

Pakiet programowy do badań symulacyjnych zintegrowanych systemów nawigacyjnych

Streszczenie. Przedmiotem artykułu jest opis pakietu programowego IRENA służącego do badań symulacyjnych urządzeń nawigacyjnych, algorytmów przetwarzania danych nawigacyjnych oraz zintegrowanych systemów korekcji nawigacyjnej radaru SAR. W referacie omówiono strukturę, funkcjonalność i postępy prac nad pakietem. Pakiet powstaje w ramach realizacji projektu badawczego oznaczonego akronimem WATSAR, którego celem jest opracowanie, wykonanie i zbadanie demonstratora technologii radarowego systemu zobrazowania terenu.

Abstract. The paper describes a software toolbox IRENA intended for simulative testing navigation devices, algorithms of navigation data processing and various types of integrated navigation systems for SAR motion compensation. The paper describes the structure, functionality and progress of works on the toolbox. The toolbox is created in the frame of research grant under acronym WATSAR, aimed at designing, manufacturing and testing a demonstrator of a radar terrain observation system. (*Software Toolbox for Simulation of Integrated Navigation Systems*).

Słowa kluczowe: symulacja komputerowa, SAR, BSP, INS, GNSS, filtr Kalmana, wygładzanie optymalne.

Keywords: computer simulation, SAR, UAV, INS, GNSS, Kalman filter, optimal smoothing.

doi:10.12915/pe.2014.08.39

Wstęp

Bezzałogowe statki powietrzne (BSP) znajdują obecnie coraz liczniejsze zastosowania cywilne i wojskowe. Jedną z możliwych aplikacji tego typu pojazdów jest obserwacja terenu z wykorzystaniem kamer światła widzialnego, kamer podczerwieni lub sensorów radarowych. Obecnie konsorcjum złożone z Wojskowej Akademii Technicznej oraz przedsiębiorstwa WB Electronics S.A. realizuje projekt badawczy oznaczony akronimem WATSAR, którego celem jest opracowanie, wykonanie i przebadanie demonstratora technologii radarowego systemu zobrazowania terenu o parametrach oraz gabarytach umożliwiających zainstalowanie go na miniaturowym bezpilotowym statku powietrznym (mini BSP). Projekt przewidziany do realizacji na lata 2012-2015 jest wykonywany w ramach Programu Badań Stosowanych finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Realizacja projektu obejmuje zadanie badawcze polegające na opracowaniu i symulacyjnej weryfikacji algorytmów przetwarzania sygnałów w torze nadawczo-odbiorczym radaru oraz algorytmów syntezy zobrazowania SAR (Synthetic Aperture Radar) i kompensacji zaburzeń toru lotu nośnika. Celem tego zadania jest stworzenie algorytmów przetwarzania sygnałów radarowych, syntezy zobrazowania SAR i kompensacji zaburzeń toru lotu nośnika oraz weryfikacja efektywności ich działania w drodze symulacji komputerowych.

Założono, że w ramach tego zadania zostaną opracowane, a następnie symulacyjnie przetestowane m.in. algorytmy wyznaczania poprawek nawigacyjnych dla radaru SAR. Ze względu na charakterystyczne dla platform lotniczych niestabilności toru lotu [7, 9], w opracowywanym systemie zostanie umieszczony system korekcji nawigacyjnej radaru SAR, złożony z systemu nawigacyjnego INS/GNSS(RTK) Ekinox D INS firmy SBG Systems wraz z dwiema antenami GNSS, inercjalnej jednostki pomiarowej IMU z giroskopami FOG firmy KVH Industries 1750 IMU oraz mikroprocesorowego modułu przetwarzania danych nawigacyjnych (MPDN), w którym zostaną zaimplementowane wszystkie niezbędne algorytmy przetwarzania danych nawigacyjnych (m.in. filtr Kalmana lub algorytm wygładzania) [3, 5]. System ten będzie można wykorzystać nie tylko jako źródło danych korekcyjnych radaru SAR, ale również jako samodzielny pokładowy system nawigacyjny oraz źródło danych pomiarowych dla układu stabilizacji systemu antenowego radaru.

