

KANIEWSKI Piotr¹

LUŻNO ZINTEGROWANY SYSTEM POZYCJONOWANIA POJAZDU LĄDOWEGO DR/GNSS

Jednym z najprostszycy sposobów integracji systemu nawigacji zliczeniowej DR z odbiornikiem GNSS jest tzw. luźna integracja. Luźno zintegrowane systemy DR/GNSS zawierają dwa filtry Kalmana, tj. wewnętrzny filtr odbiornika GNSS oraz filtr zewnętrzny, integrujący dane z filtru wewnętrznego i z systemu DR. Prostota luźnej integracji wynika z faktu, że odbiornik GNSS zawiera filtr Kalmana i konieczne jest jedynie opracowanie filtru zewnętrznego. W niniejszej pracy przedstawiono zasadę działania systemu DR i jego elementów oraz zasadę pozycjonowania w systemie GNSS. Podano model dynamiki i obserwacji systemu DR/GNSS, stanowiące podstawę do opracowania zewnętrznego filtru Kalmana, oraz omówiono algorytm działania tego filtru. Opracowanie zawiera wyniki badań symulacyjnych luźno zintegrowanego systemu DR/GNSS wraz z ich dyskusją.

LOOSELY COUPLED DR/GNSS POSITIONING SYSTEM FOR LAND VEHICLES

Loosely coupling is one of the simplest methods of integration of a dead-reckoning system (DR) with a GNSS receiver. Loosely coupled systems contain two Kalman filters, i.e. the internal filter of a GNSS receiver and an external filter, jointly processing data from the GNSS filter and from the DR system. The simplicity of such a system results from the fact that the GNSS receiver usually contains a Kalman filter and it is necessary to design only the external one. The paper presents the dynamics and observation models of DR/GNSS system, which constitute the basis for development of external Kalman filter, and explains the rules of operation of the filter's algorithm. Chosen simulation results of loosely coupled DR/GNSS system and their discussion are included.

1. WSTĘP

W pozycjonowaniu pojazdów lądowych najczęściej wykorzystuje się nawigację zliczeniową DR (*Dead Reckoning*) [2], pozycjonowanie z wykorzystaniem systemów radiotechnicznych, w tym głównie globalnych systemów nawigacji satelitarnej GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) [5] oraz technikę dopasowania do mapy MMT (*Map Matching Technique*) [2]. W aplikacjach o wysokich wymaganiach stosowana bywa także

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Tel. +4822 6839224, E-mail: Piotr.Kaniewski@wat.edu.pl

nawigacja inercjalna [2]. Każda z wymienionych metod określania położenia posiada istotne wady sprawiające, że w praktyce często stosuje się łącznie przynajmniej dwa spośród wymienionych rozwiązań.

W niniejszej pracy przedstawiono zintegrowany system pozycjonujący DR/GNSS, złożony z systemu nawigacji zliczeniowej DR i odbiornika systemu nawigacji satelitarnej GNSS. Integracja wymienionych urządzeń nawigacyjnych umożliwia poprawę kluczowych parametrów systemu (dokładności i ciągłości) w porównaniu z odpowiednimi parametrami wchodzących w jego skład elementów.

2. NAWIGACJA ZLICZENIOWA DR

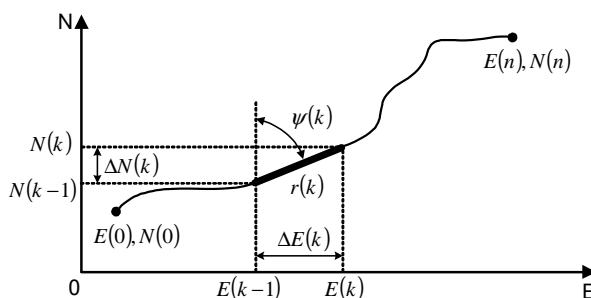
Zasada nawigacji zliczeniowej polega na zliczaniu (sumowaniu) składowych przyrostów drogi we wszystkich kierunkach i dodawaniu ich do położenia początkowego [2]. W przypadku pojazdów poruszających się na niewielkich, prawie płaskich obszarach, na których można zaniedbać krzywiznę Ziemi i nierówności terenu, dwuwymiarowe położenie pojazdu może być podawane w horyzontalnym układzie współrzędnych EN (*East-North*) i w dowolnej chwili nT wyrażone za pomocą pary liczb (E, N) :

