

PNIEWSKI Roman¹
KOWALIK Rafał²

Modulacja AltBOC w sygnałach GNSS i jej wpływ na osiąganą dokładność pozycji obiektów ruchomych

WSTĘP

Systemy GNSS z racji swoich olbrzymich możliwości, znajdują ostatnio coraz to więcej zastosowań w codziennym życiu oraz w aplikacjach stosowanych w środkach transportu. Podczas podróży samochodem lub wycieczki w góry może zastąpić mapę i jak po sznurku doprowadzić do celu. Dzięki satelitom możliwe staje się również szybkie odnalezienie zaginionego bądź ukradzionego pojazdu, zaplanowanie optymalnej trasy podróży. Pomocny może być także w aplikacjach odpowiedzialnych za monitorowanie i sterowanie ruchem drogowym. Jednak, aby te wszystkie funkcje mogły być realizowane przez systemy GNSS uzyskiwana dokładność pozycji musi oscylować w granicach 0,5 metra.

Wiedząc, że systemy nawigacyjne GNSS, aby wyznaczyć położenia obiektu bazują na danych uzyskanych z depechy nawigacyjnej, nadawanej przez satelity oraz informacjach dostarczanych przez systemy łączności bezprzewodowej, moduły INS oraz inne czujniki, w jakie wyposażony jest docelowy obiekt. W przypadku pojazdu drogowego przydatne stają się informacje o aktualnej prędkości pojazdu przekazywane przez czujnik prędkości zamontowany w tym obiekcie.

Odkąd istnieją satelitarne systemy wyznaczania pozycji podjęto ciąg działań mających na celu poprawę uzyskiwanych dokładności przez odbiornik GNSS. Jednym ze stosowanych rozwiązań poprawiających osiąganą dokładność było opracowanie nowej procedury, z której uzyskiwano dane niezbędne do określenia współrzędnych definiujących położenie użytkownika. Wypracowane dwie metody (kodowa i fazowa), choć obciążone są mniejszymi lub większymi błędami są w stanie obliczyć pozycję użytkownika wyposażonego w odbiornik GNSS z dokładnością do 50 metrów. Oba wymienione sposoby są dość obszernie omówione w pozycjach [1], [2], [3].

Mimo, to uzyskana dokładność jest niewystarczająca, aby zapewnić prawidłową pracę większości aplikacji transportowych obecnie zaimplementowanych w odbiornikach GNSS, których głównymi funkcjami jest lokalizacja obiektów oraz automatyczne prowadzenie pojazdu do zadanego celu. Tym samym uzyskanie wysokiej dokładności w technice GNSS wymaga również zastosowania specjalnych procedur obserwacyjnych i obliczeniowych, ponadto na ostateczny wynik wpływ mają również: błędy systemu GNSS, błędy ośrodka i propagacji sygnału GNSS, błędy aparaturowe, błędy wynikające z niewłaściwej geometrii konstelacji satelitów GNSS oraz błędy stosowanych technologii. Błędy te w pewnym stopniu wyeliminowano dzięki uruchomieniu systemów wzmagających obecnie działające systemy GNSS takich jak: EGNOS, WAAS oraz MAAS, które nadają poprawki korygujące w sygnałach GNSS skutki wpływu jonosfery i troposfery [5]. Mimo, iż uzyskiwane wyniki znacznie się poprawiły jednak ze względu na swą niezbyt dużą dokładność zawartą w granicach 30 – 100 metrów nadal nie będzie przydana w kierowaniu ruchem w strefie miejskiej. Z racji tego ciągle trwają prace badawcze mające na celu znaczącą poprawę uzyskiwanych dokładności, a jedną z nich jest modyfikacja sygnału nadawanego przez satelity GNSS, którą jako pierwszy opisał Betz w publikacji [6]. Wprowadzona zmiana w sygnale polega na zastosowaniu dodatkowego kodu zwanego prostokątnym kodem podnośnym, który powoduje rozbieżność widma sygnału na dwie symetryczne części. Taki sposób modulacji sygnałów określono nazwą BOC (n,m). Dodatkowo w późniejszych

¹ Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29. Tel: + 48 48 361-77-28, Fax: + 48 48 361-77-42, r.pniewski@uthrad.pl

² Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29. Tel: + 48 48 361-77-05, 361-77-07, Fax: + 48 48 361-77-42, yaro-82@o2.pl, doktorant

etapach pracy badawczej wprowadzono kolejną modyfikację polegającą na rozdzieleniu kodu podnośnego na dwie części składowe, dzięki czemu otrzymane widma zostały przesunięte na częstotliwość nośną sygnału nawigacyjnego. Metoda ta funkcjonuje pod nazwą AltBOC (n,m), a jej własności i zalety wpływające na uzyskiwane dokładności przedstawiono w dalszej części artykułu.

