

Analiza błędów losowych czujników bezwładnościowych przy pomocy metod wariancyjnych

Streszczenie. Artykuł porusza problem badania właściwości błędów losowych czujników inercjalnych. Wykorzystana w badaniach metoda wariancji Allana umożliwiła określenie ich wartości na podstawie przebiegu czasowego sygnałów. Analizie poddano giroskopy i przyspieszeniomierze dwóch czujników wykonanych w różnych technologiach. Na koniec opisano model propagacji błędów w dwuwymiarowym systemie nawigacji inercjalnej.

Abstract. This paper presents application of Allan Variance method for analysis of inertial sensors random errors. The research is based on data from two inertial sensors made in different technologies. Finally, the error propagation model of two-dimensional Inertial Navigation System is described. (*Inertial sensor random errors analysis using Variance methods*).

Słowa kluczowe: czujniki inercjalne, wariancja Allana, model propagacji błędów, nawigacja inercjalna.

Keywords: inertial sensors, Allan Variance, error propagation model, inertial navigation.

Wprowadzenie

Wykorzystanie czujników bezwładnościowych do zliczeniowego pomiaru przemieszczeń jest popularną metodą uzupełniania informacji z systemów globalnej nawigacji satelitarnej GNSS (ang. Global Navigation Satellite System). Dane z systemu bezwładnościowego (inercjalnego) INS (ang. Inertial Navigation System) są najczęściej integrowane z danymi GNSS w filtrze Kalmana, pozwalając na śledzenie ruchu obiektu również w trakcie zaniku sygnałów satelitarnych, spowodowanych np. przemieszczaniem się w tunelu lub wśród wysokiej zabudowy (ang. Urban Canyon). Z tego względu systemy zintegrowane INS/GNSS znajdują obecnie bardzo szerokie zastosowanie.

Zasadniczą wadą metody zliczeniowej jest jej wrażliwość na błędy deterministyczne i losowe czujników bezwładnościowych, które kumulują się w toku obliczeń realizowanych w INS. W rezultacie następuje szybkie narastanie błędów pozycjonowania, ograniczające czas przez jaki system nawigacyjny INS/GNSS umożliwia określanie przemieszczeń w warunkach zaniku sygnałów GNSS.

Najdokładniejsze systemy bezwładnościowe, pozwalające nawigować przy ich pomocy przez wiele dni, wykorzystują platformę giroskopową utrzymującą położenie niskoszumnych mechanicznych przyspieszeniomierzy z wykorzystaniem zawieszenia kardanowego. Rezygnacja z platformy giroskopowej stosowana w systemach bezkardanowych jest naturalnym dążeniem do zmniejszania rozmiarów, kosztu i zwiększania niezawodności INS, lecz wiąże się ona z ograniczaniem jego dokładności. Ze względu na wymienione zalety, systemy bezkardanowe różnych klas można obecnie znaleźć w licznych aplikacjach i na różnych typach platform. Wersje o wysokiej dokładności wykorzystuje się m.in. w przemyśle lotniczym, natomiast tanie, proste systemy bezkardanowe są powszechne w elektronice konsumenckiej, np. w telefonach komórkowych.

W artykule poddano dyskusji wpływ błędów pomiarów na dokładność wyznaczania położenia przy pomocy algorytmu zliczeniowego w systemie bezkardanowym. Przedstawiono model błędów losowych czujników bezwładnościowych oraz wariancyjne metody estymacji ich parametrów na podstawie danych zarejestrowanych w warunkach laboratoryjnych. Badaniu poddane zostały czujniki (giroskopy i przyspieszeniomierze) wchodzące w skład inercjalnych jednostek pomiarowych IMU (ang. Inertial Measurement Unit). W testach wykorzystano czujniki wykonane w różnych technologiach: przyspieszeniomierze i giroskopy wykonane w technologii systemów mikroelektromechanicznych MEMS (ang. Micro-

electromechanical System) oraz giroskopy światłowodowe FOG (ang. Fiber Optic Gyroscope). W podsumowaniu porównano błędy estymacji położenia śledzonego obiektu z wykorzystaniem modelu symulacyjnego, uwzględniającego parametry błędów losowych badanych czujników.