$$E(n) = E(0) + \sum_{k=1}^n \Delta E(k) = E(0) + \sum_{k=1}^n r(k) \sin \psi(k) \quad (1)$$

$$N(n) = N(0) + \sum_{k=1}^n \Delta N(k) = N(0) + \sum_{k=1}^n r(k) \cos \psi(k) \quad (2)$$

gdzie: $E(n), N(n)$ – współrzędne pojazdu w chwili nT ,
 $E(0), N(0)$ – współrzędne początkowego położenia pojazdu,
 $\Delta E(k), \Delta N(k)$ – przyrosty drogi w kierunku wschodnim i północnym,
 $r(k)$ – przyrosty drogi w przedziale czasu od $(k-1)T$ do kT ,
 $\psi(k)$ – kurs rzeczywisty pojazdu w czasie od $(k-1)T$ do kT ,
 T – okres wyznaczania położenia w systemie DR.

Zasadę nawigacji zliczeniowej w układzie współrzędnych EN, przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Zasada nawigacji zliczeniowej

W przypadku, gdy pojazd lądowy może się poruszać na dużym obszarze, krzywizny Ziemi nie da się pominąć. Wówczas położenie wyraża się najczęściej w układzie współrzędnych związanym z Ziemią ECEF (*Earth-Centered Earth-Fixed*). W zależności od sposobu dalszego wykorzystania położenia wyznaczonego w systemie DR, jest ono obliczane w postaci współrzędnych geograficznych i wysokości (φ, λ, h) lub współrzędnych prostokątnych (x, y, z) .

Zakładając kulisty model Ziemi i pomijając we wzorach współrzędną wysokości h , która w przypadku pojazdów lądowych jest pomijalnie mała w porównaniu z promieniem Ziemi R , a także zachowując założenie, że kąty pochylenia i przechylenia pojazdu są pomijalnie małe, współrzędne geograficzne (φ, λ) można obliczyć z zależności:

$$\varphi(k+1) = \varphi(k) + \frac{r(k)\cos(\psi)}{R} \quad (3)$$

$$\lambda(k+1) = \lambda(k) + \frac{r(k)\sin(\psi)}{R\cos\varphi(k)} \quad (4)$$

Zakładając dodatkowo, że składowe prędkości v_N i v_E pojazdu wzdłuż osi lokalnego horizontalnego układu współrzędnych NED (*North-East-Down*) są stałe w okresie T , a więc zachodzą zależności:

$$v_N(k) = r(k)\cos\psi(k)/T \quad (5)$$

$$v_E(k) = r(k)\sin\psi(k)/T \quad (6)$$

równania nawigacji zliczeniowej (3)-(4) przyjmują postać:

$$\varphi(k+1) = \varphi(k) + \frac{v_N(k) \cdot T}{R} \quad (7)$$

$$\lambda(k+1) = \lambda(k) + \frac{v_E(k) \cdot T}{R\cos\varphi(k)} \quad (8)$$

Systemy DR są autonomiczne, tzn. nie wymagają informacji pochodzącej z urządzeń zewnętrznych w stosunku do obiektu nawigowanego (np. nadajników lub transponderów naziemnych bądź satelitarnych). Gwarantuje to dostępność danych niezależnie od położenia, pory dnia i roku, a także małą podatność systemu na celowe i przypadkowe zakłócenia z zewnątrz. Zwykle charakteryzują się one również ciągłością danych wyjściowych oraz wysoką krótkoterminową dokładnością i niezawodnością, wynikającą z ich prostej konstrukcji [2].

Zliczanie drogi wiąże się jednak z koniecznością inicjalizacji położenia z zewnętrznego źródła oraz z narastaniem błędów pozycjonowania w miarę upływu czasu działania systemu i proporcjonalnie do przebytej drogi. Z tego względu, systemy DR nie są zwykle stosowane samodzielnie, lecz są integrowane z urządzeniami nawigacyjnymi określającymi położenie w sposób bezwzględny, np. z odbiornikami GNSS [5].

3. ELEMENTY SYSTEMÓW DR

Systemy DR składają się z przyrządów umożliwiających pomiar lub obliczanie drogi przebytej przez pojazd (czujników ruchu liniowego) i przyrządów mierzących kurs pojazdu lub wielkości funkcjonalnie z nim związane (czujników ruchu kąтового).

