

Stanisław MILEWSKI¹, Rafał DULSKI², Mariusz KASTEK², Piotr TRZASKAWKA²

¹AKADEMIA MARYNARKI WOJENNEJ, ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia

²WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Badania właściwości promiennych materiałów stosowanych do maskowania okrętów w zakresie podczerwieni

Dr inż. Stanisław MILEWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od roku 1996 pracuje w Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, obecnie na stanowisku adiunkta w Instytucie Uzbrojenia Okrętowego. W roku 2006 uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych w specjalności optoelektronika. Autor i współautor ponad 30 publikacji. Jego zainteresowania to zastosowania optoelektroniki w uzbrojeniu morskim.



e-mail: s.milewski@amw.gdynia.pl

Dr inż. Mariusz KASTEK

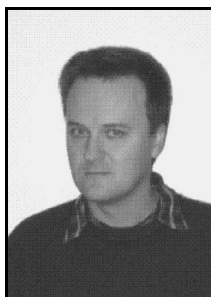
Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1997 roku jest pracownikiem WAT. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2002. Zajmuje się problematyką detekcji obiektów w systemach czujników podczerwieni stosowanych w systemach ochrony, a także analizą sygnałów oraz algorytmami detekcji implementowanymi w czujnikach podczerwieni. Pracuje na stanowisku adiunkta-kierownika Zakładu Techniki Podczerwieni i Termowizji w Instytucie Optoelektroniki WAT.



e-mail: mkastek@wat.edu.pl

Dr inż. Rafał DULSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od roku 1994 pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT, obecnie na stanowisku adiunkta w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji. W roku 1998 uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych w specjalności optoelektronika. Autor i współautor ponad 100 publikacji. Zajmuje się głównie komputerowym modelowaniem i przetwarzaniem obrazu w podczerwieni oraz techniką termowizyjną.



e-mail: rdulski@wat.edu.pl

Dr inż. Piotr TRZASKAWKA

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1991 r.). Adiunkt w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Realizuje zadania naukowo-badawcze dotyczące pomiarowego wykorzystania kamer termowizyjnych i wyznaczania sygnatur termalnych obiektów i zjawisk.



e-mail: ptrzaskawka@wat.edu.pl

Streszczenie

Maskowanie okrętów w zakresie podczerwieni jest jednym z podstawowych zadań realizowanych na współczesnym morskim teatrze działań. Efektywnej obrony okrętu wymaga informacji o aktualnym kontraście temperatury okręt – tło. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów mocy promieniowania cieplnego wybranych pokryć maskujących jednostek pływających oraz metody modyfikacji sygnatury termicznej okrętów. Analizy teoretyczne poprzedzono badaniami eksperymentalnymi z wykorzystaniem kamer termowizyjnych oraz spektrometrii.

Słowa kluczowe: detekcja w podczerwieni, maskowanie statków, wykrywanie statków, detekcja wielowidmowa.

Ships masking in IR band

Abstract

Masking of ship's thermal signature is one of the key tasks performed in modern naval operations. The main goal of such efforts is to minimize the probability of ship detection and identification, mainly in the aspects of anti-missile defense. In order to obtain effective protection, the actual information on the current thermal contrast between a ship and the background is required. The paper presents the measurement results of the radiant exitance in IR range from various types of camouflage coatings as well as selected methods for modifications of ship's thermal signatures. The assessment of the influence of simulated emissivity change on the radiant exitance emitted from the ship was conducted assuming that the emissivity of the ship equaled to that of the applied coatings. Theoretical analyses were preceded by experimental measurements. The measurements involved the use of measurement-class infrared cameras and LWIR-band Fourier-transform imaging spectroradiometer in order to determine the radiant exitance from several different surface types. The initial experiments were conducted in selected weather conditions and seasons of the year in order to take into account such factors as solar radiation (angle and intensity) and radiation reflected from some chosen elements of the surrounding scenery.

Keywords: IR detection, ship camouflage, vessels detection, multispectral detection.

