

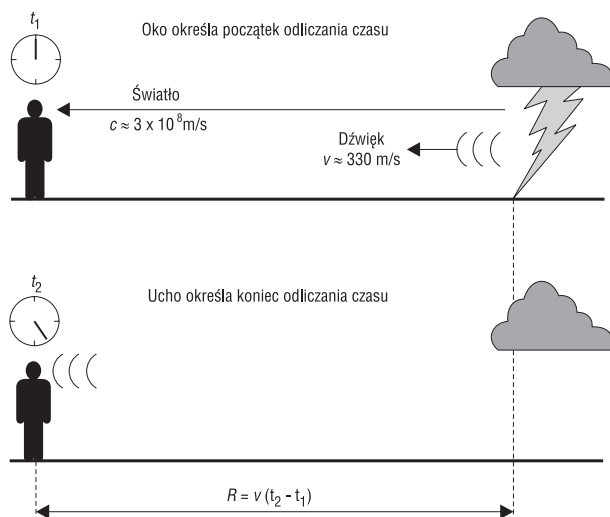
System nawigacji satelitarnej GPS, część 5

Pozycja, prędkość i czas

W poprzedniej części kursu opisano między innymi strukturę sygnałów nadawanych przez satelity systemu GPS. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie sposobu wykorzystania tych sygnałów w odbiornikach GPS należących do segmentu użytkowników. Bez zagłębiania się w szczegóły techniczne dotyczące budowy odbiorników, w bieżącym artykule zostanie omówiona ogólna zasada wyznaczania położenia i prędkości użytkownika oraz określania czasu w systemie NAVSTAR GPS. Przedstawiona zostanie również zasada pozycjonowania w radiotechnicznych systemach nawigacyjnych, którą warto poznać, ponieważ GPS jest jednym z przedstawicieli tej właśnie grupy systemów.

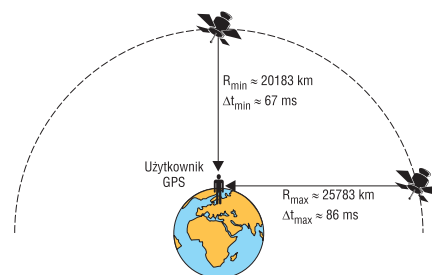
Czas, czyli odległość

Z przedstawionej wcześniej idei działania systemu GPS wynika, że kluczem do obliczenia położenia użytkownika w tym systemie jest wyznaczenie położenia śledzonych satelitów GPS oraz odległości pomiędzy nimi, a odbiornikiem. Omówienie zasady pozycjonowania rozpoczniemy od wy-



Rys. 19. Zasada określania odległości do miejsca uderzenia pioruna

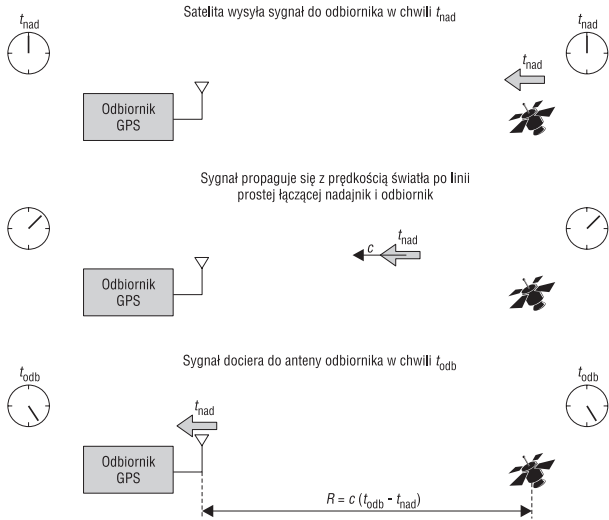
jaśnienia sposobu, w jaki określana jest odległość satelita-odbiornik. Wykorzystywana jest tu metoda podobna do tej, którą zwykle posługujemy się określając odległość do miejsca uderzenia pioruna w czasie burzy. Ocena odległości odbywa się w tym przypadku przez określenie czasu, po jakim dociera do nas dźwięk związany z wyładowaniem atmosferycznym. Pomiar czasu rozpoczyna widok błyskawicy, a kończy dźwięk grzmotu. Jeśli pomnożymy otrzymany odcinek czasu przez prędkość rozchodzenia się dźwięku (około 330 m/s), to otrzymamy poszukiwaną odległość. Na przykład, jeśli od widoku błyskawicy do dźwięku grzmotu upłynęły 3 sekundy, to, oznacza, że uderzenie pioruna miało miejsce około 1 kilometra od obserwatora ($330 \text{ m/s} \cdot 3 \text{ s} = 990 \text{ m} \approx 1 \text{ km}$



Rys. 20. Zależność odległości i czasu propagacji sygnału do odbiornika od położenia satelity GPS

Opisaną zasadę określania odległości wyjaśniono na rys. 19.