Założenia

W toku realizacji projektu ustalono, że jednym z elementów koniecznych do wykonania w ramach ww. zadania jest opracowanie pakietu programowego służącego do badań symulacyjnych planowanych do zastosowania urządzeń nawigacyjnych, zaprojektowanych algorytmów przetwarzania danych nawigacyjnych oraz różnych wariantów zintegrowanych systemów korekcji nawigacyjnej radaru SAR. W wyniku analizy dostępnych pakietów oprogramowania ustalono, że żaden z nich nie spełnia wszystkich wymagań projektu, ponieważ nie zawierają one algorytmów filtracji danych nawigacyjnych i procedur wygładzania przewidywanych do implementacji w MPDN. Ponadto charakteryzują się wysokimi kosztami zakupu, których nie uwzględnia budżet projektu, a część z nich jest niedostępna lub ma ograniczoną dostępność. W związku z tym zdecydowano się na stworzenie własnego pakietu programowego (toolboxu), którego strukturę i funkcjonalność omówiono w dalszej części niniejszego artykułu.

Jako środowisko programistyczne, w którym jest implementowany pakiet symulacyjny wybrano MATLAB®, ze względu na jego dostępność, uniwersalność i elastyczność oraz duże doświadczenie zespołu projektowego w praktycznym wykorzystywaniu tego narzędzia. Założono, że tworzony pakiet będzie stanowił toolbox o nazwie IRENA, co stanowi skrót od nazwy Instytut Radioelektroniki – Nawigacja i Algorytmy). Pakiet ma stanowić uzupełnienie środowiska MATLAB® o nowe funkcje związane z symulacją systemów nawigacyjnych.

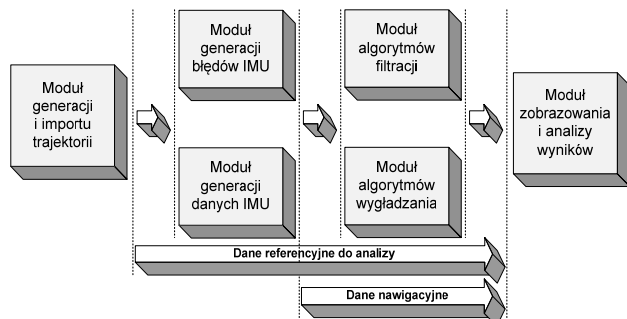
Struktura pakietu

Opracowywany pakiet powinien umożliwiać analizę podstawowych zjawisk zachodzących w urządzeniach i w całym zintegrowanym systemie przeznaczonym do korekcji nawigacyjnej radaru SAR [7, 9]. Zjawiska te mają związek z ruchem platformy latającej oraz własnościami zastosowanych urządzeń i algorytmów przetwarzania danych nawigacyjnych. Pakiet powinien umożliwić wierne odtworzenie tych zjawisk oraz ich zobrazowanie i analizę w celu wyciągnięcia wniosków dotyczących przydatności opracowywanych algorytmów przetwarzania danych nawigacyjnych. Ogólną strukturę pakietu symulacyjnego przedstawiono na rysunku 1.

Pakiet będzie docelowo zbudowany z sześciu modułów, które będą stanowiły jednolite tematycznie zestawy skryptów lub funkcji przygotowanych w języku Matlab,

przeznaczone do realizacji jednego z zadań, stawianych przed pakietem. Moduły pakietu będą stanowiły:

1. Moduł generacji i importu trajektorii
2. Moduł generacji błędów IMU
3. Moduł generacji danych IMU
4. Moduł algorytmów filtracji
5. Moduł algorytmów wygładzania
6. Moduł zobrazowania i analizy wyników



Rys.1. Struktura pakietu oprogramowania do badań symulacyjnych systemu korekcji położenia radaru SAR

Moduł generacji i importu trajektorii

Moduł ten jest odpowiedzialny za generację realistycznych trajektorii lotu mini BSP oraz za import danych zarejestrowanych podczas lotu tego rodzaju platform. Dane z tego modułu posłużą do symulacji pomiarów pochodzących z inercjalnej jednostki pomiarowej IMU (*Inertial Measurement Unit*) [8] i odbiornika systemu nawigacji satelitarnej GNSS [3].