1. Wstęp

Każdy obiekt nawodny może być wykryty i zidentyfikowany na podstawie cech promiennych, pozyskiwanych w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego, z których najbardziej użyteczne to: zakres widzialny, podczerwień oraz mikrofałe. Zbiór charakterystyk opisujących obiekt w danym zakresie promieniowania jest nazywany sygnaturą, np. sygnatura termiczna obiektu. Stopień redukcji lub dopasowania sygnatury do warunków (otoczenia), w których obiekt występuje jest istotny z punktu widzenia jego przetrwania na polu walki. Ze względu na zasięg wykrycia – najistotniejszym wydaje się być maskowanie obiektów w zakresie mikrofalowym. Jednakże, współczesne pole walki wymusza potrzebę maskowania obiektów w szerokim spektrum promieniowania elektromagnetycznego i co najważniejsze zachowania równowagi pomiędzy stopniem modyfikacji sygnatur.

2. Metody zmniejszania wykrywalności okrętów

Podstawowe metody modyfikacji sygnatury termicznej okrętów starszych generacji lub zbudowanych z zastosowaniem tylko wybranych elementów technologii Stealth polegają na [1-3]:

- modelowaniu cech promiennych: specjalne malowanie okrętów, ekranowanie termiczne powierzchni i punktów o największej emisji ciepła, schłodzenie spalin, zastosowanie specjalnych mat osłaniających elementy uzbrojenia i pokładów;
- użyciu pałapek myląco - maskujących (pozorne cele termiczne) oraz stosowanie systemów zraszania okrętowego, stawianie zasłon dymnych i aerozolowych.



Konwencjonalna sylwetka okrętu



Zmodernizowany projekt kadłuba okrętu jako „semi-stealth”



Projekt kadłuba okrętu według założeń technologii Stealth

Rys. 1. Kolejne etapy modyfikacji sylwetek okrętów
Fig. 1. Consecutive stages of ship shape modifications

Najbardziej istotne cechy konstrukcyjne okrętów zbudowanych w technologii Stealth polegają na zastosowaniu materiałów kompozytowych, zmniejszeniu wymiarów, zwłaszcza wysokości - brak masztów, anten oraz uzbrojenia na otwartych pokładach [4, 5].

Jedną z najistotniejszych cech bojowych nowoczesnych okrętów jest możliwość pomiaru aktualnych (w warunkach działania) charakterystyk promiennych oraz ich modyfikacja w celu dopasowania do otoczenia.

3. Modyfikacja sygnatury termicznej

Czynniki wpływające na wielkość sygnatury termicznej okrętu są analizowane w aspekcie takich cech jak: wartość temperatury oraz przestrzenny rozkład promieniowania [6, 7].

Ponieważ, sygnatura termiczna okrętu jest wyznaczana na podstawie rejestrowanego kontrastu natężenia promieniowania pomiędzy okrętem a tłem¹ - istnieje możliwość jej modyfikacji, np. poprzez zmianę: wartości temperatury lub zmianę kierunku propagacji promieniowania. Wymienione efekty można uzyskać poprzez:

- zaprojektowanie i wykonanie kadłuba okrętu (lub jego elementów) z materiałów o dobranej strukturze powierzchni zewnętrznych;
- pokrycie kadłuba okrętu (lub jego elementów) specjalnymi farbami lub materiałami;
- ustawienie wybranych powierzchni kadłuba pod różnymi kątami.

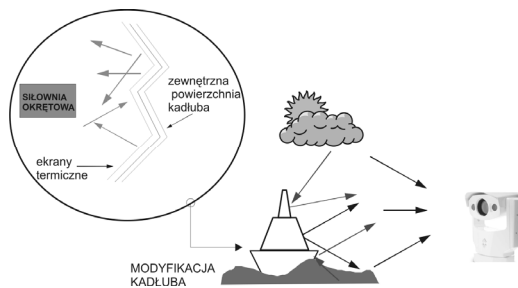
Skuteczne wykorzystanie w/w elementów modyfikujących cechy sygnatury termicznej będzie możliwe, jak również potęgowane, przy uwzględnieniu warunków występujących podczas poszukiwania (wykrycie) i śledzenia (identyfikacja) okrętu z wykorzystaniem urządzeń podczerwieni np. kamer termowizyjnych [8]. Warunki te będą określone poprzez:

- usytuowanie kamery termowizyjnej, w tym wysokość nad poziomem morza, kąt oraz kierunek obserwacji;
- parametry kamery termowizyjnej, w tym: kąt pola widzenia FOV oraz ogniskową f ,
- odległość obserwacji,
- kurs rzeczywisty oraz pozorny (względem stanowiska obserwacyjnego) i wielkość okrętu.

Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że na morzu - okręt może być widoczny na tle:

- a) nieboskłonu nad horyzontem – przy dużej odległości obserwacji,
- b) nieboskłonu i powierzchni morza – przy mniejszej odległości lub dużym kącie obserwacji,
- c) powierzchni morza (wody) - przy małej odległości lub dużym kącie obserwacji.

Wskazane warunki będą znacząco wpływały na sygnaturę termiczną okrętu na skutek oddziaływania i wykorzystania promieniowania tła [9, 10]. Składowe promieniowania, tła zarówno powierzchnia morza, jak i niebo są obiektami bardzo rozległymi, co skutkuje tym, że całkowita energia promieniowania docierająca do urządzenia rejestrującego będzie sumą energii: promieniowania okrętu, promieniowania tła (nieboskłon i powierzchnia morza) oraz promieniowania tła - odbitego od powierzchni okrętu. Omawiane zjawisko zilustrowano na rys. 2.



Rys. 2. Modyfikacja powierzchni kadłuba okrętu oraz wpływ otoczenia na zmiany sygnatury termicznej

Fig. 2. A ship's hull surface modification and influence of environment on thermal signature changes

¹ W warunkach morskich tło stanowi powierzchnia morza i niebo

4. Badania eksperymentalne

W celu określenia wielkości promieniowania z powierzchni o różnych charakterystykach promiennych przeprowadzono badania z użyciem pomiarowych kamer termowizyjnych oraz spektrometri obrazowego. Eksperymenty przeprowadzono w wybranych warunkach pogodowych i porach roku, tak aby uwzględnić min. Kąt padania oraz natężenie promieniowania słonecznego padające na badane próbki, jak również promieniowanie odbite od wybranych elementów otoczenia. W dalszym etapie prac zostały przeprowadzone pomiary emisyjności próbek dla różnych typów pokryć maskujących.

5. Termowizyjne badania płyt testowych

Specyficzne warunki obserwacji okrętów na morzu powodują, że do kamery termowizyjnej docierają trzy główne składowe promieniowania pochodzące od:

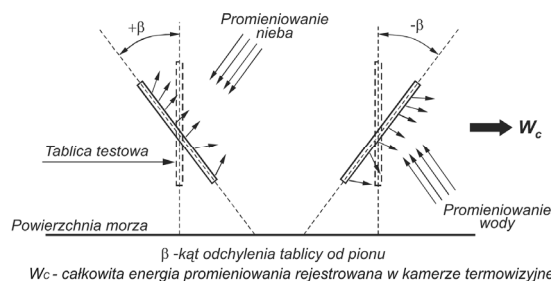
- promieniowania własnego okrętu,
- promieniowania nieba odbitego od okrętu,
- promieniowania wody odbitego od okrętu.

Wyznaczenie wszystkich składowych promieniowania jest zadaniem złożonym, gdyż ich wartości zależą od kształtu, nachylenia i emisyjności obiektu obserwowanego kamerą termowizyjną. Z tego też względu ocenę cech promiennych różnych materiałów przeprowadzono eksperymentalnie.

Do pomiarów przygotowano specjalne płyty testowe o następujących oznaczeniach i właściwościach.

