

MILEWSKI Wiesław¹
SZELMANOWSKI Andrzej
CIEŚLIK Andrzej

MOŻLIWOŚCI KOMPUTEROWEGO WSPOMAGANIA SYSTEMU NAHELMOWEJ PREZENTACJI DANYCH W ZAKRESIE STEROWANIA POŁOŻENIEM KĄTOWYM GŁOWICY OBSERWACYJNO-CELOWNICZEJ

W referacie przedstawiono wyniki przeprowadzonych w ITWL analiz w zakresie możliwości zastosowania systemu nahelmowej prezentacji danych do sterowania uzbrojeniem modernizowanych śmigłowców wojskowych. W części ogólnej omówiono wybrane metody i układy wykorzystywane do wyznaczania położenia kąowego hełmu oraz wspomaganie pilota w zakresie nahelmowego sterowania systemem pozyskiwania danych wizualnych (np. głowice obserwacyjno-celowniczych). W części szczegółowej przedstawiono wyniki analizy wybranych algorytmów i projekt układu wyznaczania orientacji hełmu (bazujący na module pomiarowym z sensorami pola magnetycznego i siły bezwładności), wykorzystywanych do sterowania położeniem kątowym elementów pozyskania danych wizualnych (np. głowicy obserwacyjno-celowniczej). Realizacja tego tematu została przyjęta do finansowania przez MNiSzW w ramach projektu badawczego rozwojowego.

POSSIBILITIES OF THE COMPUTER ASSIST BY THE HELMET-MOUNTED DISPLAY SYSTEM IN CONTROLLING THE ORIENTATION OF THE ELECTRO-OPTICAL SURVEILLANCE SYSTEM

The paper has been intended to present results of the AFIT-conducted studies on the suitability of the helmet-mounted display system to control armament systems of upgraded military helicopters. Some selected methods and systems used to track the helmet orientation and support the pilot as far as the helmet-mounted display system's capabilities to collect visual data are concerned (e.g. electro-optical surveillance system orientation) have been discussed in 'Generalities'. In the part on the particularities analyses of some selected algorithms have been presented and followed with a design of the helmet-orientation tracking system (based on the measuring module with the magnetic and inertial field components) used to control the orientation of the electro-optical surveillance system. This project has been financed by the Ministry of Science & Higher Education of Poland as a scientific research & development project (R&D).

¹ Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Awioniki, 01-494 Warszawa, ul. Księcia Bolesława 6.
Tel.: + 48 22 685-12-03, 685-10-43, Fax: + 48 22 685-10-43, E-mail: andrzej.szelmanowski@itwl.pl

1. WSTĘP

Współczesne zintegrowane systemy awioniczne obejmują m.in. nahełmowe systemy sterowania uzbrojeniem, w tym tzw. nahełmowe systemy celownicze [1]. Wykorzystują one nahełmowe systemy prezentacji danych oraz systemy uzbrojenia, w tym tzw. głowice obserwacyjno-celownicze jako źródła danych obrazowych (zabudowane m.in. na śmigłowcach AH-1 COBRA, AH-64 APACHE i TIGER HAC). W wersji podstawowej głowice takie są wykorzystywane do pozyskiwania informacji obrazowej, w wersji zaawansowanej – umożliwiają m.in. automatyczne śledzenie wybranego celu (tzw. AUTOTRACKING). Dla przykładu, wersja HAC śmigłowca TIGER wyposażona jest w celownik MMS osadzony na szczycie wirnika (rys.1.) dla zapewnienia obserwacji załodze w zakresie TV i zobrazowania celu w podczerwieni.



Rys.1. Widok hełmu z elementami systemu celowniczego TopOwl (po lewej) i zabudowanej głowicy obserwacyjno-celowniczej (po prawej) dla śmigłowca TIGER HAC

Urządzeniami wspomagającymi jest dalmierz laserowy oraz układ naprowadzający pociski rakietowe. Wersja ta zawiera nowoczesny wyświetlacz danych i parametrów celowania umieszczony w hełmie pilota/operatora systemu uzbrojenia śmigłowca. Dodatkowo na hełmie zabudowane są zintegrowane sensory FLIR, umożliwiające wykonywanie lotu w warunkach ograniczonej widoczności i nocnych. Obraz z sensora FLIR jest powielony na miniaturze układu CRT i zrzucony na wyświetlacz hełmu. Widok zarówno dla lewego, jak i prawego oka jest identyczny i może być łączony w jeden obraz. Dane nawigacyjno - celownicze przekazywane są bezpośrednio tylko do jednego oka.

