



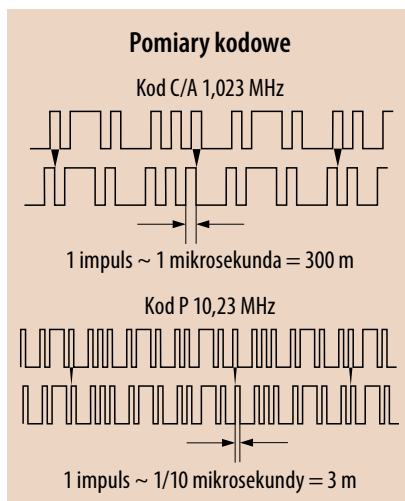
Satelitarny system wyznaczania pozycji w geodezji i nawigacji, cz. II

Dwa sposoby pomiaru GPS

Miesiąc temu rozpoczęliśmy w NAWI cykl publikacji poświęcony technologii GPS. W tym numerze zajmiemy się zasadą określenia położenia punktów. Pomiar satelitarny GPS polega na wyznaczeniu odległości od odbiornika satelitarne do satelity. Można go wykonać metodą kodową (pomiar pseudoodległości) albo metodą fazową (pomiar fazowy).

JANUSZ ŚLEDZIŃSKI

Emisja kodu. W pomiarze kodowym (rys. 1) wykorzystuje się fakt, że satelita emituje kod (C/A lub P), a odbiornik wytwarza identyczny w tych samych określonych momentach czasu. Kod, który z sygnałem satelitarnym dociera do instrumentu, jest przesunięty względem kodu wytwarzanego w odbiorniku (tzw. *replica code*) o czas przebiegu sygnału z satelity do anteny. W odbiorniku następuje ponowne przesunięcie obu kodów wzglę-



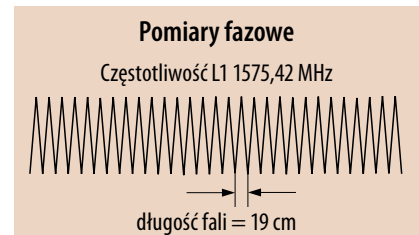
Rys. 1. Dokładność pomiarów kodowych dla kodu C/A wynosi 3 m, dla kodu P – 30 cm (przyjmuje się, że możliwa do osiągnięcia dokładność to 1% długości impulsu)

dem siebie aż do uzyskania korelacji. Pomierzony w ten sposób czas pomnożony przez prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych jest równy mierzonej odległości Ziemia–satelita.

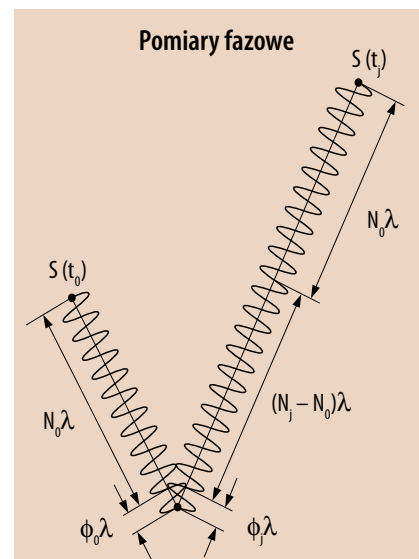
Sposób pomiaru kodowego nazywany bywa również sposobem pomiaru pseudoodległości. Czemu taką właśnie nazwę przyjęto dla tego sposobu pomiaru? Rozważmy podobieństwa i różnice pomiędzy sposobem satelitarnego pomiaru kodowego odległości a pomiarem naziemnym za pomocą, na przykład, dalmierza laserowego. W technice tradycyjnej do zmierzenia dystansu między dwoma punktami na jednym ustawiamy dalmierz, na drugim zaś lustro. Podczas pomiaru wysłany z dalmierza sygnał po odbiciu od lustra zostaje zarejestrowany w tym samym narzędziu, które emituje sygnał. W ten sposób mierzymy podwójną odległość pomiędzy punktami. W przypadku pomiaru Ziemia–satelita sygnał kodowy jest wysłany przez satelitę i odbierany przez instrument, a następnie porównywany z sygnałem *replica code*. Technika taka ma sens tylko wtedy, gdy zegary satelity i odbiornika na Ziemi są dokładnie zsynchronizowane. Przyjęto, że taki pomiar (jednostronny!) Ziemia–satelita obciążony w dużym stopniu wpływem błędów niesynchronizacji zegarów na satelicie i w odbiorniku nazywany będzie – dla odróżnienia od pomiaru naziemnego, wolnego od tego wpływu – pomiarem pseudoodległości.

Fazowa metoda. Druga ze wspomnianych metod pomiaru odległości do satelity, czyli metoda fazowa (rys. 2), polega na pomiarze fazy sygnału dochodzącego do odbiornika. Wyznaczana odległość d wyrażana jest w tej metodzie poprzez pewną całkowitą liczbę N pełnych znanych długości fali mieszczącą się w mierzonej odległości plus „końcówka”, czyli część pełnej długości fali (faza ϕ pomnożona przez długość fali λ), co można zapisać wzorem:
$$d = N \lambda + \phi \lambda.$$

Odbiornik GPS łatwo mierzy fazę ϕ , natomiast główną trudnością tej metody jest wyznaczenie całkowitej liczby N pełnych długości fal mieszczących się w mierzonej odległości d . Jest to problem „nieoznaczoności pełnych cykli długości fal”. Liczbę tę należy dla wszystkich technologii GPS, które operują pomiarami fazowymi, wyznaczyć na podstawie specjalnej procedury, tzw. inicjalizacji pomiaru. Jeśli nie ma przerwy w łączności z satelitą, odbiornik może rejestrować także przedstawioną na rys. 3 pełną liczbę różnicy całkowitych długości fal $N_1 - N_0$ od pewnego momentu początkowego t_0 .