Wariancyjne metody analizy danych z czujników bezwładnościowych

Wariancyjne metody analizy danych z czujników służą do analizy czasowej sygnałów pomiarowych z giroskopów i przyspieszeniomierzy. Popularną metodą określania parametrów błędów losowych czujników inercjalnych jest analiza wariancji Allana AV (ang. Allan Variance). Algorytm oparty na tej metodzie pozwala na analizę następujących błędów losowych giroskopów: dryfu BI (ang. Bias Instability), błędu ARW (ang. Angle Random Walk), szumu kwantyzacji Q (ang. Quantization Noise), błędu RRW (ang. Rate Random Walk) oraz błędu RR (ang. Rate Ramp). Analogicznej analizie błędów losowych poddaje się przyspieszeniomierze, dla których można określić wielkość: obciążenia BI, szumu kwantyzacji Q, błędu VRW (ang. Velocity Random Walk) oraz błędu RW (ang. Random Walk). Wielkość tych błędów określa się na podstawie wykresu odchylenia $AV(\tau)$ zarejestrowanych w warunkach statycznych danych pomiarowych. Sposób wyznaczania wartości wariancji $AV(\tau)$ oraz metody interpretacji wyników zostały przedstawione w wielu artykułach i standardach organizacji IEEE [1,2,3].

Obok metod wariancyjnych istnieją metody analizy sygnału w dziedzinie częstotliwości, które również przedstawiono w standardach oraz publikacjach [4,5].

Błędy pomiarowe czujników bezwładnościowych

Pomiar wielkości mierzonych przy pomocy czujników bezwładnościowych obarczony jest błędem losowym, którego wartość średnia oraz wariancja zależą zarówno od wewnętrznych zakłóceń, jak i od warunków środowiskowych, w których znajduje się testowane urządzenie. W szczególności na wyniki pomiarów mają wpływ takie czynniki jak zakłócenia przedostające się przez zasilanie lub wahania temperatury w trakcie dokonywania pomiaru. Systemy INS są zwykle zasilane ze źródeł prądu stałego i jak wszystkie urządzenia pomiarowe są wrażliwe na zakłócenia, które mogą mieć wpływ na widmo sygnału, zwiększając dolną granicę szumów, a tym samym wpływając na dokładność oceny. Dodatkowo pomiary z czujników zasilanych z przetwornic impulsowych lub zasilaczy podłączonych do sieci elektroenergetycznej są narażone na zakłócenia harmoniczne.

Producenci czujników często kompensują wpływ temperatury otoczenia na elementy pomiarowe. Pomimo tego mierzone wielkości są obciążone błędem resztkowym zależnym od temperatury i wpływającym na czułość, dryf giroskopów lub obciążenie przyspieszeniomierzy. Charakter tych zmian nie musi być liniowy i zależy od badanego czujnika. Jeżeli aplikacja wymaga wysokiej dokładności, konieczne jest wzorcowanie czujnika w zakresie temperatury jego pracy.

Utrzymywanie stabilnej temperatury otoczenia w trakcie badań czujników, które nie posiadają mechanizmu wewnętrznej stabilizacji, jest wymagane do osiągnięcia dokładnych wyników analizy AV.

Opis badanych systemów INS

Opisane w dalszej części artykułu badania przeprowadzono dla dwóch czujników typu IMU: Analog Devices ADIS16480, którego elementy pomiarowe wykonano w technologii MEMS oraz KVH IMU1750 składającego się z przyspieszeniomierzy MEMS oraz giroskopów FOG. Czujniki prędkości kątowej wykorzystane w IMU1750 charakteryzują się znacznie mniejszymi błędami w porównaniu do elementów pomiarowych wykonanych w technologii MEMS. Wartości błędów specyfikowane przez producentów przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Błędy losowe ADIS16480 wg. noty katalogowej [6]

Rodzaj błędu	Wartości typowe błędów (1σ)	Jednostka
Dryf giroskopu	6,25	$^{\circ}/hr$
Błąd ARW	0,3	$^{\circ}/\sqrt{hr}$
Obciążenie przyspieszeniomierzy	0,1	mg
Błąd VRW	0,029	$\frac{m}{s} / \sqrt{hr}$

Tabela 2. Błędy losowe IMU1750 wg. noty katalogowej [7]

Rodzaj błędu	Wartości typowe błędów (1σ)	Jednostka
Dryf giroskopu	0,05	$^{\circ}/hr$
Błąd ARW	0,012	$^{\circ}/\sqrt{hr}$
Obciążenie przyspieszeniomierzy	0,05	mg
Błąd VRW	0,070	$\frac{m}{s} / \sqrt{hr}$

Dryf giroskopu światłowodowego wchodzącego w skład IMU1750 jest o dwa rzędy wielkości mniejszy od dryfu giroskopu wykonanego w technologii MEMS, zastosowanego w ADIS16480. Błąd ARW jest natomiast 25 razy mniejszy w przypadku czujnika światłowodowego. Znaczne różnice pomiędzy parametrami giroskopów przekładają się na dokładność estymacji położenia w systemach INS zawierających wymienione typy czujników.