Wyznaczanie odległości obserwatora od miejsca uderzenia pioruna jest jednak problemem zdecydowanie prostszym niż obliczanie odległości od odbiornika do nadajnika w systemie GPS, a to ze względu na bardzo dużą prędkość światła, znacznie większą od prędkości dźwięku. Błysk dociera do obserwatora niemal natychmiast, przez co moment rozpoczęcia rozchodzenia się fali dźwiękowej jest dokładnie znany. W systemie GPS do pomiaru odległości od odbiornika do satelity



Rys. 21. Idea określania odległości od satelity do odbiornika GPS

wykorzystuje się pomiar czasu propagacji fali radiowej, a informację o momencie nadania sygnału trzeba uzyskiwać bardziej złożonymi metodami. W zależności od położenia satelity, czas dotarcia jego sygnału do odbiornika wynosi od około 67 ms, kiedy satelita przelatuje dokładnie nad odbiornikiem, do około 86 ms, gdy satelita znajduje się tuż nad horyzontem (rys. 20).

W opisanym wcześniej radiotechnicznym systemie kołowym, moment nadania sygnału przez urządzenie użytkownika był znany, co znacznie upraszczało obliczenie różnicy czasu pomiędzy nadaniem zapytania i odbiorem odpowiedzi z transpondera, a tym samym wyznaczenie odległości między nimi. Urządzenia użytkowników systemu GPS nie wysyłają jednak zapytań, a jedynie odbierają sygnały z satelitów. Moment odbioru sygnału jest więc znany, ale nieznanym jest moment jego nadania. Sprawia to, że wyznaczenie odległości satelita-odbiornik jest zadaniem bardziej skomplikowanym niż w systemie z transponderami. Zalety pasywnego wyznaczania położenia w GPS są jednak ogromne. Przede wszystkim umożliwia ono korzystanie z systemu dowolnej liczbie użytkowników równocześnie, podczas gdy w systemie z transponderami liczba obsługiwanych użytkowników jest ograniczona. Skonstruowanie systemu z nielimitowaną liczbą użytkowników było jednym z założeń konstruktorów systemu GPS. W równej mierze pasywny sposób pozycjonowania wynika z militarnego przeznaczenia systemu, gdzie emitowanie sygnałów przez użytkowników byłoby niepożądane,

ponieważ umożliwiałyby ich łatwe wykrycie. Ponadto nadawanie sygnałów do satelitów wymagałoby stosowania w segmencie użytkowników GPS skomplikowanych i drogich urządzeń nadawczo-odbiorczych, o dużych rozmiarach i znacznym zużyciu energii.

Jak jednak można wyznaczyć odległość na podstawie odebranego sygnału, jeśli nie wiadomo, kiedy został on wysłany? Wyobraźmy sobie sytuację przedstawioną na rys. 21. Załóżmy, że

satelita i odbiornik GPS są wyposażone w bardzo dokładne, idealnie ze sobą zsynchronizowane zegary. Nadajnik GPS umieszczony na satelicie nadaje sygnał, w którym zawarta jest informacja o czasie jego wysłania t_{nad} . Odbiornik po pewnym czasie odbiera nadany sygnał i określa moment jego otrzymania t_{odb} . Jak pokazano na rys. 21, różnica tych czasów pozwala obliczyć poszukiwaną odległość pomiędzy satelitą i odbiornikiem.