Rys. 2. Dokładność pomiarów fazowych wynosi około 1,9 mm (możliwa do osiągnięcia dokładność to 1% długości fali)



Rys. 3. Problem nieoznaczoności pełnych cykli długości fal w metodzie fazowej



Rys. 4. Trysferacja (przestrzenne liniowe wcięcie wstecz) + obserwacja dodatkowa

Geodezyjne i matematyczne aspekty wyznaczania pozycji. System GPS jest tak skonstruowany, aby w każdym punkcie na powierzchni Ziemi można było obserwować przynajmniej 4 satelity, czyli pomierzyć odległości do czterech satelitów, których położenie w przestrzeni znamy. Stąd wnioskujemy, że położenie anteny naszego odbiornika GPS wyznaczymy na podstawie przestrzennego liniowego wcięcia wstecz. Geometrycznie rzecz rozważając, mamy tu do czynienia z metodą „trysferacji”. Wyznaczany punkt (antena odbiornika GPS) leży na przecięciu trzech kul zatoczonych ze znanych w przestrzeni położeń satelitów promieniami równymi pomierzonym odległościom Ziemia–satelita (rys. 4). W zadaniu wyznaczania współrzędnych przestrzennych stanowiska technikami satelitarnymi GPS występują cztery niewiadome, a mianowicie trzy współrzędne X, Y, Z oraz wyraz Δt – oznaczający synchronizację zegara odbiornika do czasu GPS. Stąd wynika potrzeba obserwowania czterech satelitów.

Współrzędne punktów wyznaczamy metodą absolutną (bezwzględną) lub względną. Mając do dyspozycji jeden tylko odbiornik satelitarny GPS, można uzyskać współrzędne stanowiska anteny

w układzie, w którym podawane są orbity satelitów GPS (układ geocentryczny WGS 84 – World Geodetic System) odniesione do początku układu, tj. do środka ciężkości Ziemi. Jest to sposób najmniej dokładny i stosunkowo rzadko stosowany. Dokładność wyznaczenia współrzędnych tym sposobem wynosi co najwyżej kilka metrów. Należy przy tym pamiętać, że metodami geodezji klasycznej wyznaczenie współrzędnych bezwzględnych (odniesionych do środ-

ka ciężkości Ziemi) było możliwe z precyzją co najwyżej kilkuset metrów.

Znacznie częściej stosuje się sposoby względnego wyznaczania współrzędnych. W tym przypadku potrzebne są przynajmniej dwa odbiorniki GPS. W metodach względnych nie otrzymujemy współrzędnych X, Y, Z stanowisk, lecz różnice współrzędnych ΔX , ΔY , ΔZ pomiędzy wszystkimi punktami satelitarnymi uczestniczącymi w pomiarze. Dokładność takiego sposobu jest znacznie wyższa, ponieważ wiele błędów, którymi obarczone są pomiary satelitarne (błędy szcztkowe refrakcji jonosferycznej i troposferycznej, błędy orbit satelitarnych, szcztkowe błędy niesynchroniczności zegarów itp.) przy wyznaczaniu różnic eliminuje się. Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że standardowa precyzja geodezyjnych pomiarów GPS wynosi 10^{-6} (1 mm na 1 km), co oznacza, że są to technologie „centymetrowe” i „milimetrowe”. Z tą dokładnością można nawiązywać punkty geodezyjne. Możliwe jest uzyskanie jeszcze wyższej dokładności pomiarów geodezyjnych GPS wynoszącej 10^{-7} , a nawet 10^{-8} (1 mm na 10 km lub 100 km), lecz wymaga to wykonywania ciągłych obserwacji satelitarnych i specjalnych zaawansowanych procedur opracowania, a zatem dokładności takie są możliwe do osiągnięcia jedynie między permanentnie pracującymi stacjami-obszerniami satelitarnymi.

Prof. Janusz Śledziński jest pracownikiem naukowym Instytutu Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej

Pomiary odległości do satelity	
Kodowe	Fazowe
dokładność „metrowa”	dokładność „centymetrowa” i „milimetrowa”
jeden pomiar do 4 satelitów pozwala na wyznaczenie położenia punktu w czasie rzeczywistym	wymagana inicjalizacja odbiornika (wyznaczenie pełnej liczby cykli N)
nie jest wymagana inicjalizacja odbiornika	obecnie często stosowana metoda szybkiej inicjalizacji OTF (<i>on-the-fly</i>) wymagająca łącznego wykorzystania pomiarów kodowych i fazowych
metoda wygodna w zastosowaniach nawigacyjnych	

Wyznaczanie położenia punktów	
Wyznaczanie położenia punktu pojedynczego (<i>single point positioning</i>)	Wyznaczanie względnego położenia punktów (<i>relative positioning</i>)
wyznaczanie współrzędnych X, Y, Z	wyznaczanie różnic współrzędnych ΔX , ΔY , ΔZ
niezbędny jeden odbiornik GPS	niezbędne przynajmniej dwa odbiorniki GPS
niska dokładność	możliwa najwyższa dokładność („centymetrowa” i „milimetrowa”)
sposób używany zazwyczaj w technologiach kinematycznych (nawigacji)	stosowane są metody obserwacji kodowych i fazowych
najczęściej przy wykorzystaniu obserwacji kodowych	sposób najczęściej używany we wszystkich pracach geodezyjnych