Jedną z ciekawszych i utylitarnych aplikacji nahełmowych systemów celowniczych jest metoda nahełmowego sterowania uzbrojeniem (lub wyposażeniem) statków powietrznych, która może być wykorzystana do sterowania położeniem kątowym głowic obserwacyjno-celowniczych (w wydaniu zaawansowanym na śmigłowcach wojskowych), czy też układów uproszczonych w postaci zestawu kamer umożliwiających obserwacje w zakresie telewizyjnym lub podczerwieni (dla śmigłowców cywilnych). Systemy takie przeznaczone są do wspomaganie działania wybranych służb państwowych, m.in. straż pożarna, policja, służba graniczna, służba ochrony środowiska (np. patrole ekologiczne monitorujące stan zanieczyszczenia wody Zatoki Gdańskiej).

2. WYBRANE SYSTEMY NAHEŁMOWE WSPÓLPRACUJĄCE Z GŁOWICAMI OBSERWACYJNO-CELOWNICZYMI

Jednym z bardziej znanych systemów nahełmowego zobrazowania i sterowania uzbrojeniem jest system nahełmowego wyświetlacza parametrów pilotażowo-celowniczych typu IHADSS, zabudowany na śmigłowcu AH-64 APACHE. W zestawie systemu uzbrojenia tego śmigłowca znajduje się działko Hughes XM 230, którego położenie sterowane jest za pomocą systemu nahełmowego (ruch głowy pilota wywołuje odpowiedni ruch stanowiska ruchomego) oraz głowica obserwacyjno-celownicza z systemem PNVS/TADS (rys.2.).

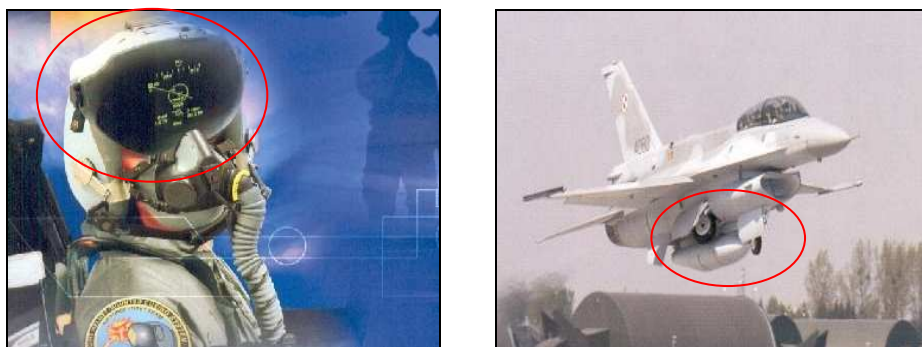


Rys.2. Widok nahełmowego wyświetlacza parametrów celowniczych IHADSS (po lewej) i głowicy obserwacyjnej PNVS/TADS (po prawej) dla śmigłowca AH-64 APACHE

Na śmigłowcu AH-64 APACHE zabudowane jest działko Hughes XM230 Chain Gun, nazwane tak ze względu na obracający się rygiel zamkowy. Napęd rygla stanowi mechanizm łańcuchowy, co pozwala osiągnąć wysoki poziom niezawodności działania. Działko to charakteryzuje się zakresem zmian położenia kąтового względem osi głównych platformy śmigłowca w elewacji (kącie podniesienia) od $+11^{\circ}$ (do góry) do -60° (do dołu) oraz 110° w azymucie (w lewo i w prawo).

Z kolei głowica obserwacyjno-celownicza stanowi sprzężenie systemów celowniczych TADS i PNVS. Jak wykazują analizy [1], przy obecnym poziomie technologicznym (w zakresie osiągniętych dokładności wizowania celu za pomocą urządzeń celowniczych) ocenia się, że nie ma większego sensu celowanie w punkt, którego pilot nie może zobaczyć, zaś poziome nakierowanie działka śmigłowca AH-64 APACHE jest już na granicy poruszania się głowicy TADS w azymucie i większe niż pionowe nakierowanie PNVS. Podczas normalnego lotu działko jest zablokowane w pozycji bezpiecznej (wzdłuż osi śmigłowca), natomiast w czasie wykonywania zadania bojowego działko może być wycelowane ręcznie lub sprzężone z głowicą TADS/PNVS. Sprzężenie to może być realizowane za pomocą pulpitu sterowania lub za pomocą systemu nahełmowego IHADSS (integrującego układ określania położenia hełmu i system zobrazowania celownika). Przy wykorzystaniu systemu nahełmowego działko może być wycelowane tylko przez jednego członka załogi (pilota lub operatora) obserwującego cel. Może też być przestawione wzdłuż osi śmigłowca w tryb HDD (wskaźnik przezierny lub monitor czołowy).