Jako czujniki ruchu liniowego w pojazdach nieposiadających ABS, do których należą starsze typy samochodów, pojazdy rolnicze, ciężkie maszyny, roboty mobilne itp., mogą być stosowane odometry lub prędkościomierze [2].

Odometry służą do wyznaczania całkowitej drogi lub przyrostów drogi przebytej przez pojazd w krótkich odcinkach czasu. Dane wyjściowe odometru są obliczane na podstawie zliczania sygnałów impulsowych z czujników umieszczonych na kołach lub na wale napędowym pojazdu. Czujniki te składają się z części nieruchomej oraz ruchomej. W stacjonarnej części czujnika są formowane impulsy podczas przejścia w jej pobliżu części ruchomej. Nowoczesne samochody, wyposażone w system ABS, posiadają montowane na wszystkich kołach czujniki, których pomiary stanowią standardowe dane wyjściowe dostępne w samochodowej magistrali komunikacyjnej CAN.

Zliczona w czasie od $(k-1)T$ do kT liczba impulsów $C(k)$ z czujnika odometru jest mnożona przez współczynnik skali K tak, aby otrzymać odpowiadający jej przyrost drogi:

$$r(k) = K \cdot C(k) \quad (9)$$

Jako czujniki ruchu kąтового w systemach DR stosuje się często giroskop, kompas elektroniczny lub odbiornik GNSS. Giroskop o osi pomiarowej zorientowanej wzdłuż pionu lokalnego może być wykorzystany jako źródło informacji o względnych zmianach kursu pojazdu w odniesieniu do znanego kursu początkowego [3, 4]. W zależności od typu i/lub sposobu konfiguracji czujnika, giroskopy dostarczają danych o prędkości kątovej, o przyrostach kątowych w krótkich okresach czasu lub o całkowitej zmianie kąta od chwili inicjalizacji giroskopu. Kurs giroskopowy ψ określa się w wyniku całkowania prędkości kątovej ω mierzonej przez giroskop lub, w przypadku giroskopów dostarczających zmian kątowych $\Delta\psi$, sumowania przyrostów kursu z giroskopu, z kursem początkowym:

$$\Delta\psi(k) = \int_{(k-1)T}^{kT} \omega(t) dt \quad (10)$$

$$\psi(n) = \psi(0) + \sum_{k=1}^n \Delta\psi(k) \quad (11)$$

gdzie: ψ – kurs pojazdu,

$\Delta\psi$ – zmiana kursu w krótkim odcinku czasu,

ω – prędkość kątowna pojazdu wokół osi pionowej,

$\psi(0)$ – kurs początkowy.

Kompas elektroniczny wykorzystuje do określania kursu własności ziemskiego pola magnetycznego. Kompas ustawiony zgodnie z osią wzdłużną pojazdu określa azymut magnetyczny tej osi. Azymut magnetyczny różni się, niekiedy znacznie, od azymutu geograficznego określanego względem południka geograficznego. Dzieje się tak, ponieważ, położenie biegunów magnetycznych i geograficznych nie pokrywa się. Z tego względu pomiędzy południkiem magnetycznym i geograficznym występuje kąt zwany deklinacją magnetyczną, który należy uwzględnić w obliczeniach pozycji w systemie DR.

Należy zauważyć, że kąt azymutu osi wzdłużnej pojazdu i jego kurs mogą się znacznie różnić. Dzieje się tak zwłaszcza w statkach powietrznych i obiektach pływających ze względu na oddziaływanie wiatru i ruchów wody. W przypadku pojazdów lądowych różnica taka występuje np. podczas jazdy w poślizgu, jednak przez większość czasu azymut geograficzny może być uważany za równy kursowi rzeczywistemu pojazdu. Kurs rzeczywisty (*true heading*) jest nazwą stosowaną dla kąta określanego względem kierunku północy geograficznej. Istnieje również pojęcie kursu magnetycznego (*magnetic heading*), który jest wyznaczany względem kierunku północy magnetycznej.