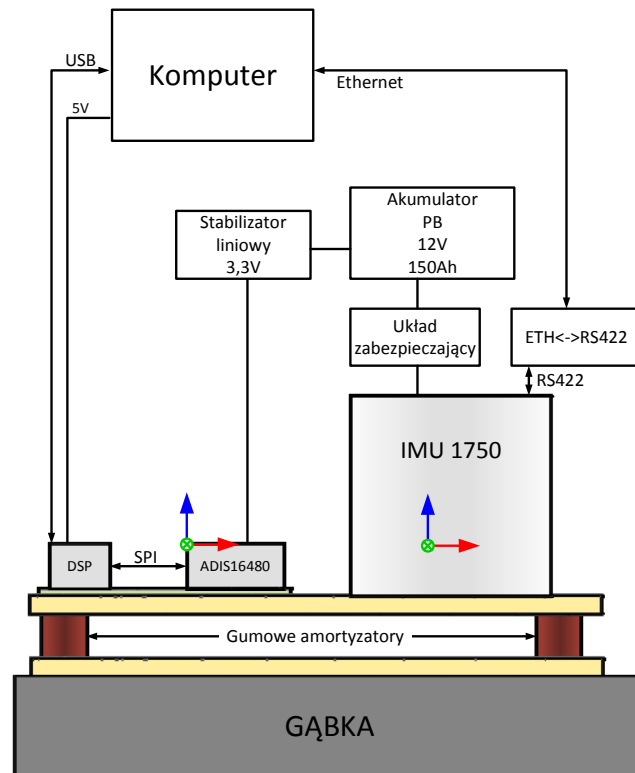
Warunki pomiarowe

Zapewnienie stabilnych warunków otoczenia (m.in. napięcia zasilania i temperatury) jest jednym z podstawowych wymagań, których spełnienie umożliwia osiągnięcie wiarygodnych wyników analizy dokładności czujników inercjalnych, stąd zagadnieniu temu poświęcono dużo uwagi.

Podczas prowadzonych badań, czujniki inercjalne odizolowano od przypadkowych drgań otoczenia poprzez zamocowanie ich na platformie izolującej, składającej się z obejm, podkładek izolujących oraz miękkiej gąbki.

Czujniki zasilano z akumulatora ołowiowego. Napięcie doprowadzone do ADIS16480 było stabilizowane przez niskoszumowy stabilizator liniowy. Zasilanie IMU1750 zrealizowano natomiast z wykorzystaniem układu monitorującego zasilanie. Temperatura powietrza w trakcie wykonywania badań wynosiła $T_A = 25^{\circ}C$.

Wstępne przetwarzanie danych oraz konfigurację ADIS16480 wykonywał procesor DSP znajdujący się na płycie ewaluacyjnej czujnika ADIS. Jego zadaniem, oprócz konwersji danych do formatu tekstowego, była komunikacja z komputerem PC. Zasilanie płyty ewaluacyjnej pochodziło z gniazda USB. Dane z czujnika IMU1750 przesyłano do komputera PC w postaci binarnej poprzez konwerter interfejsów RS422 -> Ethernet. Schemat opisanego stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rysunku 1.



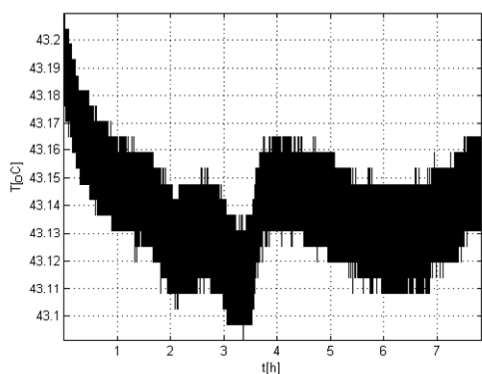
Rys 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego do badania błędów losowych czujników ADIS16480 i IMU1750.

Opis eksperymentu

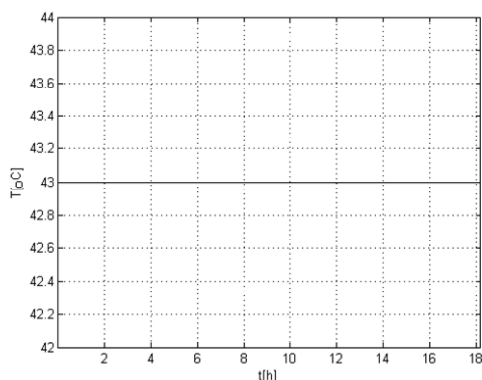
Metoda analizy wariancji Allana pozwala na pominięcie błędów deterministycznych oraz nieznanymi, stałych błędów losowych w trakcie przygotowywania badań. Ponieważ pomiary wykonywane są w układzie współrzędnych związanym z Ziemią, składowa stała prędkości obrotowej zostaje rozłożona na osie czułości badanych giroskopów. Jej wartość traktowana jest jako nieznaną stałą, ponieważ w trakcie badań nie jest znany kierunek północy rzeczywistej. Dodatkowo na wartość pomiarów nakłada się nieznaną stałą wartość błędu niezrównoważenia, wynikająca z procesu automatycznej kalibracji czujników w trakcie uruchamiania.