Typowe IMU dostarczają na wyjściu zmiany prędkości Δv i zmiany kątów orientacji przestrzennej $\Delta \theta$ [8]. Do wyznaczenia tych danych w symulatorze konieczna jest generacja danych o położeniu, prędkości, przyspieszeniu i orientacji przestrzennej pojazdu w przestrzeni 3D oraz czasu związanego z wymienionymi elementami nawigacyjnymi. Oznacza to konieczność generacji zbioru wektorów 13-elementowych zawierających 1 zmienną czasu, 3 współrzędne położenia, 3 składowe prędkości, 3 składowe przyspieszenia i 3 kąty orientacji przestrzennej.

Generator trajektorii będzie dostarczał danych o położeniu w lokalnym horyzontalnym układzie ENU o ustalonym początku na powierzchni Ziemi [5]. Prędkość i przyspieszenie pojazdu będą podawane jako trójki składowych (v_N, v_E, v_D) oraz (a_N, a_E, a_D) wzdłuż osi lokalnego horyzontalnego układu współrzędnych NED (*North-East-Down*) [5]. Orientacja przestrzenna mini BSP będzie wyrażana jako kąty Eulera (ϕ, θ, ψ) [1]. Dane importowane z plików zarejestrowanych podczas lotu będą również formatowane do opisanej wyżej postaci.

Generator trajektorii będzie dostarczał danych nawigacyjnych w ustalonym przedziale czasu, ze stałym, zadaniem przez użytkownika toolboxu odstępem czasowym. W przypadku danych zarejestrowanych w plikach, czas trwania będzie narzucony czasem rejestracji. Moduł generacji i importu trajektorii będzie natomiast odpowiedzialny za interpolację tych danych tak, aby miały one zadany przez użytkownika odstęp czasowy.

Moduł generacji błędów IMU

Generator błędów IMU został opracowany i umożliwia generację błędów 3 giroskopów i 3 przyspieszeniomierzy wchodzących w skład IMU. Część błędów czujników jest niezależna, zaś część zależna od oddziaływań zewnętrznych związanych z ruchem pojazdu (przyspieszeń liniowych i prędkości kątowych) [2, 8]. Generacja błędów zależnych od ruchu wymaga, aby Moduł generacji błędów

IMU otrzymywał dane z Modułu generacji i importu trajektorii.

Model błędów triady giroskopów zamontowanych w IMU można wyrazić następującą zależnością, zawierającą najważniejsze typy zwykle uwzględnianych błędów [8]:

$$(1) \begin{bmatrix} \delta\omega_x \\ \delta\omega_y \\ \delta\omega_z \end{bmatrix} = \mathbf{b}_G + \mathbf{S}_G \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \mathbf{M}_G \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \mathbf{w}_G$$

gdzie:

$\delta\omega_x, \delta\omega_y, \delta\omega_z$ – błędy składowych prędkości kątowej giroskopów w układzie RPY [5], $\mathbf{b}_G$ – wektor błędów systematycznych giroskopów, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – składowe prędkości kątowej giroskopów w układzie RPY, $\mathbf{S}_G$ – macierz diagonalna 3×3 reprezentująca błędy współczynników skali, $\mathbf{M}_G$ – macierz antysymetryczna 3×3 reprezentująca nieortogonalne ustawienie osi triady giroskopów, $\mathbf{w}_G$ – wektor błędów przypadkowych giroskopów.