Satelitarne „linijki”

W systemie GPS informacja o chwili nadania sygnału z satelity nie jest jednak przekazywana bezpośrednio, jak to przedstawiono na rys. 21. Określenie momentu wysłania sygnału t_{nad} jest możliwe dzięki temu, że każdy satelita nadaje sygnały o skomplikowanej strukturze kodowej, zawierające kody pseudolosowe PRN i depezę nawigacyjną. W cywilnych odbiornikach nawigacyjnych GPS wykorzystywane są tylko sygnały zmodulowane ogólnodostępnym kodem C/A o okresie 1 ms, złożonym z 1023 odcinków kodowych.

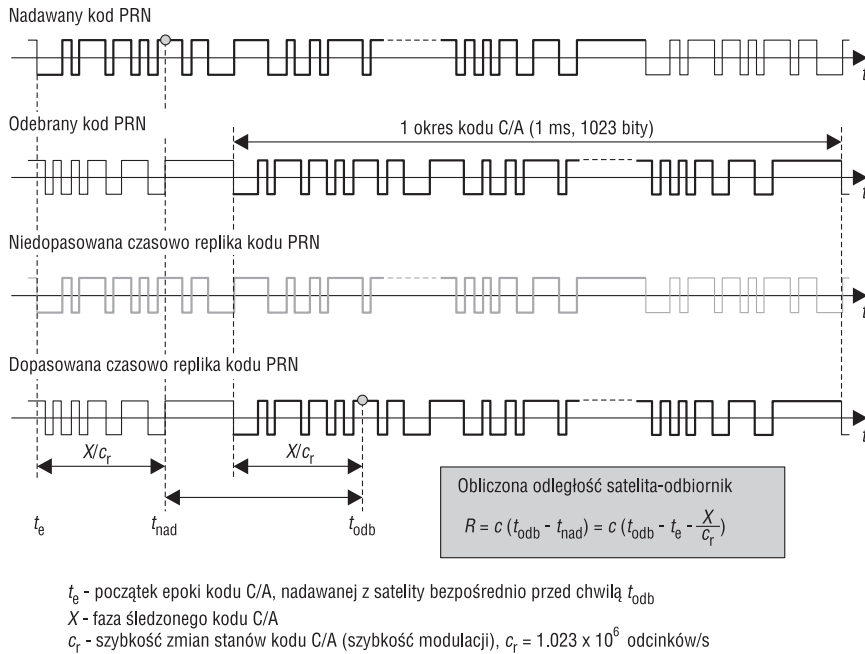
Przez pewien czas pozostał przy założeniu, że zegary satelity i odbiornika GPS są w pełni zsynchronizowane. W praktyce to założenie nie jest spełnione, ale jego tymczasowe przyjęcie ułatwi zrozumienie istoty metody określania odległości od satelity do odbiornika GPS. Jak opisano w poprzednim artykule, kody PRN wszystkich satelitów GPS są unikatowe, okresowe i zsynchronizowane z bardzo dokładnym czasem GPS. Oznacza to, że w odbiorniku można precyzyjnie określić, który

odcinek kodu PRN danego satelity powinien być nadawany w określonej chwili. Ponadto, dzięki temu, że kody pseudolosowe są generowane zgodnie ze znanym algorytmem, mogą być one również wytworzone w odbiorniku GPS.

Odbiornik GPS generuje tzw. repliki, czyli lokalnie odtworzone wersje kodów PRN, dla wszystkich potencjalnie widocznych satelitów, a następnie porównuje odtworzone i odebrane sekwencje kodu. Porównanie polega na stopniowym przesuwaniu w czasie wygenerowanego w odbiorniku odcinka kodu PRN, aż do uzyskania jego wyrównania z kodem odebrany, czyli do momentu uzyskania maksimum współczynnika korelacji. Po wyszukaniu i akwizycji sygnałów od widocznych satelitów, odbiornik GPS przystępuje do śledzenia fazy kodu PRN (numeru odcinka kodu C/A, będącego liczbą rzeczywistą z przedziału od 0 do 1023) oraz fazy fali nośnej każdego z odszukanych sygnałów. Opóźnienie Δt kodu PRN w sygnale odebranym względem kodu PRN sygnału nadawanego z satelity dostarcza informacji o wzajemnej odległości satelita-odbiornik. Zasadę określania czasu przejścia sygnału i odległości od satelity do odbiornika GPS zilustrowano na rys. 22. W przykładzie tym wykorzystano fragmenty kodu PRN o numerze 10.