Wyżej wymienione składowe nie wpływają na wyniki analizy błędów losowych czujników bezwładnościowych za pomocą analizy AV, jednakże ich usunięcie jest konieczne przed integracją sygnałów w celu określenia przemieszczeń.

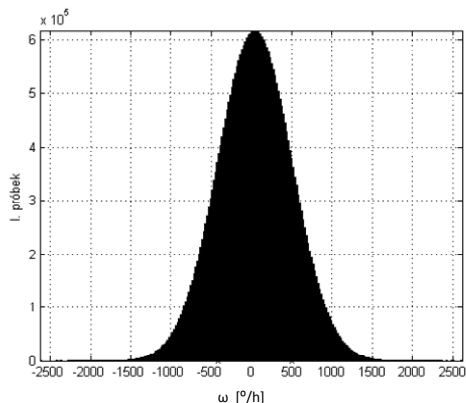
W trakcie wykonywania badań zarejestrowano przebiegi sygnałów pochodzących z 3 giroskopów i 3 przyspieszeniomierzy czujników ADIS16480 oraz IMU1750. Częstotliwość próbowania sygnałów z czujnika ADIS16480 wynosiła 1230 Hz, zaś z czujnika IMU1750 1000 Hz. Czas rejestracji danych wyniósł 12 godzin.



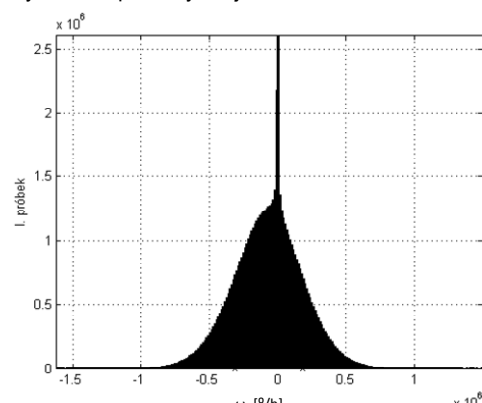
Rys 2. Wykres temperatury czujnika ADIS16480 w trakcie badań



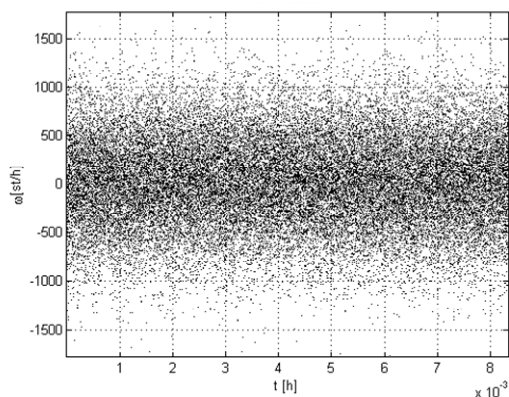
Rys 5. Wykres temperatury czujnika IMU1750 w trakcie badań



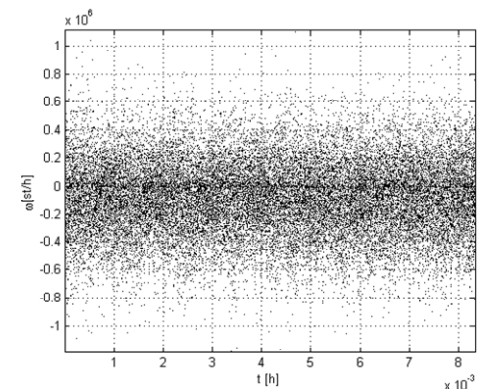
Rys 3. Histogramm poddanych analizie danych pomiarowych giroskopu osi X czujnika ADIS16480



Rys 6. Histogramm poddanych analizie danych pomiarowych giroskopu osi X czujnika IMU1750