Innym przykładem nowoczesnego systemu najełmowego wykorzystywanego do sterowania wyposażeniem pokładowym jest system JHMCS, stosowany na samolocie F-16 (rys.3.). System ten steruje pracą głowicy obserwacyjno-celowniczej PANTERA, zabudowanej w zasobniku podwieszanym do kadłuba samolotu [2].



Rys.3. Widok najełmowego zintegrowanego systemu celowniczego JHMCS (po lewej) i zasobnika z głowicą obserwacyjną PANTERA (po prawej) dla samolotu F-16

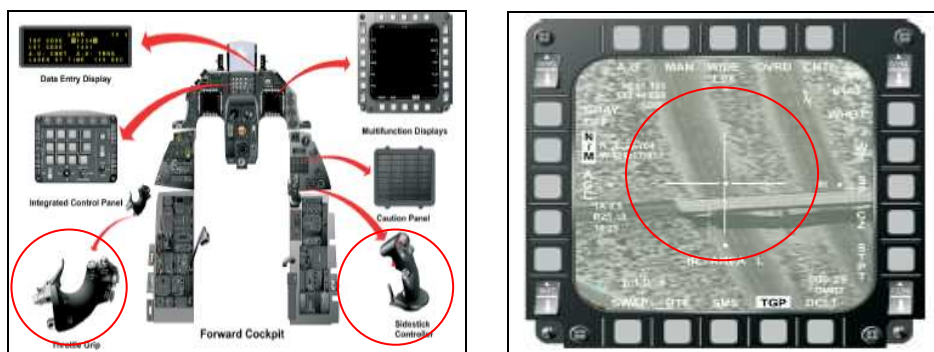
Głowica obserwacyjno-celownicza PANTERA umożliwia generowanie zobrazowania o wysokiej rozdzielczości dla detekcji i akwizycji celów powietrznych i naziemnych. Śledzenie zaznaczonych przez pilota celów pozwala na przygotowanie i wykorzystanie zarówno uzbrojenia konwencjonalnego (m.in. działa i pocisków niekierowanych), jak i broni precyzyjnej (bomb i pocisków kierowanych laserowo). Dostarczane przez głowicę zobrazowanie pozwala na uzyskanie obserwacji zarówno w zakresie widzialnym, jak i w podczerwieni (przy wykorzystaniu technologii noktowizyjnej NVG).

Jak się obecnie ocenia, najnowocześniejszym systemem najełmowym jest wyświetlacz zbudowany dla samolotu F-35. Na wyświetlaczu HMDS prezentowane są informacje o znaczeniu bojowym, takie jak najważniejsze parametry lotu i dane celownicze do wszystkich systemów uzbrojenia. System pozwala na wykonywanie lotów w nocy dzięki noktowizji, która odwzorowuje obraz otoczenia zgodnie z ruchami głowy pilota oraz kierunkiem jego wzroku. Co ciekawe, system najełmowy samolotu F-35 umożliwia obserwację przez kadłub statku powietrznego – np. spojrzenie pilota w dół spowoduje, że wyświetlacz HMDS pokaże obraz z pod kadłuba samolotu. Funkcja ta jest bardzo pomocna w podczas prowadzenia walki powietrznej. Dzieje się tak dlatego, że system HMDS odpowiednio dopasowuje obrazy otrzymywane z zestawu kamer umieszczonych na zewnątrz samolotu. Dzięki temu pilot może kontrolować otoczenie statku powietrznego.

Użycie takiego hełmu pozwala wyeliminować z kabiny wyświetlacz projekcji czołowej w postaci wskaźnika przeziernego HUD. Hełm spełnia rolę interfejsu integrującego pilota z samolotem, gdzie obraz cyfrowy wyświetlany jest na wizjerze hełmu. Dzięki takiemu systemowi pilot samolotu F-35 może też śledzić inne samoloty, nawet te niewidoczne dla jego wzroku – zanim pilot dostrzeże maszynę wroga znajdującą się w znacznej odległości, na wyświetlaczu zobaczy odpowiedni punkt z opisem. Według posiadanych informacji, sterowanie tym systemem odbywa się całkowicie za pomocą hełmu.

