie niektórych działów gospodarki od GPS, rząd USA zdecydował o wprowadzeniu dodatkowej częstotliwości L5 dostępnej dla użytkowników cywilnych (obok dotychczasowych L1 i L2). L5 oraz nowy kod L2C (C/A na częstotliwości L2) w znacznym stopniu spowodują wzrost precyzji otrzymywanych współrzędnych, jak również zwiększą dostępność systemu w miejscach zalesionych i o rozbudowanej infrastrukturze.

Podstawowym elementem podlegającym limitowanej dystrybucji jest dostęp do sygnału określanego jako P(Y) przeznaczony tylko dla licencjonowanych odbiorców, dającego możliwość udokładnienia uzyskiwanych danych oraz zapewnienia większej skuteczności działania. Rozbudowa i zmiany systemu GPS obejmują nie tylko sferę zastosowań cywilnych, ale przede wszystkim dotyczą sygnałów wojskowych, które zоста-



na rozszerzone o możliwość transmisji nowego kodu M.

Ze względów technologicznych, głównie tzw. czasu operacyjnego działania poszczególnych satelitów, ich konstelacja podlega ciąglej modernizacji. Satelity obecnie umieszczane na orbitach (slotach) należą do generacji (bloku) określanej jako IIR-M. Blok ten, oprócz pełnej kompatybilności z poprzednikami, charakteryzuje się dodatkowymi funkcjami. Satelity IIR-M emitują kod L2C, a w fazie testów jest przeznaczony dla wojska kod M. Zasady korzystania z kodu M będą analogiczne jak obecnie w przypadku sygnału P(Y), co wiąże się z koniecznością dostępu do modułów kryptograficznych dystrybuowanych jedynie przez właściciela systemu (rząd USA). Jednocześnie wprowadzono nową technikę implementacji kluczy zabezpieczających, zwaną OTAR.

Pełne rozwinięcie dodatkowych funkcji planowane jest z wprowadzeniem nowego bloku satelitów II-F. Zgodnie z harmonogramem satelity umieszczane na orbitach od lutego 2009 r. będą miały możliwość zwiększania mocy nadawanego sygnału, co ma bardzo duże znaczenie w zapobieganiu celowemu zakłóceniom systemu. Blok II-F wprowadzi też nową częstotliwość L5. Udostępnienie operacyjne powyższych zmian będzie realizowane sukcesywnie po właściwych testach.

Zmiany w systemie GPS nie zamykają się na bloku II-F. Kolejnym krokiem będą satelity bloku GPS III, który wprowadzi nową funkcję zsynchronizowanego zwiększania mocy

sygnału GPS w określonych rejonach świata, głównie za interesowania operacyjnego sił zbrojnych. Funkcja ta ma zapobiegać zakłóceniom w odbiorze danych oraz zapewnić ciągłość sygnału tam, gdzie jest to bardzo ważne. Jednocześnie dzięki planowanej poprawie dokładności zegarów atomowych na satelitach zwiększy się nominalna dokładność określenia współrzędnych. Szacuje się, że osiągnie ona wartość ok. 1 m (pozycja 3D, prawdopodobieństwo 95%) przy wykorzystaniu modułów wojskowych. Dla porównania obecnie system pozwala na określenie współrzędnej z dokładnością 5-10 m (pozycja 3D, prawdopodobieństwo 95%). Satelity przewidziane w ramach bloku GPS III będą również posiadały zmodyfikowane informacje dostosowane do innych systemów nawigacji satelitarnej, w szczególności do europejskiego Galileo.

Równoległe z wprowadzaniem kolejnych sygnałów GPS, trwają prace nad nowymi konstrukcjami odbiorników. Moduł YMCA, którego dostawy planowane są na początek 2010 roku, jako pierwszy pozwoli integrować sygnały P(Y), M oraz C/A. Moduły lotnicze i morskie wykorzystujące nowe sygnały będą budowane od 2010 roku, a zakończenie projektu planowane jest na 2014 rok. Oczywiście ciągłym modyfikacjom podnoszącym sprawność i odporność na zakłócenia podlegają także systemy antenowe. Obecnie mocno zaawansowane są prace nad antenami nazywanymi ADAP, które posiadają możliwość identyfikacji zakłóceń

i ich eliminacji. Rozpoczęto również prace nad projektem anteny SAS (Small Antenna Systems), charakteryzującej się właściwościami analogicznymi do ADAP, ale zminiaturyzowanej. Zakończenie tego projektu, związane z wykonaniem testów, planowane jest na koniec 2010 roku.