Rys 4. Fragment przebiegu czasowego sygnału giroskopu osi X z czujnika ADIS16480

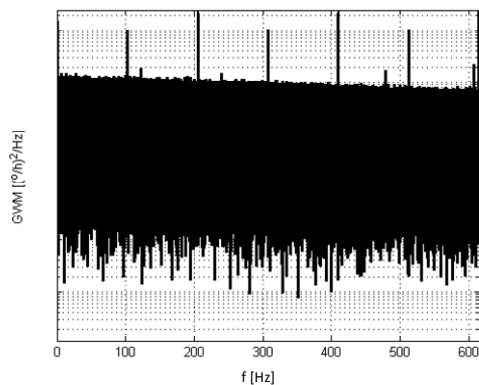


Rys 7. Fragment przebiegu czasowego sygnału giroskopu osi X z czujnika IMU1750

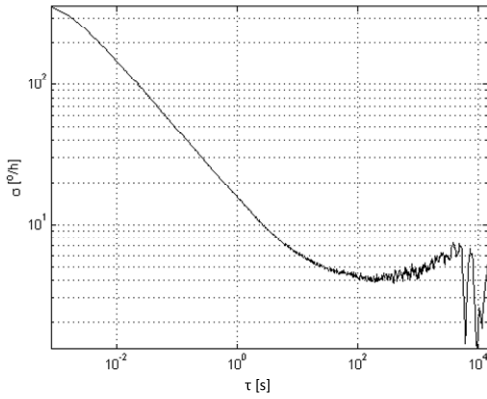
Wyniki eksperymentu

Przed przystąpieniem do analizy wariancji dokonano wstępnej oceny pomiarów mającej na celu usunięcie zakłóceń z początkowych i końcowych próbek pomiarów. Wstępna analiza wyników obejmowała ocenę wahań temperatury wewnątrz czujników, ocenę histogramów oraz przebiegów czasowych dla poszczególnych osi czujników bezwładnościowych. Z analizowanych sygnałów usunięto rekordy, dla których temperatura czujników nie znajdowała się w stanie ustalonym. Przebieg temperatury czujników w trakcie badań przedstawiono na poniższych wykresach. Histogramy sygnałów czujnika ADIS16480 dla stanu ustalonego sygnału przyjmują kształt krzywej dzwonowej, typowej dla zakłóceń o rozkładzie normalnym. Na histogramie giroskopu IMU1750, przedstawionym na rysunku 6 widoczne są wyraźne zakłócenia o innym charakterze. Oprócz znacznej liczby próbek skupionych wokół wartości 6000 °/h, nieprawidłowy jest zakres mierzonych wielkości. Sugeruje to występowanie silnych

zakłóceń elektromagnetycznych lub mechanicznych. Zbliżone wyniki uzyskano także dla pozostałych osi czułości giroskopów IMU1750 oraz przyspieszeniomy.

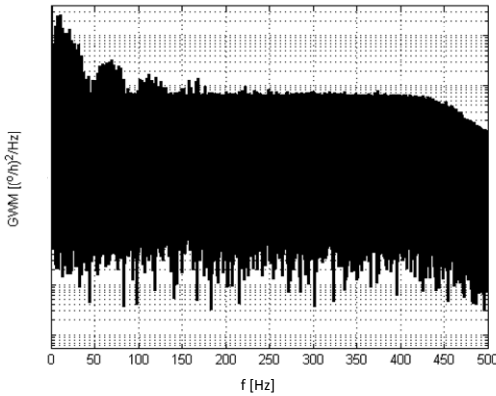


Rys 8. Wykres gęstości widmowej mocy sygnału z giroskopu osi X czujnika ADIS16480



Rys 10.

Wykres wariacji Allana danych z giroskopu osi X czujnika ADIS16480



Rys 9. Wykres gęstości widmowej mocy sygnału z giroskopu osi X czujnika IMU1750

Wykresy gęstości widmowej mocy GMM sygnałów z obu czujników na wykresach 8 i 9 zdradzają występowanie zakłóceń harmoniczných. Charakter tych zakłóceń dla obu czujników jest różny. Zakłócenia o podobnym charakterze występowały jednak we wszystkich osiach pomiarowych giroskopów i przyspieszeniomierzy.

Uzyskane wyniki pomiarowe dla IMU1750 sugerują konieczność dalszych analiz zmierzających do ustalenia przyczyn występowania błędów znacznie odbiegających od specyfikacji tego urządzenia. Konieczna jest weryfikacja sprawności samego IMU, jak również analiza warunków jego pracy w zaprojektowanym układzie pomiarowym, co będzie przedmiotem dalszych badań. Analizowanie błędów losowych tego IMU na podstawie zarejestrowanych pomiarów byłoby na obecnym etapie obciążeniem dużym błędem, który nie pozwoliłby na prawidłową ocenę jego parametrów. Z tego powodu w dalszej części artykułu szczegółowo przeanalizowane zostały jedynie dane z czujników wchodzących w skład IMU ADIS16480.

Analiza wariacji Allana danych z IMU

Analizie wariacji poddano dane z przyspieszeniomierzy i giroskopów w osiach X, Y i Z czujnika ADIS16480. Przykładowy wykres wariacji AV prędkości kątowej w zależności od czasu uśredniania τ przedstawiono na rysunku 10. Dynamiczne zmiany wartości funkcji $\sigma(\tau)$, na jej końcowym odcinku, wynikają z rosnącego wraz z długością τ błędu wyznaczenia wartości σ . Wartości błędów losowych wyznaczonych na podstawie analizy AV zestawiono natomiast w tabeli 3.