3. PROBLEMY STEROWANIA POŁOŻENIEM GŁOWICY OBSERWACYJNO-CELOWNICZEJ ZA POMOCĄ SYSTEMU NAHEŁMOWEGO

Podstawową wadą w sterowaniu pracą i położeniem głowicy obserwacyjno-celowniczej samolotu F-16 jest konieczność wykorzystania pulpitu sterowania i manipulatora (rys.4.).



Rys.4. Widok elementów sterowania głowicą obserwacyjno-celowniczą PANTERA (po lewej) i zobrażenia na monitorze głowicy (po prawej) dla samolotu F-16

Podobnie dla systemu zobrażania śmigłowca W-3PL GŁUSZEC, wykorzystującego głowicę obserwacyjno-celowniczą TOPLITE (rys.5.), sterowanie jej położeniem kątowym odbywa się za pomocą specjalnego manipulatora zabudowanego na pulpicie sterowania. Przejęcie sterowania przez system nahełmowy wymaga użycia dodatkowego układu np. komputera misji (w celu sprzężenia systemów poprzez cyfrową szynę danych MIL-1553B) oraz komputera graficznego (w celu wprowadzenia torów zobrażenia głowicy do wyświetlacza nahełmowego i zarządzania trybami wyświetlania).



Rys.5. Widok głowicy obserwacyjno-celowniczej TOPLITE (po lewej) i układu ręcznego sterowania położeniem głowicy (po prawej) dla śmigłowca W-3PL GŁUSZEC

Przedstawione wyżej systemy nabełmowe współpracujące z głowicami obserwacyjno-celowniczymi (stosowane na wojskowych statkach powietrznych) wykorzystują sterowanie ręczne za pomocą pulpitów sterujących. Jednak ręczne sterowanie położeniem kątowym głowicy (pomimo dużej dokładności ustawiania linii wizowania na wybrany cel przy wykorzystaniu zobrazenia i powiększania obrazu na monitorze głowicy) jest męczące, gdyż wymaga ciągłej koncentracji uwagi pilota / operatora i konieczności przenoszenia jego wzroku z obserwowanego obiektu (celu) na zobrazenie monitora i odwrotnie. Dla ułatwienia śledzenia celu można wprowadzić nabełmowe sterowanie położeniem kątowym głowicy obserwacyjno-celowniczej. Wtedy pilot obserwujący wybrany obiekt jednocześnie wskazuje (poprzez system zobrazenia nabełmowego) kierunek wizowania dla głowicy.

Kąty potrzebne do sterowania położeniem kątowym głowicy obserwacyjno-celowniczej względem statku powietrznego (elewacji i azymutu osi wizowania głowicy) można wyznaczyć z następujących zależności:

$$\mathbf{E}_{\text{GOC}}(t) = \Theta_{\text{PO}}(t) - \Theta_{\text{SP}}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{A}_{\text{GOC}}(t) = \Psi_{\text{PO}}(t) - \Psi_{\text{SP}}(t) \quad (2)$$

gdzie: $\mathbf{E}_{\text{GOC}}(t)$ - wymagana elewacja osi wizowania głowicy w układzie statku powietrznego naprowadzanej za pomocą systemu nabełmowego

$\mathbf{A}_{\text{GOC}}(t)$ - wymagany azymut osi wizowania głowicy w układzie statku powietrznego naprowadzanej za pomocą systemu nabełmowego

$\Theta_{\text{PO}}(t)$ - pochylenie hełmu pilota / operatora w układzie horyzontalnym

$\Psi_{\text{PO}}(t)$ - odchylenie hełmu pilota / operatora w układzie horyzontalnym

$\Theta_{\text{SP}}(t)$ - pochylenie statku powietrznego w układzie horyzontalnym otrzymane z pokładowego systemu nawigacyjnego np. INS/GPS

$\Psi_{\text{SP}}(t)$ - odchylenie statku powietrznego w układzie horyzontalnym otrzymane z pokładowego systemu nawigacyjnego np. INS/GPS