Określenie całkowitej i ułamkowej liczby odcinków kodu PRN, o którą należy przesunąć kod PRN w odbiorniku, aby uzyskać jego korelację z kodem PRN odebranego sygnału, jest zwykle realizowane za pomocą korelatora w postaci pętli śledzenia opóźnienia DLL (Delay-Locked Loop). Dokładność tej metody jest rzędu 0,1...1 % czasu trwania pojedynczego odcinka kodowego. Czas trwania odcinka kodu C/A wynosi 0,9775 μs , tak więc dokładność korelacji kodu PRN z jego repliką wynosi od około 1 ns do 10 ns. Po pomnożeniu przez prędkość światła prowadzi to do błędu w obliczeniu odległości od około 0,3 m do 3 m. Ten błąd jest jednym ze składników wpływających na całkowity błąd pozycjonowania w systemie GPS.

Obliczanie odległości satelita-odbiornik można obrazowo porównać do wysuwania linijki z satelity w kierunku odbiornika GPS. Podziałkę na tej linijce stanowią odcinki kodu C/A, a odległość jest określa-



Rys. 22. Zasada określania czasu przejścia sygnału od satelity do odbiornika GPS i obliczania odległości satelity-odbiornik

na na podstawie obserwacji, która działa linijski znajduje się w miejscu położenia użytkownika. Odległość pomiędzy sąsiednimi działkami linijski stanowi dystans pokonywany przez sygnał GPS w czasie trwania jednego odcinka kodu C/A. Mnożąc czas trwania odcinka kodu C/A, wynoszący $0,9775 \mu s$, przez prędkość światła $c \approx 3 \times 10^8$ m/s, możemy oszacować długość pojedynczej działki linijski na około 293 m (3×10^8 m/s \times $0,9775 \times 10^{-6}$ s \approx 293 m).

Długość jednej epoki kodu C/A to jednak tylko 1 ms, co po pomnożeniu przez prędkość światła, pozwala oszacować długość całej linijski na około 300 km (3×10^8 m/s \times 10^{-3} s $=$ 3×10^5 m $=$ 300 km). Jak pamiętamy odległość od satelity do znajdującego się w pobliżu Ziemi odbiornika jest jednak znacznie większa i wynosi ponad 20000 km (rys. 20), a więc „linijska” z kodu C/A okazuje się stanowczo za krótka! Mówiąc ściślej, mamy do czynienia z niejednoznacznością pomiaru odległości za pomocą kodu C/A.

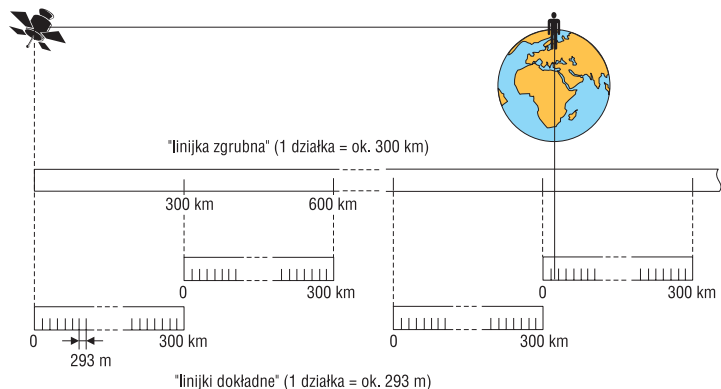
Istnieje kilka sposobów na zapewnienie jednoznacznego pomiaru odległości satelity-odbiornik. Najprostszy sposób polega na inicjalizacji odbiornika GPS poprzez „ręczne” wprowadzenie do niego przybliżonego położenia lub odczytanie ostatniego zapamiętanego położenia z wewnętrznej, podtrzymywanej pamięci. Inny sposób, stosowany jednak tylko w nielicznych odbiornikach specjal-

nych, polega na zgrubnym (z dokładnością rzędu kilkudziesięciu kilometrów) określeniu położenia użytkownika w wyniku obserwacji dopplerowskich przesunięć częstotliwości odbieranych sygnałów.