Kurs pojazdu może być też określony za pomocą odbiornika GNSS. Odbiorniki GNSS, oprócz położenia i czasu, wyznaczają również prędkość użytkownika. W tym celu wykorzystuje się dopplerowskie przesunięcie częstotliwości fal nośnych sygnałów docierających z satelitów do odbiornika GNSS. Obliczone na podstawie tych przesunięć i wyrażone w układzie NED składowe prędkości pojazdu pozwalają na określenie kierunku przemieszczania się użytkownika (tzw. kursu drogi), którego wartość w chwili kT wynosi:

$$\psi_{GNSS}(k) = \arctg \frac{v_E(k)}{v_N(k)} \quad (12)$$

przy czym v_E i v_N stanowią składowe prędkości określane za pomocą odbiornika GNSS.

4. ZASADA POZYCJONOWANIA W SYSTEMACH GNSS

Systemami radiotechnicznymi, które znalazły najszersze zastosowanie w pozycjonowaniu i nawigacji pojazdów lądowych są globalne systemy nawigacji satelitarnej GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), w tym głównie amerykański system GPS (*Global Positioning System*) [5]. Obecnie GPS jest jedynym systemem GNSS posiadającym pełną zdolność operacyjną.

Systemy GNSS posiadają szereg istotnych zalet, które w ostatnich latach przyczyniły się do rozpowszechnienia ich stosowania. Mogą z nich korzystać wszyscy użytkownicy wyposażeni w odpowiednie odbiorniki, których cena jest stosunkowo niska. Sygnały GNSS są dostępne globalnie i przez całą dobę. Ponadto położenie wyznaczone w systemach GNSS

charakteryzuje się wysoką dokładnością, a błędy pozycjonowania, w odróżnieniu od systemów DR, nie zależą od czasu ani od długości przebytej drogi.

Nawigacyjne odbiorniki GNSS określają położenie metodą odległościową [1, 5]. Wielkościami mierzonymi są różnice czasu pomiędzy momentami wysłania i odbioru sygnałów radiowych transmitowanych przez satelity nawigacyjne. Sygnały satelitów zawierają w tzw. depeszy nawigacyjnej między innymi informacje niezbędne do wyznaczenia ich położenia oraz czasu transmisji sygnału. Odbiornik GNSS wykorzystując własny zegar określa czas odbioru sygnałów. Przeliczona na ekwiwalent odległościowy różnica między czasem odbioru a czasem nadania jest nazywana pseudoodległością, ze względu na fakt, że zegar odbiornika GNSS nie jest wstępnie zsynchronizowany z czasem satelitarnego systemu nawigacyjnego.

Relacje geometryczne w systemie GNSS zilustrowano na rys. 2. Położenie pojazdu jest wyznaczone w układzie ECEF i opisywane trzema nieznanymi współrzędnymi x , y oraz z . Dodatkową niewiadomą jest błąd synchronizacji zegara odbiornika GNSS. Określenie położenia wymaga wyznaczenia przynajmniej czterech pseudoodległości i rozwiązania czterech nieliniowych równań o postaci [1, 5]:

$$\Psi_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} + c\Delta t = R_i + b \quad (13)$$

gdzie: Ψ_i – pseudoodległość do i -tego satelity,

R_i – odległość do i -tego satelity,

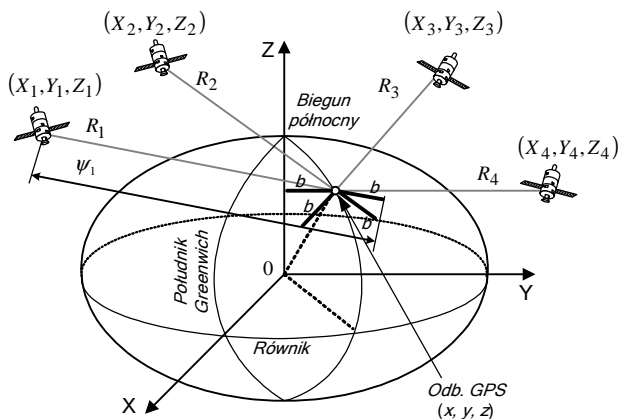
X_i, Y_i, Z_i – położenie i -tego satelity obliczane na podstawie depeszy nawigacyjnej,

x, y, z – położenie pojazdu,

c – prędkość światła,

Δt – błąd synchronizacji zegara odbiornika GNSS,

b – odległościowy ekwiwalent błędu synchronizacji zegara odbiornika GNSS.