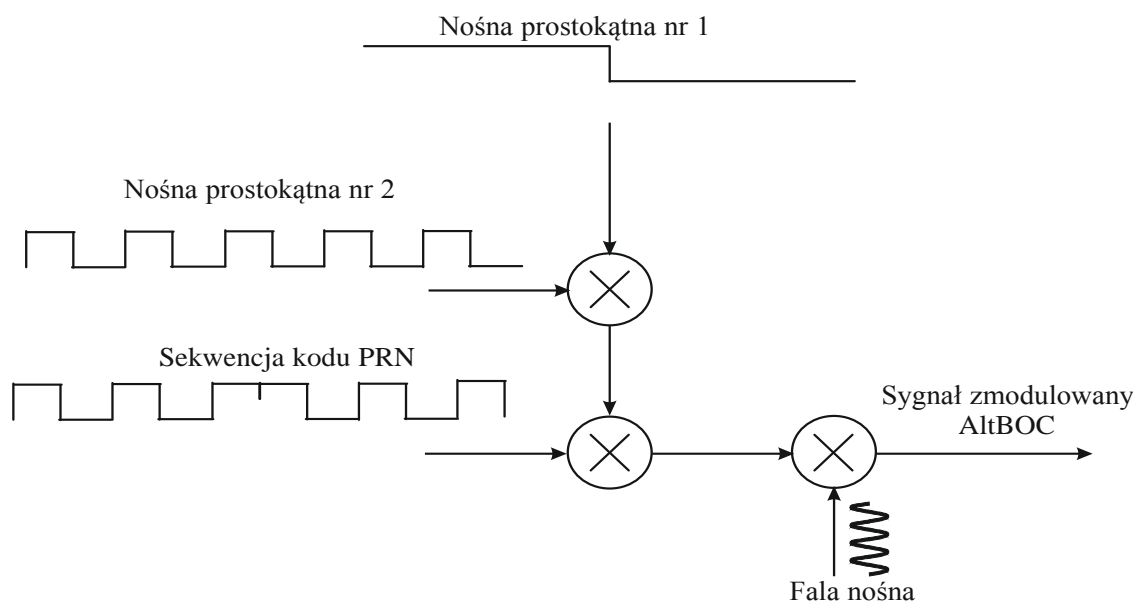
1. KONCEPCJA MODULACJI ALTBOC

W przypadku modulacji AltBOC (m, n) (Alternate BOC) mamy do czynienia z sytuacją, w której nośna prostokątna, w pierwszej kolejności poddawana jest operacji multiplikacji z drugą nośną prostokątną o szybkości nadawania chipów wynoszącej ($n \times 1,023$) MHz. Następnie uzyskany sygnał poddawany jest ponownej multiplikacji (operacja mnożenia) z ciągiem rozpraszającym PRN o częstotliwości ($m \times 1,023$) MHz. Uzyskany w wyniku tych operacji sygnał poddawany jest kolejnej multiplikacji tym razem z falą nośną, na którą nałożono także dane informacyjne. W rezultacie otrzymano sygnał zmodulowany AltBOC, o całkiem odmiennych własnościach niż sygnał BOC(n,m).

W przypadku klasycznej modulacji BOC wynikowe widmo jest rozdzielone na dwie części położone po lewej i prawej stronie częstotliwości nośnej. Z kolei modulacja AltBOC skutkuje tym, że widmo nie jest rozbite na dwie części, lecz po prostu przesunięte w kierunku (na przykład) wyższej częstotliwości; możliwe jest również przesunięcie składowej widma do niższej częstotliwości. W efekcie można wykorzystać „listki boczne” widma sygnału do przenoszenia różnych informacji.

Sposób generowania sygnału zmodulowanego AltBOC przedstawiono na rysunku 1. Zauważyć można, iż zaprezentowana koncepcja podobna jest do idei generowania sygnału BOC, z tym wyjątkiem, że nośna prostokątna reprezentowana jest przez sygnał zespolony.

Proces modulacji realizowany jest, więc po prostu przez mnożenie sekwencji PRN z sygnałem zespolonym nośnej prostokątnej. Otrzymany sygnał AltBOC może, więc składać się dwa lub cztery kody.



Rys. 1 Sposób generowania sygnału AltBOC (n,m) [7]

W systemach nawigacyjnych kody te służą do przenoszenia informacji oraz danych nawigacyjnych. A podzielić je można na dwa rodzaje: *pilot channels* oraz *data channels*.

1.1. Matematyczny model sygnału AltBOC

Matematycznie sygnał zmodulowany AltBOC z wykorzystaniem dwóch kodów zdefiniowano, jako:

$$s_{AltBOC}(t) = c_u(t) \cdot er(t) + c_l(t)er^*(t) \quad (1)$$

gdzie

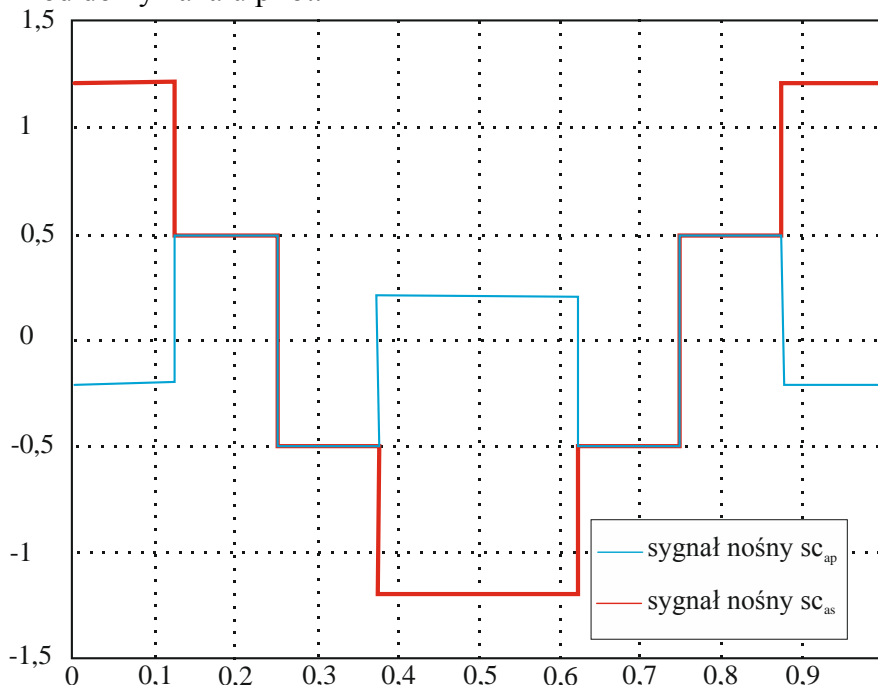
$$er(t) = \text{sign}[\cos(2\pi f_0 t)] + j\text{sign}[\sin(2\pi f_0 t)] = c_r(t) + js_r(t) \quad (2)$$

c_u - górna sekwencja kodu, a c_l - dolna sekwencja kodu.

Dotychczas zakładano, że sekwencja nośna prostokątna rozłożona jest na dwa kody: górny i dolny. W przypadku wprowadzania dodatkowych kodów (cztery) sygnał AltBOC opisuje zależność:

$$s_{AltBOC}(t) = (c_u + jc'_u) \cdot er(t) + (c_l + jc'_l)er^*(t) \quad (3)$$

gdzie c_u - kod górny przenoszący dane nawigacyjne, c'_u - kod górny kanału pilot c_l - kod dolny kanału danych, c'_l - kod dolny kanału pilot.



