Zasada pracy różnicowego GPS - DGPS

dr inż. Paweł Zalewski

Sformułowanie problemu

W systemie GPS wykorzystywane są sygnały pomiaru czasu (timing signals) przynajmniej z trzech satelitów w celu ustalenia pozycji, przy czym każdy z tych sygnałów obarczony jest indywidualnym zestawem błędów.

Moment startu sygnału może być przesunięty w wyniku niedokładności zegarów satelitarnych oraz różnicy pomiędzy teoretycznym a rzeczywistym położeniem satelity na orbicie.

Następnie podczas podróży w kierunku Ziemi sygnał ulega refrakcji w atmosferze (ionosphere and troposphere delays) i odbiciom od obiektów znajdujących się w pobliżu anteny odbiornika (tzw. wielotorowość sygnału - multipath).

Występujące błędy, poza wielotorowością, mogą zostać skorygowane w wyniku zastosowania techniki różnicowej (differential technique).

Sformułowanie problemu

Sformułowanie problemu

Źródła błędów w systemie GPS:

Sformułowanie problemu

Rozwiązanie problemu

Różnicowy GPS oparty jest na koncepcji występowania takich samych lub prawie takich samych błędów pomiaru w pewnym obszarze dookoła pozycji odniesienia (referencyjnej).

Jeżeli dwa odbiorniki znajdują się na powierzchni Ziemi, w odległości kilkuset kilometrów od siebie, to docierające do nich sygnały satelitarne przechodzą przez praktycznie ten sam rejon atmosfery i obarczone są tymi samymi błędami propagacji. Poza błędami wielotorowości i szumami własnymi (receiver's noise) pozostałe wartości błędów będą wspólne dla obu odbiorników.

W takiej sytuacji jeden z odbiorników może zostać użyty do pomiaru wartości błędów, a następnie do przekazania ich drugiemu odbiornikowi.

Komponenty systemu DGPS

- stacja referencyjna (stacja odniesienia lub różnicowa - reference station)
- stacja ruchoma (odbiornik użytkownika - rover, mobile station)
- łącze transmisji danych (data link)

Stacja referencyjna

W różnicowym GPS jeden z odbiorników umieszczony zostaje w punkcie geodezyjnym - o dokładnie wyznaczonej pozycji 3D.

W takiej stacji referencyjnej na podstawie znajomości położeń satelitów na orbicie i znajomości swojej pozycji wyznaczona zostaje teoretyczna odległość pomiędzy anteną stacji a satelitą. Po porównaniu tej odległości z pseudoodległością zmierzoną w rzeczywistości (przez odbiornik GPS), otrzymana różnica stanowi poprawkę różnicową [m].

Stacja referencyjna

W teorii poprawki różnicowe w stacji referencyjnej mogą być wyznaczane na dwa sposoby jako:

- ➔ **błędy pozycji 3D (metoda pojedynczego punktu),**
- ➔ **błędy poszczególnych pseudoodległości (metoda poprawiania indywidualnych odległości do satelitów):**

$$d_B = p_B + \Delta p_A$$

$$d_B = p_B + \Delta p_A + c\Delta t_A + c\Delta t_B + c\Delta t_s$$

Metody te dają analogiczne rezultaty tylko w jednym przypadku - gdy sygnały wykorzystywane do wyznaczenia pozycji pochodzą z tych samych satelitów zarówno w stacji referencyjnej (reference or base station) jak i odbiorniku ruchomym (rover or mobile station)!

Stacja referencyjna

Jest kilka przyczyn, dla których wymieniony warunek w praktyce jest niespełniony:

- ➔ **inne kryterium doboru satelitów w odbiornikach (np. 5 kanałów i 12 kanałów),**
- ➔ **różna geometria satelitów w obu stacjach wynikająca z odległości pomiędzy stacjami, czego rezultatem są różne czasy wschodu i zachodu dla poszczególnych satelitów,**
- ➔ **ukształtowanie terenu blokujące sygnał w pobliżu stacji,**
- ➔ **odbiorniki w obu stacjach niekoniecznie muszą używać wszystkich obserwowanych satelitów do wyznaczenia pozycji.**

Poprawka pseudoodległości

Z tych powodów w stacjach referencyjnych stosuje się drugą metodę generując indywidualne poprawki pseudo-odległościowe dla wszystkich obserwowanych ze stacji satelitów.

