



Piotr KANIEWSKI, Stanisław KONATOWSKI

ŚCIŚLE ZINTEGROWANY SYSTEM POZYCJONOWANIA POJAZDU LĄDOWEGO DR/GNSS

Streszczenie

W artykule opisano system pozycjonujący DR/GNSS, zintegrowany metodą filtracji pośredniej (kompensacji), przeznaczony do zastosowania w pojazdach lądowych. System ten, składający się z podsystemu nawigacji zliczeniowej DR i odbiornika GNSS należy do grupy systemów ściśle zintegrowanych i zawiera pojedynczy scentralizowany algorytm filtracji Kalmana. W artykule przedstawiono budowę systemu, jego model matematyczny i algorytm filtracji. Opracowanie zawiera również wyniki badań symulacyjnych systemu DR/GNSS wraz z ich dyskusją.

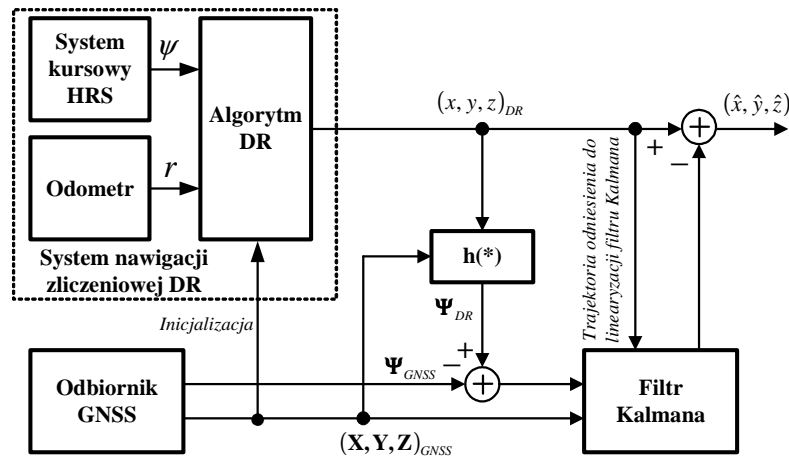
WSTĘP

W pozycjonowaniu pojazdów lądowych najczęściej wykorzystuje się nawigację zliczeniową DR (*Dead Reckoning*) [4, 5] i pozycjonowanie z wykorzystaniem globalnych systemów nawigacji satelitarnej GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) [6]. Każde z wymienionych rozwiązań posiada liczne zalety, jak też i istotne wady, sprawiające, że w praktyce często stosuje się je łącznie. Integracja systemu DR z odbiornikiem GNSS, przedstawiona w niniejszym artykule, umożliwia poprawę kluczowych parametrów (dokładności i ciągłości) systemu DR/GNSS w porównaniu z parametrami jego elementów.

Wspólne przetwarzanie danych DR i GNSS może być realizowane w systemach luźno lub ściśle zintegrowanych. Pierwsze z wymienionych rozwiązań, opisane m.in. w publikacjach autorów niniejszego opracowania [2, 4], charakteryzuje się prostotą lecz nie wykorzystuje pełnego potencjału integrowanych urządzeń. W niniejszym artykule przedstawiono nieco bardziej skomplikowany ściśle zintegrowany system pozycjonujący DR/GNSS i porównano jego parametry z parametrami systemu luźno zintegrowanego.

1. STRUKTURA SYSTEMU DR/GNSS

Schemat blokowy ściśle zintegrowanego systemu DR/GNSS zawierającego odometr, odbiornik GNSS i system kursowy HRS (*Heading Reference System*), złożony z giroskopu oraz kompasu elektronicznego, przedstawiono na rys. 1. System HRS jest rozwiązaniem własnym, opisanym m.in. w publikacjach [3, 4], spełniającym funkcję analogiczną do pojedynczego czujnika kursu, lecz charakteryzującym się wyższą dokładnością.



Rys. 1. Ściśle zintegrowany system pozycjonujący DR/GNSS

Położenie pojazdu $(x, y, z)_{DR}$ jest w systemie DR obliczane w wyniku sumowania przyrostów drogi r z uwzględnieniem kierunku jazdy (kursu pojazdu) ψ i dodawania ich do położenia początkowego. Inicjalizacja zliczania drogi odbywa się z wykorzystaniem położenia ustalonego za pomocą odbiornika GNSS.