Model błędów triady przyspieszeniomierzy IMU jest natomiast opisywany uproszczoną zależnością [8]:

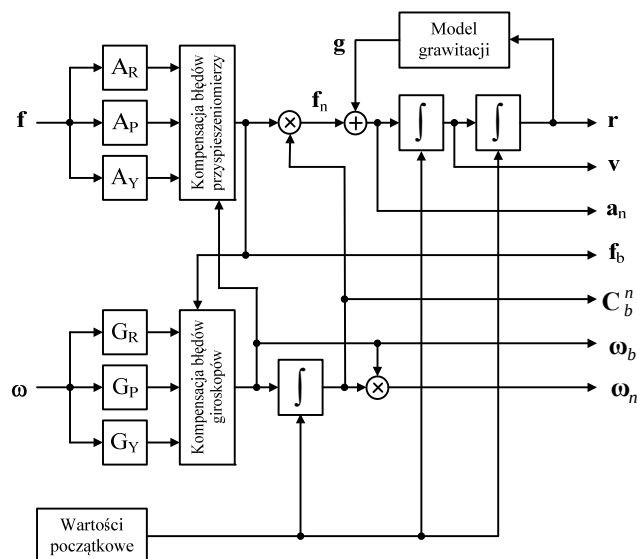
$$(2) \begin{bmatrix} \delta f_x \\ \delta f_y \\ \delta f_z \end{bmatrix} = \mathbf{b}_A + \mathbf{S}_A \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} + \mathbf{M}_A \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} + \mathbf{w}_A$$

gdzie:

$\delta f_x, \delta f_y, \delta f_z$ – błędy składowych przyspieszeń pozornych z przyspieszeniomierzy w układzie RPY, $\mathbf{b}_A$ – wektor błędów systematycznych przyspieszeniomierzy, f_x, f_y, f_z – składowe przyspieszenia w układzie RPY, $\mathbf{S}_A$ – macierz diagonalna 3×3 reprezentująca błędy współczynników skali, $\mathbf{M}_A$ – macierz antysymetryczna 3×3 reprezentująca nieortogonalne ustawienie osi triady przyspieszeniomierzy, $\mathbf{w}_A$ – wektor błędów przypadkowych przyspieszeniomierzy.

Moduł generacji danych IMU

Bezkartanowe systemy nawigacji inercjalnej INS [1, 8] zawierają czujniki inercjalne (przyspieszeniomierze i giroskopy) oraz komputer wykonujący szereg obliczeń zgodnych z ideą przedstawioną na rysunku 2 [3]:



Rys.2. Operacje wykonywane w bezkartanowym INS

W systemach tych realizowane są algorytmy wyznaczania elementów nawigacyjnych takich jak orientacja przestrzenna, prędkość i położenie na podstawie danych z inercjalnej jednostki pomiarowej IMU, czyli

przetworzonych danych z przyspieszeniomierzy Δv i giroskopów $\Delta \theta$. Algorytmy te, podobnie jak same systemy bezkardanowe, są określane skrótem SINS (*Strapdown Inertial Navigation System*).

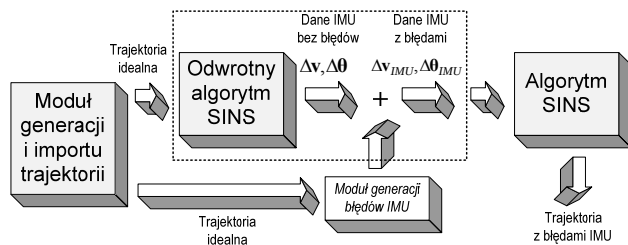
Przyspieszeniomierze **A** i giroskopy **G** w INS są umieszczone na platformie związanej z pojazdem. Sygnałami wejściowymi systemu są działające na zespół czujników inercjalnych ISA (*Inertial Sensors Assembly*): wektor przyspieszenia pozornego f i wektor prędkości kątowej ω pojazdu względem układu inercjalnego. Sygnały giroskopów i przyspieszeniomierzy są poddawane kompensacji znanych błędów systematycznych, błędów współczynników skali i błędów niewyrównania osi, ustalonych podczas kalibracji fabrycznej INS.