O ile nie ma większego problemu [1] z określeniem położenia przestrzennego statku powietrznego (np. wg danych z pokładowego systemu nawigacyjnego INS/GPS), to określenie orientacji przestrzennej hełmu względem kabiny statku powietrznego wymaga zastosowania zaawansowanych metod. Jednym ze sposobów wyznaczania orientacji hełmu jest algorytm wykorzystujący mierzone przez hełm składowe wektora pola magnetycznego $[\mathbf{H}_{\text{PO}}(t)]$ i siły ciężkości $[\mathbf{G}_{\text{PO}}(t)]$ w układzie współrzędnych hełmu pilota / operatora. Przykładowe zależności bazują na określeniu następujących wektorów:

$$[\mathbf{S}(t)] = [S_x(t), S_y(t), S_z(t)] = [\mathbf{G}_{\text{PO}}(t)] \times [\mathbf{H}_{\text{PO}}(t)] / \text{ABS}\{ [\mathbf{G}_{\text{PO}}(t)] \times [\mathbf{H}_{\text{PO}}(t)] \} \quad (3)$$

$$[\mathbf{U}(t)] = [U_x(t), U_y(t), U_z(t)] = [\mathbf{G}_{\text{PO}}(t)] / \text{ABS}\{ [\mathbf{G}_{\text{PO}}(t)] \} \quad (4)$$

$$[\mathbf{N}(t)] = [N_x(t), N_y(t), N_z(t)] = [\mathbf{S}(t)] \times [\mathbf{U}(t)] \quad (5)$$

gdzie: $[\mathbf{S}(t)]$ - znormalizowany wektor składowych powstałych z iloczynu wektorowego wektora siły ciężkości $[\mathbf{G}_{\text{PO}}(t)]$ i wektora pola magnetycznego $[\mathbf{H}_{\text{PO}}(t)]$

$[\mathbf{U}(t)]$ - znormalizowany wektor składowych powstałych z wektora pola siły ciężkości $[\mathbf{G}_{PO}(t)]$

$[\mathbf{N}(t)]$ - znormalizowany wektor składowych powstałych z iloczynu wektorowego wektora $[\mathbf{S}(t)]$ i wektora $[\mathbf{U}(t)]$

$[\mathbf{H}_{PO}(t)]$ - wektor składowych pola magnetycznego mierzonych w układzie hełmu

$[\mathbf{G}_{PO}(t)]$ - wektor składowych pola siły ciężkości mierzonych w układzie hełmu

Wtedy położenie przestrzenne hełmu w układzie horyzontalnym (zorientowanym względem wektorów pola magnetycznego Ziemi $[\mathbf{H}_{ZM}(t)]$ i siły ciężkości $[\mathbf{G}_{ZM}(t)]$) określają kąty pochylenia, przechylenia i odchylenia wyznaczone według następujących zależności :

$$\Theta_{PO}(t) = \text{ATN} \{ U_y(t) / U_z(t) \} \quad (6)$$

$$\Phi_{PO}(t) = \text{ATN} \{ U_x(t) / [U_y(t) \text{SIN}\Theta(t) + U_z(t) \text{COS}\Theta(t)] \} \quad (7)$$

$$\Psi_{PO}(t) = \text{ATN} \{ N_x(t) / S_x(t) \} \quad (8)$$

gdzie: $\Theta_{PO}(t)$ - pochylenie hełmu pilota / operatora w układzie horyzontalnym

$\Phi_{PO}(t)$ - przechylenie hełmu pilota / operatora w układzie horyzontalnym

$\Psi_{PO}(t)$ - odchylenie hełmu pilota / operatora w układzie horyzontalnym

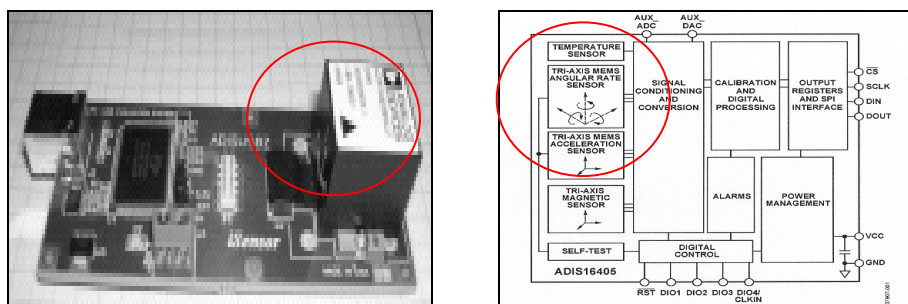
Jak widać, wykorzystanie składowych pola magnetycznego Ziemi (lub pola siły ciężkości) do wyliczania kątów orientacji przestrzennej hełmu i sterowania położeniem kątowym głowicy obserwacyjno-celowniczej wymaga wspomaganie komputerowego, w tym opracowania sposobu określenia współczynników trygonometrycznych (w wersji uproszczonej) lub macierzy cosinusów kierunkowych (w wersjach bardziej złożonych).

