

Rafał DULSKI<sup>1</sup>, Stanisław MILEWSKI<sup>2</sup>, Mariusz KASTEK<sup>1</sup>, Piotr TRZASKAWKA<sup>1</sup>

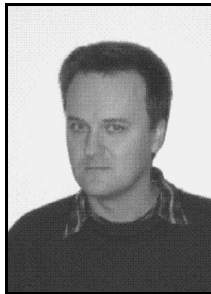
<sup>1</sup>WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

<sup>2</sup>AKADEMIA MARYNARKI WOJENNEJ, ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia

## Wykrywanie małych jednostek pływających za pomocą kamer termowizyjnych

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 Podczuwienia 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 podczuwieniu oraz techniką termowizyjną.



e-mail: rdulski@wat.edu.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 podczuwienia stosowanych w systemach ochrony, a także analizą sygnałów oraz algorytmami detekcji implementowanymi w czujnikach podczuwienia. Pracuje na stanowisku adiunkta-kierownika Zakładu Techniki Podczuwienia i Termowizji w Instytucie Optoelektroniki WAT.



e-mail: mkastek@wat.edu.pl

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. Piotr TRZASKAWKA

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1991 r.). Adiunkt w Zakładzie Techniki Podczuwienia 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

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań, których celem było określenie możliwości wykrycia małych jednostek pływających za pomocą kamer termowizyjnych. Spośród szeregu jednostek pływających, biorących udział w eksperymencie, za najciekawszy i jednocześnie najtrudniejszy do wykrycia obiekt uznano szybką łódź motorowodną. Wyniki eksperymentu dostarczyły danych do określenia rzeczywistego kontrastu temperatury pomiędzy badanym obiektem i tłem (powierzchnią morza) w ustalonych warunkach pomiarowych. Na podstawie uzyskanych danych przeprowadzono obliczenia teoretycznych zasięgów wykrycia za pomocą symulacji komputerowej. Badania objęły trzy zakresy widmowych promieniowania cieplnego, tzn.: daleką, średnią oraz bliską podczuwienia.

**Słowa kluczowe:** pomiary termowizyjne, detekcja wielowidmowa, zasięgi wykrycia.

### Detection of small vessels using infrared cameras

#### Abstract

The paper deals with the problem of detection of small objects in a maritime environment, such as small, fast motor boats detected in near, medium and far infrared ranges in harbour and naval base areas. The resulting analyses and simulations were preceded by experimental measurements conducted in a maritime environment, performed by means of necessary equipment, such as measurement-class thermal cameras whose operating range covered nearly all usable infrared spectrum. The recorded radiometric and image data were carefully analysed. On the basis of THE measurements and recorded image the effective thermal contrast  $\Delta T$  was determined between the test object and sea surface. The results were then used for calculation of theoretical detection ranges in the infrared spectral bands. Theoretical detection ranges were calculated using NVTherm software. The sample results of research and analysis are presented in all three infrared spectral bands. The multiband research of the detection process provides additional information which will result in the increased effectiveness of systems and devices in the detection of small surface objects in a maritime environment.

**Keywords:** thermal camera investigations, multispectral detection, DRI ranges.

### 1. Wstęp

Podstawowymi zadaniami, w których kamery termowizyjne znajdują zastosowanie na morzu jest wykrywanie i identyfikacja zagrożeń, np. ataków terrorystycznych, oraz zapewnienie bezpieczeństwa i ochrony statków i portów. Zadania te są najczęściej realizowanym przez jednostki Ratownictwa Morskiego, jednostki Straży Granicznej oraz Marynarki Wojennej.

Efektywne zastosowanie kamer termowizyjnych w warunkach morskich zależy od wielu czynników, z których najistotniejsze są czynniki wynikające ze specyficznych warunków atmosferycznych oraz cech wykrywanych obiektów – jednostek pływających. Dobór kamery o odpowiednich parametrach (rozdzielczość termiczna i przestrzenna detektora, parametry obiektywu, itp.) determinują zasięg działania i kąt obserwacji kamery a tym samym, decydują o jej przydatności w konkretnym zadaniu ATR (*ang. Automatic Target Recognition*).