Rys. 2 Przykładowa realizacja sygnałów nośnych sc_{ap} i sc_{as} [1]

Uzyskany w ten sposób sygnał zmodulowany nie będzie posiadał stałej obwiedni w wyniku nieliniowego wzmocnienia sygnału nadanego z transportera satelity. Efekt ten można złagodzić, wykorzystując zmodyfikowany sygnał zespolony utworzony na podstawie nośnej prostokątnej.

$$s_{AltBOC}(t) = (c_l + jc'_l) \cdot \left[sc_{as}(t) - jsc_{as} \left(t - \frac{T_s}{4} \right) \right] + (c_u + jc'_u) \cdot \left[sc_{as}(t) - jsc_{as} \left(t - \frac{T_s}{4} \right) \right] + (\bar{c}_l + j\bar{c}'_l) \cdot \left[sc_{ap}(t) - jsc_{ap} \left(t - \frac{T_s}{4} \right) \right] + (\bar{c}_u + j\bar{c}'_u) \cdot \left[sc_{ap}(t) - jsc_{ap} \left(t - \frac{T_s}{4} \right) \right] \quad (4)$$

gdzie

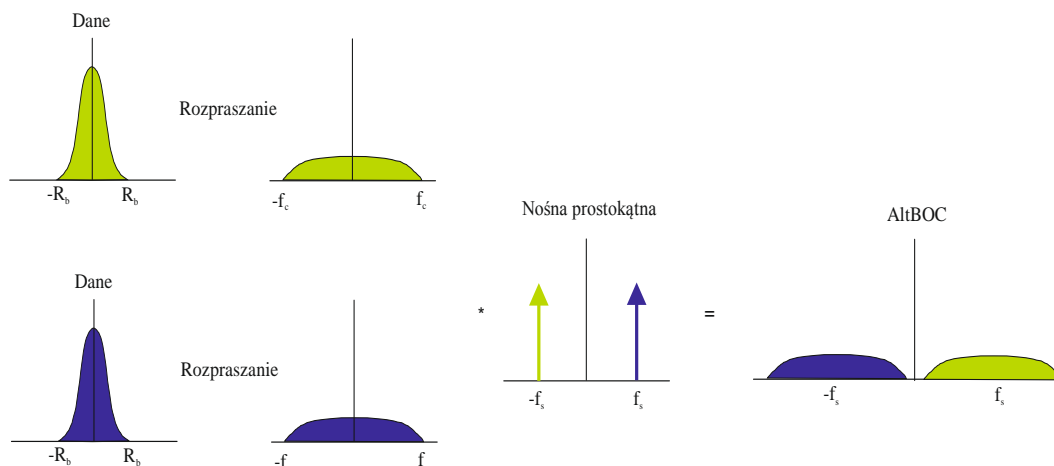
$$\bar{c}_l = c_u c'_u c'_l \quad \bar{c}'_l = c_u c'_u c_l \quad \bar{c}_u = c_l c'_l c'_l \quad \bar{c}'_u = c_u c_l c'_l \quad (5)$$

oraz

$$sc_{as}(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} \text{sign} \left[\cos \left(2\pi f_0 - \frac{\pi}{4} \right) \right] + \frac{1}{2} \text{sign}[\cos(2\pi f_0)] + \frac{\sqrt{2}}{4} \text{sign} \left[\cos \left(2\pi f_0 + \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (6)$$

$$sc_{ap}(t) = -\frac{\sqrt{2}}{4} \text{sign} \left[\cos \left(2\pi f_0 - \frac{\pi}{4} \right) \right] + \frac{1}{2} \text{sign}[\cos(2\pi f_0)] - \frac{\sqrt{2}}{4} \text{sign} \left[\cos \left(2\pi f_0 + \frac{\pi}{4} \right) \right]$$

Przeprowadzone rozważania matematyczne zobrazowano na rysunku 3.



Rys. 3 Idea tworzenia modulacji AltBOC

Celem modulacji AltBOC jest wygenerowanie w spójny sposób pasm $E5a$ i $E5b$, które będą odpowiednio modulowane za pomocą złożonych wykładniczych lub podnośną w taki sposób, by sygnały mogły być otrzymywane, jako szerokopasmowy sygnał typu BOC. Każde pasmo częstotliwości $E5a$ i $E5b$ posiada skojarzone rozszerzenie synfazowe (I) lub kwadraturowe (Q) bądź kody PRN, z kodami $E5a$ przesuniętymi do dolnej wstęgi bocznej oraz kodami $E5b$ przesuniętymi do górnej wstęgi bocznej. Odpowiednie podnośne kwadraturowe $E5a$ i $E5b$ modulowane są za pomocą sygnałów sterujących bez jakichkolwiek danych nawigacyjnych, a odpowiednie nośne synfazowe modulowane są za pomocą zarówno kodów PRN, jak i sygnałów z danymi.

2. MODEL MATEMATYCZNY OBIEKTU DROGOWEGO BĘDĄCEGO W RUCHU

W celu przeprowadzenia symulacji, dzięki którym zostanie dokonana ocena uzyskiwanych dokładności obiektu będącego w ruchu przez odbiornik GNSS należy przygotować odpowiedni model matematyczny, który pozwoli na dynamiczną weryfikację otrzymanych wyników.