● SPOSÓB POMIARU A DOKŁADNOŚĆ

Po zapoznaniu się z trendami rozwoju GPS wiemy, że parametrem nawigacyjnym jest w tym systemie pomiar odległości. Nie jest ona mierzona wprost (stąd nazwa pseudoodległość), tylko na podstawie czasu propagacji sygnału z satelity do odbiornika, który może być określany na dwa sposoby. Pierwszy wykorzystuje standardowy kod C/A (pomiar kodowy), drugi – pomiar fazy fali nośnej (pomiar fazowy). W pomiarze kodowym do określenia czasu propagacji sygnału od satelity do odbiornika wykorzystuje się korelację kodów pseudolosowych (liczby pseudolosowe Golda) satelity i repliki wygenerowanej w odbiorniku. Czas powtarzania kodu C/A trwa 1 milisekundę i jest wykorzystywany w procesie synchronizacji kodów. Jest on równocześnie parametrem nawigacyjnym, z którego wyliczana jest odległość. Znając szybkość powtarzania kodu, można wyznaczyć maksymalny błąd pomiaru pseudoodległości, który wynosi ok. 300 m. Analogicznie, dla kodu P(Y), którego powtarzalność wynosi 0,1 ms, wyznaczona pseudoodległość obciążona będzie błędem ok. 30 m.

Zwracam uwagę, że błędy dotyczą pomiaru pseudoodległości, a nie współrzędnych, których błąd w pomiarach pojedynczym odbiornikiem (pomiar bezwzględny) waha się w przedziale od kilku (odbiorniki z dostępem do kodu P) do kilkunastu metrów (odbiorniki z kodem C/A). Pamiętajmy, że chodzi o pozycję 3D wyznaczoną z prawdopodobieństwem 95%. Zmniejszenie

prawdopodobieństwa pociąga za sobą zmniejszenie błędu wyznaczenia pozycji i z tego faktu dość często korzystają producenci odbiorników GPS. Spotyka się bowiem oferty odbiorników mierzących współrzędne z dokładnością metrową lub nawet lepszą. Pomija się przy tym fakt, że prawdopodobieństwo jej uzyskania zostało zaniżone lub wykorzystano do tego celu specjalne algorytmy, np. wygładzające obserwacje kodowe pomiarem fazowym, czyli technologią PPP. Dokładność wyznaczenia pozycji w pomiarach kodowych jest zdeterminowana również jakością podzespołów elektronicznych odbiornika, a szczególnie stabilnością zegara kwarcowego stanowiącego wzorzec częstotliwości.

Innym elementem wpływającym na dokładność jest sposób śledzenia satelitów GPS, który może być sekwencyjny lub równoległy. Sposób sekwencyjny stosowany jest w najprostszycy odbiornikach (turystycznych, nawigacyjnych itp.). Przez określony interwał czasu odbiornik śledzi sygnały jednego satelity, po czym przełącza się na kolejnego satelity, a proces powtarzany jest aż do zakończenia obserwacji. Zaletą takiego rozwiązania jest niewielki koszt odbiornika, a wadą – mała dokładność wyznaczonych współrzędnych.

Sposób równoległy jest znacznie droższy, ale gwarantuje śledzenie wszystkich dostępnych satelitów na sferze niebieskiej, co wpływa na zwiększenie dokładności. Rozwiązanie równoległe to nic innego, jak połączenie w jednym odbiorniku kilkunastu niezależnych kanałów odbiorczych, z których każdy śledzi jedną częstotliwość. Jeśli posiadamy na przykład odbiornik dwuczęstotliwościowy 24-kanałowy, oznacza to, że może on śledzić jednocześnie 12 satelitów na dwóch częstotliwościach.