Wzajemna orientacja układu nawigacyjnego i pojazdu C_b^n jest obliczana na podstawie „całkowania” sygnałów z giroskopów. Informacja ta jest wykorzystywana do transformacji przyspieszeń f_b i prędkości kątowych ω_b z układu związanego z pojazdem do układu nawigacyjnego. Przyspieszenia w układzie nawigacyjnym f_r są następnie całkowane jednokrotnie i dwukrotnie w celu obliczenia prędkości v i położenia r .

W zależności od przyjętego układu współrzędnych stosuje się również korekcję Coriolisa [1, 8] oraz oblicza i uwzględnia przyspieszenie grawitacyjne. Wymagana jest ponadto inicjalizacja systemu [3].

W praktycznej realizacji algorytmu SINS wykonywane są dyskretne odpowiedniki ww. operacji. Zamiast ciągłych wartości f i ω wyznaczane są przyrosty Δv i $\Delta \theta$, które podlegają dalszemu przetwarzaniu.

Moduł generacji danych IMU jest już wykonany i realizuje obliczenia zgodnie z algorytmem SINS w układzie NED, a także obliczenia odwrotne (odwrotny algorytm SINS). Operacje wykonywane w module można przedstawić następująco:



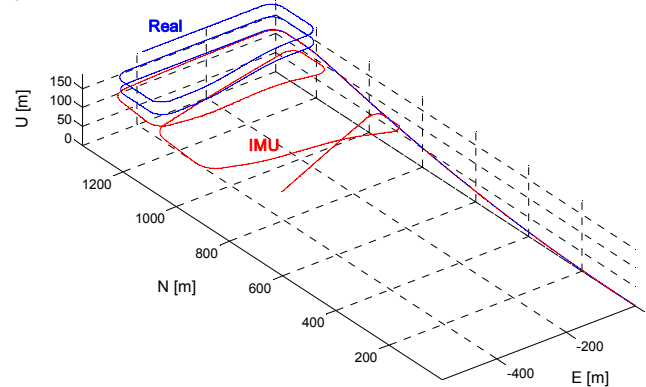
Rys.3. Zasada działania Modułu generacji danych IMU

Na podstawie elementów nawigacyjnych z Modułu generacji i importu trajektorii (trajektoria idealna), odwrotny algorytm SINS wyznacza idealne, pozbawione błędów zmiany prędkości Δv i kątów orientacji przestrzennej $\Delta \theta$ w krótkich, zadanych odcinkach czasu. Dane te zawierają wszystkie składowe związane z obrotem platformy względem układu inercjalnego, tj. obrót platformy względem układu nawigacyjnego NED, obrót układu NED względem ECEF ze względu na przemieszczanie się pojazdu i obrót układu ECEF względem układu inercjalnego ECI [3, 5] ze względu na ruch obrotowy Ziemi, a także dodatkowymi składowymi przyspieszeń (przyspieszeniem grawitacyjnym i przyspieszeniem Coriolisa).

W badaniach prowadzonych z wykorzystaniem toolboxu, do uzyskanych idealnych danych IMU są dodawane błędy z Modułu generacji błędów IMU. Symulowane w ten sposób dane z IMU są podawane do algorytmu SINS, który wyznacza na ich podstawie orientację przestrzenną, prędkość i położenie mini BSP. Uzyskana trajektoria jest rozbieżna w stosunku do trajektorii

idealnej ze względu na błędy IMU (błędy położenia mają charakter narastający).

Badania z wykorzystaniem pakietu umożliwiają obserwację i szacowanie błędów INS dla różnych trajektorii, dla zadanych błędów początkowych INS (inicjalizacji położenia i prędkości oraz wyrównania kątów) oraz dla zadanych parametrów błędów czujników. Przykładowe wyniki uzyskane za pomocą pakietu przedstawiono na rysunku 4.