I tak niech wektor X^T określa pojazd znajdujący się w ruchu i poruszający się po powierzchni Ziemi (2D), przy czym prędkość pojazdu określana jest przez czujnik prędkości zamontowany w pojeździe oraz przez odbiornik GNSS. Wobec tego wektor opisujący model dynamiczny pojazdu będącego w ruchu zapisać można następująco [4]:

$$X^T = [e \ n \ \dot{e} \ \dot{n} \ \ddot{e} \ \ddot{n} \ \varepsilon_e \ \varepsilon_n \ \delta_\theta \ \delta_s] \quad (7)$$

gdzie e i n określają współrzędne obiekt w przestrzeni 2D (x, y), zaś \dot{e}/\dot{n} oraz \ddot{e}/\ddot{n} charakteryzują aktualną prędkość pojazdu w chwili wyznaczania jego pozycji wraz z jego przyspieszeniem na płaszczyźnie 2D (powierzchnia Ziemi) o współrzędnych x i y , natomiast przez ε_e oraz ε_n są błędami występującym w określaniu pozycji pojazdu. Dodatkowo, jeśli pojazd wyposażony jest w odbiornik GNSS/INS to uwzględnić należy również wystąpienie względnego błędu kąta obrotu żyroskopu δ_θ oraz błąd odległość kodera od żyroskopu δ_s .

Poza tym uwzględniając równania ruchu Newtona [2]

$$\begin{cases} s = vt + \frac{at^2}{2} \\ v = at \end{cases} \quad (8)$$

gdzie t jest czasem, v – prędkością pojazdu, a – przyspieszeniem zaś s przebytą drogą.

Zatem z zależności (8) wynika, że droga jak i prędkość pojazdu wyznaczane są z przyspieszenia pojazdu. Chociaż w przeprowadzonych obliczeniach należy uwzględnić wiele czynników mających również znaczący wpływ na ostateczny wyniki takich jak rodzaj powierzchni, po której porusza się obiekt, samopoczucia kierowcy oraz ilość pojazdów na drodze (tzw. „korki”). Zatem zmiana stanu dynamicznego pojazdu uzależniona jest od pośrednio lub bezpośrednio od zmiany jego przyspieszenia. Dlatego tak ważne jest odpowiednie sformułowanie modelu matematycznego przyspieszenia w dynamicznym modelu pojazdu.

W literaturze [3] omówionych jest wiele modeli matematycznych opisujących złożoność ruchu w środowisku miejskim, w których wzięto pod uwagę zarówno przyspieszenie, zwolnienie i zatrzymanie pojazdu. W artykule wykorzystano model matematyczny opracowany na procesach Markowa pierwszego rodzaju, w którym poszczególne parametry zapisano kolejno

$$\begin{aligned} \ddot{e} &= \overline{a_e} + a_e, & \dot{a}_e &= -\tau_{a_e} \cdot a_e + W_{a_e}, \\ \ddot{n} &= \overline{a_n} + a_n, & \dot{a}_n &= -\tau_{a_n} \cdot a_n + W_{a_n}, \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie a_e oraz a_n są niezerowymi wartościami średnimi przyspieszenia w procesie Singera, $\overline{a_e}$ i $\overline{a_n}$ określają wartości średnie przyspieszenia pojazdu na przebytej drodze, odpowiednio przez W_{a_e} oraz W_{a_n} oznaczono średnie wartości szumu białego o stałej wartości widmowej gęstości mocy tzn. $2\tau_{a_e}\sigma_{a_e}^2$ i $2\tau_{a_n}\sigma_{a_n}^2$. Przez τ_{a_e} oraz τ_{a_n} oznaczono multiplikatywną odwrotność czasu korelacji. Równocześnie następuje zdefiniowanie innych błędów możliwych do wystąpienia w badanym modelu opartym na procesach Markowa opisanych zależnościami

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_e &= -\tau_{\varepsilon_e} \varepsilon_e + \omega_{\varepsilon_e}, & \dot{\varepsilon}_n &= -\tau_{\varepsilon_n} \varepsilon_n + \omega_{\varepsilon_n}, \\ \dot{\delta}_\theta &= -\tau_{\delta_\theta} \delta_\theta + \omega_{\delta_\theta}, & \dot{\delta}_s &= -\tau_{\delta_s} \delta_s + \omega_{\delta_s}, \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie τ_{ε_e} , τ_{ε_n} , τ_{δ_θ} , τ_{δ_s} są multiplikatywną odwrotnością czasu korelacji, zaś przez ω_{ε_e} , ω_{ε_n} , ω_{δ_θ} , ω_{δ_s} oznaczono wartości średnie szumu białego występującego w badanym modelu matematycznym opisującym obiekt będący w ruchu na zatłoczonej trasie. Biorąc pod uwagę powyższe rozważania można utworzyć dyskretne równanie stanu ruchu

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1} X_k + U_k + W_k \quad (11)$$

gdzie

$$\Phi_{k+1, k} = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & T I_{2 \times 2} & C_1 & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & C_2 & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & E_1 & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & E_2 & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 20F \end{bmatrix} \quad (12)$$

gdzie

$$\begin{aligned} C_1 &= \text{diag} \left\{ \frac{1}{\tau_{a_e}^2} (-1 + \tau_{a_e} T + e^{-\tau_{a_e} T}), \frac{1}{\tau_{a_n}^2} (-1 + \tau_{a_n} T + e^{-\tau_{a_n} T}) \right\} \\ C_2 &= \text{diag} \left\{ \frac{1}{\tau_{a_e}^2} (1 - e^{-\tau_{a_e} T}), \frac{1}{\tau_{a_n}^2} (1 - e^{-\tau_{a_n} T}) \right\} \\ E_1 &= \text{diag} \{ e^{-\tau_{\varepsilon_e} T}, e^{-\tau_{\varepsilon_n} T} \}, E_2 = \text{diag} \{ e^{-\tau_{\delta_\theta} T}, e^{-\tau_{\delta_s} T} \} \\ F &= \text{diag} \{ e^{-\tau_{\delta_\theta} T}, e^{-\tau_{\delta_s} T} \} \end{aligned} \quad (13)$$