Tabela 3. Wyznaczone wartości błędów losowych z danych pomiarowych czujnika ADIS16480

Rodzaj błędu	Oś X	Oś Y	Oś Z
Dryf giroskopów [$^{\circ}/h$]	7,80	7,28	6,393
Błąd ARW [$^{\circ}/\sqrt{h}$]	0,284	0,258	0,258
Obciążenie przyspieszeniomierzy [mg]	0,093	0,057	0,052
Błąd VRW [$\frac{m}{s}/\sqrt{Hz}$]	0,0287	0,0285	0,0284

Model błędów INS w dwuwymiarowym statycznym układzie współrzędnych

Wpływ błędów czujników na wynik estymacji położenia zostanie przedstawiony na przykładzie dwuwymiarowego modelu systemu inercyjnego w statycznym układzie współrzędnych. Ten szczególny model pozwala na wyjaśnienie podstawowej zasady propagacji błędów INS i został obszernie opisany w wielu publikacjach [8,9].

Rozpatrzmy ruch obiektu związanego z bazowym układem współrzędnych O_b w przestrzeni inercyjnej, w której działa siła ciężenia wywołująca przyspieszenie g_{zi} . W trakcie ruchu środek układu O_i pokrywa się ze środkiem układu O_b , ale jego orientacja przestrzenna pozostaje niezmienna. Przyspieszenia mierzone w układzie O_b , są transformowane do układu współrzędnych inercjalnych po określeniu względnego obrotu θ , a następnie po usunięciu składowej przyspieszenia ziemskiego są podwójnie całkowane. Schemat systemu przedstawiony został na rys. 12.

Informacja o prędkości kątowej ω_{yb} w systemie INS służy do aktualizacji początkowej orientacji układu bazowego. Niewielkie błędy pomiaru tej wielkości akumulują się w kącie θ , którego wartość wykorzystywana jest w trakcie rzutowania wartości zmierzonych przyspieszeń a_{xb} , a_{zb} na osie inercyjnego układu współrzędnych, zgodnie z przedstawionym, w postaci równań różniczkowych (1), algorytmem INS w dwuwymiarowym układzie współrzędnych.

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{x}_i &= v_{xi} \\ \dot{z}_i &= v_{zi} \\ \dot{v}_{xi} &= a_{xi} + g_{xi} \\ \dot{v}_{zi} &= a_{zi} + g_{zi} \\ a_{xi} &= a_{xb} \cos \theta + a_{zb} \sin \theta \\ a_{zi} &= -a_{xb} \sin \theta + a_{zb} \cos \theta \\ \dot{\theta} &= \omega_{yb} \end{aligned}$$

Źródłami błędów estymacji współrzędnych x_i i z_i są obciążenia przyspieszeniomierzy (δa_{xb} , δa_{zb}), dryf giroskopu ($\delta \omega_{yb}$) oraz błąd określenia początkowej orientacji układu inercyjnego ($\delta \theta$). Zakładając, że wartość przyspieszenia ziemskiego g jest stała i przeprowadzając rachunek błędów można zapisać model:

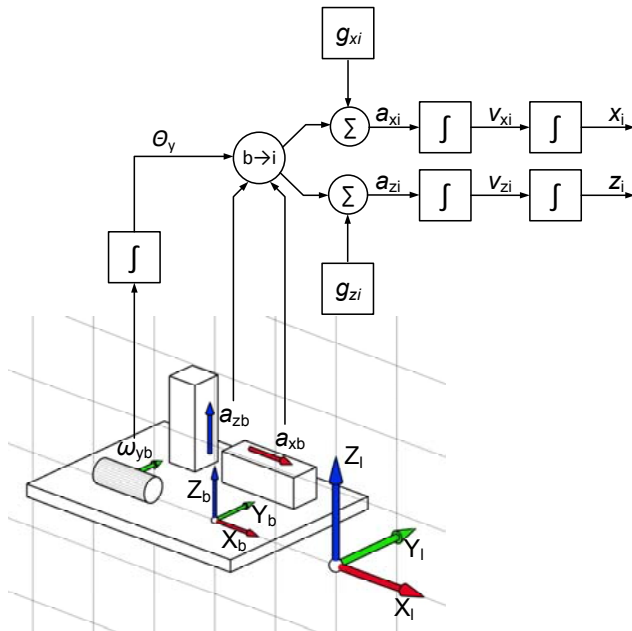
$$(2) \quad \begin{aligned} \delta \dot{x}_i &= \delta v_{xi} \\ \delta \dot{z}_i &= \delta v_{zi} \\ \delta \dot{v}_{xi} &= \delta a_{xi} \\ \delta \dot{v}_{zi} &= \delta a_{zi} \\ \delta a_{xi} &= a_{zi} \delta \theta + \delta a_{xb} \cos \theta + \delta a_{zb} \sin \theta \\ \delta a_{zi} &= -a_{xi} \delta \theta - \delta a_{xb} \sin \theta + \delta a_{zb} \cos \theta \\ \delta \dot{\theta} &= \delta \omega_{yb} \end{aligned}$$