Ze względu na fakt, że w systemach GNSS położenie użytkownika (x, y, z) i satelitów $(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})_{GNSS}$ jest wyznaczone w układzie współrzędnych ECEF (*Earth-Centered Earth-Fixed*) [4], również w systemie DR zastosowano równanie nawigacji zliczeniowej sformułowane w tym układzie:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ z(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin \varphi(k) \cos \lambda(k) & -\sin \lambda(k) \\ -\sin \varphi(k) \sin \lambda(k) & \cos \lambda(k) \\ \cos \varphi(k) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r(k) \cos \psi(k) \\ r(k) \sin \psi(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie: $x(k), y(k), z(k)$ – współrzędne pojazdu w układzie ECEF w chwili kT ,
 $\varphi(k), \lambda(k)$ – współrzędne geograficzne (szerokość i długość) obliczane w wyniku transformacji współrzędnych prostokątnych x, y, z [4],
 $r(k)$ – przyrosty drogi w przedziale czasu od kT do $(k+1)T$,
 $\psi(k)$ – kurs rzeczywisty pojazdu w czasie od kT do $(k+1)T$,
 T – okres wyznaczania położenia w systemie DR.

Zapis $(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})_{GNSS}$ oznacza trójkę wektorów zawierających współrzędne położenia wszystkich śledzonych przez odbiornik satelitów systemu GNSS, Ψ_{GNSS} stanowi wektor pseudoodległości z odbiornika GNSS, zaś Ψ_{DR} reprezentuje wektor odległości satelita-użytkownik, obliczonych na podstawie położenia z systemu DR $(x, y, z)_{DR}$ i położenia satelitów $(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})_{GNSS}$, zgodnie z zależnością opisaną funkcją \mathbf{h} . Funkcja ta stanowi część modelu obserwacji systemu DR/GNSS i została przedstawiona w dalszej części artykułu.

W systemie zastosowano integrację metodą kompensacji z korekcją w przód, co oznacza że odbywa się ona w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego i nie wpływa na dane systemu DR przetwarzane przez filtr Kalmana. Wielkości wyznaczone w DR i odbiorniku GNSS są od siebie odejmowane i tworzą wektor pomiarowy przetwarzany przez filtr. Wektor ten zawiera wyłącznie kombinację błędów DR i GNSS, a rola filtru sprowadza się do estymacji błędów systemu nawigacji zliczeniowej, w celu ich późniejszej korekcji. Ze względu na występującą w systemie nieliniową relację pomiędzy wielkościami estymowanymi przez filtr (położenie pojazdu) i wielkościami występującymi na jego wejściu (różnice odległości satelita-

użytkownik) zastosowano linearyzowany filtr Kalmana. Linearyzacja jest wykonywana z wykorzystaniem trajektorii odniesienia z systemu DR.

2. MODEL MATEMATYCZNY SYSTEMU DR/GNSS

Biorąc pod uwagę zależności pomiędzy składowymi prędkości pojazdu w kierunku północnym v_N i wschodnim v_E oraz wielkościami mierzonymi w systemie DR:

$$v_N(k) = r(k) \cos \psi(k) / T \quad (2)$$

$$v_E(k) = r(k) \sin \psi(k) / T \quad (3)$$

na podstawie równania nawigacji zliczeniowej (1) można zapisać analogiczne przybliżone równanie odnoszące się do błędów pozycjonowania:

$$\begin{bmatrix} \delta x(k+1) \\ \delta y(k+1) \\ \delta z(k+1) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \delta x(k) \\ \delta y(k) \\ \delta z(k) \end{bmatrix} + T \cdot \begin{bmatrix} -\sin \varphi(k) \cos \lambda(k) & -\sin \lambda(k) \\ -\sin \varphi(k) \sin \lambda(k) & \cos \lambda(k) \\ \cos \varphi(k) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta v_N(k) \\ \delta v_E(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

z którego wynika, że bieżące błędy położenia powstają w wyniku sumowania ich poprzednich wartości z błędami przyrostów drogi wzdłuż osi X, Y i Z układu ECEF.