Zaś

$$\begin{aligned} U_k &= [u_1, u_2, u_3, u_5, u_6, I_{1 \times 4}]^T \\ u_1 &= \frac{1}{\tau_{a_e}} \left(-T + \frac{\tau_{a_e} T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\tau_{a_e} T}}{\tau_{a_e}} \right) \overline{a_e} \\ u_2 &= \frac{1}{\tau_{a_n}} \left(-T + \frac{\tau_{a_n} T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\tau_{a_n} T}}{\tau_{a_n}} \right) \overline{a_n} \\ u_3 &= \left(T - \frac{1 - e^{-\tau_{a_e} T}}{\tau_{a_e}} \right) \overline{a_e}, u_4 = \left(T - \frac{1 - e^{-\tau_{a_n} T}}{\tau_{a_n}} \right) \overline{a_n} \\ u_5 &= (1 - e^{-\tau_{a_e} T}) \overline{a_e}, u_6 = (1 - e^{-\tau_{a_n} T}) \overline{a_n} \end{aligned} \quad (14)$$

Natomiast przez W_k oznaczono macierz szumu białego, gdzie $E[W_k W_{k+j}^T] = 0$ ($\forall j \neq 0$), zaś macierz kowariancji

$$Q_k = E[W_k W_k^T] = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0_{6 \times 2} & 0_{6 \times 2} \\ 0_{2 \times 6} & Q_{12} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 6} & 0_{2 \times 2} & 20Q_{13} \end{bmatrix} \quad (15)$$

gdzie

$$Q_{11} = [q_{ij}]_{6 \times 6}$$

$$q_{11} = \frac{\sigma_{a_e}^2}{\tau_{a_e}^4} \left(1 - e^{-2\tau_{a_e}T} + 2\tau_{a_e}T + \frac{2\tau_{a_e}^3 T^3}{3} - 2\tau_{a_e}^2 T^2 - 4\tau_{a_e}T e^{-\tau_{a_e}T} \right)$$

$$q_{13} = q_{31} = \frac{\sigma_{a_e}^2}{\tau_{a_e}^3} (e^{-2\tau_{a_e}T} + 1 - 2e^{-\tau_{a_e}T} + 2e^{-\tau_{a_e}T} - 2\tau_{a_e}T + \tau_{a_e}^2 T^2)$$

$$q_{15} = q_{51} = \frac{\sigma_{a_e}^2}{\tau_{a_e}^2} (1 - e^{-2\tau_{a_e}T} - 2\tau_{a_e}T e^{-\tau_{a_e}T})$$

$$q_{22} = \frac{\sigma_{a_n}^2}{\tau_{a_n}^4} \left(1 - e^{-2\tau_{a_n}T} + 2\tau_{a_n}T + \frac{2\tau_{a_n}^3 T^3}{3} - 2\tau_{a_n}^2 T^2 - 4\tau_{a_n}T e^{-\tau_{a_n}T} \right)$$

$$q_{24} = q_{42} = \frac{\sigma_{a_n}^2}{\tau_{a_n}^3} (e^{-2\tau_{a_n}T} + 1 - 2e^{-\tau_{a_n}T} + 2e^{-\tau_{a_n}T} - 2\tau_{a_n}T + \tau_{a_n}^2 T^2)$$

$$q_{26} = q_{62} = \frac{\sigma_{a_n}^2}{\tau_{a_n}^2} (1 - e^{-2\tau_{a_n}T} - 2\tau_{a_n}T e^{-\tau_{a_n}T}) \quad (16)$$

$$q_{33} = \frac{\sigma_{a_n}^2}{\tau_{a_n}^2} (4e^{-2\tau_{a_e}T} - 3 - e^{-2\tau_{a_e}T} + 2\tau_{a_n}T)$$

$$q_{35} = q_{53} = \frac{\sigma_{a_e}^2}{\tau_{a_e}} (e^{-2\tau_{a_e}T} + 1 - 2e^{-\tau_{a_e}T})$$

$$q_{44} = \frac{\sigma_{a_n}^2}{\tau_{a_e}^2} (4e^{-2\tau_{a_n}T} - 3 - e^{-2\tau_{a_n}T} + 2\tau_{a_n}T)$$

$$q_{46} = q_{64} = \frac{\sigma_{a_n}^2}{\tau_{a_n}} (e^{-2\tau_{a_n}T} + 1 - 2e^{-\tau_{a_n}T})$$

$$q_{55} = \sigma_{a_e}^2 (1 - 2e^{-\tau_{a_e}T})$$

$$q_{66} = \sigma_{a_n}^2 (1 - 2e^{-\tau_{a_n}T}) \text{ jeśli } q_{ij} = 0$$

$$Q_{12} = \text{diag}\{\sigma_{\varepsilon_e}^2 (1 - e^{-2\tau_{\varepsilon_e}T}), \sigma_{\varepsilon_n}^2 (1 - e^{-2\tau_{\varepsilon_n}T})\}$$

$$Q_{13} = \text{diag}\{\sigma_{\delta_\theta}^2 (1 - e^{-2\tau_{\delta_\theta}T}), \sigma_{\delta_s}^2 (1 - e^{-2\tau_{\delta_s}T})\}$$

Powyższe rozważania wskazują jak istotna jest znajomość wartości przyspieszenia pojazdu. Równie ważne jest prawidłowe określenie jego prędkości. W przypadku przeprowadzonych badań wspomniane wielkości są znane.