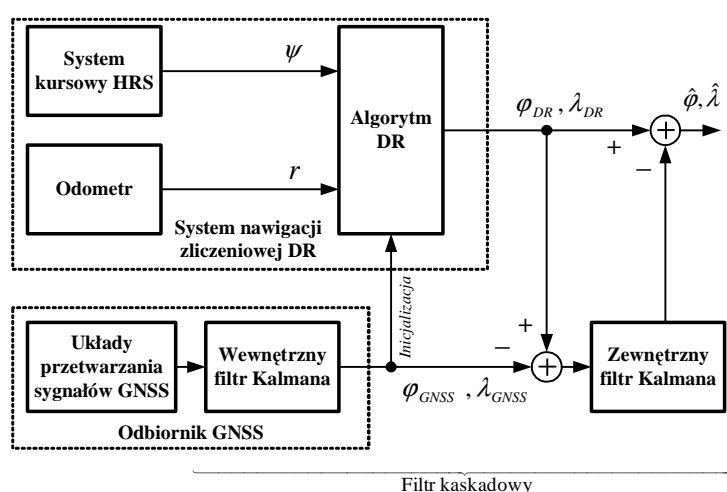


Rys.2. Relacje geometryczne w systemie GNSS

Na podstawie współrzędnych prostokątnych (x, y, z) , korzystając ze znanych zależności [5], można następnie obliczyć współrzędne geograficzne i wysokość (φ, λ, h) .

5. BUDOWA LUŻNO ZINTEGROWANEGO SYSTEMU DR/GNSS

Schemat blokowy luźno zintegrowanego systemu DR/GNSS, zawierającego odometr, odbiornik GNSS oraz system kursowy HRS (*Heading Reference System*) zawierający giroskop i kompas elektroniczny przedstawiono na rys. 3. System HRS został opracowany przez autora [3, 4] i spełnia funkcję analogiczną do pojedynczego czujnika kursu, lecz charakteryzuje się wyższą dokładnością. Założono, że w systemie będzie wykorzystywany wbudowany wewnętrzny filtr Kalmana odbiornika GNSS, a zatem konieczne jest jedynie opracowanie filtra zewnętrznego.



Rys.3. Luźno zintegrowany system pozycjonujący DR/GNSS

W przedstawionym systemie DR/GNSS zastosowano integrację metodą kompensacji z korekcją w przód. Metoda ta polega na korekcji położenia z systemu DR za pomocą danych z odbiornika GNSS. Współrzędne geograficzne położenia z DR i GNSS są od siebie odejmowane i tworzą wektor pomiarowy przetwarzany przez zewnętrzny filtr Kalmana. Wektor ten zawiera wyłącznie kombinację błędów DR i odbiornika GNSS, a rola filtru sprowadza się do estymacji błędów systemu nawigacji zliczeniowej, w celu jego późniejszej korekcji. Korekcja w przód oznacza, że odbywa się ona w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego i nie wpływa na dane systemu DR przetwarzane przez filtr Kalmana.

6. MODEL LUŻNO ZINTEGROWANEGO SYSTEMU DR/GNSS

Błędy zliczania drogi w systemie DR są wolnozmiennie (silnie skorelowane w czasie) i narastają w sposób nieograniczony, zaś błędy pozycjonowania odbiornika GNSS zawierają zarówno składowe wolnozmiennie, jak i szybkozmiennie, ale są ograniczone [2].

Model dynamiki systemu DR/GNSS zintegrowanego metodą kompensacji, stanowi model propagacji w czasie błędów systemu nawigacji zliczeniowej. Błędy składowej północnej i wschodniej prędkości DR (δv_N i δv_E) modelowano jako procesy Wienera [1]:

$$\delta v_N(k+1) = \delta v_N(k) + w_N(k) \quad (14)$$

$$\delta v_E(k+1) = \delta v_E(k) + w_E(k) \quad (15)$$

przy czym w_N i w_E stanowią ciągi gaussowskie o zerowej wartości oczekiwanej i stałej wariancji. Błędy prędkości δv_N i δv_E prowadzą do narastających błędów współrzędnych położenia, tj. błędu szerokości geograficznej $\delta\varphi$ i długości geograficznej $\delta\lambda$:

$$\delta\varphi(k+1) = \delta\varphi(k) + \frac{\delta v_N(k) \cdot T}{R} \quad (16)$$

$$\delta\lambda(k+1) = \delta\lambda(k) + \frac{\delta v_E(k) \cdot T}{R \cos\varphi(k)} \quad (17)$$