Ze względu na niewielką dokładność pomiaru kodowe nie są stosowane w geodezji.

Na szczęście niektóre odbiorniki dwuczęstotliwościowe, a coraz częściej także jedno-częstotliwościowe klasy GIS mogą mierzyć i rejestrować surową fazę fali nośnej, której detekcję można prowadzić z rozdzielczością 1%, czyli, biorąc pod uwagę długość fal stosowanych w GPS (19 i 24 cm), pomiar pseudoodległości w pomiarze fazowym można zrealizować z dokładnością na poziomie 1-3 mm! Proces korelacji wygląda analogicznie do pomiaru kodowego, z tą różnicą, że pod uwagę brane są przebiegi fali nośnej wygenerowanej przez satelitę i odbiornik. Mierzone jest, ile długości fali (całkowitych plus przesunięcie fazowe) zmieści się między antenami satelity i odbiornika. Metody fazowe pomiarów wymagają bardzo dokładnych zegarów w odbiornikach i specjalnych technik przetwarzania sygnałów, stąd ich wysoka cena.

Problemem metody fazowej jest brak informacji o całkowitej liczbie cykli fazowych (odległości odbiornik-satelita), rejestrowany jest tylko przyrost fazy fali nośnej od momentu rozpoczęcia śledzenia satelitów przez odbiornik. Dlatego metodę tę stosuje się głównie w pomiarach względnych (różnicowych) – realizowanych przez dwa odbiorniki wyposażone w oprogramowanie umożliwiające wyznaczenie nieoznaczoności fazy (liczba całkowitych cykli fazy w momencie inicjalizacji). Tego typu rozwiązania mogą być stosowane zarówno w czasie rzeczywistym, jak i w post-processingu (metoda wykonania opracowania pomiarów po zakończeniu obserwacji).

● SYSTEMY WSPOMAGAJĄCE

GPS nie może być bezpośrednio stosowany do pomiarów geodezyjnych z uwagi na zbyt małą dokładność pomiarową, szacowaną na poziomie kilku metrów. Innym czynnikiem wpływającym ujemnie na niezawodność działania systemu jest brak zdolności

natychmiastowego ostrzeżenia użytkownika o niewłaściwym funkcjonowaniu (*integrity*). Jest to jeden z podstawowych warunków, szczególnie dla lotnictwa, których nie spełnia żaden z pracujących systemów satelitarnych. Wprawdzie sygnały poszczególnych satelitów systemu GPS czy GLONASS zawierają informację o poprawności ich działania (*satellite health*), ale użytkownik nie jest informowany o poprawności działania całego systemu i ostrzegany, że w danym momencie może on dawać niewiarygodne wyniki.

Spełnienie warunku *integrity* jest bardzo trudne i stosuje się zasadniczo dwie metody wspomaganie. Metoda wewnętrzna, nazywana RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring), polega na wykorzystaniu pomiarów wykonanych przy użyciu nadliczbowych satelitów, ale przy obecnych rozwiązaniach nie daje ona pewnych wyników. Alternatywą są metody zewnętrzne, polegające na kontroli w czasie rzeczywistym sygnału systemu poprzez specjalną sieć stacji naziemnych. Dodatkowym kanałem (*GPS integrity channel GIC*) wysyłany jest do użytkownika GPS niezależny sygnał zawierający informacje *integrity*. Do jego transmisji najczęściej wykorzystuje się naziemne sieci teleinformatyczne lub satelity geostacjonarne, np. Inmarsat.

Najczęściej spotykanym rodzajem wspomaganie zewnętrznego w geodezji i kartografii, zwiększającego dokładność oraz niezawodność, są systemy różnicowe DGPS i RTK, których idea jest synchroniczne wykorzystanie obserwacji z co najmniej dwóch odbiorników danego systemu. Skuteczność systemu różnicowego

ulega pogorszeniu, gdy stacja bazowa i odbiornik ruchomy korzystają z różnych satelitów. W takim przypadku błędy niektórych pomiarów w odbiorniku ruchomym nie są kompensowane. Sytuacja taka z reguły występuje przy bardzo dużej odległości stacji referencyjnej od odbiornika ruchomego. Innym problemem jest różnica czasu między wyznaczeniem poprawki różnicowej na stacji referencyjnej i jej odbiorem przez odbiornik ruchomy, która nie powinna przekraczać 1,5 s.