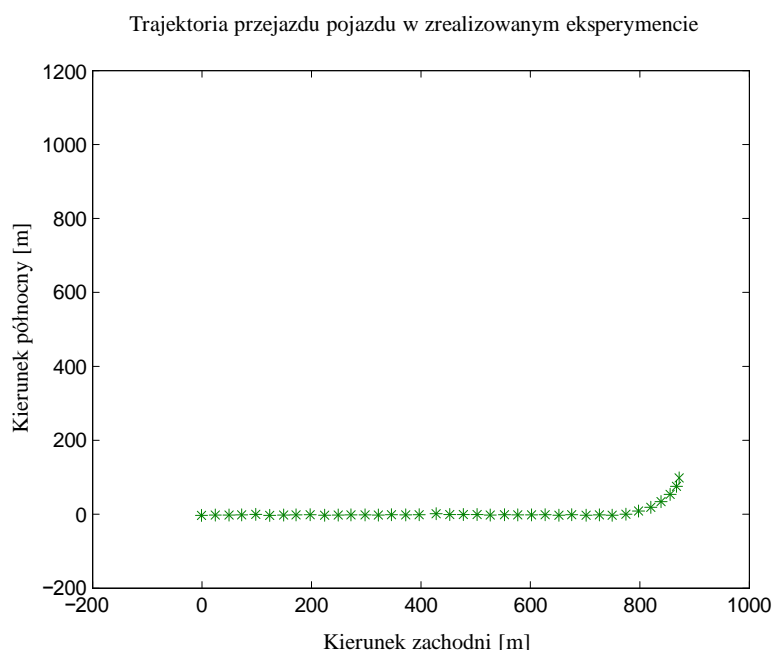
3. WYNIKI Z BADAŃ SYMULACYJNYCH

Na obecnym etapie badania ograniczono się jedynie do odbiorników GNSS (u-blox) pracujących na częstotliwości *L1* dla systemu GPS oraz na częstotliwości *E5* dla systemu Galileo. Odbiornik ten wyposażony jest również w moduł umożliwiający odbioru poprawek z systemu EGNOS, dzięki czemu uzyskane wyniki będą bardziej wiarygodne. Obszar badań podzielono na dwa etapy. Pierwszy etap polega na pomiarze współrzędnych obiektu będącego w ruchu dla kilku wariantów. Mianowicie odbiornik odbiera jedynie sygnały nadawane na częstotliwości *E5* następnie na częstotliwościach *L1* i *E5*. W kolejnym cyklu przeprowadza się test odbiornika, który odbierał oprócz sygnałów wymienionymi wcześniej również poprawki dostarczane przez system EGNOS. Drugą część badań przede wszystkim realizowana była w laboratorium i polegała jedynie na ich przetwarzaniu i analizie. Ponadto w przeprowadzonych testach szczególny nacisk wywarło na dokładność wyznaczanych

pozycji obiektu z tych względów pojazd, w którym znajdował się badany odbiornik poruszał się z prędkością 10 km/h na odcinku drogi równym 100 metrów. Krok, z jakim realizowany był proces zapisywania danych odnośnie współrzędnych obiektu odbywał się, co 0,5 sekund, co pozwoli na wiarygodną ocenę uzyskanych rezultatów. Zaznaczyć należy, że w przypadku testów sygnału E5 systemu Galileo dane nawigacyjne oraz konstelacja segmentu kosmicznego symulowana była przez aplikację, w której istnieje możliwość ustawienia widoczności satelitów, przez co uzyskane dane mogą nieznacznie odbiegać od wyników otrzymanych w warunkach rzeczywistych. Eksperyment badawczy został przeprowadzony na terenie otwartym (droga publiczna E7) w nocy, aby nie narażać na niebezpieczeństwo pozostałych użytkowników ruchu. Antena odbierająca sygnały przychodzące z satelity zainstalowana była na dachu pojazdu, w którym wykonano pomiary. Odległość między anteną a odbiornikiem GNSS wynosiła około 1,5 metra. Obszar, w którym przeprowadzono eksperyment charakteryzował się dobrą widocznością tzn. ze wszystkich czterech kierunków sygnał nadawany przez satelitę dociera do docelowego odbiornik bez żadnych strat związanych z wielodrogowością sygnałów. Okoliczności te pozwoliły również na obiektywne i rzeczywiste oszacowanie uzyskiwanych dokładności.

Na rysunku 4 przedstawiono trajektorię, po jakiej poruszał się pojazd wyposażony w odbiornik GNSS, dla którego wykonano badania symulacyjne mające na celu oszacowanie dokładności pozycji dla sygnałów zmodulowanych techniką AltBOC. Mając na uwadze fakt, iż sygnały nawigacyjne zmodulowane metodą AltBOC będą dopiero wdrażane, więc dla subiektywnego porównania eksperyment zrealizowano również dla sygnałów GNSS zmodulowanych techniką BPSK, wykorzystywane aktualnie (np. sygnały systemu GPS).

Ponadto przyjęto założenia, że trasa przejazdu odbywa się w kierunku zachodnim a jej rozpoczęcie usytuowano w początku układu współrzędnych. Hipoteza ta pozwoli na precyzyjne oszacowanie uzyskiwanych dokładności oraz błędów powstałych w czasie wykonywania eksperymentu.



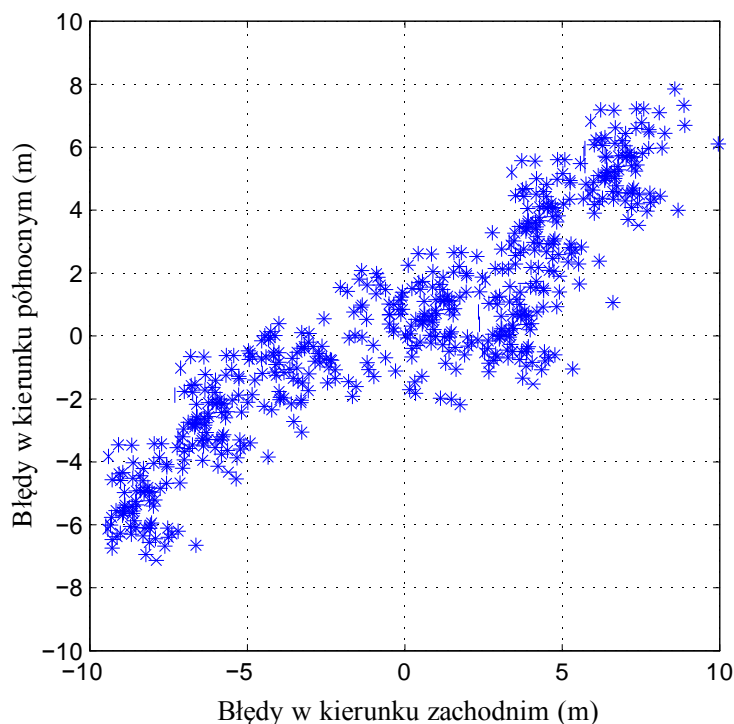
Rys. 4 Trasa przejazdu w zrealizowanym eksperymencie