Zapisując równania (14)-(17) w postaci pojedynczego równania macierzowego, otrzymano dyskretny model dynamiki systemu zintegrowanego DR/GNSS:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \delta\varphi(k+1) \\ \delta v_N(k+1) \\ \delta\lambda(k+1) \\ \delta v_E(k+1) \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}(k+1)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & T/R & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T/[R \cos\varphi(k)] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\Phi(k+1,k)} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \delta\varphi(k) \\ \delta v_N(k) \\ \delta\lambda(k) \\ \delta v_E(k) \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ w_N(k) \\ 0 \\ w_E(k) \end{bmatrix}}_{\mathbf{w}(k)} \quad (18)$$

gdzie: \mathbf{x} – wektor stanu,
 \mathbf{w} – wektor zakłóceń procesu,
 Φ – macierz tranzycyjna.

Na wejście zewnętrznego filtru Kalmana systemu DR/GNSS jest podawana różnica składowych położenia zliczonego przez system DR (φ_{DR} i λ_{DR}) oraz określonego przez odbiornik GNSS (φ_{GNSS} i λ_{GNSS}), a zatem wektor pomiarowy \mathbf{z} jest równy:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \varphi_{DR} - \varphi_{GNSS} \\ \lambda_{DR} - \lambda_{GNSS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi + \delta\varphi - \varphi + v_\varphi \\ \lambda + \delta\lambda - \lambda + v_\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta\varphi \\ \delta\lambda \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\varphi \\ v_\lambda \end{bmatrix} \quad (19)$$

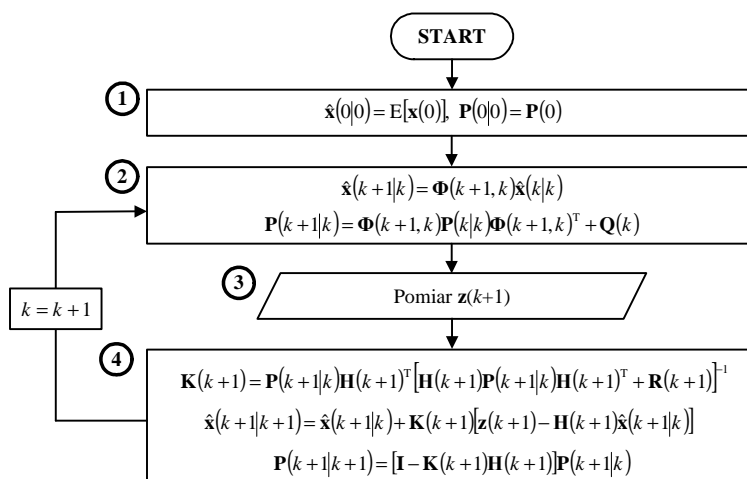
przy czym v_φ i v_λ stanowią ciągi gaussowskie o zerowej wartości oczekiwanej i stałej wariancji, reprezentujące błędy położenia określanego przez odbiornik GNSS. Na podstawie powyższej zależności otrzymano model obserwacji systemu DR/GNSS, określający relację pomiędzy wektorem pomiarowym \mathbf{z} i wektorem stanu \mathbf{x} :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \varphi_{DR}(k) - \varphi_{GNSS}(k) \\ \lambda_{DR}(k) - \lambda_{GNSS}(k) \end{bmatrix}}_{\mathbf{z}(k)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}(k)} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \delta\varphi(k) \\ \delta v_N(k) \\ \delta\lambda(k) \\ \delta v_E(k) \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} v_\varphi(k) \\ v_\lambda(k) \end{bmatrix}}_{\mathbf{v}(k)} \quad (20)$$

przy czym \mathbf{H} stanowi macierz pomiarową, a \mathbf{v} jest wektorem błędów pomiarowych.

7. ALGORYTM FILTRACJI SYSTEMU DR/GNSS

Ze względu na fakt, że model luźno zintegrowanego systemu DR/GNSS jest liniowy i zawiera addytywne, gaussowskie zakłócenia procesu oraz błędy pomiarowe, a także ze względu na zastosowaną integrację metodą kompensacji z korekcją w przód, właściwym algorytmem przetwarzania danych nawigacyjnych w tym systemie jest liniowy filtr Kalmana (rys. 4) [1]. Algorytm składa się z jednorazowej inicjalizacji (1), predykcji wektora stanu i macierzy kowariancji błędów (2), realizacji pomiaru (3) oraz korekcji wyników predykcji z wykorzystaniem ostatnio wykonanego pomiaru (4).