- PT1 - płyta stalowa, matowa, czerniona o współczynniku emisyjności 0,98,
- PT2 - płyta izolacyjna, matowa, czarna o współczynniku emisyjności 0,95,
- PT3 - płyta aluminiowa ryflowana, lakierowana, o współczynniku emisyjności dla całej powierzchni około 0,7,
- PT4 - elastyczna mata z tłoczonej folii aluminiowej o współczynniku emisyjności 0,8,
- PT5 - płyta PCV pokryta naporowanym aluminium z wklęsłymi półkulami o średnicy 10 cm oraz współczynniku emisyjności około 0,3.

Ideę stosowania płyt testowych do pomiarów i oceny zmian właściwości promiennych różnych powierzchni od kąta ich odchylenia względem powierzchni morza przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Idea oceny właściwości promiennych wybranych pokryć maskujących okrętu

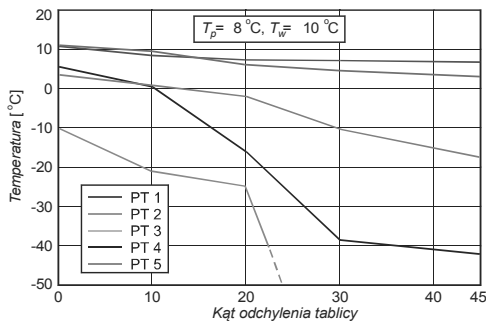
Fig. 3. The idea of assessment of radiative properties of selected ship camouflage

Odchylenie płyt testowych z dodatnim kątem odchylenia (+ β) uwidacznia wpływ promieniowania nieba na termiczny obraz i temperaturę radiacyjną badanej płyty (rys. 4).

Dla ujemnych kątów odchylenia od pionu (- β) płyty testowe odbijają promieniowanie wody morskiej. Wyniki pomiarów termowizyjnych dla tego eksperymentu zamieszczono na rys. 5.

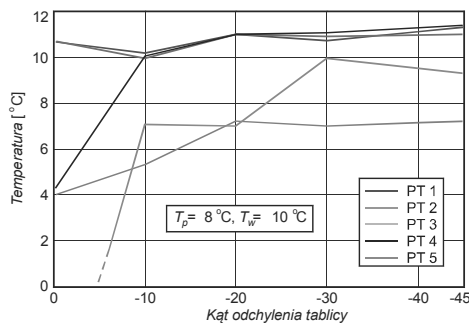
Pomiary termowizyjne płyt testowych zostały wykonane w realnych warunkach morskich z wykorzystaniem kamer termowizyjnych typu Agema 900 LW. Celem eksperymentu było określenie kierunku zmian temperatury radiacyjnej płyt testowych, o różnych cechach promiennych, w funkcji kąta odchylenia – tym samym wskazanie wpływu poszczególnych składników tła na

wielkość całkowitej energii promieniowania (W_C) rejestrowaną przez kamerę termowizyjną.



Rys. 4. Zmiany temperatury płyt testowych w funkcji dodatniego kąta odchylenia kadłuba okrętu

Fig. 4. Variations in temperature of tested plates vs. positive angle of ship's hull deviation



Rys. 5. Zmiany temperatury płyt testowych w funkcji ujemnego kąta odchylenia kadłuba okrętu

Fig. 5. Variations in temperature of tested plates vs. negative angle of ship's hull deviation

Przedstawiona metoda pomiaru temperatury radiacyjnej płyt charakteryzuje się dużą niedoskonałością, co w połączeniu z uzyskanymi niepełnymi danymi dotyczącymi wielkości promieniowania tła powoduje, że wyniki mają jedynie charakter poglądowy.

6. Badania emisyjność farb pokrywowych

W przypadku okrętów głównym materiałem pokrywającym kadłuby są różnego rodzaju farby, które oprócz przeznaczenia ochronnego - powierzchni zewnętrznej każdej jednostki pływającej zabezpiecza się przed wpływem oddziaływania „agresywnego” środowiska morskiego - muszą charakteryzować się także specjalnymi właściwościami np. maskować okręt w zakresie widzialnym (tzw. kamuflaż optyczny), pochłaniać lub rozpraszać fale radarowe. Do oceny skuteczności maskowania okrętów w zakresie podczerwieni jest niezbędna znajomość emisyjności powierzchni, zwłaszcza kadłuba i nadbudówek okrętu.