Jednak przed samą prezentacją i analizą uzyskanych wyników zaznaczyć wypada, iż na dokładność wyznaczonej pozycji wpływają także inne czynniki takie jak: liczba widocznych nad horyzontem satelitów, jakość geometrii wyznaczenia (PDOP), wykorzystanie poprawek pozyskiwanych z systemu EGNOS, czynniki zakłócające oraz czas pozyskiwania wyników na stanowisku. Ten ostatni czynnik w dużej mierze zależy od osób przeprowadzających eksperyment doświadczalny. Z dotychczas przeprowadzonych badań wynika, niepoprawność pierwszych wyznaczonych współrzędnych, określających pozycję użytkownika wyposażonego w odbiornik

GNSS. Wiarygodne wyniki pojawiają się dopiero po upływie około 2 minut od momentu rozpoczęcia testów. Przy czym proces ten ma znaczenie jedynie w pierwszej części badań w chwili uruchomienia odbiornika GNSS. W późniejszych cyklach czynnik ten miał jedynie nieznaczny wpływ na uzyskiwane rezultaty.

Pozycja pojazdu wykorzystanego w badaniach w tym jego współrzędne, realizowana była poprzez pomiar kodowy.

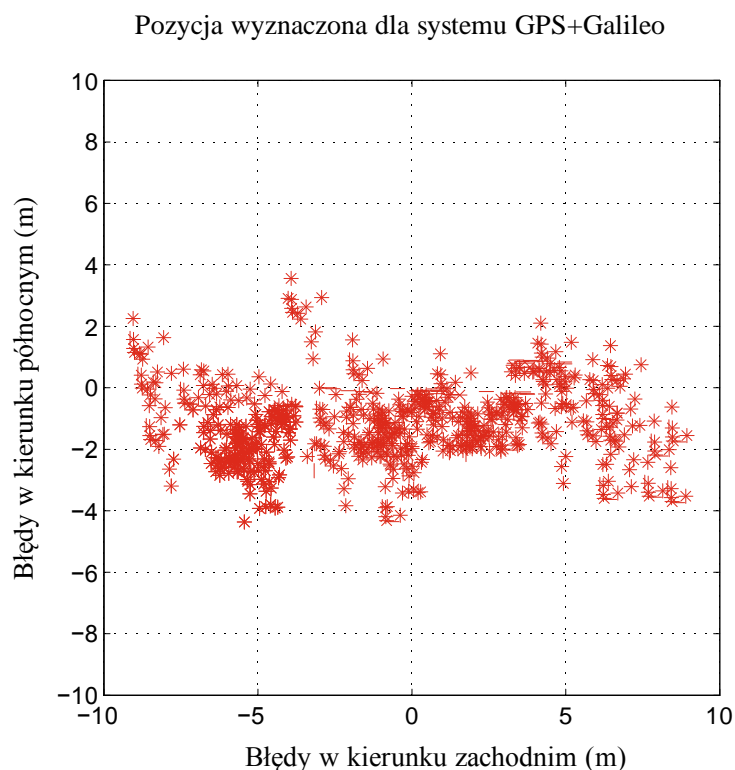
Pozycja wyznaczona dla danych otrzymanych z systemu GPS



Rys. 5 Dokładność pozycji pojazdu wyznaczona dla odbiornika GNSS dla sygnał E5

Z obserwacji wyników uzyskanych dla sytuacji, w której odbiornik GNSS odbiera jedynie sygnał E5 systemu Galileo wynika, że błąd dokładności położenia pojazdu w czasie testów wyniósł w najgorszym przypadku około 8 metrów. Pomiędzy poszczególnymi punktami obrazującymi położenie obiektu można dostrzec niewielkie różnice jednak średnio nie przekraczają one kilku metrów. Różnice te wykazują nieprzewidywalny charakter, bowiem dostrzegalny jest niewielki związek z aktualną konstelacją satelitów, bowiem do chwili obecnej na orbicie docelowej systemu Galileo pracują jedynie 4 satelity. Z tego względu w symulacjach skorzystano z przygotowanych algorytmów i modeli matematycznych realizujących sygnał E5 systemu Galileo. Biorąc pod uwagę, że na dokładność wyznaczenia może mieć wpływ bliskość badanego odbiornika oraz symulatora sygnału uzyskane wyniki mogą się nieznacznie różnić od tych otrzymanych w warunkach rzeczywistych.

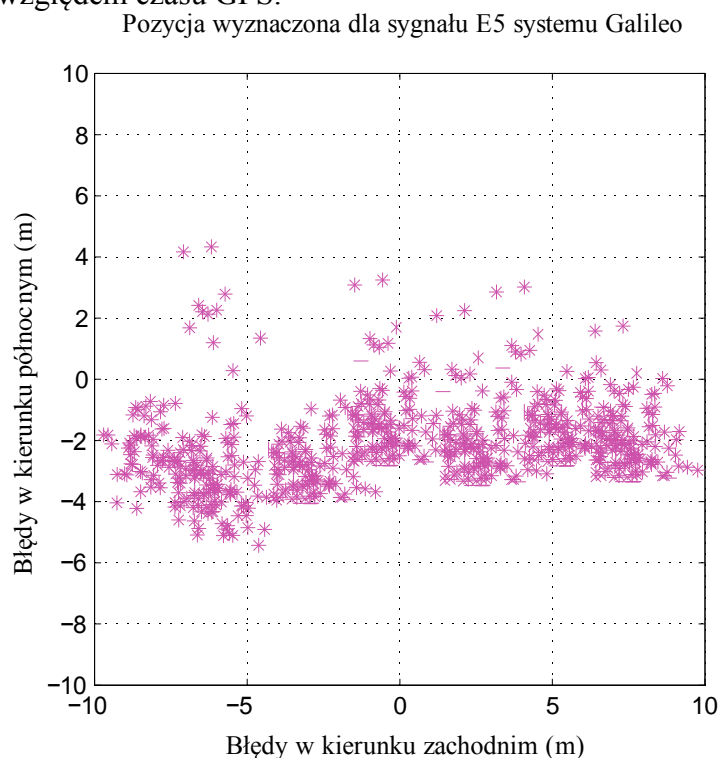
W kolejnym kroku testów powtórzono cały tok postępowania z jednym wyjątkiem w badanym odbiorniku GNSS włączono odbiór sygnału systemu GPS nadawanego na częstotliwości L1. Otrzymane wyniki charakteryzują znacznie mniejszy błąd dokładnościowy w najgorszym przypadku około 4,5 metra. Tym samym dokładność określania położenia obiektu będącego w ruchu w znacznym stopniu uległa poprawieniu do sytuacji, w której odbiornik GNSS odbierał jedynie sygnał E5 systemu Galileo.