Okoliczności i przebiegu ataków terrorystycznych na morzu wskazują, że najczęściej piraci (terrorysty) wykorzystują szybkie łodzie motorowodne typu RIB (rys. 1) (*ang. Rigid Inflatable Boat*). [1]. Dzieje się tak z powodu łatwej dostępności takich łodzi oraz dzięki ich unikalnym właściwościom: szybkość, zwrotność zapewniająca dużą dynamikę działania.



Rys. 1. Przykładowe łodzie typu RIB  
Fig. 1. Exemplary RIB boats

### 2. Podstawy teoretyczne

W zakresie podczuwienia maksymalnym zasięgiem wykrycia obiektu jest odległość, przy której różnica temperatury pomiędzy

obiektem i tłem (wyznaczająca wartość kontrastu termicznego  $\Delta T$  dla danej sceny – obrazu termograficznego) jest zredukowana w atmosferze do wartości nie mniejszej niż wykrywalna przez urządzenie różnica temperatury NETD (*ang. Noise Equivalent Temperature Difference*). Podstawowe kryterium wykrycia obiektu, odniesiony do czułości termicznej systemu obserwacyjnego NETD oraz warunków propagacji promieniowania w atmosferze jest opisany zależnością (1) [2-4]:

$$\frac{\Delta T \cdot \tau_{atm}(R)}{NETD} = 1 \quad (1)$$

gdzie:  $\tau_{atm}(R)$  - współczynnik transmisji promieniowania przez atmosferę na drodze R (obiekt-system detekcji),  $\Delta T$ - kontrast (różnica) temperatury obiektu i tła.

Zależność (1) odnosi się do zasięgu i warunków wykrycia obiektu, w których rozmiar kątowny obiektu jest porównywalny z rozdzielczością geometryczną kamery termowizyjnej. Oznacza to, że w obrazie termowizyjnym obserwowanej sceny, obszar odpowiadający powierzchni obiektu jest porównywalny z rozmiarem 1 piksela obrazu – obiekt jako punkt.

W przypadku gdy oprócz prostego wykrycia zachodzi potrzeba identyfikacji lub rozpoznania obiektu, spełnienie zależności (1) nie jest wystarczające do stwierdzenia, że wykryty obiekt jest obiektem poszukiwanym.

W związku z tym, w zadaniach wykrycia (jako efektu końcowego procesu poszukiwania) i identyfikacji (jako efektu końcowego procesu śledzenia) obiektów przyjmuje się kryteria określające liczbę rozróżnialnych w obrazie termicznym pikseli, niezbędnych do osiągnięcia pożądanego poziomu dyskryminacji obiektu obserwowanej sceny. Przykładowe kryteria wykrycia i identyfikacji jednostek pływających zostały przedstawione w tabeli 1.

Tab. 1. Kryterium O'Neila [6]

Tab. 1. O'Neil's criterion [6]

Poziomy identyfikacji	Wymagana liczba rozróżnialnych pikseli w obrazie
Detekcja obiektu	36
Klasyfikacja: jednostka pływająca - okręt lub statek	100
Rozpoznanie: okręt/statek	500
Identyfikacja: typ okrętu	1000

Natężenie mocy promieniowania termicznego jednostki pływającej, rejestrowane przez kamerę termowizyjną, jest wartością zmienną w czasie i zależy od odległości i wysokości stanowiska obserwacyjnego (kąta obserwacji) oraz od kursu jednostki pływającej (wielkości powierzchni promieniującej). W zastosowaniach praktycznych, w celu określenia bieżącej wartości mocy promieniowania obiektu względem stałej wartości mocy promieniowania tła (promieniowanie nieba i wody) wyznaczana się stosunek tych dwóch sygnałów – określane jako  $SNR_{app}$  (*ang. Signal to Noise Ratio*).

Wartość  $SNR_{app}$  wynika z ilorazu sygnałów określających luminancję energetyczną obiektu oraz tła i jest wprost proporcjonalna do liczby pikseli obrazu należących do obiektu o polu powierzchni  $A_T$  i odwrotnie proporcjonalna do wielkości zobrazowywanej sceny FOV (*ang. Field of View*) oraz odległości obserwacji R [2, 6]:

$$SNR_{app} = Sp \frac{\Delta L \cdot \tau_{atm}(R)}{NETD}, \quad (2)$$

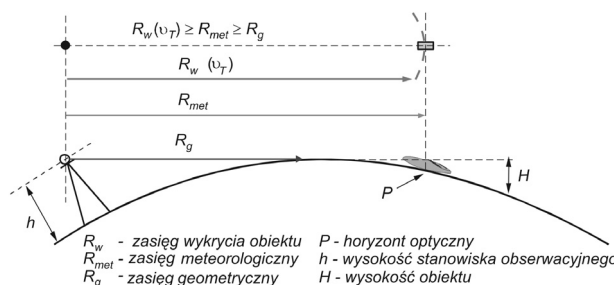
$$Sp = \begin{cases} \frac{A_T}{(R \cdot FOV)^2} & \text{dla } A_T \leq FOV \\ 1 & \text{dla } A_T > FOV \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:  $SNR_{app}$  – bieżąca wartość stosunku sygnału do szumu;  $FOV$  – kąt pola widzenia kamery;  $\Delta L$  – kontrast (różnica) lumi-

nacji energetycznej obiektu i tła;  $A_T$  – ekwiwalent powierzchni promieniującej obiektu (przekątna prostokąta o wymiarach H i W).

Warunki wykrywania i identyfikacji jednostek pływających na morzu są określane na podstawie szeregu parametrów, z których najważniejsze to: warunki geometryczne, warunki meteorologiczne, parametry techniczne urządzenia obserwacyjnego oraz właściwości termiczne i spektralne obiektów (określane poprzez temperaturę T oraz emisyjność  $\epsilon$ ).

Interpretacja graficzna przedstawionych warunków wykrycia jednostki pływającej na morzu została przedstawiona na rys. 2.



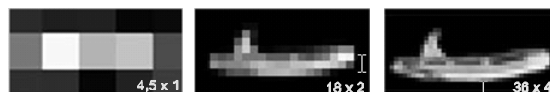
Rys. 2. Interpretacja graficzna warunków wykrycia jednostki pływającej na morzu  
Fig. 2. Graphic interpretation of detection conditions for a vessel at the sea

Przy założeniu idealnych warunków obserwacji, w pierwszej kolejności mogą być wykryte (są widoczne) elementy konstrukcyjne jednostki pływającej, które najszybciej pojawią się nad horyzontem P (rys. 2) [2, 5]. Przy uwzględnieniu w/w warunków zasięg wykrycia jednostki pływającej na morzu  $R_W(v_T)$  będzie spełniać zależność:

$$R_W(v_T) \geq R_{met} \geq R_g \quad (4)$$

gdzie:  $v_T$  - wielkość powierzchni promieniującej obiektu określona poprzez liczbę pikseli w analizowanej scenie.

Do obliczania zasięgów wykrycia stosuje się powszechnie tzw. kryterium Johnson'a. Kryterium [6-8] to opisuje liczbę pikseli obrazowych obiektu, które muszą być widoczne na obrazie aby osiągnąć dany stopień dyskryminacji DRI (*ang. Detection, Recognition, Identification*). Liczba pikseli zależy oczywiście od rodzaju obiektu a dokładniej od jego powierzchni [9]. Przykład zliczania pikseli obrazowych obiektu na termogramie, w celu wyznaczenia zasięgów DRI jednostki pływającej typu RIB przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Sposób zliczania pikseli obrazowych do wykrycia, rozpoznania i identyfikacji obiektu typu RIB

Fig. 3. A Method for counting a number of pixels during DRI of RIB type objects

### 3. Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne przeprowadzono w strefie przybrzeżnej na wodach Zatoki Gdańskiej z wykorzystaniem łodzi motorowodnej typu RIB S-6100K „Academos” (rys. 4).

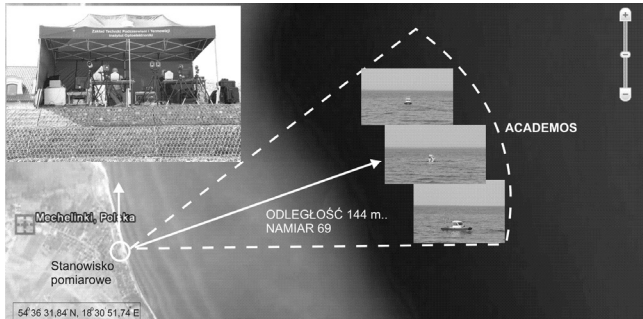


Rys. 4. Łódź motorowodna typu RIB S-6100K „Academos”

Fig. 4. S-6100K „Academos” RIB type motorboat

Eksperyment badawczy polegał na zarejestrowaniu obrazów termicznych łodzi w ustalonych warunkach obserwacyjnych (pogoda, pora dnia, kąt i odległość obserwacji) oraz określeniu moż-

liwości jej detekcji za pomocą kamer termowizyjnych o różnych parametrach użytkowych (rys. 5).



Rys. 5. Mapka sytuacyjna określająca warunki rejestracji łodzi typu RIB  
Fig. 5. A situation map describing conditions of RIB type boat registrations

Do rejestracji danych pomiarowych wykorzystano kamery pracujące w zakresie bliskiej, średniej i dalekiej podczerwieni firmy FLIR Systems (rys. 6) oraz szereg urządzeń pomocniczych, takich jak: kamery wideo, dalmierz laserowy, stacja pogodowa, itp.

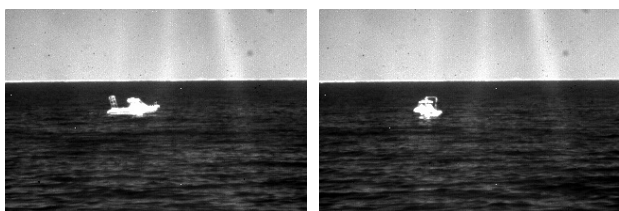


Rys. 6. Kamery termowizyjne oraz wideo na stanowisku pomiarowym  
Fig. 6. Thermal imaging and video cameras on a measuring setup

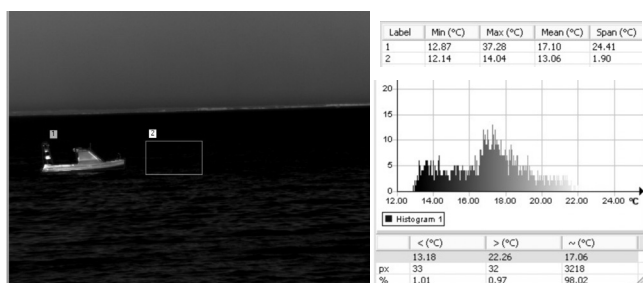
Zastosowanie wyżej wymienionych urządzeń i przyrządów pomiarowych pozwoliło na precyzyjne ustalenia warunków badań oraz ich szczegółową dokumentację.

#### 4. Analiza danych

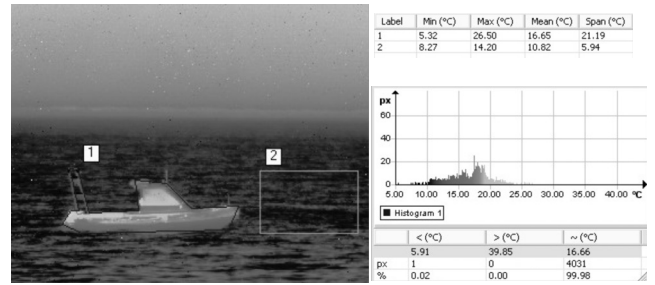
W niniejszym punkcie pokazano przykładowe termogramy (rys. 7-9) zarejestrowane za pomocą kamer termowizyjnych w czasie badań eksperymentalnych oraz wyniki ich analizy [6, 10].



Rys. 7. Przykładowe termogramy łodzi RIB w zakresie NIR  
Fig. 7. Exemplary IR images of RIB type boat in NIR band



Rys. 8. Termogram łodzi RIB w zakresie MWIR z wynikami analizy  
( $f=100$  mm, odległość 250 m)  
Fig. 8. IR image of RIB type boat in MWIR with analysis results  
( $f=100$  mm, distance 250 m)



Rys. 9. Termogram łodzi RIB w zakresie LWIR z wynikami analizy  
( $f=200$  mm, odległość 250 m)  
Fig. 9. IR image of RIB type boat in LWIR with analysis results  
( $f=200$  mm, distance 250 m)

Termogramy rejestrowano w trzech zakresach widmowych: daleka podczerwień LWIR (*ang. Long Wave InfraRed*), średnia podczerwień MWIR (*ang. Middle Wave InfraRed*) oraz bliska podczerwień NIR (*ang. Near InfraRed*). Do termogramów zarejestrowanych w zakresach MWIR LWIR dołączano histogramy obrazu oraz temperatury dane statystyczne dla łodzi (wartość 1) oraz powierzchni morza (wartość 2). W zakresie NIR kamera rejestrująca sygnał podawała tylko informacje o poziomie sygnału, więc analiza temperaturowa nie była możliwa.

#### 5. Teoretyczne zasięgi wykrycia

Do wyznaczenia teoretycznych zasięgów detekcji wykorzystano, oparte na kryterium Johnsona, oprogramowanie NVTherm [8]. W niniejszym punkcie przedstawiono zestawienie parametrów obiektu i kamer termowizyjnych wykorzystanych w czasie symulacji oraz jej przykładowe wyniki.

W badaniach eksperymentalnych wykorzystano nowoczesne, pomiarowe kamery termowizyjne firmy FLIR Systems zakupione przez WAT w roku 2011 (tab. 1). Kamery te dzięki zastosowaniu wysokoczułych detektorów podczerwieni dają możliwość rejestracji rozkładów temperatury z rozdzielczością sięgającą 20mK.

Tab. 1. Parametry kamer wykorzystanych w czasie badań  
Tab. 1. IR camera parameters used during investigations

Parameter	Typ kamery		
	FLIR SC7900 (LWIR)	FLIR SC5600 (MWIR)	FLIR SC2200 (NIR)
	HgCdTe	InSb	HgCdTe
Chłodzenie	termoelektryczne	Stirling	Stirling
Zakres widmowy	7.5-11.5 $\mu\text{m}$	2.5-5.1 $\mu\text{m}$	0.8-2,5 $\mu\text{m}$
Rozmiar matrycy	320x256	640x512	320x256
NETD	20 mK	20 mK	n/a
Pixel pitch	30 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$
Ogniskowa	200 mm	100 mm	100 mm
FOV	2,8°x2,2°	5,5°x4,4°	5,5°x4,4°
F#	2,0	3,0	2,8
Średnica wejściowa obiektywu	100 mm	33,3 mm	35,7 mm

Przyjęte do symulacji zasięgów wykrycia parametry łodzi RIB (zgodnie z kryterium Johnsona) podano w tabeli 2.

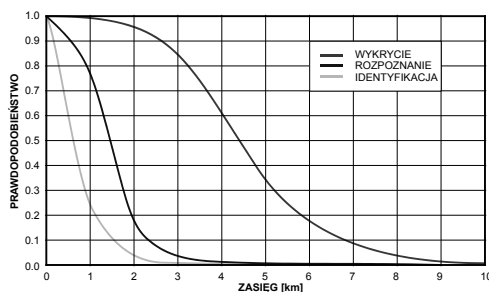
Tab. 2. Parametry łodzi RIB przyjęte do symulacji zasięgów wykrycia  
Tab. 2. Parameters of RIB type boat used in simulations of detection ranges

Parameter	Widok z boku	Widok z przodu
Rozmiar obiektu [D x H]	6,1 m x 1,65 m = 10 m <sup>2</sup>	2,43 m x 1,65 m = 4 m <sup>2</sup>
Rozmiar krytyczny	3.17 m	2 m
Kontrast termiczny $\Delta T$	MWIR	4°C
	LWIR	5,8°C

Pierwszy z nich to wymiary krytyczny, stanowiący ekwiwalent łodzi o wymiarach 6 m x 1,65 m. Drugi stanowi kontrast termiczny

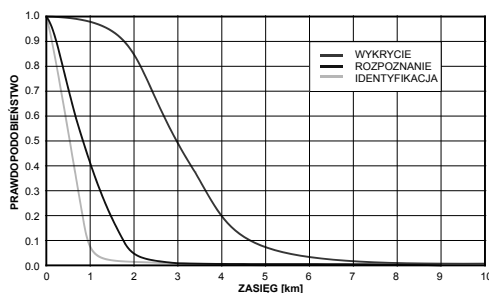
ny obiektu w stosunku do powierzchni morza, obliczony na podstawie zarejestrowanych w czasie badań eksperymentalnych termogramów oraz uśredniony dla wybranego przypadku pomiarowego.

Zasięgi DRI wyznaczono dla kamer pracujących w zakresach LWIR oraz MWIR, wyposażonych w każdym przypadku w obiektyw o najdłuższej dostępnej ogniskowej (tabela 2). Pokazane poniżej rezultaty dotyczą tylko wybranego przypadku warunków rejestracji łodzi typu RIB. Przedstawione rejestracje dotyczą pogodnego dnia, dwóch kątów obserwacji łodzi w stosunku do obserwującej kamery i odległości obserwacji 250 metrów. Analiza zasięgowa dla skrajnych przypadków wymiaru krytycznego, tzn. „z boku” oraz „z przodu” pozwala na określenie maksymalnie korzystnego i niekorzystnego przypadku położenia łodzi w stosunku do obserwującej kamery w kontekście możliwości jej detekcji. Na rys. 10 - 13 pokazano przykładowe wykresy teoretycznych zasięgów wykrycia, wygenerowane przez program NV-Therm. Z wykresów można odczytać informacje o maksymalnych zasięgach DRI oraz jak zmienia się zasięg w przypadku zmiany założonego poziomu prawdopodobieństwa, że obiekt zostanie wykryty (w kryterium Johnson'a użyteczne zasięgi DRI definiuje się na poziomie prawdopodobieństwa równym 50%).



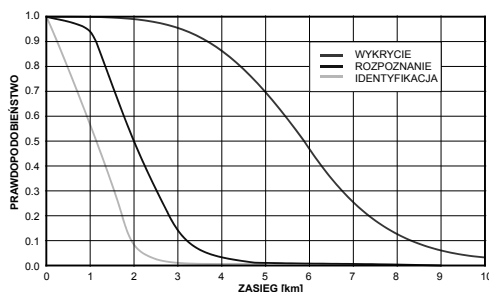
Rys. 10. Wykres DRI dla łodzi typu RIB w zakresie MWIR – widok z boku ( $f=100$  mm,  $FOV=5,5^\circ \times 4,4^\circ$ , FPA 15  $\mu\text{m}$ , 640x480)

Fig. 10. DRI charts for RIB type boat in MWIR band - the side view ( $f=100$  mm,  $FOV=5.5^\circ \times 4.4^\circ$ , FPA 15  $\mu\text{m}$ , 640x480)



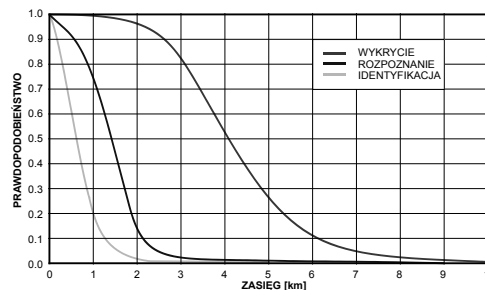
Rys. 11. Wykres DRI dla łodzi typu RIB w zakresie MWIR – widok z przodu ( $f=100$  mm,  $FOV=5,5^\circ \times 4,4^\circ$ , FPA 15  $\mu\text{m}$ , 640x480)

Fig. 11. DRI charts for RIB type boat in MWIR band - the front view ( $f=100$  mm,  $FOV=5.5^\circ \times 4.4^\circ$ , FPA 15  $\mu\text{m}$ , 640x480)



Rys. 12. Wykres DRI dla łodzi typu RIB w zakresie LWIR – widok z boku ( $f=200$  mm,  $FOV=2,8^\circ \times 2,2^\circ$ , FPA 30  $\mu\text{m}$ , 320x240)

Fig. 12. DRI charts for RIB type boat in LWIR band - the side view ( $f=200$  mm,  $FOV=2.8^\circ \times 2.2^\circ$ , FPA 30  $\mu\text{m}$ , 320x240)



Rys. 13. Wykres DRI dla łodzi typu RIB w zakresie LWIR – widok z przodu ( $f=200$  mm,  $FOV=2,8^\circ \times 2,2^\circ$ , FPA 30  $\mu\text{m}$ , 320x240)

Fig. 13. DRI charts for RIB type boat in LWIR band - the front view ( $f=200$  mm,  $FOV=2.8^\circ \times 2.2^\circ$ , FPA 30  $\mu\text{m}$ , 320x240)

## 6. Wnioski

Wielowidmowe badania procesu detekcji w podczerwieni dostarczają szeregu dodatkowych informacji, w stosunku do badań jednowidmowych, dając nowe możliwości zwiększenia skuteczności działania urządzeń i systemów wykrywających małe obiekty w warunkach morskich. Pozyskane w ten sposób dane pozwalają np. na określenie efektywności syntezy obrazów w różnych zakresach widmowych.

Zaprezentowane przykładowe wyniki rejestracji i symulacji mają jedynie charakter poglądowy i na ich podstawie nie należy wyciągać ogólnych dotyczących przydatności danego zakresu widmowego promieniowania podczerwonego do detekcji obiektów na tle morza. W przypadku warunków obserwacji odbiegających znacznie od warunków, w których zostały zarejestrowane przedstawione termogramy wyniki analizy mogą się znacznie różnić. W szczególności obecność silnego promieniowania słonecznego oraz deszczu może znacząco wpłynąć na skuteczność obserwacji. Ogromne znaczenia mają także oczywiście parametry promienne (emisyjność) wykrywanej łodzi.

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

## 7. Literatura

- [1] Kubiak K.: Piractwo i terroryzm morski. Nowe wyzwania dla bezpieczeństwa międzynarodowego. [www.wns.dsw.edu.pl/fileadmin/user\\_upload/wszechnica/04.pdf](http://www.wns.dsw.edu.pl/fileadmin/user_upload/wszechnica/04.pdf)
- [2] Milewski S.: Badania wpływu warunków obserwacji oraz cech promiennych jednostek pływających na zasięg ich wykrywania w podczerwieni, Rozprawa doktorska, WAT Warszawa (2006).
- [3] Van den Broek S.P. et al.: Detection and classification of infrared decoys and small targets in a sea background, in Proc. of SPIE, 2000, vol. 4029, pp. 70–80.
- [4] Diani M., Baldaci A., Corsini G.: Novel background removal algorithm for Navy infrared search and track systems; Optical Engineering 40(8), August 2001.
- [5] Milewski S.: Model promieniowania termicznego obiektów morskich, Metrologia Wspomagana Komputerowo, MWK2005, Tom II, 189-184, Waplewo (2005).
- [6] Holst G. C.: Electro-optical Imaging System Performance, JCD Publishing, Winter Park, FL, (1995).
- [7] Ratches J. A., Lawson W. R., Obert L. P., Bergemann R. J., Cassidy T. W. and Swenson J. M.: Night Vision laboratory Static Performance Model for Thermal Viewing Systems, ECOM Report ECOM-7043, pg. 2, Fort Monmouth, NJ (1975).
- [8] FLIR92 Thermal Imaging Systems Performance Model, User's Guide, NVESD document UG5008993, Fort Belvoir, VA (1993).
- [9] STANAG 4347, Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems, 1995.
- [10] 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).