4. PROPOZYCJA UKŁADU KOMPUTEROWEGO WSPOMAGANIA SYSTEMU NAHELMOWEGO Z GŁOWICĄ OBSERWACYJNO-CELOWNICZĄ

Głównym celem nahełmowego systemu celowniczego (HMCS) jest wypracowanie danych celowniczych dla systemu uzbrojenia na podstawie określania orientacji przestrzennej hełmu pilota w stosunku do jego otoczenia (np. kabiny śmigłowca, pola magnetycznego Ziemi lub przestrzeni inercjalnej). Zastosowania systemu obejmują zakres od systemów zobrazowania nahełmowego aż do złożonych interfejsów systemu sterowania uzbrojeniem, umożliwiając zobrazowanie „rzeczywistości wirtualnej” na wyświetlaczach lub wizjerach, w tym obrazów otrzymywanych z głowicy obserwacyjno-celowniczej.

Jedną z metod analizowanych w ITWL w zakresie układu wyznaczania położenia kąтового hełmu jest metoda magnetyczno-inercjalna (pomiar składowych wektora pola magnetycznego i pola siły ciężkości). Oprócz wcześniej wymienionych zalet, wybrano ją z uwagi na fakt, że obecne sensory inercjalne (zaprojektowane jako nisko kosztowe) mają pożądane cechy w zakresie minimalizacji gabarytów (rzędu 20 mm) i masy (rzędu 20 g), co jest niezmiernie istotne dla układów pomiarowych zabudowywanych na hełmie pilota, z uwagi na dopuszczalne obciążenia jego kręgosłupa szyjnego.

Przykładem układu pomiarowego wykorzystującego metodę magnetyczno-inercyjną jest układ MEMS typu ADIS-16405 (rys.6.) z triadą czujników przyspieszenia liniowego i składowych wektora pola magnetycznego [3]. Minimalne wartości przekazywane cyfrowo w postaci tzw. bitu LSB wynoszą odpowiednio: $0,03 \text{ m/s}^2$ (dla pomiaru przyspieszenia liniowego) oraz $0,0005 \text{ Gs}$ (dla pomiaru pola magnetycznego).



Rys.6. Widok układu ADIS-16405 (po lewej) oraz jego schematu strukturalnego (po prawej) wykorzystywanego w ITWL do wyznaczania położenia kąтового hełmu

Do określenia kątów orientacji przestrzennej (pochylenia, przechylenia i odchylenia) hełmu z zabudowanym układem ADIS-16405 można też zastosować algorytm wykorzystujący rachunek kwaternionowy. Przykładowe zależności matematyczne opisujące chwilowy kwaternion korekcji mogą być określone z zastosowaniem tzw. aproksymacji Pade [1].

5. PODSUMOWANIE

Zaprezentowane w referacie rozwiązania techniczne w zakresie nahełmowych systemów celowniczych wskazują na możliwość wykorzystania ich do sterowania położeniem kątowych głowic obserwacyjno-celowniczych. Głównym problemem w takiej aplikacji jest opracowanie (lub dobór spośród istniejących) odpowiedniego algorytmu określania położenia kąтового hełmu pilota / operatora systemu.

Jedną z propozycji systemu stosowanego do określania położenia kąтового hełmu mogą być układy MEMS wykorzystujące metodę magnetyczno-inercyjną. W obecnym wydaniu są one łatwe do integracji z istniejącymi systemami zobrazowania nahełmowego. Mała masa i gabaryty są ich dwoma dodatkowymi zaletami mającymi duże znaczenie przy zachowaniu bezpieczeństwa pilota podczas awaryjnego opuszczania statku powietrznego.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bailey E.S.: *Filter and Bounding Algorithm Development for a Helmet Mounted Micromechanical Inertial Sensor Array*, S.B. Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology 1998.
- [2] Materiały reklamowe firmy Lockheed Martin: *F-16 Fighting Falcon*, 2006.
- [3] Materiały reklamowe firmy Analog Devices: *ADIS-16405 Triaxial Inertial Sensor with Magnetometer*, 2009.