Rozwiązania techniczne wspomnianych problemów prowadzą do różnych koncepcji systemów wspomaganie różnicowego, które podzielić można na naziemne GBAS (Ground Based Augmenting Systems) oraz satelitarne SBAS (Satellite Based Augmenting Systems). W rozwiązaniach satelitarnych poprawki do odbiorników ruchomych transmitowane są za pośrednictwem satelitów geostacjonarnych, co pozwala obecnie uzyskać dokładności wyznaczonych współrzędnych w zakresie od 0,5 do 1 m (np. EGNOS). W systemach naziemnych (przydatnych w zastosowaniach geodezyjnych) odbiornik odbiera poprawki od nadajnika umieszczonego na powierzchni Ziemi, dając dokładności na poziomie od

kilku do kilkunastu centymetrów.

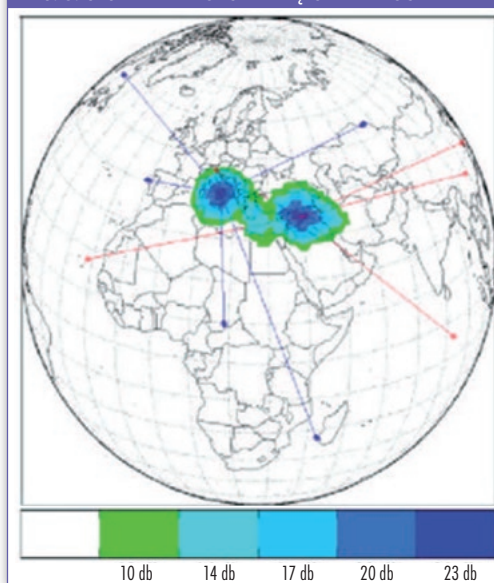
● GBAS

Naziemne systemy wspomaganie GBAS wykorzystują różnicowe obserwacje kodowe (DGPS) i/lub fazowe (RTK). Z uwagi na zasięg wyznaczania i dystrybucji poprawek różnicowych można wyróżnić kilka wersji tzw. sieciowych DGPS: lokalny (Local Area DGPS – LADGPS), wielkoobszarowy (Wide Area DGPS – WADGPS) oraz globalny (Global DGPS – GDGPS). W wersji lokalnego DGPS poprawki docierają z najbliższej stacji, a w wersji rozszerzonej – jako średnia ważona poprawek z kilku stacji referencyjnych.

Spośród kilku rozwiązań GBAS najbardziej rozwijana jest wersja wielkoobszarowa WADGPS. System w tym wydaniu tworzy sieć stacji referencyjnych, które są koordynowane przez stację kontrolną. Każda stacja referencyjna wyznacza poprawki pseudoodległości do wszystkich widocznych satelitów w danym momencie i przesyła je łącznie telekomunikacyjnymi do stacji głównej. Stacja ta, wykorzystując odpowiednie algorytmy uwzględniające aktualny stan jonosfery i troposfery, oblicza wektor poprawek błędami efemeryd, błędami zegara każdego satelity oraz parametrami opóźnień jonosferycznych i troposferycznych, a następnie przekazuje je wszystkim użytkownikom w obszarze objętym przez sieć. W najbliższej przyszłości w systemie WADGPS oczekiwane jest osiągnięcie decymetrowych dokładności.