Powszechnie wykorzystywany jest natomiast sposób eliminacji niejednoznaczności, polegający na wykorzystaniu informacji zawartych w depeszy nawigacyjnej sygnału GPS. W tej metodzie, odbiornik po wyszukaniu, akwizycji i rozpoczęciu śledzenia sygnałów od widocznych satelitów GPS, rozpoczyna poszukiwanie momentów rozpoczęcia bitów depeszy nawigacyjnej. Czas trwania pojedynczego bitu wynosi 20 ms, a więc granice bitów występują co 20 odcinków kodu C/A. Po odnalezieniu granic poszczególnych bitów depeszy nawigacyjnej, czyli osiągnięciu tzw. synchronizacji bitowej, rozpoczyna się demodulacja

depeszy. Zawartość depeszy omówiono w poprzednim artykule. Jak pamiętamy, drugim słowem każdej podramki jest słowo HOW, zawierające dokładny czas nadania następnej podramki. Odbiornik GPS ustala na tej podstawie czas nadania początku każdej podramki i początku epoki kodu C/A, która jej odpowiada. Ponieważ kolejne epoki kodu rozpoczynają się dokładnie co 1 ms, odbiornik zlicza kolejne odebrane epoki kodu uzyskując precyzyjną informację o czasie ich nadania z satelity. Dysponując czasem rozpoczęcia podramki oraz numerem epoki C/A w ramach tej podramki, w odbiorniku można ustalić ile milisekund upłynęło od momentu nadania z satelity początku epoki kodu C/A, która jest aktualnie odbierana przez odbiornik GPS. Wykorzystując tę informację łącznie z informacją o fazie kodu uzyskaną z pętli śledzenia kodu PRN, można nie tylko jednoznacznie, ale również precyzyjnie określić moment nadania dowolnego odebranego fragmentu sygnału GPS.

Wracając do analogii z linijską, wykorzystanie czasu nadania epoki kodu C/A można porównać do wysuwania jeszcze jednej linijski z satelity w kierunku odbiornika GPS. Odległości między działkami tej linijski są bardzo duże i równe pojedynczym epokom kodu C/A, co oznacza czasowo 1 ms, zaś odległościowo około 300 km. Wadą takiej linijski jest bardzo mała rozdzielczość, która uniemożliwiłaby dokładny pomiar odległości, ale jej zaletą jest nieograniczona długość, gwarantująca jednoznaczność tego pomiaru. Obliczenie odległości satelity-odbiornik można porównać do wykonania łącznego odczytu wskaźników z obu „linijskich”, co zilustrowano na rys. 23.