Oprócz poprawek różnicowych, obliczane są także szybkości ich zmiany (pierwsza pochodna poprawki), które służą stacji ruchomej do modelowania tendencji zmiany wartości poprawek w czasie, w okresie od wyznaczenia poprawki w stacji referencyjnej do odbioru kolejnej poprawki do tego samego satelity w odbiorniku ruchomym (tzw. wiek poprawki - the age of correction, AOC).

Czyli w odbiorniku ruchomym, do zmierzonej pseudo-odległości dodawana jest z odpowiednim znakiem poprawka zmienna - ekstrapolowana (poprawiana) w czasie!

Poprawka pseudoodległości

W odbiorniku DGPS, w skład którego wchodzą: antena z odbiornikiem GPS oraz odbiornik poprawek różnicowych pracujący na określonym rodzaju łącza radiowego, następuje dodanie sumarycznej poprawki do zmierzonej pseudo-odległości:

$$\Delta p_B(t_1) = \Delta p_A(t_0) + \frac{dp_A(t_1 - t_0)}{dt}$$

gdzie:

$\Delta p_B(t_1)$ **- wartość poprawki do odp. pseudoodległości**

$\Delta p_A(t_0)$ **- wartość poprawki wyzn. w stacji referencyjnej**

$\frac{dp_A(t_1 - t_0)}{dt}$ **- poprawka na szybkość zmiany pseudoodległości**

Stosowanie poprawek

- metoda różnicowania w czasie nierzeczywistym (post-processing) polega na korygowaniu pozycji za pomocą poprawek różnicowych po zakończeniu sesji pomiarowej; wykonywane jest to na podstawie pomiarów zarejestrowanych w stacji odniesienia i w miejscu odbiornika użytkownika (stacji ruchomej) stosując standard rejestracji i transmisji danych określony przez producenta odbiorników i oprogramowania rejestratorów,

- metoda różnicowania w czasie rzeczywistym (real-time), w której korygowanie pomiarów prowadzone jest w czasie rzeczywistym poprzez transmisję poprawek różnicowych do odbiornika użytkownika drogą radiową wykorzystując odpowiedni standard łącza transmisji danych (data link).

Stosowanie poprawek

Real-Time

Post-Processed

Łącze transmisji danych

Idealne łącze powinno przekazywać dane z minimalnym opóźnieniem i bez straty informacji. Praktycznie jest to niemożliwe, a wybór łącza jest kompromisem pomiędzy zasięgiem, szybkością transmisji i kosztami budowy i eksploatacji.

Najistotniejszym z tych kryteriów jest przepustowość łącza (szybkość transmisji), gdyż w zasadniczy sposób wpływa na dokładność określanej pozycji w systemie DGPS. Duża przepustowość umożliwia krótki czas transmisji poprawek, co w efekcie daje krótki interwał ekstrapolacji poprawek.

Przepustowość łącza radiowego jest definiowana jako liczba bitów możliwych do przesłania w czasie jednej sekundy.

Łącze transmisji danych

Ogólnie relację między okresem uaktualniania poprawek różnicowych, długością depeszy i przepustowością łącza można przedstawić następująco:

$$R = \frac{L}{B \times P}$$

gdzie:

R - okres uaktualniania poprawek różnicowych w odbiorniku wyrażony w sekundach;

L - całkowita długość depeszy dotyczącej danego momentu obserwacji satelitarnej wyrażona w bitach;

B - przepustowość łącza transmisyjnego wyrażona w bodach;

P - zakładane prawdopodobieństwo odbioru poprawnej informacji.