Alternatywnym rozwiązaniem są naziemne systemy stacji referencyjnych wykorzystujące różnicowe obserwacje kodowo-fazowe realizujące pomiary RTK (Real Time Kinematic – pomiar kinematyczny w

RYS. 3. GPS III – WYBIÓRCZE ZWIĘKSZANIE MOCY



czasie rzeczywistym). Pozycja w tej metodzie poprawiona jest na podstawie danych z innego odbiornika o ściśle określonej pozycji (referencyjnego). Poprawki wyliczane są do pomierzonych pseudoodległości na stacji referencyjnej. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość wyznaczenia różnic odległości z dokładnością 0,02 cyklu mierzonej fazy (czyli pojedynczych milimetrów), a metoda ze względu na wysoką dokładność pomiaru (na poziomie pojedynczych centymetrów) jest obecnie najczęściej stosowana na świecie. Dokładność pomiaru w metodzie RTK uzależniona jest od sposobu wyznaczania poprawek różnicowych, które zawierają poprawione błędy: centrów fazowych anten, efermyd, refrakcji troposferycznej i jonosferycznej.

Obecnie istnieje kilka sposobów wyznaczania poprawek RTK. Najprostszą i jednocześnie najstarszą metodą jest wyznaczenie ich z pojedynczej stacji referencyjnej. Wadą takiego podejścia jest konieczność zachowania odległości pomiędzy odbiornikami – referencyjnym i ruchomym, ponieważ słabo w tym rozwiązaniu jest eliminowany wpływ refrakcji jonosferycznej i troposferycznej. Teoretycznie odległość ta wynosi do 25 km, ale w praktyce, w zależności od liczby przeszkód terenowych i mocy zastosowanego radiomodemu, może ograniczyć się do kilkuset metrów!

Czy można ten problem rozwiązać? Oczywiście, pozyskiwanie poprawek z kilku stacji referencyjnych (metoda sieciowa RTK) pozwala na zwiększenie dokładności pomiaru i czasu dla całej sieci lub jej fragmentów pokrywających dany obszar. Przykładowo dla trzech stacji połączonych w sieć możliwe jest modelowanie wpływu błędów refrakcji na całej powierzchni powstałego trójkąta, stąd nazwa: poprawka powierzchniowa. Pomiar wykonany poza tym obszarem może być obciążony dużym błędem, który wzras-

ta wprost proporcjonalnie do odległości. Niewątpliwą zaletą rozwiązania jest możliwość nawet trzykrotnego zmniejszenia niezbędnej liczby stacji referencyjnych w porównaniu z metodą RTK wykorzystującą pojedynczą stację.

• OD FKP DO VRS

Jedną z realizacji pomysłu transmisji do odbiornika ruchomego poprawek powierzchniowych jest rozwiązanie oparte na systemie FKP (Flächen Korrektur Parameter). W myśl tej koncepcji dokładność wyznaczenia pozycji odbiornika ruchomego jest funkcją jego położenia na obszarze obejmowanym przez sieć. Odbiornik w terenie otrzymuje i oblicza swoją pozycję na podstawie informacji o błędach mających wpływ na wyznaczenie pseudoodległości satelita-odbiornik. FKP odnoszą się do powierzchni równoległej do elipsoidy WGS-84, na wysokości stacji referencyjnej i są wyrażone przez prosty model matematyczny – płaszczyznę. Rozwiązanie FKP nie jest doskonałe, założony liniowy model refrakcji jonosferycznej nie pozwala na osiągnięcie zadowalających dokładności i niezawodności. Dodatkowym mankamentem jest fakt, że w wersjach formatu RTCM starszych niż 2.3 możliwe jest pozyskanie danych jedynie z dwóch stacji referencyjnych, co znacznie zawęża możliwość implementacji poprawek powierzchniowych.

W poszukiwaniu rozwiązań problemów występujących przy realizacji metody FKP powstała metoda VRS – Virtual Reference Station (Wirtualna Stacja Referencyjna). W ogólnym zarysie koncepcja polega na wygenerowaniu na podstawie danych z sieci stacji referencyjnych poprawek dla wirtualnej stacji w pobliżu odbiornika ruchomego (identyfikowanej przez współrzędne bezwzględne), z reguły w odległości nieprzekraczającej 10 m. Metoda VRS wykorzystuje sieć stacji referencyjnych

połączonych – poprzez dowolny moduł wymiany danych – z centrum kontrolnym, które w czasie rzeczywistym zbiera informacje nadchodzące z sieci i na ich podstawie generuje poprawki powierzchniowe dla danego obszaru (Regional Area Corrections). W momencie przesunięcia odbiornika poza obszar wyznaczonej poprawki, automatycznie generowany jest nowy zestaw poprawek z jednoczesną transmisją informacji o zmianie położenia do centrum zarządzania siecią VRS.