Błędy składowej północnej i wschodniej prędkości DR (δv_N i δv_E) modelowano jako procesy Wienera [1]:

$$\begin{bmatrix} \delta v_N(k+1) \\ \delta v_E(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta v_N(k) \\ \delta v_E(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_N(k) \\ w_E(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie w_N i w_E stanowią ciągi gaussowskie o zerowej wartości oczekiwanej i stałej wariancji.

W ściśle zintegrowanym systemie DR/GNSS występujące na wyjściu odbiornika GNSS pseudoodległości zawierają błąd spowodowany brakiem synchronizacji zegara odbiornika ze skalą czasu GNSS. Błąd ten musi być uwzględniony w modelu dynamiki i estymowany przez filtr Kalmana systemu ściśle zintegrowanego. Typowy model błędów zegara zawiera dwie zmienne stanu, z których jedną jest odległościowy ekwiwalent błędu synchronizacji zegara b , zaś drugą dryf zegara d . Dyskretny model tych błędów jest następujący [1]:

$$\begin{bmatrix} b(k+1) \\ d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b(k) \\ d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_b(k) \\ w_d(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdzie w_b i w_d stanowią ciągi gaussowskie o zerowej wartości oczekiwanej i stałej wariancji.

Zapisując równania (4)-(6) w postaci pojedynczego równania macierzowego, otrzymano dyskretny model dynamiki ściśle zintegrowanego systemu DR/GNSS:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \delta x(k+1) \\ \delta y(k+1) \\ \delta z(k+1) \\ \delta v_N(k+1) \\ \delta v_E(k+1) \\ b(k+1) \\ d(k+1) \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}(k+1)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -T \sin \varphi(k) \cos \lambda(k) & -T \sin \lambda(k) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -T \sin \varphi(k) \sin \lambda(k) & T \cos \lambda(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \cos \varphi(k) & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\Phi(k+1,k)} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \delta x(k) \\ \delta y(k) \\ \delta z(k) \\ \delta v_N(k) \\ \delta v_E(k) \\ b(k) \\ d(k) \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_N(k) \\ w_E(k) \\ w_b(k) \\ w_d(k) \end{bmatrix}}_{\mathbf{w}(k)} \quad (7)$$

przy czym \mathbf{x} stanowi wektor stanu, \mathbf{w} reprezentuje wektor zakłóceń procesu, zaś Φ jest macierzą tranzycyjną.

Wektor pomiarowy \mathbf{z} na wejściu filtra Kalmana składa się z różnic pomiędzy odległościami użytkownik-satelita Ψ_{DR} , obliczonymi na podstawie położenia użytkownika z systemu DR, oraz pseudoodległościami Ψ_{GNSS} z odbiornika GNSS:

$$\mathbf{z} = \Psi_{DR} - \Psi_{GNSS} = [\psi_1^{DR} - \psi_1^{GNSS} \quad \psi_2^{DR} - \psi_2^{GNSS} \quad \dots \quad \psi_m^{DR} - \psi_m^{GNSS}]^T \quad (8)$$

przy czym:

$$\begin{aligned} \psi_i^{DR} &= \sqrt{(X_i - x_{DR})^2 + (Y_i - y_{DR})^2 + (Z_i - z_{DR})^2} = \\ &= \sqrt{[X_i - (x + \delta x)]^2 + [Y_i - (y + \delta y)]^2 + [Z_i - (z + \delta z)]^2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\psi_i^{GNSS} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} + b + v_i \quad (10)$$