Łącze transmisji danych

- Łącze IALA pracujące w zakresie częstotliwości LF: 283.5-325.0kHz (zakres pracy radiolatarń morskich). Maksymalny zasięg radiowy transmisji wynosi około 400km, a maksymalna prędkość transmisji 200 bodów. Propagacja fali przyziemnej narażona jest na wpływ zakłóceń od fali jonosferycznej i atmosferycznych.
- Łącze pracujące w zakresie fal VHF charakteryzujące się zasięgiem horyzontalnym, szybką i stabilną transmisją danych oraz brakiem wpływu zakłóceń atmosferycznych.
- Łącze sieci komórkowych – j. w.
- Łącze pracujące na częstotliwości UHF rzędu 1.5 GHz wykorzystywane przez satelity geostacjonarne systemów WAAS, MSAS, EGNOS, OmniStar, Landstar oraz tzw. pseudolites. Łącze charakteryzuje się dużym zasięgiem i dużą prędkością transmisji danych. Koszty eksploatacji tego typu łącza są bardzo wysokie. Wykorzystuje zwielokrotnienie stacji ref.

Łącze transmisji danych

Ważnym elementem łącza radiowego jest dobór rodzaju modulacji.

W przypadku łącza IALA wykorzystana została modulacja MSK (Minimum Shift Keying) ze względu na to, że wymaga ona najmniejszej szerokości pasma przenoszenia i jednocześnie zapewnia brak interferencji z radiolatarniami pracującymi w pobliżu oraz pracą do celów radionamierzania.

Oprócz odpowiedniego doboru częstotliwości i rodzaju modulacji, czynnikiem warunkującym szybką i bezbłędną transmisję danych jest przyjęcie odpowiedniego formatu ich przesyłania.

Łącze transmisji danych

Dla operatorów systemu DGPS koniecznością stało się stosowanie standardowego formatu depeszy różnicowej. Standard taki został zarekomendowany przez Specjalny Komitet 104 Komisji Radiotechnicznej Służb Morskich (Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM SC-104)) i po raz pierwszy opublikowany w listopadzie 1987r.

Format danych oparto na depeszy nawigacyjnej GPS, stosując ten sam rozmiar i format słowa oraz algorytm wykrywania błędów transmisji EDAC (Error Detection and Correction).

W stosowanej aktualnie wersji 2.0 formatu RTCM SC-104 możliwe jest użycie 64 różnych typów wiadomości różnicowych.

Typy wiadomości różnicowych RTCM

Message Type	*Message Title*
1	DGPS corrections
2	Delta DGPS corrections
3	Reference station parameters
4	Carrier surveying information
5	Constellation health
6	Null frame
7	Marine radiobeacon almanacs
8	Pseudolite almanacs
9	High rate DGPS corrections
10	P code DGPS corrections
11	C/A code L1/L2 delta corrections
12	Pseudolite station parameters
13	Ground transmitter parameters
14	Surveying auxiliary message
15	Ionospheric/tropospheric message
16	Special message
17	Ephemeris almanac
18-59	Undefined (RTK and others)
60-63	Differential Loran C messages

Typy wiadomości różnicowych RTCM

Wiadomość typu 1 zawiera zestaw poprawek pseudoodległości oraz szybkości ich zmian dla wszystkich obserwowanych w stacji referencyjnej satelitów, wydanie danych efemerydalnych (the issue of data ephemeris (IODE)) i wartość błędu UDRE (the user differential range error).

Parametr IODE pozwala stacji ruchomej na zidentyfikowanie satelitarnych danych nawigacyjnych użytych w stacji referencyjnej - jeżeli są one różne od własnych to powinny zostać uwzględnione poprawki Delta (typ 2).

UDRE jest wartością odchylenia standardowego (standard deviation) błędu poprawki różnicowej (differential error) obliczoną w stacji referencyjnej, która może być użyta do oceny jakości wyznaczonej w odbiorniku ruchomym pozycji.

Czynniki warunkujące poprawność odbioru wiadomości różnicowych RTCM

Jakość transmisji poprawek zależy od następujących czynników (pomijając częstotliwość i rodzaj modulacji):

- **czynników propagacyjnych:**
- **propagacja fali radiowej,**
- **przewodność podłoża,**
- **moc nadawcza,**

- **zakłóceń:**
- **zakłócenia atmosferyczne,**
- **zakłócenia elektrostatyczne (nagromadzenie ładunku elektrostatycznego),**
- **zakłócenia przemysłowe (agregaty, spawarki, urządzenia iskrzące).**

Aby odebrać poprawki musi być zachowany wymagany stosunek sygnału stacji referencyjnej do szumu (SNR).