Rys.4. Trajektoria idealna i symulowana trajektoria z INS

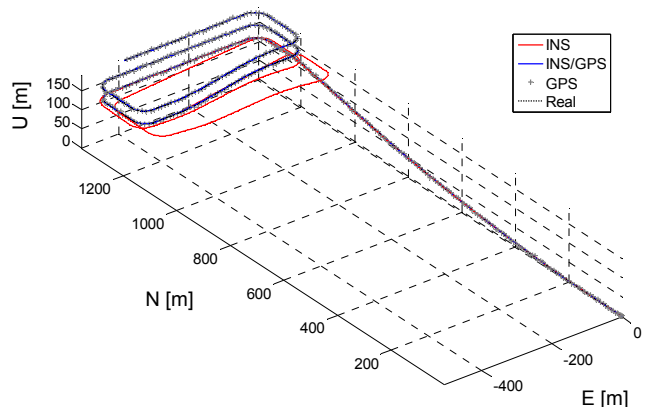
Moduł algorytmów filtracji

Moduł algorytmów filtracji jest odpowiedzialny za wspólne przetwarzanie symulowanych danych pomiarowych z odbiornika GNSS wchodzącego w skład systemu INS/GNSS(RTK) Ekinox D INS firmy SBG Systems lub całego systemu INS/GNSS(RTK) oraz inercjalnej jednostki pomiarowej 1750 IMU firmy KVH Industries za pomocą algorytmów filtracji Kalmana.

Filtry Kalmana są opracowywane w kilku wersjach różniących się złożonością modelu systemu [4-6]. Na obecnym etapie zaprojektowano i wykonano:

1. Liniowy 9-stanowy filtr Kalmana dla luźno zintegrowanego systemu INS/GPS z korekcją w przód
2. Linearyzowany 9-stanowy filtr Kalmana dla ściśle zintegrowanego systemu INS/GPS z korekcją w przód
3. Linearyzowany 11-stanowy filtr Kalmana dla ściśle zintegrowanego systemu INS/GPS z korekcją w przód
4. Rozszerzony 9-stanowy filtr Kalmana dla ściśle zintegrowanego systemu INS/GPS z korekcją wstecz
5. Rozszerzony 11-stanowy filtr Kalmana dla ściśle zintegrowanego systemu INS/GPS z korekcją wstecz
6. Rozszerzony 8-stanowy filtr Kalmana odbiornika GPS z modelem dynamiki PV

Przykładowe wyniki badań uzyskane z wykorzystaniem Modułu algorytmów filtracji przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Trajektoria idealna, z INS, z odbiornika GPS i estymowana w systemie zintegrowanym INS/GPS z filtrem 11-stanowym

W kolejnym etapie pracy planowane jest opracowanie nowych wersji filtru Kalmana z bardziej złożonymi modelami dynamiki, zawierającymi 6 dodatkowych zmiennych stanu, stanowiących dryfy 3 giroskopów i obciążenia 3 przyspieszeniomierzy. Prace nad tymi filtrami są obecnie w końcowej fazie realizacji.

Moduł algorytmów wygładzania

Algorytmy wygładzania mogą być zastosowane w realizowanym projekcie WATSAR zamiast filtracji Kalmana, jeśli synteza obrazu SAR nie musi być wykonywana w czasie rzeczywistym, a jedynie prawie rzeczywistym, co wydaje się akceptowalne z punktu widzenia rozważanej aplikacji. Algorytmy wygładzania, np. algorytm Rauch-Tung-Strieble (RTS), służą do estymacji wektora stanu w chwilach wcześniejszych niż aktualne dane pomiarowe, co powoduje dostarczanie wyników z opóźnieniem, ale o wyższej dokładności niż w algorytmach filtracji estymujących wektor stanu na bieżąco.