Model obserwacji systemu DR/GNSS, określający zależność pomiędzy elementami wektora stanu \mathbf{x} i wektora pomiarowego \mathbf{z} , jest zatem określony zależnością o postaci:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \psi_1^{DR} - \psi_1^{GNSS} \\ \psi_2^{DR} - \psi_2^{GNSS} \\ \vdots \\ \psi_m^{DR} - \psi_m^{GNSS} \end{bmatrix}}_{\mathbf{z}(k)} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sqrt{[X_1 - (x + \delta x)]^2 + [Y_1 - (y + \delta y)]^2 + [Z_1 - (z + \delta z)]^2} + \dots \\ \dots - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2 + (Z_1 - z)^2} - b \\ \sqrt{[X_2 - (x + \delta x)]^2 + [Y_2 - (y + \delta y)]^2 + [Z_2 - (z + \delta z)]^2} + \dots \\ \dots - \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2 + (Z_2 - z)^2} - b \\ \vdots \\ \sqrt{[X_m - (x + \delta x)]^2 + [Y_m - (y + \delta y)]^2 + [Z_m - (z + \delta z)]^2} + \dots \\ \dots - \sqrt{(X_m - x)^2 + (Y_m - y)^2 + (Z_m - z)^2} - b \end{bmatrix}}_{\mathbf{h}[\mathbf{x}(k)]} + \underbrace{\begin{bmatrix} -v_1 \\ -v_2 \\ \vdots \\ -v_m \end{bmatrix}}_{\mathbf{v}(k)} \quad (11)$$

gdzie: \mathbf{h} – funkcja pomiarowa,

\mathbf{v} – wektor błędów pomiarowych,

x, y, z – rzeczywiste położenie pojazdu,

$\delta x, \delta y, \delta z$ – błędy położenia systemu DR,

X_i, Y_i, Z_i – położenie i -tego satelity GNSS,

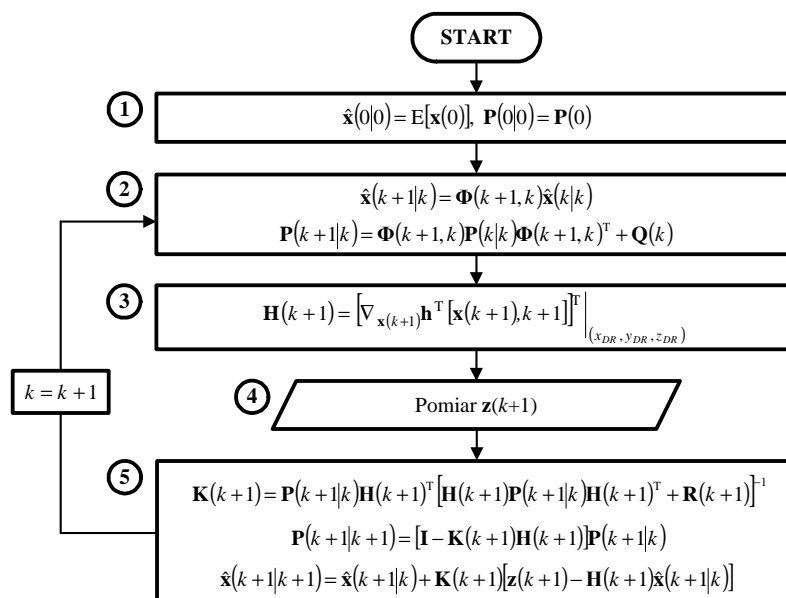
ψ_i^{DR} – odległość pomiędzy i -tym satelitą a użytkownikiem z systemu DR,

ψ_i^{GNSS} – pseudoodległość określona dla i -tego satelity,

b – odległościowy ekwiwalent błędu zegara odbiornika GNSS,
 v_i – błąd pomiarowy i -tej pseudoodległości.

3. ALGORYTM FILTRACJI SYSTEMU DR/GNSS

Model ściśle zintegrowanego systemu DR/GNSS jest nieliniowy i charakteryzuje się addytywnymi, gaussowskimi zakłóceniami procesu i błędami pomiarowymi. Nieliniowość dotyczy jedynie modelu obserwacji i jest stosunkowo słaba, ze względu na niewielkie wartości błędów δx , δy i δz systemu DR w porównaniu z odległościami satelita-użytkownik w systemie GNSS. Algorytmem filtracji odpowiednim dla systemu o wymienionych cechach jest linearyzowany filtr Kalmana (LKF) [4], którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 2. Algorytm składa się z jednorazowej inicjalizacji (1), predykcji wektora stanu i macierzy kowariancji błędów (2), linearyzacji polegającej na obliczeniu macierzy pomiarowej \mathbf{H} (macierzy pochodnych cząstkowych funkcji \mathbf{h} po elementach wektora stanu \mathbf{x} pochodzących z systemu DR) (3), realizacji pomiaru (4) oraz korekcji wyników predykcji z wykorzystaniem ostatnio wykonanego pomiaru (5).