• PLUSY I MINUSY VRS

Proces pomiarowy z wykorzystaniem poprawek VRS przedstawia się następująco. System musi składać się z minimum 3 stacji referencyjnych połączonych z centrum zarządzania poprzez porty komunikacyjne. Odbiornik ruchomy za pośrednictwem wybranego medium transmisyjnego (np. technika GSM) przesyła w standardzie NMEA do centrum swoją przybliżoną pozycję. Standard NMEA został wybrany dlatego, że posiada go praktycznie każdy odbiornik GPS. Centrum zarządzające po otrzymaniu informacji o położeniu odbiornika, wysyła poprawki w formacie RTCM. Odbiornik przetwarza dane, koryguje pozycję, po czym ponownie przesyła dane o nowym położeniu do centrum. Wszystkie poprawki są wyznaczane dla przesłanej przybliżonej pozycji (wirtualnej), a odbiornik ruchomy korzysta z nich tak, jak z rzeczywistej stacji referencyjnej. Rozwiązanie takie pozwala na zwiększenie odległości między stacjami rzeczywistymi nawet do 70 km. Pozostaje jeszcze do wyjaśnienia, co się dzieje w centrum zarządzania i jak wyznaczane są poprawki.

Oprogramowanie VRS w centrum zarządzającym ma za zadanie wyznaczyć model wpływu warunków atmosferycznych (jonosfery i troposfery) na wielkości błędów położenia odbiornika ruchomego.

Dla wyznaczenia refrakcji troposferycznej każdego punktu wirtualnego (VRS) wykorzystywany jest zmodyfikowany model Hopfielda. Ale odbiornik może śledzić sygnał satelity pod innym kątem i azimuthem niż otaczające go stacje referencyjne, a także może znajdować się na innej wysokości niż stacje referencyjne, z czym mamy do czynienia w obszarach górskich. Konieczne jest zatem tworzenie nie tylko poprawek ze względu na geometrię, ale również różnice w charakterystyce troposfery pomiędzy poszczególnymi stacjami referencyjnymi i VRS. Uzyskuje się w ten sposób błędy mniejsze o ok. 40% w stosunku do RTK z pojedynczą stacją referencyjną.

Poprawki uwzględniają również model jonosfery (tzw. model pojedynczej warstwy) wyznaczany na podstawie kombinacji liniowej dwuczęstościowych obserwacji fazowych GPS (L1 i L2). Pozwala to na natychmiastowe wprowadzanie poprawek do odbiornika, nawet przy tzw. zimnym starcie. Liczne testy wskazują na podwójny spadek wpływu błędów refrakcji jonosferycznej w stosunku do rozwiązań klasycznych RTK.

Minusem metody VRS jest konieczność dwukierunkowej transmisji danych między odbiornikiem ruchomym a stacją referencyjną. Przesyłanie informacji o przybliżonym położeniu odbiornika odbywa się za pomocą telefonii komórkowej. Zwiększa to koszty dla odbiorcy końcowego, o ile odbiornik wymaga reinicjalizacji ze względu na zmianę stanowiska pomiarowego. Poza tym w etapie końcowym metody VRS pozycja odbiornika obliczana jest na podstawie pojedynczej linii bazowej o małej długości. Rozwiązanie to zmniejsza możliwości monitorowania dokładności i integralności rozwiązania. Kolejnym mankamentem jest ograniczenie pomiaru tylko do obszaru objętego rzeczywistymi stacjami referencyjnymi.