Rys. 6 Dokładność pozycji pojazdu wyznaczona dla odbiornika GNSS dla sygnałów E5 i L1

Bardzo podobne wyniki uzyskano dla przypadku, w którym odbiornik GNSS odbierał także poprawki nadawane przez system EGNOS.

W celu oceny dokładności pozycjonowania odbiornika korzystającego z poprawek transmitowanych przez satelity systemu EGNOS obliczono różnice współrzędnych B, L, H otrzymanych metodą RTK w trybie postprocessingu oraz współrzędnych zarejestrowanych przez odbiornik u-blox. W obliczeniach zróżnicowano współrzędne zarejestrowane w tych samych momentach czasowych względem czasu GPS.



Rys. 7 Dokładność pozycji pojazdu wyznaczona dla odbiornika GNSS dla sygnałów E5 i L1 z uwzględnieniem poprawek odebranych z systemu EGNOS

Na rysunkach (4 – 6) widać, że zastosowanie modulacji AltBOC w sygnałach nawigacyjnych skutkuje znaczną poprawą dokładności uzyskiwanych pozycji obiektów lub użytkowników wyposażonych w odbiorniki GNSS. Choć widać znikomy wpływ poprawek dostarczanych przez system EGNOS a związane to jest z faktem, iż obszar, w jakim przeprowadzono eksperymenty (Radom) znajdują się na granicach jego funkcjonalności.

WNIOSKI

Wyniki obserwacji z otrzymywanych dokładności pozycji obiektu będącego w ciągłym ruchu mogą mieć duże znaczenie w aspekcie transportowym, ponieważ jak wynika z powyższych wykresów zastosowanie modulacji AltBOC powoduje zmniejszenie błędów w wyznaczonej pozycji użytkownika wyposażonego w odbiornik GNSS. W efekcie przyczynić się może do większego zainteresowania i eksploatacji odbiorników GNSS w aplikacjach transportowych.

Analizując otrzymane wyniki z przeprowadzonego eksperymentu można sformułować następujące wnioski:

- odbiór sygnałów nawigacji satelitarnej zmodulowanych techniką AltBOC powodują poprawę otrzymanych dokładności,
- wykorzystanie odbiornika GNSS z funkcją odbioru poprawek różnicowych z systemu EGNOS w pojeździe nie gwarantuje uzyskania rejestracji pozycji w trakcie przebytej całej trasy z uwzględnieniem korekt różnicowych,
- momenty czasowe, w których odbiornik zaczął uwzględniać poprawki z systemu EGNOS oraz kiedy przestał ich używać w rozwiązaniu są wysoce przypadkowe,
- wykonany eksperyment wskazuje, że znaczący wpływ na osiągnięte dokładności pozycji obiektów poruszających się po powierzchni (układ 2D) zależą od środowiska, w jakim się znajdują oraz ich aktualnych prędkości.

Na podstawie zarejestrowanych danych, dla każdej serii testów obliczono średnią wartość szerokości i długości geograficznej oraz błędy średnie tych wielkości. Wobec obliczonych wartości można wysunąć wniosek, iż średni błąd w uzyskanych dokładnościach wynosi 3,85 metra. Zatem wobec tych danych z powodzeniem można wykorzystać w aplikacjach transportowych.

Ponadto zaznaczyć wypada, iż w wykonanych badaniach nie uwzględniono wszystkich czynników mających wpływ na ostateczny wyniki dokładności położenia obiektu niektóre czynniki takie jak wielodrożność sygnał oraz błędy w urządzeniu odbiorczym pominięto.

Streszczenie

W referacie omówiono technikę- modulacji AltBOC wraz z jej głównymi własnościami. Wyjaśniono istotę jej generowania oraz. Zaprezentowano również podstawowe problemy, jakie należy rozważyć przy opracowaniu modelu matematycznego, aby uzyskać jak najlepszą dokładność obiektu będącego w ruchu.

Modulation AltBOC the GNSS signals and its impact on the achievable accuracy of the position of moving objects

Abstract

The paper describes a technique-modulation AltBOC with its main properties. Explained the essence of her generation, and. Also presented the basic problems that need to be considered when developing a mathematical model to obtain the best accuracy of the moving object.

BIBLIOGRAFIA

1. Xiaoguang L., „GPS Stochastic Modeling Signal Quality Measures and ARMA Processes”, Springer 2013
2. Ukkusuri Satish V., Ozbay K., “Advances in Dynamic Network Modeling in Complex Transportation Systems”, Springer 2013

3. Doumiati M., Charara A., Victorino A., Lechner D., "Vehicle Dynamics Estimation using Kalman Filtering", Wiley-ISTE 2013
4. Cheng H., "Autonomous Intelligent Vehicles Theory, Algorithms, and Implementation" Springer 2011
5. Jackowski S. "Telekomunikacja część 2", Wydawnictwo Politechniki Radomskiej 2004
6. Betz J. W., The offset carrier modulation for GPS modernization, in Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, ION-NTM 1999, pp. 639–648, January 1999, San Diego, California, USA.
7. Rebeyrol E., Macabiau C., Lestarquit L., Ries L., Issler J-L., Boucheret M.L., Bousquet M., BOC Power Spectrum Densities, Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, ION-NTM 2005, 24-26 January 2005, Long Beach, California, USA.