W większości praktycznych zastosowań, do scharakteryzowania emisyjności określonych materiałów przyjmuje się podawane w literaturze tablicowane wartości oznaczane poprzez współczynnik $\varepsilon(\lambda, T)$. Najczęściej są to emisyjności wyznaczone w kierunku normalnej do danej powierzchni. Należy jednak pamiętać, że emisyjność obiektu jest zależna od kąta obserwacji, długości fali, a jej wartość może również zmieniać się w czasie.

Oznacza to, że emisyjność całkowita obiektu ε_T jest funkcją kąta obserwacji θ , długości fali promieniowania λ , temperatury obiektu T oraz czasu t [4, 5]:

$$\varepsilon_T = f(\theta, \lambda, T, t) \quad (1)$$

Znajomość emisyjności obiektu umożliwia wyznaczenie dokładnej wartości temperatury i mocy promieniowania obiektu na podstawie zarejestrowanych obrazów termowizyjnych.

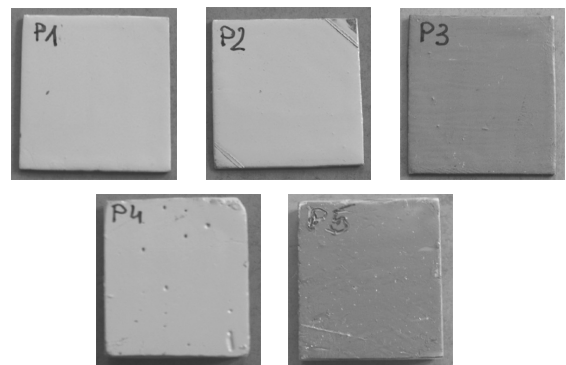
Przy omawianiu emisyjności okrętów najczęściej rozpatruje się emisyjność metali, przy czym, jak wcześniej wskazywano istnieją również jednostki zbudowane z innych materiałów.

Duże znaczenie i wpływ na zmianę właściwości promiennych powierzchni jednostek pływających mają czynniki powodujące tzw. efekt starzenia materiałów. W warunkach środowiska morskiego czynnikami takimi są:

- duża wilgotność powietrza powodująca korozję metali,
- kontakt z wodą morską o znacznym zasoleniu,
- obrastanie powierzchni glonami,
- czynniki mechaniczne, powodujące uszkodzenia powłok ochronnych.

Do wyznaczenia emisyjności powłok ochronnych okrętu wykonano dwa zestawy próbek pomalowanych wybranymi do badań farbami. Przygotowane do badań próbki (rys. 6) oznaczono jako:

- próbki P1, P2, P3 - na podłożu ze stali kadłubowej,
- próbki P4 oraz P5 - na podłożu z maty szklanej.



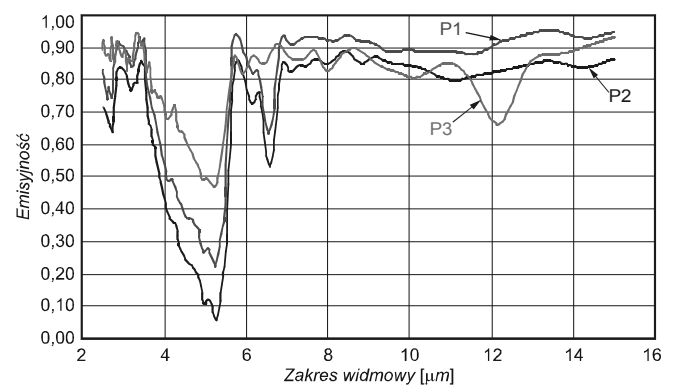
Rys. 6. Zdjęcia próbek pomiarowych

Fig. 6. Pictures of measuring samples

Wyznaczenie emisyjności, w kierunku normalnej do powierzchni badanej próbki jest możliwe na podstawie rozkładów widmowych współczynnika odbicia $\rho(\lambda)$, wg zależności [4]:

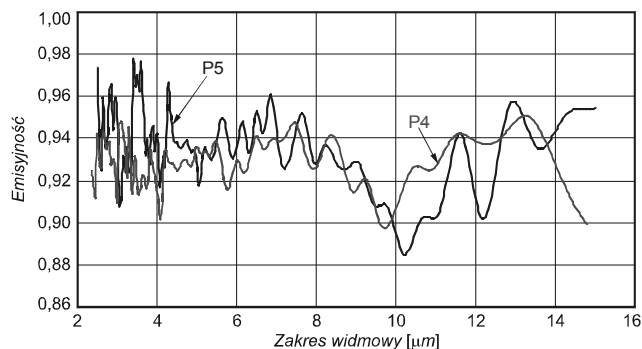
$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) \quad (2)$$

Na podstawie pomiarów fotometrycznych zostały wyznaczone wartości emisyjności widmowych dla badanych próbek. Uzyskane wyniki dla próbek na podłożu ze stali kadłubowej przedstawiono na rys. 7, natomiast dla próbek na podłożu z maty szklanej na rys. 8.



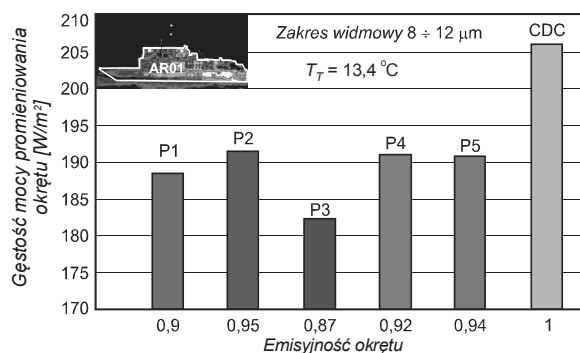
Rys. 7. Emisyjność widmowa próbek P1, P2 i P3

Fig. 7. Spectral emissivity of P1, P2, and P3 samples

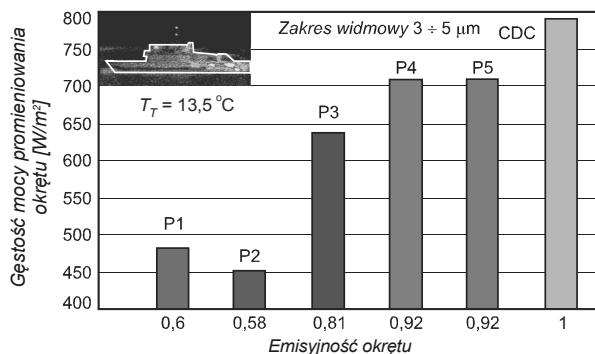


Rys. 8. Emisyjność widmowa próbek P4 i P5
Fig. 8. Spectral emissivity of P4, and P5 samples

Ocenę wpływu symulowanej zmiany emisyjności obiektu na wartość gęstości mocy promieniowania przeprowadzono zakładając, że emisyjność okrętu jest równa emisyjności badanych farb. Jednocześnie, wykonano obliczenia mocy promieniowania okrętu dla warunków ($\epsilon=1$), w których został by pokryty farbą o cechach Ciała Doskonale Czarnego (CDC). Wyniki obliczeń uzyskane w obu rozpatrywanych zakresach widmowych zilustrowano na rys. 9 i rys. 10.



Rys. 9. Zmiana gęstości mocy promieniowania okrętu w funkcji symulowanej modyfikacji emisyjności - zakres widmowy 8 ÷ 12 μm
Fig. 9. Variations of radiant exitance of ship's hull vs. modified value of emissivity - 8 ÷ 12 μm spectral band



Rys. 10. Zmiana gęstości mocy promieniowania okrętu w funkcji symulowanej modyfikacji emisyjności - zakres widmowy 3 ÷ 5 μm
Fig. 10. Variations of radiant exitance of ship's hull vs. modified value of emissivity - 3 ÷ 5 μm spectral band

Z powyższych wykresów bardzo wyraźnie widać, że zmiany parametrów promiennych powierzchni okrętu, wynikające z rodzaju farby i stanu powierzchni, mogą wpływać na wykrywalność w zakresie podczerwieni.