Rys. 2. Algorytm LKF 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{Q} – macierz kowariancji zakłóceń procesu [1, 4],

\mathbf{R} – macierz kowariancji błędów pomiarowych [1, 4],

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

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

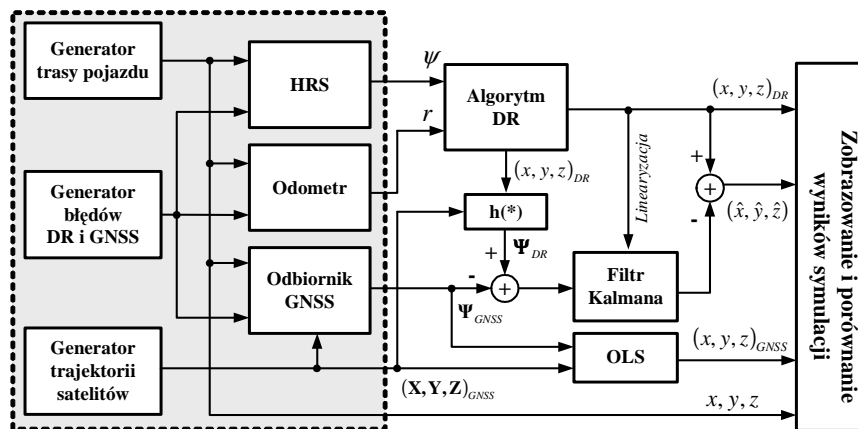
$\mathbf{K}(k)$ – macierz wzmacnień Kalmana w chwili kT ,

\mathbf{I} – macierz jednostkowa.

4. BADANIA SYMULACYJNE SYSTEMU DR/GNSS

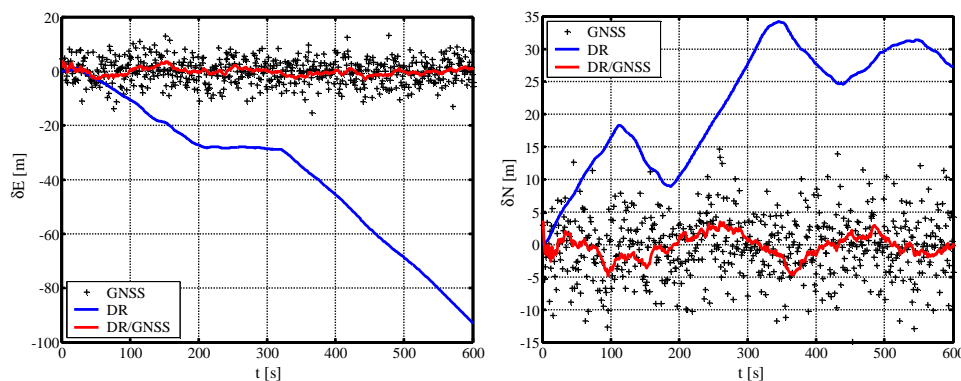
Ściśle zintegrowany system DR/GNSS zbadano metodą symulacji komputerowej. Przeprowadzone badania miały za zadanie ocenę i porównanie dokładności pozycjonowania systemu zintegrowanego oraz jego składników. Przyjęto metodykę badań przedstawioną w

postaci schematu blokowego na rys. 3. Jej istotą było wygenerowanie trasy pojazdu lądowego, trajektorii satelitów systemu GNSS i błędów urządzeń nawigacyjnych, a następnie przetwarzanie wygenerowanych danych pomiarowych w sposób, w jaki byłoby to realizowane w rzeczywistym systemie zintegrowanym.



Rys. 3. Metodyka badań symulacyjnych ściśle zintegrowanego systemu DR/GNSS

Dla celów porównawczych położenie pojazdu wyznaczano metodą nawigacji zliczeniowej DR bez korekcji, na podstawie danych z odbiornika GNSS metodą najmniejszych kwadratów OLS (*Ordinary Least Squares*) oraz przetwarzając łącznie dane DR i GNSS z wykorzystaniem opracowanego algorytmu filtracji LKF. Otrzymane przykładowe błędy pozycjonowania systemu DR/GNSS oraz DR i odbiornika GNSS przedstawiono na rys. 4. Przebiegi realizacji tych błędów zostały wyrażone w metrach i przedstawione wzdłuż osi E i N lokalnego horyzontalnego układu współrzędnych.