Niepewność pomiaru wynikająca z dryfu giroskopu przenosi się proporcjonalnie do wartości przyspieszeń mierzonych w układzie inercjalnym. Jego wartość kumuluje się na wszystkich etapach przetwarzania zaczynając od kąta θ , aż do wyznaczenia położenia w układzie inercjalnym. Niepewności pomiaru wnoszone przez dryf $\delta \omega$ do pomiaru x_i i z_i narastają w czasie i wynoszą:

$$(3) \quad \begin{aligned} x_i: & \quad \delta \omega_{yb} a_{zi} t^3 / 6 \\ z_i: & \quad -\delta \omega_{yb} a_{xi} t^3 / 6 \end{aligned}$$

Wpływ obciążenia przyspieszeniomierzy na dokładność wyznaczenia położenia obiektu również zależy od czasu i jest rzutowana na osie układu inercjalnego w zależności od obliczanego kąta θ :

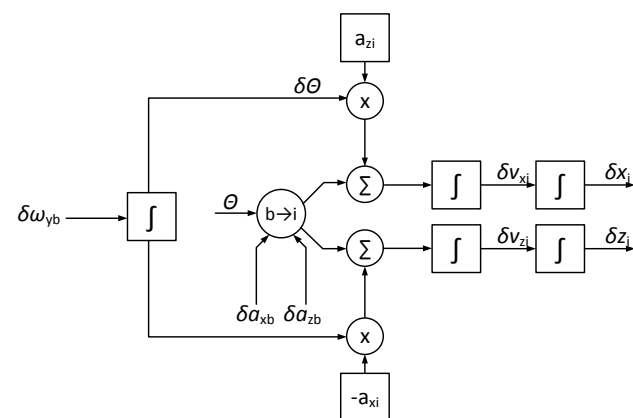
$$(4) \quad \begin{aligned} x_i: & \quad \delta a_{xb} \cos(\theta) t^2 / 2 \\ & \quad \delta a_{zb} \sin(\theta) t^2 / 2 \\ z_i: & \quad -\delta a_{xb} \sin(\theta) t^2 / 2 \\ & \quad \delta a_{zb} \cos(\theta) t^2 / 2 \end{aligned}$$



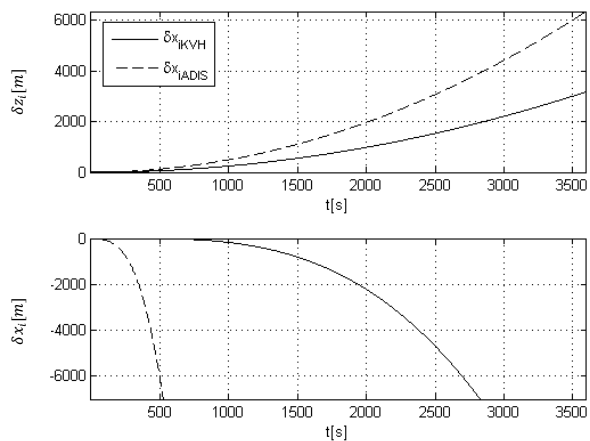
Rys 12. Schemat INS w dwuwymiarowym układzie współrzędnych

W przedstawionym modelu założono, że niepewności wyznaczenia początkowego położenia ($\delta x_0, \delta z_0$), prędkości początkowej ($\delta v_{x0}, \delta v_{z0}$) oraz kąta orientacji $\delta \theta_0$, są równe 0. Oznacza to, że znane są dokładne parametry początkowe modelu: położenie, prędkość i orientacja przestrzenna. Założenia te przyjęto również w modelu symulacyjnym, którego schemat przedstawiono na rysunku 13. Dodatkowo przyjęto, że badany układ pozostawał w bezruchu, a jedyna siła działająca w układzie występuje w osi Z i pochodzi od przyspieszenia ziemskiego.

Do symulacji wykorzystano wielkości katalogowe błędów czujników ADIS16480 oraz IMU1750, a jej wyniki przedstawiono na wykresie niepewności δx_i (rysunek 14).