● MASTER-AUXILIARY

Nowszym rozwiązaniem w technologiach sieciowych RTK jest koncepcja Master-Auxiliary, eliminująca niedogodność metody VRS związaną z wyznaczeniem stacji wirtualnej. Idea metody zakłada sprowadzenie obserwacji z sieci stacji referencyjnych na wspólny poziom nieoznaczoności fazy, przy jednoczesnej optymalizacji ilości danych. Osiąga się to przez transmisję pełnej informacji o poprawkach i współrzędnych do centrum zarządzania. Pozostałe stacje otrzymują różnice tych wielkości. Oprogramowanie wewnętrzne odbiornika ruchomego, który odbiera te informacje, jest w stanie interpolować wielkość błędu niezależnie od swego położenia w sieci.

Ideę pomiaru można sprowadzić do trzech podstawowych kroków. Pierwszy obejmuje wyznaczenie nieoznaczoności fazy na podstawie obserwacji przesyłanych do centrum obliczeniowego (zarządzania). Głównym celem jest sprowadzenie obserwacji fazowych do wspólnego poziomu nieoznaczoności, tak aby po utworzeniu podwójnych różnic z podstawowych obserwacji fazowych wszystkie nieoznaczoności zostały wyeliminowane. Szczególnie ważne na tym etapie jest uwzględnienie modelu jonosfery, którego brak utrudnia wyznaczenie nieoznaczoności.

W drugim etapie budowany jest model poprawek dla obszaru sieci na podstawie zebranych i przetworzonych informacji. Model musi uwzględniać wpływ błędów pomiarowych w zależności od położenia odbiornika ruchomego na obszarze całej sieci. Chodzi głównie o skompensowanie błędów opóźnienia troposferycznego, które rosną wprost proporcjonalnie do odległości między odbiornikiem ruchomym a stacją referencyjną. Wpływy refrakcji jonosferycznej i błędów efemeryd są rozpatrywane niezależnie dla każdego satelity, na-

tomiast błędy pochodzące od refrakcji troposferycznej mogą być wyznaczane dla każdej stacji. Z technicznego punktu widzenia błędy dzielone są na dyspersyjne (jonosfera) oraz niedyspersyjne (troposfera i efemerydy satelitarne). Błędy powodowane refrakcją jonosferyczną zależą od częstotliwości nadawanego sygnału, a szybkość ich zmian jest proporcjonalna do zmian współczynnika TEC (Total Electron Content – całkowita zawartość elektronów swobodnych w jonosferze zależna od stopnia jonizacji).

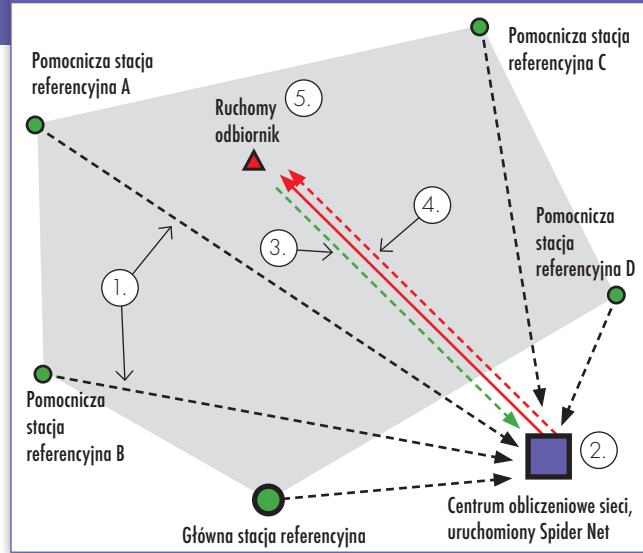
Ostatnim elementem jest transmisja danych o dokładnym położeniu do odbiornika ruchomego. Poprawki dyspersyjne muszą być transmitowane przynajmniej co 10 s, niedyspersyjne – co minutę.