Moduł algorytmów wygładzania jest już zrealizowany i zawiera algorytmy wygładzania w stałym punkcie, w stałym przedziale oraz ze stałym opóźnieniem. Moduł będzie służył do wspólnego przetwarzania symulowanych danych pomiarowych odbiornika GNSS wchodzącego w skład systemu INS/GNSS(RTK) Ekinox D INS firmy SBG Systems lub całego systemu INS/GNSS(RTK) oraz inercyjnej jednostki pomiarowej 1750 IMU firmy KVH Industries.

Podsumowanie

Pakiet programowy IRENA jest wykonywany przez zespół z Instytutu Radioelektroniki Wydziału Elektroniki WAT w ramach realizacji projektu WATSAR. Dotychczas opracowano cztery z sześciu modułów, tj. Moduł generacji błędów IMU, Moduł generacji danych IMU, Moduł algorytmów filtracji i Moduł algorytmów wygładzania. Prace nad Modulem generacji i importu trajektorii są bardzo zaawansowane. Elementy Modułu zobrazowania i analizy wyników nie będą przedmiotem odrębnych zadań lecz powstają na bieżąco wraz z innymi elementami toolboxu.

Ze względu na zaawansowany stan prac nad poszczególnymi modułami pakietu rozpoczęto weryfikację opracowanych składników toolboxu w celu usunięcia ewentualnych błędów i usprawnienia ich działania.

Biorąc pod uwagę dotychczasowe obserwacje zespołu projektowego wydaje się, że pakiet IRENA będzie stanowił użyteczne narzędzie do badań symulacyjnych zintegrowanych systemów nawigacyjnych i ich elementów, a zwłaszcza czujników i systemów inercjalnych.

Implementacja wszystkich założonych funkcji i modułów sprawi, że ma on szansę stać się rozwiązaniem unikalnym w skali światowej. Istniejące rozwiązania tego typu są nieliczne i nie zawierają wszystkich elementów planowanych do zaimplementowania w toolboxie IRENA.

Pomimo, że toolbox jest tworzony z myślą o konkretnym, dość specyficznym zastosowaniu jakim jest badanie systemów korekcji nawigacyjnej radaru SAR, jego architektura jest znacznie bardziej uniwersalna i elastyczna, co zdaniem autorów umożliwi jego dalsze wykorzystanie już po zakończeniu pracy badawczej.

Projekt współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych jako Projekt Badawczy PBS1/B3/15/2012.

LITERATURA

- [1] Bekir E., *Introduction to Modern Navigation Systems*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2007.
- [2] Farrell J.A., *Aided Navigation GPS with High Rate Sensors*, McGraw-Hill, USA, 2008.
- [3] Grewal M.S., Weill L.R., Andrews A.P., *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration 2nd Edition*, John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [4] Kaniewski P., *Closed-Loop INS/TACAN/ALT Positioning System*, Acta Physica Polonica A, Vol. 114, No. 6A, 2008, 133-138.
- [5] Kaniewski P., *Struktury, modele i algorytmy w zintegrowanych systemach pozycjonujących i nawigacyjnych*, Wyd. WAT, 2010.
- [6] Konatowski S., Sosnowski B.: *Ocena dokładności procesu estymacji przez wybrane filtry nieliniowe*, Przegląd Elektrotechniczny, 87 (2011), nr 9a, 101-106.
- [7] Mengdao X., Xiuwei J., Renbiao W., Feng Z., Zheng B., *Motion Compensation for UAV SAR Based on Raw Radar Data*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 47, No. 8, August 2009, 2870-2883.
- [8] Titterton D.H., Weston J.L., *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Institution of Electrical Engineers, UK, 2004.
- [9] Zaugg E.C., Long D.G., *Theory and Application of Motion Compensation for LFM-CW SAR*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 46, No. 10, October 2008, 2990-2998.

Autorzy: dr hab. inż. Piotr Kaniewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: piotr.kaniewski@wat.edu.pl; dr inż. Stanisław Konatowski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: stanislaw.konatowski@wat.edu.pl.