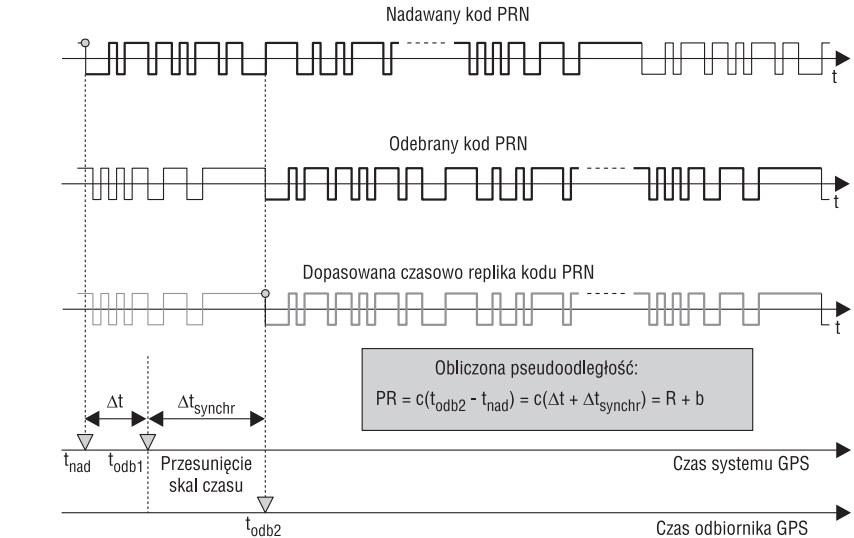


Rys. 23. Poglądowe wyjaśnienie zasady obliczania odległości satelity-odbiornik

Pseudoodległość zamiast odległości

Poważnym problemem w praktycznej realizacji przedstawionej idei wyznaczania odległości satelita–odbiornik jest ograniczona dokładność zegarów. Na pokładzie satelitów GPS są stosowane bardzo dokładne zegary atomowe (cezowe lub rubidowe), a w przyszłości planowane jest stosowanie jeszcze dokładniejszych maserów wodorowych. Ponadto błędy zegarów satelitów GPS są monitorowane i okresowo korygowane przez segment kontrolny systemu GPS. Dodatkowo, poprawki pozwalające na skorygowanie pozostałych błędów zegarów satelitów są przesyłane w pierwszej podramce depeszy nawigacyjnej. W odbiorniku GPS są one stosowane do wyznaczenia precyzyjnego czasu, zwanego czasem GPS. Wszystko to sprawia, że nadawane z satelitów GPS fale nośne i modulujące je kody pseudolosowe oraz bity depeszy nawigacyjnej są ściśle związane czasowo ze wspólną atomową skalą czasu.

Niestety stosowanie zegarów atomowych w odbiornikach nawigacyjnych nie jest na razie możliwe ze względu na ich cenę, rozmiary i duży pobór mocy. W odbiornikach takich stosuje się stosunkowo mało dokładne zegary kwarcowe, co sprawia, że skala czasu, z którą są związane generowane w odbiorniku repliki kodów PRN nie pokrywa się ze skalą czasu systemu GPS. Dokładność zegarów stosowanych w kolejnych generacjach odbiorników GPS ulega jednak stałej poprawie. Trwają też prace nad miniaturyzacją zegarów atomowych, więc może w przyszłości problem niskiej dokładności określania czasu w odbiornikach GPS zostanie rozwiązany. Na razie jednak jest on powszechnym



Rys. 24. Wpływ braku synchronizacji zegara odbiornika z czasem systemu GPS na pomiar odległości satelita–odbiornik

problemem i wymaga specjalnego postępowania, aby wyeliminować jego wpływ na dokładność pomiaru odległości.

Jeśli zegar odbiornika posiada błąd czasu Δt_{synchr} w stosunku do czasu GPS, to obliczona przez odbiornik odległość PR jest równa sumie rzeczywistej odległości R i błędowi odległości b (obciążenia zegara odbiornika) spowodowanego brakiem zgodności skal czasowych zegara odbiornika i systemu GPS:

$$PR = c\Delta t - \Delta t_{synchr} = R + b$$

W praktyce błąd zegara odbiornika Δt_{synchr} może być nawet większy od czasu przejścia sygnału od satelity do odbiornika, a więc składnik b we wzorze może być większy niż składnik R . Jeśli zegar odbiornika się opóźni, to obliczona odległość PR może okazać się nawet ujemna! Jak widać wielkość PR nie ma wiele wspólnego z rzeczywistą odległością satelita–odbiornik R i z tego wzglę-

du jest nazywana pseudoodległością. Problem braku synchronizacji zegara odbiornika z czasem systemu GPS zilustrowano na rys. 24. Określony w odbiorniku moment nadania fragmentu sygnału t_{nad} jest zgodny z dokładnym czasem GPS. Moment odbioru w skali czasu GPS został oznaczony jako t_{odb1} . Ze względu na brak zgodności skal czasu systemu i odbiornika, odbiornik określa moment odbioru jako t_{odb2} , co następnie prowadzi do dużego błędnie obliczonej odległości satelita–odbiornik.

Mogłoby się wydawać, że pomiar, którego błąd może być większy niż sama mierzona wielkość jest całkiem bezużyteczny. Okazuje się jednak, że odbiornik GPS dość łatwo radzi sobie z błędem synchronizacji zegara i na podstawie pseudoodległości jest w stanie określić położenie użytkownika.

Piotr Kaniewski
 pkaniewski@wat.edu.pl

MONTAŻ SMT

- na paście
- na kleju

PROGRAMOWANIE KONSTRUOWANIE

- sterowników na bazie mikrokontrolerów 8-bitowych, 16-bitowych, 32-bitowych

PROJEKTOWANIE

- układów elektronicznych
- obwodów drukowanych

PONADTO OFERUJEMY:

- montaż mieszany: przewlekany, SMT
- lutowanie na fali lutowniczej SOLTEC MIDI z podwójną falą typu SMART WAVE

MCD Electronics Sp. z o.o.
 34-300 Zywiec, ul. Leleweła 26
 tel/fax: 33 / 861 60 35
 e-mail: smt@mcd.com.pl
 http://www.mcd.com.pl