● DOKŁADNOŚCI SUBCENTYMETROWE

Pośród kilku pokazanych metod wyznaczania poprawek powierzchniowych RTK niektóre są powszechnie stosowane na świecie już nawet od kilku lat (FKP), inne zaś – dopiero testowane i wdrażane do praktyki. Co pozwalają one osiągnąć? Odpowiedź można sformułować różnie, ale zawsze będą w niej się przewijać dwa pojęcia – dokładności i niezawodności pomiaru. Poprawki powierzchniowe RTK zwiększają dokładność pomiarów GPS do poziomu kilku centymetrów, ale przede wszystkim podnoszą niezawodność pomiaru, dzięki zastosowaniu

bardzo skomplikowanego systemu ich generowania i kontroli. I jeszcze jedna wspólna cecha: wszystkie mogą być rozwijane z wykorzystaniem naziemnych stacji referencyjnych, które mają bardzo precyzyjnie wyznaczone współrzędne, na ogół z dokładnością na poziomie poniżej 1 cm.

Czy jest w ogóle możliwe osiąganie subcentymetrowych dokładności pomiarów GPS? Zdecydowanie tak, ale wymaga to budowy na stacji specjalnej stabilizacji, która musi być poprzedzona badaniami geologicznymi. Zalecenia te dotyczą stacji permanentnych, które pretendują do klasy punktów referencyjnych sieci globalnych czy kontynentalnych. W Polsce taka stacja znajduje się w obserwatorium Centrum Badań Kosmicznych w Borowcu k. Poznania. Stacje budowane na adaptowanych dachach budynków czy w niesprawdzonych lokalizacjach mogą być stacjami referencyjnymi, ale dokładność wyznaczenia ich współrzędnych będzie uzależniona od stabilności posadowienia anteny. Tym bardziej że mogą na nich zachodzić wahania okresowe, które są wynikiem np. zmian środowiskowych. Przykładem może być punkt umiejscowiony po czeskiej stronie Śnieżki, który charakteryzuje się okresowymi wahaniami wysokości skorelowanymi z intensywnością opadów śniegu. Podobne zmiany współrzędnych można zauważyć również na niektórych stacjach



Generowanie poprawek przebiega w następujących etapach:

1. Pomocnicze stacje referencyjne transmitują surowe dane obserwacyjne do centrum obliczeniowego sieci.
2. Następuje obliczenie nieoznaczoności i redukcja na wspólny poziom odniesienia.
3. Opcjonalnie istnieje możliwość wystania informacji o pozycji odbiornika ruchomego w formacie NMEA, co pozwala na optymalny dobór geometrii stacji referencyjnych.
4. Transmisja komunikatu sieciowego RTCM zawierającego poprawki dla stacji głównej i różnice poprawek dla stacji pomocniczych. Stacją główną nie musi być ta, która jest położona najbliżej odbiornika, ponieważ jej zadaniem jest wyłącznie przesłanie poprawek.
5. Obliczenie poprawionej pozycji odbiornika ruchomego na podstawie pełnej informacji z całej sieci.

referencyjnych umiejscowionych na dachach budynków, ale zależy to od konstrukcji i użytych materiałów.

Wyznaczając współrzędne z dokładnościami subcentymetrowymi, nie możemy zapomnieć o dokładności definicji samego układu odniesienia, w jakim wykonujemy pomiar. Prowadząc pomiary GPS czy GNSS nawet na niewielkim obszarze, wykorzystujemy system globalny, który jest obciążony wieloma błędami o charakterze globalnym, regionalnym i lokalnym, a ich pominięcie wpływa na zwiększenie błędu pomiaru. Zagadnienia te są bardzo trudne pod względem pojęciowym i aplikacyjnym i do dzisiaj ostatecznie nierozwiązane.

Pamiętajmy też, że wymienione dokładności są zawsze wyznaczone dla określonego poziomu ufności, np. 95%, co oznacza, że aż 5% pomiarów może przekroczyć zakładany poziom dokładności. Mierząc 200 punktów techniką RTK, geodeta może uzyskać nawet 10 wyznaczeń błędnych! Nie dziwi więc, że przy dynamicznie wzrastającej sprzedaży odbiorników GPS różnych klas coraz częściej zdarzają się przypadki zgubienia drogi np. przez kierowców wierzących ślepo w nawigację satelitarną.

DR HAB. INŻ. MARIUSZ FIGURSKI
(profesor WAT,
prodziekan ds. naukowych
Wydziału Inżynierii Lądowej
i Geodezji)