Czynniki warunkujące poprawność odbioru wiadomości różnicowych RTCM

Sygnał z radiolatarni dociera na fali przyziemnej. Natężenie pola elektromagnetycznego fali przyziemnej zależy od mocy nadawczej i przewodności podłoża. Przewodność ziemi jest bardziej zmienna i generalnie mniejsza niż wody morskiej.

Zakłócenia atmosferyczne wpływają na jakość transmisji, a ich natężenie zależy od pory roku i dnia oraz pozycji.

Możliwość odbioru sygnału zależy także od stosunku sygnał/szum w miejscu odbiornika.

Kodowanie informacji w metodzie EDAC pozwala odbierać sygnały przy mniejszych wartościach SNR. Aby jakość odbioru sięgała 99.7% danych przesyłanych w standardzie RTCM, minimalna wartość SNR wynosi 10dB bez kodowania EDAC i 5dB w przypadku stosowania EDAC.

Zwielokrotnienie stacji referencyjnych

Przy jednoczesnym wykorzystaniu kilku stacji referencyjnych (multiple reference station solution) wszystkie odebrane poprawki pseudoodległości mogą być użyte do wyznaczenia pozycji. W tym celu stosowane są cztery metody:

- **centroid approach - na podstawie poprawek pseudo-odległości ze wszystkich stacji referencyjnych wyznaczana jest jedna poprawka dla każdego śledzonego satelity; ta poprawka jest właściwą dla środka obszaru pokrytego przez stacje referencyjne; dodatkowa poprawka kierunkowa (offset) może zostać wyznaczona w wyniku korelacji składowych poprawki centralnej z poprawkami z poszczególnych stacji referencyjnych,**

Zwielokrotnienie stacji referencyjnych

➔ **all-in-view approach – wszystkie poprawki pseudo-odległościowe są przyjmowane do wyznaczenia pozycji bez obróbki wstępnej (za wyjątkiem sprawdzenia ich ważności - wiek!!); dla przykładu poprawka dla satelity PRN 12 może być otrzymana z 4 różnych stacji referencyjnych dając w rezultacie nie jedną a 4 poprawione odległości (linie pozycyjne) do wyznaczenia pozycji,**

➔ **position domain approach – jest metodą polegającą na niezależnym wyznaczeniu pozycji na podstawie rozdzielonych poprawek różnicowych z każdej odbieranej stacji referencyjnej; wypadkowa pozycja jest rezultatem średniej ważonej wszystkich wyznaczonych pozycji,**

Zwielokrotnienie stacji referencyjnych

- **wide area DGPS (WADGPS) - w tej metodzie nie wykorzystuje się już koncepcji jednej poprawki do danej pseudoodległości, może ona zapewnić dokładności rzędu 5m (95%) na obszarach kilku tysięcy kilometrów.**
  Obserwacje z sieci stacji referencyjnych zbierane są w serwerze, którego zadaniem jest rozbicie błędów pseudoodległości na ich poszczególne składowe modelowane w czasie rzeczywistym; poprawki orbitalne, atmosferyczne i zegarów satelitarnych dla każdego satelity są następnie cyklicznie przesyłane do stacji ruchomej.

Dokładność systemu DGPS

Błąd pseudoodległości w GPS / DGPS przy załączonym SA dla długości linii bazy pomiędzy stacją referencyjną a stacjami ruchomymi równą 500km i wieku poprawek < 5s:

Error Source	Stand-alone [m]	Differential [m]
User Independent		
Satellite clock	15.0	0.1
Ephemeris	40.0	1.0
Orbit	5.0	0.13
Ionosphere	12.0	1.0
Troposphere	3.0	0.5
User Dependent		
Multipath	2.0	2.8
Receiver noise	0.5	0.7
Total root sum squared	44.8	3.3

Podsumowanie