7. Wnioski

Uogólniając uzyskane wyniki można stwierdzić, że modyfikacja właściwości promiennych powierzchni kadłuba okrętu, np. poprzez pokrycie ich odpowiednimi farbami wpływa na wartość energii promiennej okrętu rejestrowanej przez kamery termowizyjne. Dodatkowo, modyfikując sylwetkę okrętu poprzez kątowne ustawienie powierzchni burt lub stosując odpowiednie ekrany - można wykorzystać wpływ promieniowania otoczenia, zwłaszcza powierzchni wody i nieba, do zmiany wielkości i kierunku propagacji energii promiennej. Tym samym, zmiana odczytywanej w obrazie termowizyjnym temperatury radiacyjnej prowadzi do zmniejszenia wartości kontrastu temperatury obiekt/tło, co skutkuje zmniejszeniem wykrywalności okrętu.

Zmniejszenie kontrastu temperatury ΔT jest jednym z elementów maskowania okrętów w zakresie podczerwieni. Należy przy tym pamiętać, że dążenie do uzyskania niskiej wykrywalności dotyczy wszystkich zakresów promieniowania elektromagnetycznego, które charakteryzują okręty. Często jednak minimalizacja sygnatury termicznej powoduje znaczny wzrost pasywnego pola radiolokacyjnego [2]. Uzyskane wyniki są częścią badań prowadzonych w obszarze minimalizacji wykrywalności obiektów wojskowych i mogą służyć jako materiał wyjściowy, zwłaszcza w aspekcie obiektów funkcjonujących w środowisku morskim.

Przedstawione w artykule badania zostały sfinansowane ze środków na naukę w latach 2010 – 2012 jako projekt badawczy.

8. Literatura

- [1] Joński A.: Niska wykrywalność i kontrola pól fizycznych - możliwości, technologia i koszty, Naval Forces nr 4/2002, s. 117-126.
- [2] Dura M.: Okręty o zmniejszonej wykrywalności, Nowa Technika Wojskowa, nr 12/1993, s.39-43.
- [3] Milewski S., Zieliński M., Chmieliński M.: Polish Decoys Systems, Littoral Infrared Self-Defence Technology Studies, NATO RTO/SET-088/Task Group51, AMW Syg.1070/2005, 29-34, Gdynia 2005r.
- [4] <http://www.thinkmaritime.com/2009/02/08/swedish-visby-class-corvette>
- [5] Lindqvist A.: Composite materials in naval applications, Naval Forces, 2/2003, str10-14.
- [6] Milewski S.: Model promieniowania termicznego obiektów morskich, Metrologia Wspomagana Komputerowo, MWK2005, Tom II, 189-184, Waplewo (2005).
- [7] Milewski S.: Badania wpływu warunków obserwacji oraz cech promiennych jednostek pływających na zasięg ich wykrywania w podczerwieni, Rozprawa doktorska, WAT Warszawa (2006).
- [8] Dulski R., Madura H., Piątkowski T., Sosnowski T.: Analysis of a thermal scene using computer simulations, Infrared Physics & Technology, No 49, p. 257-260, (2007).
- [9] Holst G. C.: Electro-optical Imaging System Performance, JCD Publishing, Winter Park, FL, (1995).
- [10] Madura H., Minkinia W.: Pomiary Termowizyjne w Praktyce - Praca Zbiorowa, Budowa, Parametry i Zastosowania Kamer Termowizyjnych, str. 27-37, PAK, Warszawa, (2004).

otrzymano / received: 06.08.2011
przyjęto do druku / accepted: 05.09.2011

artykuł recenzowany