Rys 13. Schemat propagacji błędów INS w dwuwymiarowym układzie współrzędnych



Rys 14. Wykres zmiany niepewności pomiaru położenia w osi X w dwuwymiarowym INS dla czujników ADIS16480 i KVH IMU1750

Podsumowanie i wnioski

W trakcie pomiarów, pomimo zastosowania niskoszumnych źródeł zasilania, izolacji mechanicznej czujników oraz wykonywania badań w godzinach nocnych, wystąpiły zakłócenia. Wartości tych zakłóceń oraz fakt, że występują one zarówno w pomiarach z giroskopów, jak i przyspieszeniomierzy sugeruje, że ich źródłem są zakłócenia elektromagnetyczne. W przypadku czujnika ADIS16480 znajdującego się na płycie ewaluacyjnej przyczyną zakłóceń jest brak separacji galwanicznej pomiędzy częścią zasilaną z portu USB komputera PC, a samym czujnikiem. Zakłócenia te nie wpływają jednak na jakość analizy wariancji Allana. Wartości otrzymane przy jej pomocy zawierają się w granicach określonych w nocie katalogowej czujnika.

Zakłócenia występujące w danych z czujnika KVH mają złożony charakter, który sugeruje iż ich źródłem są drgania mechaniczne. Zaburzeniom poddane były wszystkie elementy pomiarowe IMU w osiach X,Y,Z.

Zmierzone wartości błędów losowych czujnika ADIS16480, są zbliżone do wartości określonej przez producenta w nocie katalogowej. Zmierzony dryf giroskopów (Tabela 3) jest większy od wartości podawanej przez producenta (Tabela 1). Należy jednak pamiętać, że specyfikacja określa wartości tych parametrów dla 68% (1σ) produktów. Wielkość błędów może różnić się w sposób zasadniczy w zależności od urządzeń, a nawet dla poszczególnych osi pomiarowych.

Zakłócenia czujnika IMU1750 nie pozwoliły na dalszą szczegółową analizę parametrów błędów losowych. Przyczyna występowania zakłóceń nie została dotychczas określona i będzie poddana dalszej analizie.

Przedstawiony w artykule model błędów losowych wykorzystano dla porównania niepewności pomiaru położenia przez INS w dwuwymiarowym układzie współrzędnych. Zgodnie z oczekiwaniami niepewność pomiaru dla danych z czujnika ADIS16480 narasta z czasem szybciej niż niepewność dla danych IMU1750. Przyczyną różnic w narastaniu błędów δx_i i δz_i jest mierzone w osi Z przyspieszenie ziemskie. Zgodnie z zależnością (3) dryf giroskopu przenosi się razem z działającym w układzie inercjalnym przyspieszeniem a_{zi} i kumuluje się w wartości δx_i .

Badania nad zakłóceniami losowymi czujników inercjalnych są obecnie prowadzone m.in. w kierunku automatyzacji procesu ich wyznaczenia. Obecny stan badań w tym zakresie ukierunkowany jest na wykorzystanie metody maksymalizacji funkcji wiarygodności, której próby wykorzystania realizowane były już w pracach

realizowanych w Instytucie Geodezji i Fotogrametrii w Zurychu [10]. Podjęcie prac w tym obszarze jest również planowane jako dalszy etap badań opisanych w niniejszym artykule.

Autorzy: mgr inż. Jacek Paszek, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 02-980 Warszawa, E-mail: Jacek.Paszek@wat.edu.pl; dr hab. inż. Piotr Kaniewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 02-980 Warszawa, E-mail: Piotr.Kaniewski@wat.edu.pl; mgr inż. Michał Łabowski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 02-980 Warszawa, E-mail: Michal.Laboski@wat.edu.pl

LITERATURA

- [1] „IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optic gyros”. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1998
- [2] „IEEE recommended practice for inertial sensor test equipment, instrumentation, data acquisition, and analysis”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York., 2005
- [3] „IEEE standard definitions of physical quantities for fundamental frequency and time metrology--random instabilities”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2009
- [4] Paszek J., Kaniewski P., Badanie czujników inercjalnych z wykorzystaniem metody analizy widmowej, *Pomiar Automatyka Kontrola*, (2014), nr 9, s. 702-704
- [5] Quinchia A.G., et al. Analysis and modelling of MEMS inertial measurement unit, *International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, Starnberg 2012
- [6] ANALOG DEVICES, Datasheet ADIS16480 Ten Degrees of Freedom Inertial Sensor with Dynamic Orientation Outputs, Rev. E, (2015), www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DIS16480.pdf
- [7] KVH Industries, KVH® 1750 Inertial Measurement Unit (IMU) Technical Manual, Rev. A, (2012), www.kvh.com
- [8] Titterton D. H., Weston J. L., Strapdown inertial navigation technology, The Institution of Engineering and Technology, (2004)
- [9] Lawrence A., Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance and Control, Second Edition, Springer-Verlag, New York.
- [10] Stebler Y., Hosking, Constrained expectation-maximization algorithm for stochastic inertial error modeling: study of feasibility. *Measurement Science and Technology*, vol. 22, no. 7, 2011