Rys.4. Algorytm filtracji Kalmana systemu DR/GNSS

gdzie: $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ – estymata wektora stanu w chwili kT – wynik filtracji,

$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$ – estymata wektora stanu w chwili $(k+1)T$ – wynik predykcji,

$\mathbf{P}(k|k)$ – macierz kowariancji błędów filtracji w chwili kT ,

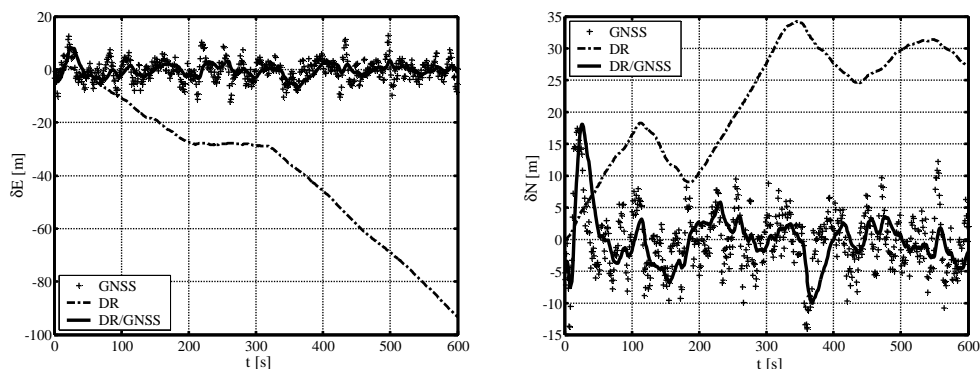
$\mathbf{P}(k+1|k)$ – macierz kowariancji błędów predykcji w chwili $(k+1)T$,

$\mathbf{K}(k)$ – macierz wzmocnień Kalmana w chwili kT ,

\mathbf{I} – macierz jednostkowa.

8. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH SYSTEMU DR/GNSS

Opracowany system DR/GNSS zbadano metodą symulacji komputerowej. Badania miały za zadanie ocenę i porównanie dokładności pozycjonowania systemu zintegrowanego oraz jego składników. Otrzymane przykładowe błędy pozycjonowania systemu DR/GNSS oraz DR i odbiornika GNSS przedstawiono na rys. 5. Przebiegi realizacji tych błędów uzyskane podczas badań symulacyjnych zostały wyrażone w metrach i przedstawione wzdłuż osi E i N lokalnego horyzontalnego układu współrzędnych.



Rys. 5. Błędy położenia w systemie DR/GNSS – składowa wschodnia (δE) i północna (δN)

9. WNIOSKI

Wyniki badań luźno zintegrowanego systemu pozycjonującego DR/GNSS pozwalają na stwierdzenie, że charakteryzuje się on brakiem narastających błędów pozycjonowania, charakterystycznych dla systemu DR. Ponadto dokładność systemu zintegrowanego jest wyższa niż dokładność odbiornika GNSS. Poprawa dokładności systemu w stosunku do odbiornika GNSS jest zależna nie tylko od dokładności jego elementów składowych, ale również od trasy, po której porusza się pojazd. Wyższą dokładność pozycjonowania uzyskiwano w przypadku niewielkiej zmienności kierunku ruchu pojazdu.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Brown R.G., Hwang P.Y.C.: *Introduction to random signals and applied Kalman filtering*, Wiley, UK, 1992.
- [2] Drane C., Rizos C.: *Positioning Systems in Intelligent Transportation Systems*, Artech House, USA, 1998.
- [3] Kaniewski P., Kazubek J.: *Integrated System for Heading Determination*, Acta Physica Polonica A, Vol. 116, No. 3, 2009, s. 325-330.
- [4] Kaniewski P., Kazubek J.: *Urządzenia i systemy radioelektroniczne – wybrane zagadnienia, rozdział pt. Zintegrowany system kursowy pojazdu lądowego*, WAT, 2009.
- [5] Spilker J. & Parkinson B., Eds., *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol. I, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA, 1996.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju jako Projekt Badawczy Rozwojowy Nr O R00 0161 12