Rys. 4. Błędy położenia w systemie DR/GNSS – składowa wschodnia (δE) i północna (δN)

W tab. 1 porównano pierwiastki błędów średniokwadratowych (RMS) położenia wyznaczonego za pomocą odbiornika GNSS i za pomocą systemu DR/GNSS. Podano błędy wzdłuż osi E i N oraz horyzontalny błąd całkowity δP określony zależnością:

$$\text{RMS}(\delta P) = \sqrt{[\text{RMS}(\delta E)]^2 + [\text{RMS}(\delta N)]^2} \quad (12)$$

W tabeli zamieszczono również wyniki badań luźno zintegrowanego systemu DR/GNSS, opisanego w innej publikacji własnej [2], w celu porównania dokładności obu rozwiązań zbadanych przy takich samych założeniach symulacyjnych.

Tab. 1. Błędy RMS położenia z odbiornika GNSS i systemów DR/GNSS

	GNSS	DR/GNSS LC ¹	DR/GNSS TC ²	Redukcja LC	Redukcja TC
RMS(δE)	4,12 m	2,37 m	1,28 m	42%	69%
RMS(δN)	4,94 m	4,20 m	1,78 m	15%	64%
RMS(δP)	6,43 m	4,82 m	2,19 m	25%	66%

¹ DR/GNSS LC – system DR/GNSS luźno zintegrowany (*Loosely Coupled*)

² DR/GNSS TC – system DR/GNSS ściśle zintegrowany (*Tightly Coupled*)

WNIOSKI

Wyniki badań symulacyjnych ściśle zintegrowanego systemu DR/GNSS, pozwalają na stwierdzenie, że w wyniku integracji wyeliminowano narastające błędy pozycjonowania systemu nawigacji zliczeniowej i znacząco zredukowano szybkozmienne błędy przypadkowe odbiornika GNSS. System ściśle zintegrowany jest przy tym znacznie dokładniejszy od systemu luźno zintegrowanego, a błędy estymacji położenia są w mniejszym stopniu zależne od wyboru trasy, po której porusza się pojazd. Wyższa dokładność tego systemu jest wynikiem zastąpienia suboptymalnego filtra kaskadowego systemu luźno zintegrowanego, pojedynczym, scentralizowanym algorytmem filtracji systemu ściśle zintegrowanego.

TIGHTLY COUPLED DR/GNSS POSITIONING SYSTEM FOR LAND VEHICLES

Abstract

The paper presents a DR/GNSS positioning system, integrated with use of indirect filtration (compensation) method, intended for land vehicles. The system composed of a dead-reckoning subsystem (DR) and a GNSS receiver belongs to the group of tightly coupled systems and contains only one centralized Kalman filter. The paper presents the structure of DR/GNSS system, its mathematical model and explains the rules of operation of the filtering algorithm. Chosen simulation results of tightly coupled DR/GNSS system and their discussion are included.

BIBLIOGRAFIA

1. Brown R.G., Hwang P.Y.C.: *Introduction to random signals and applied Kalman filtering*, Wiley, UK, 1992.
2. Kaniewski P.: *Luźno zintegrowany system pozycjonowania pojazdu lądowego DR/GNSS*, Logistyka 6/2011, s. 1559-1568.
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., *Struktury, modele i algorytmy w zintegrowanych systemach pozycjonujących i nawigacyjnych*, Wyd. WAT, 2010.
5. Konatowski S., Dąbrowski M., Pieniężny A., *Vehicle Positioning System Based on GPS and Autonomic Sensors*, Annual of Navigation, No. 16, 2010, s. 67-74.
6. Spilker J. & Parkinson B., Eds., *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol. I, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA, 1996.

Autorzy:

płk dr hab. inż. KANIEWSKI Piotr - *Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki*

KONATOWSKI Stanisław - *Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki*