



Stanowiska do pomiaru podstawowych parametrów kamer termowizyjnych spełniające wymogi metrologiczne WP

JAROSŁAW BAREŁA, KRZYSZTOF FIRMANTY,
MARIUSZ KASTEK, ANDRZEJ DŁUGASZEK¹

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, Zakład Techniki Termowizji
i Podczerwieni, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, barela@wat.edu.pl, mkastek@wat.edu.pl

¹Centralny Wojskowy Ośrodek Metrologii,
00-908 Warszawa, ul. Radiowa 2, dlugaszek@wp.pl

Streszczenie. Na wyposażeniu Wojska Polskiego znajduje się duża ilość różnych typów kamer termowizyjnych. Są one głównie częścią składową systemów obserwacyjnych i kierowania ogniem. Każdy sprzęt wojskowy podlega okresowym przeglądom i remontom. Przy każdej takiej operacji należy sprawdzać parametry urządzeń obserwacyjnych. Należy także pamiętać, że w trakcie użytkowania parametry urządzeń obserwacyjnych ulegają pogorszeniu. Obecnie na wyposażeniu WP nie znajduje się stanowisko pomiarowe mogące zweryfikować podstawowe parametry kamer termowizyjnych. Prezentowane stanowisko pomiarowe ma za zadanie pomiar wszystkich parametrów kamer termowizyjnych mających wpływ na jakość generowanego obrazu.

Słowa kluczowe: ciała czarne, systemy termowizyjne, kolimatory podczerwieni

1. Wstęp

Na wyposażeniu WP znajduje się wiele typów obserwacyjnych kamer termowizyjnych. Najwięcej obserwacyjnych kamer termowizyjnych znajduje się na pojazdach wojskowych. Są one częścią składową systemów obserwacyjnych pola walki oraz systemów kierowania ogniem. Parametry urządzeń obserwacyjnych według zaleceń NATO wymagają kontroli. Ma to na celu określenie wartości bojowych systemów obserwacji i kierowania ogniem oraz określenie zmiany właściwości systemów w trakcie eksploatacji. Obecnie na wyposażeniu WP nie znajduje się stanowisko

pomiarowe mogące zweryfikować podstawowe parametry kamer termowizyjnych. W warsztatach remontowych znajduje się tylko stanowisko do pomiaru charakterystyki minimalnej wykrywalnej różnicy temperatury.

Stanowiska pomiarowe do badań parametrów termowizyjnych kamer obserwacyjnych powinny umożliwić pomiar parametrów, które mają istotne znaczenie dla zasięgu skutecznej obserwacji oraz wartości bojowych sprzętu wojskowego, których są istotnym elementem. W artykule przedstawiono metrologię pomiaru podstawowych parametrów kamer termowizyjnych oraz opis stanowiska pomiarowego umożliwiającą ich wyznaczenie.

2. Podstawowe parametry obserwacyjnych kamer termowizyjnych oraz ich interpretacja

Badając obserwacyjne urządzenia termowizyjne, zaleca się przeprowadzenie pomiarów następujących parametrów i charakterystyk opisujących zdolność urządzenia do prowadzenia skutecznej obserwacji: minimalna rozróżnialna różnica temperatur MRT, minimalna wykrywalna różnica temperatur MDT, funkcja przenoszenia modulacji MTF, funkcja przenoszenia sygnału SiTF, jednorodność obserwacyjna, rozdzielczość temperaturowa NETD.

Charakterystyka minimalnej rozróżnialnej różnicy temperatur jest definiowana jako zależność minimalnej różnicy temperatur pasków standardowego testu czteropaskowego i temperatury tła, zapewniającej rozróżnienie wszystkich pasków testu przez obserwatora, w funkcji częstości przestrzennej (wymiarów testu). Charakterystyka MRT zawiera informację o zdolności kamery zarówno do rozróżnienia niskokontrastowych dużych obiektów obserwowanej scenerii jak i wysokokontrastowych szczegółów obserwowanej scenerii. MRT jest powszechnie uznana za najważniejszą charakterystykę obserwacyjnych kamer termowizyjnych. Znaczenie charakterystyk MRT kamer termowizyjnych wynika z możliwości oszacowania prawdopodobieństw wykrycia, rozpoznania i identyfikacji typowych obiektów wojskowych za pomocą kamer o znanych parametrach zarówno w zastosowaniach wojskowych jak również w termalnych badaniach nieniszczących.

Charakterystyka minimalnej wykrywalnej różnicy temperatur jest definiowana jako zależność minimalnej różnicy temperatury testu w kształcie kwadratu i temperatury tła, umożliwiająca wykrycie testu przez obserwatora na ekranie badanego urządzenia termowizyjnego, w funkcji częstości przestrzennej (wymiarów) testu. Charakterystyka MDT określa zdolność systemu urządzenie-obserwator do wykrycia obiektów o małych wymiarach kątowych znajdujących się na jednorodnym tle (obiekty powietrzne i morskie). Charakterystyka ta, w przeciwieństwie do MRT, nie posiada asymptoty. Oznacza to, że każdy obiekt o dowolnie małych wymiarach kątowych może być wykryty, pod warunkiem że będzie miał dostatecznie wysoką temperaturę.

Funkcja przenoszenia modulacji MTF opisuje zniekształcenia obrazu wnoszone przez kamerę. Jest ona definiowana jako moduł z unormowanej do jedności, dla zerowej częstości przestrzennej, transformaty Fouriera z rozkładu luminancji w obrazie punktowego źródła promieniowania. Funkcja MTF stała się obecnie popularną charakterystyką oceny jakości obrazu, zarówno optycznych jak i optoelektronicznych urządzeń obrazujących.

Funkcja przenoszenia sygnału jest definiowana jako zależność luminacji obrazu testu od różnicy temperatury testu i temperatury tła dla zmiennych nastaw jaskrawości ekranu i wzmocnienia toru elektronicznego badanego urządzenia w funkcji temperatury. Funkcja SiTF jest wykorzystywana do określenia quasi-liniowego przedziału odwzorowania rozkładów temperatury obserwowanej scenarii urządzeń termowizyjnych dla wybranych nastaw wzmocnienia toru elektronicznego urządzenia i jaskrawości ekranu.

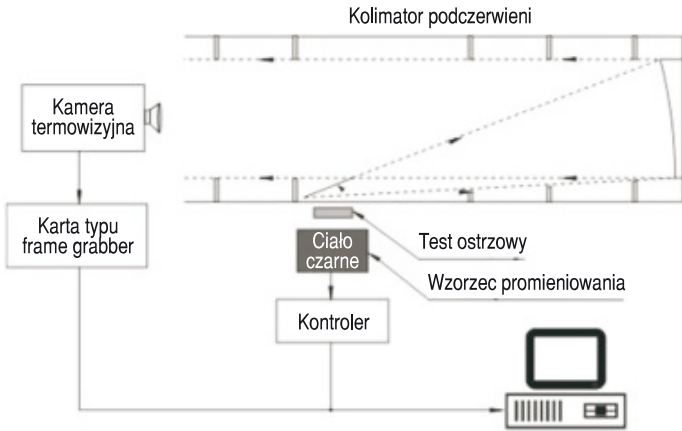
Jednorodność obserwacyjna to zakres rozrzutu wyników pomiaru charakterystyki MRT, przy zmianie położenia testu w polu widzenia urządzenia, unormowany względem wartości pomierzonej dla centrum pola widzenia. Jest wykorzystywana do określenia rozrzutu skuteczności obserwacyjnej urządzenia (prawdopodobieństwa wykrycia, rozpoznania i identyfikacji obserwowanego obiektu) przy zmianie położenia obiektu w jego polu widzenia.

Rozdzielczość temperaturowa to różnica temperatury między testem a jego tłem, która generuje sygnał równy wartości skutecznej szumów w dowolnym punkcie toru analogowego badanego urządzenia. Jednostką NETD są stopnie Kelwina lub Celsjusza.

3. Stanowisko do pomiaru parametrów obserwacyjnych kamer termowizyjnych

Stanowisko do pomiaru parametrów obserwacyjnych kamer termowizyjnych składa się z: kolimatora podczerwieni, wzorca promieniowania podczerwonego, zestawu testów, urządzeń zasilających, kart pomiarowych, oprogramowania.

Zasada działania zestawu pomiarowego jest następująca. Tarcza wraz z zestawem wymaganych testów jest umieszczona w płaszczyźnie ogniskowej kolimatora podczerwieni. Tarcza jest otoczona osłoną metalową, której temperatura jest równa temperaturze tarczy. W osłonie na wysokości testu jest wycięty otwór. Do osłony jest przymocowane ciało czarne. W efekcie w płaszczyźnie ogniskowej kolimatora powstaje następujący rozkład temperatur: test o temperaturze wzorca promieniowania na jednorodnym tle o temperaturze równej temperaturze otoczenia. Regulacja temperatury wzorca promieniowania podczerwonego umożliwia zmianę różnicy temperatur między testem a otoczeniem. W czasie pomiarów wymagana jest różnica temperatur między testem a otoczeniem zarówno dodatnia jak i ujemna.



Rys. 1. Schemat stanowiska do pomiaru parametrów obserwacyjnych kamer termowizyjnych



Rys. 2. Zdjęcie stanowiska do pomiaru parametrów obserwacyjnych kamer termowizyjnych [9]

Większość wojskowych urządzeń termowizyjnych jest przystosowanych do obserwacji obiektów znajdujących się w dużej odległości od obserwatora. Stanowiska pomiarowe wymagają więc zastosowania kolimatorów podczerwieni. Mają one za zadanie symulację rozkładu temperatur wymaganego testu znajdującego się w nieskończoności. Jednocześnie zastosowany kolimator z układem przysłon umożliwia wyeliminowanie wpływu promieniowania własnego obserwatorów i innych obiektów znajdujących się w laboratorium na wyniki badań.

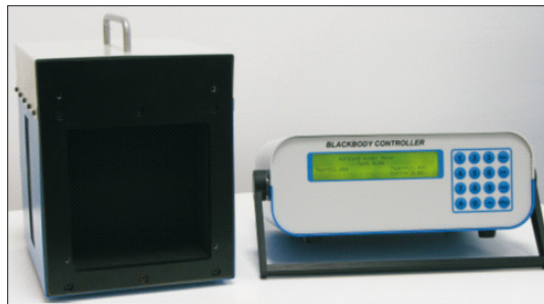
Do podstawowych parametrów kolimatora podczerwieni zaliczamy: ogniskową, aperturę wejściową, rozdzielczość kątową, zakres widmowy. Najlepsze współczesne termowizyjne kamery obserwacyjne posiadają rozdzielczość przestrzenną zbliżoną

do 20 mrad^{-1} . Ogniskowa kolimatora powinna być tak dobrana, aby zapewnić wymaganą rozdzielczość przestrzenną. Apertura wejściowa kolimatora powinna być 10% większa od średnicy optyki wyjściowej badanej kamery termowizyjnej [2]. Rozdzielczość kątowna kolimatora nie powinna wpływać na wynik pomiaru. Jest ona uzależniona od ogniskowej oraz apertury wejściowej kolimatora. Dla współczesnych systemów pomiarowych powinna wynosić nie mniej niż 40 mrad^{-1} . Zakres widmowy pracy kolimatora musi być dostosowany do zakresów widmowych pracy kamer termowizyjnych. Na wyposażeniu WP znajdują się zarówno kamery termowizyjne krótkofalowe jak i długofalowe. Dlatego zakres widmowy pracy kolimatora powinien wynosić od około $1\text{-}15 \mu\text{m}$. Transmisja w tym zakresie widmowym powinna być jak najwyższa, w rzeczywistych układach około 0,96, oraz powinna być niezależna od długości fali.

Wzorzec promieniowania podczerwieni do pomiarów parametrów kamer termowizyjnych powinien mieć powierzchnię umożliwiającą uzyskanie jednorodnego rozkładu temperatury na powierzchni całego testu [6]. Powinny umożliwić stabilizację temperatury powyżej jak i poniżej temperatury otoczenia. Wzorce promieniowania odpowiednie do stanowisk pomiarowych powinny charakteryzować się następującymi parametrami:

- zakresem stabilizowanej temperatury absolutnej $+5^{\circ}\text{C} \div +70^{\circ}\text{C}$,
- zakresem stabilizowanej temperatury różnicowej $\pm 10^{\circ}\text{C}$,
- stabilnością krótkookresową temperatury lepszą niż $0,002^{\circ}\text{C}$,
- stabilnością długookresową temperatury lepszą niż $\pm 0,01\text{K}$,
- jednorodnością powierzchni $\pm 0,005\text{K}$ (przy $|\Delta T| < 5^{\circ}\text{C}$),
- możliwie wysoką emisyjnością.

Stanowisko pomiarowe powinno wyposażone być w zestaw testów podczerwieni wymagane do pomiaru wszystkich parametrów obserwacyjnych kamer podczerwieni. Testy powinny być wykonane z materiału o dużej przewodności cieplnej (miedź), w celu zapewnienia wysokiej jednorodności rozkładu temperatury na jego powierzchni. W celu ograniczenia wpływu temperatury promiennika na temperaturę testu, powierzchnia testu od strony wzorca promieniowania powinna



Rys. 3. Niskotemperaturowy powierzchniowy wzorzec promieniowania typu BB-4-T

być pokryta złotem (naniesionym metodą galwaniczną) charakteryzującym się współczynnikiem odbicia na poziomie 0,97. Z kolei w celu zapewnienia maksymalnej emisyjności powierzchnia testu od strony widzianej przez kamerę musi być pokryta farbą o dużym współczynniku emisyjności.

4. Metodyka pomiaru parametrów oraz sposób wyznaczania zasięgów obserwacyjnych urządzeń podczerwieni

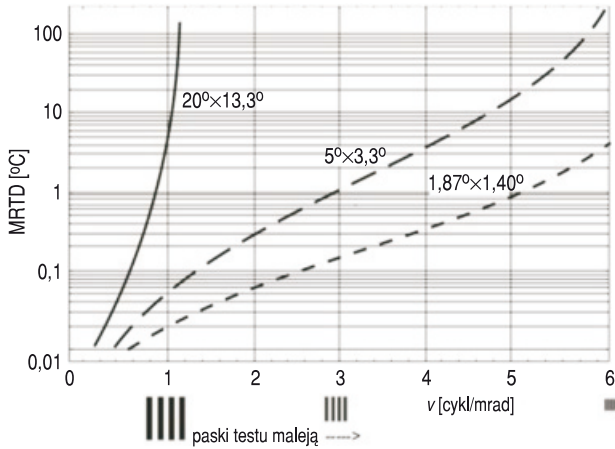
Najważniejszym parametrem wojskowych termowizyjnych kamer obserwacyjnych jest charakterystyka minimalnej rozróżnialnej różnicy temperatur. Za jej pomocą można wyznaczyć zasięgi wykrycia, rozpoznania oraz identyfikacji badanej kamery termowizyjnej [7].

W celu wyznaczenia charakterystyki MRT prowadzi się pomiar minimalnej różnicy temperatury pasków testu i temperatury tła, przy której obserwator jest w stanie rozróżnić wszystkie cztery paski testu. Obserwator może w trakcie badań optymalizować wartości wzmocnienia toru elektronicznego, jasność ekranu oraz inne mechanizmy regulacji w ramach ograniczeń istniejących w realnych warunkach pracy, natomiast czas obserwacji nie jest ograniczony. Badania są przeprowadzone najpierw dla dodatniej różnicy temperatury pasków testu względem temperatury tła, a następnie dla ujemnej różnicy. Wyznacza się różnice temperatur, przy których obserwator zaczyna rozróżniać wszystkie paski testu. Końcowe wartości MRT otrzymane dla pojedynczego obserwatora wyznacza się według wzoru

$$MRT(\gamma) = \frac{\Delta T_+(\gamma) - \Delta T_-(\gamma)}{2}, \quad (1)$$

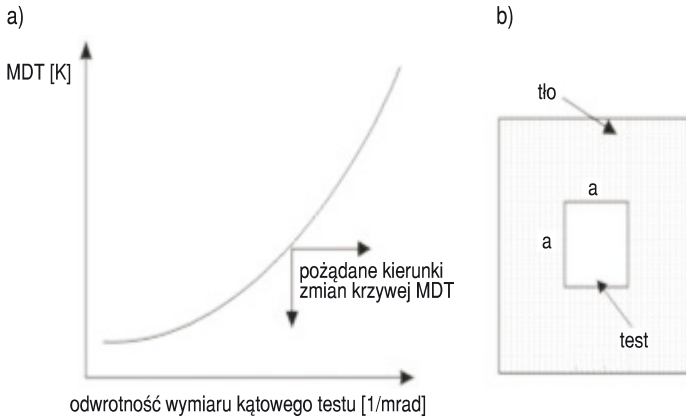
gdzie: γ — częstość przestrzenna testu [mrad^{-1}],
 $\Delta T_+(\gamma)$ — wartości MRT wyznaczone dla dodatniej różnicy temperatury pasków testu i temperatury tła dotyczące momentów, kiedy obserwator zaczyna rozróżniać paski testu,
 $\Delta T_-(\gamma)$ — wartości MRT wyznaczone dla ujemnej różnicy temperatury pasków testu i temperatury tła dotyczące momentów, kiedy obserwator zaczyna rozróżniać paski testu.

Zalecane jest, aby pomiary były przeprowadzane przez trzech obserwatorów bez wad wzroku. Końcowe wyniki badań są przedstawione w postaci wartości średniej otrzymanej dla wszystkich obserwatorów biorących udział w badaniach. W trakcie pomiarów na początku różnica temperatury między paskami testu a tłem jest bliska zeru i obserwator nie jest w stanie rozróżnić pasków testu. Następnie różnica temperatur jest stopniowo zwiększana, aż do momentu, kiedy obserwator



Rys. 4. Charakterystyka MRT przykładowej wojskowej kamery termowizyjnej dla trzech pól widzenia [2]

jest w stanie rozróżnić wszystkie paski testu. Pomiary prowadzone są przez kilku obserwatorów, a wyniki są uśredniane w celu zwiększenia obiektywności badań. W celu uzyskania pełnej charakterystyki MRT pomiary są prowadzone dla co najmniej 3-4 testów o różnych wymiarach (częstościach przestrzennych), co pozwala na uzyskanie zależności wartości MRT od częstości przestrzennej.



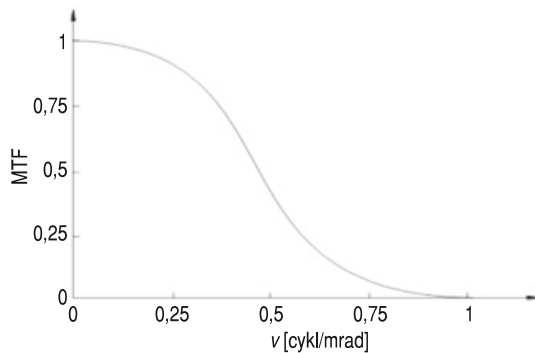
Rys. 5. a) Charakterystyka MDT przykładowej wojskowej obserwacyjnej kamery termowizyjnej;
b) typowy test do badań charakterystyki MDT

Jak wspomniano charakterystyka MDT określa zdolność systemu obserwacyjnego do wykrycia obiektów o małych wymiarach kątowych znajdujących się na jednorodnym tle (obiekty powietrzne i morskie).

W celu wyznaczenia charakterystyki MDT prowadzi się pomiar minimalnej wykrywalnej temperatury testu i temperatury tła, przy której obserwator jest w stanie wykryć test. Obserwator może w trakcie badań optymalizować wartości wzmocnienia toru elektronicznego, jasność ekranu oraz inne mechanizmy regulacji w ramach ograniczeń istniejących w realnych warunkach pracy, natomiast czas obserwacji nie jest ograniczony. Metodologia pomiaru MDT jest podobna do MRT. Jest to pomiar względny, dlatego należy go wykonywać dla trzech obserwatorów oraz dla dodatniej i ujemnej różnicy temperatur.

Funkcja przenoszenia modulacji MTF opisuje zniekształcenia obrazu wnoszone przez kamerę. Funkcja MTF zawiera informację o zależności stosunku amplitudy obrazu testu o sinusoidalnym rozkładzie egzytancji do amplitudy oryginału w funkcji częstości przestrzennej testu. Funkcję MTF można wyznaczyć kilkoma metodami [2, 3, 8]. Zgodnie z normami ISO oraz wytycznymi NATO powinno wyznaczać się ją metodą wąskiej przekoszonej szczeliny.

Metoda wąskiej szczeliny jest podstawową metodą pomiaru funkcji MTF, urządzeń analogowo-cyfrowych pracujących w zakresie promieniowania widzialnego oraz podczerwieni [2]. Opiera się ona na teorii filtracji liniowej, zgodnie z którą proces przetwarzania obrazu możemy traktować jako proces dwustopniowy. W pierwszym etapie dokonujemy rozłożenia sygnału przedmiotu na widmo harmonicznym za pomocą transformaty Fouriera. W drugim etapie odtwarzamy obraz przedmiotu poprzez syntezę harmonicznym widma z przestrzeni obrazowej w rozkład sygnału obrazu za pomocą odwrotnego przekształcenia Fouriera. Różnica w widmach sygnałów mówi o jakości procesu przetwarzania.



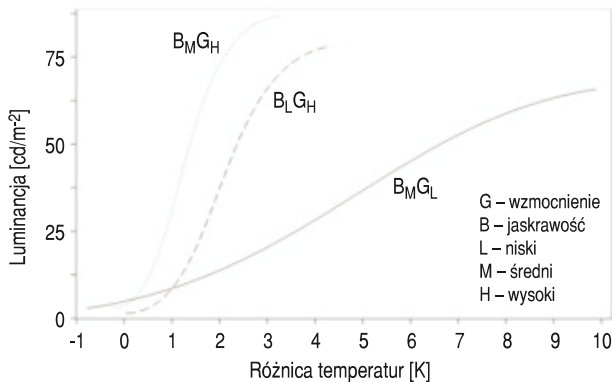
Rys. 6. Modelowy wykres przykładowej funkcji przenoszenia modulacji

Funkcja SiTF jest wykorzystywana do określenia quasi-liniowego przedziału odwzorowania rozkładów temperatury obserwowanej scenarii urządzeń termowizyjnych dla wybranych nastaw wzmocnienia toru elektronicznego urządzenia i jaskrawości ekranu. Zaleca się, aby badania SiTF były prowadzone poprzez pomiar zależności luminacji obrazu testu od różnicy temperatury źródła i temperatury testu

dla różnych nastaw wzmocnienia toru elektronicznego i jaskrawości ekranu. Badane urządzenie powinno być tak ustawione, aby otrzymać centralnie położony obraz testu na ekranie. Oświetlenie w pomieszczeniu powinno być zbliżone do wartości występujących w realnych warunkach pracy badanego urządzenia.

Wykorzystywane stanowisko pomiarowe powinno zapewnić pomijalny wpływ na wyniki pomiaru następujących czynników: skończonych wymiarów testu, atmosfery, promieniowania otoczenia, niejednorodności rozkładu temperatury na powierzchni testu i tła, zniekształceń geometrycznych i radiometrycznych kolimatora podczerwieni, ograniczonej dokładności miernika luminancji.

Pomiar jednorodności obserwacyjnej polega na pomiarze funkcji MRT, której obraz znajduje się w różnych miejscach pola widzenia kamery, najczęściej na krańcach pól widzenia. Wymaga najczęściej pomiaru MRT w pięciu obszarach pola obserwacji. Oznacza to, że pomiar jednorodności obserwacyjnej jest bardzo czasochłonny. Wynikiem pomiaru jest najgorszej wartości MRT zmierzone na krańcach pól widzenia unormowane względem wartości MRT pomierzonej dla centrum pola widzenia



Rys. 7. Funkcja SiTF przykładowej wojskowej obserwacyjnej kamery termowizyjnej

Rozdzielczość temperaturowa określa teoretycznie możliwą do uzyskania dokładność pomiaru temperatury z wykorzystaniem urządzeń termowizyjnych. Pokazuje także, jaki minimalny poziom sygnału docierający do kamery termowizyjnej, pochodzący od obserwowanego celu, kamera jest w stanie wykryć.

W celu wyznaczenia rozdzielczości temperaturowej należy przeprowadzić pomiary wartości skutecznej sygnału szumów U_n , wartości sygnału od testu U_2 o temperaturze T_2 oraz wartości sygnału od tła U_1 o temperaturze T_1 . Zarówno test jak i jego tło powinny być ciałami czarnymi. Różnica temperatury tła T_1 i temperatury testu T_2 nie powinna być większa niż kilka stopni. Badane urządzenie powinno być tak ustawione, aby otrzymać centralnie położony obraz testu na jego ekranie. Pomiary należy prowadzić na wyjściu filtra elektronicznego. Należy

stosować pojedynczy dolnoprzepustowy filtr RC, dla którego spadek o 3 dB na charakterystyce częstotliwościowej jest równy połowie czasu chwilowego oświetlenia detektora t_d .

Rozdzielczość temperaturowa powinna być wyznaczona na podstawie wyników pomiarów według wzoru

$$NET = \frac{(T_2 - T_1) \times U_n}{U_2 - U_1}, \quad (2)$$

gdzie: $NETD$ — rozdzielczość temperaturowa;

T_1 — temperatura tła;

T_2 — temperatura testu;

U_n — wartość skuteczna szumów;

U_1 — wartość sygnału od tła;

U_2 -wartość sygnału od testu.

5. Kierunki rozwoju obserwacyjnych kamer termowizyjnych i związane z tym wyzwania dla nowoczesnego laboratorium podczerwieni

Gwałtowny rozwój kamer termowizyjnych związany był z wprowadzeniem do produkcji niechłodzonych matryc detektorów bolometrycznych. Nastąpił wówczas spadek ceny kamer termowizyjnych oraz zwiększyła się liczba producentów tych kamer.

Obecnie na wyposażeniu WP w systemach obserwacyjnych i kierowania ogniem znajduje się szeroka gama kamer termowizyjnych wykonanych w różnej technologii. Znaczna część kamer to kamery na chłodzonej linii detektorów z układem skanującym. Można założyć, że w niedalekiej przyszłości standardowa obserwacyjna kamera termowizyjna będzie wykonana na chłodzonym lub niechłodzonym matrycowym detektorze o liczbie detektorów przynajmniej 640×480 . Dodatkowym czynnikiem zmieniającym parametry kamer termowizyjnych jest rozwój elektroniki, systemów operacyjnych oraz algorytmów przetwarzania obrazu. Okazuje się, że obecnie mierzone parametry systemów obrazujących nie w pełni obiektywnie opisują parametry obrazowe systemów obserwacji. Dlatego wprowadza się modyfikację warunków pomiaru parametrów kamer termowizyjnych obecnie mierzonych oraz nowe eksperymentalne parametry [8]. Do nowych zalecanych parametrów obserwacyjnych kamer termowizyjnych zaliczyć można:

- minimalną zauważalną różnicę temperatur $MTDP$ (*minimum temperature difference perceived*),
- minimalną wykrywalną różnicę temperatur $MDTD$ (*minimum detectable temperature difference*),

- równoważną niejednorodność różnicy temperatur IETD (*inhomogeneity Equivalent Temperature Difference*),
- średnią modulację przy optymalnej fazie AMOP (*average modulation at optimum phase*).

Artykuł wpłynął do redakcji 13.06.2011 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2011 r.

LITERATURA

- [1] MIL-STD-1859, *Thermal Imaging Devices, Performance Parameters Of*.
- [2] G.C. HOLST, *Testing and evaluation of infrared imaging systems*, JCD Publishing Company, 1993.
- [3] ISO 15529:1999, *Optics and optical instruments: Optical Transfer Function; Measurement of modulation transfer function (MTF) of sampled system*.
- [4] ISO 9335:1995, *Optics and optical instruments: Optical Transfer Function; Principles and procedures of measurement*.
- [5] STANAG No. 4349, *Measurement of the minimum resolvable temperature difference (MRTD) of thermal cameras*.
- [6] J. BAREŁA, M. KASZTEK, K. FIRMANTY, H. POLAKOWSKI, *Precyzyjne ciało czarne z półprzewodnikowymi modułami termoelektrycznymi*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 6, 2010, 562-566.
- [7] STANAG 4347, *Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems*, 1995.
- [8] North Atlantic Treaty Organisation, *Experimental Assessment Parameters and Procedures for Characterisation of Advanced Thermal Imagers*, 2003.
- [9] www.sbir.com.

J. BAREŁA, K. FIRMANTY, M. KASZTEK, A. DŁUGASZEK

Measurement system to control parameters of thermovision cameras that are used by Polish army

Abstract. Many thermal camera of different types are used by the Polish Armed Forces. These cameras are parts of observation and fire control systems. As any other kind of military equipment, the cameras must undergo service and maintenance procedures. At that time, their basic parameters have to be checked, as they usually deteriorate with time. The presented test stand is designed to measure all the parameters of thermal cameras that influence the quality of an output image.

Keywords: black body, thermovision system, IR collimator

