

Jarosław BAREŁA, Mariusz KASTEK, Krzysztof FIRMANTY, Henryk POLAKOWSKI
 WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI,
 ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Weryfikacja parametrów wzorców promieniowania podczerwonego

Dr inż. Jarosław BAREŁA

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1997). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2004 w zakresie elektroniki - specjalność optoelektronika. Głównym obszarem jego pracy jest programowanie systemów mikroprocesorowych, projektowanie odbiorników promieniowania w zakresie podczerwieni, prowadzenie badań przyrządów noktowizyjnych i termowizyjnych. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 20 publikacji, w tym artykuły, referaty i wdrożenia.

e-mail: jbarela@wat.edu.pl



Dr inż. Krzysztof FIRMANTY

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2003 w zakresie elektroniki - specjalność optoelektronika. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na metrologii urządzeń podczerwieni. Adiunkt w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki WAT. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 30 publikacji, w tym artykuły, referaty, patenty i wdrożenia.

e-mail: kfirmanty@wat.edu.pl



Dr inż. Mariusz KASTEK

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1997 roku jest pracownikiem Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2002. Zajmuje się pomiarami termowizyjnymi oraz problematyką detekcji obiektów w systemach czujników podczerwieni do systemów ochrony. Autor i współautor ponad 30 publikacji. Pracuje na stanowisku adiunkta-kierownika Zakładu Techniki Podczerwieni i Termowizji w Instytucie Optoelektroniki WAT.

e-mail: mkastek@wat.edu.pl



Dr inż. Henryk POLAKOWSKI

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1976). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1987 w zakresie elektroniki - specjalność optoelektronika. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na metrologii urządzeń podczerwieni. Adiunkt w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki WAT. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 100 publikacji, w tym artykuły, referaty, patenty i wdrożenia.

e-mail: hpolakowski@wat.edu.pl



Streszczenie

Wzorce promieniowania podczerwonego mają szerokie zastosowanie w systemach optoelektronicznych. Jednym z takich zastosowań jest korekcja parametrów matrycy detektorów. Do korekcji parametrów matrycy detektorów używa się wzorców powierzchniowych. Muszą się one charakteryzować parametrami temperaturowymi znacznie lepszymi od parametrów mierzonej matrycy. W artykule przedstawiono metodykę pomiaru oraz wyniki badań wzorców promieniowania wykorzystywanych w stanowiskach pomiarowych do wyznaczania współczynników korekcji parametrów matrycy detektorów.

Słowa kluczowe: wzorce promieniowania podczerwonego, systemy termowizyjne, pomiary parametrów urządzeń termowizyjnych.

Measurement parameters of blackbody used to determine correction coefficients of FPA

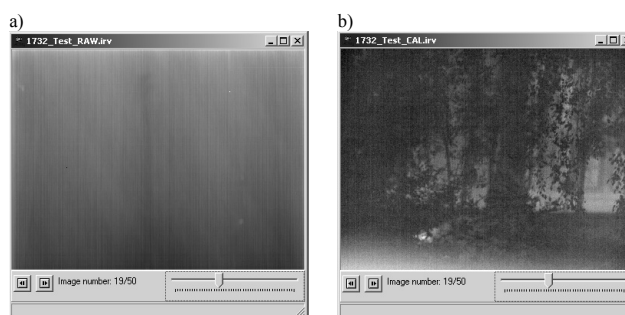
Abstract

Low temperature blackbodies are widely used in optoelectronics systems as standard IR sources. They are applied in all measurement and calibration systems for IR devices. Nowadays the calibration blackbodies must meet very strict requirements because the spatial and spectral resolution of modern thermal cameras have been significantly improved. Especially, very accurate black bodies are needed to calculate the offsets and the gain FPA. In this paper the requirements for a blackbody used for calculating the FPA coefficient as well as the methods for measuring their important parameters are given. The paper describes the measurement methods and presents the measurement results. It consists of 5 sections. In Section 1 the basic knowledge on problems concerning FPA calibration is given. In Section 2 there is described the method for measuring the black body accuracy with use of a very accurate thermometer. Section 3 focuses on measuring the short and long stability with use of thermal cameras. Section 4 deals with measurements of the black body uniformity. Measurements of the emissivity with use of a spectroradiometer are presented in Section 5. The measurement results of the black body manufactured by the Institute of Optoelectronics, Military Academy of Technology are collected in Table 4.

Keywords: thermo vision system, black body, measure parameters of blackbody.

1. Wstęp

Matryce detektorów kamer termowizyjnych, w szczególności mikrobolometrycznych, charakteryzują się pewną niejednorodnością odpowiedzi na sygnał pochodzący od obserwowanej scenerii (rys. 1). Efektem tego jest występowanie w obrazie termicznym generowanym przez matrycę stałego wzoru szumu FPN (*fixed pattern noise*), który pogarsza przestrzenną rozdzielczość termiczną kamery termowizyjnej. Niejednorodność odpowiedzi detektorów w matrycy jest powodowana rozrzutem technologicznym parametrów mikrobolometrów oraz charakterystyk układu odczytu typu ROIC (*Readout Integrated Circuit*). Ponieważ wewnętrzny układ odczytu w matrycy nie realizuje funkcji korekcji niejednorodności, to konieczne jest odpowiednie przetwarzanie sygnału wyjściowego z matrycy w celu usunięcia szumu FPN. Korekcja parametrów matrycy detektorów polega na wyznaczeniu przesunięcia (*offsets*) oraz nachylenia (*gains*) charakterystyki czułości pojedynczych detektorów matrycy [1, 2, 3].



Rys. 1. Obraz scenerii uzyskany z matrycy bolometrycznej a) przez wyznaczeniem współczynników korekcji matrycy, b) po przeprowadzeniu korekcji parametrów detektorów matrycy [1]

Fig. 1. The picture of scenery a) without correction b) with correction of camera image

Aby było możliwe wyznaczenie nachylenia i przesunięcia charakterystyki każdego detektora matrycy stanowisko powinno składać się z dwóch wzorców promieniowania o parametrach temperaturowych nie wpływających na wynik pomiaru.

W Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej wytwarzane są wzorcowe źródła promieniowania termoelektryczne typu BB-4-T (rys.2). Są one wykorzystywane między innymi w stanowiskach pomiarowych do wyznaczania współczynników korekcyjnych matryc bolometrycznych. Matryce te charakteryzują się rozdzielczością temperaturową NETD (*noise equivalent different temperature*) na poziomie 65mK.



Rys. 2. Wzorec promieniowania podczerwieni typ BB-4-T
Fig. 2. The picture of blackbody BB-4-T

Celem badania wzorca promieniowania typu BB-4-T było określenie czy źródła to nadaje się do stanowisk przeznaczonych do wyznaczania współczynników korekcyjnych chłodzonych matryc detektorów podczerwieni charakteryzujących się rozdzielczością temperaturową na poziomie 25 mK [4].

Wzorce promieniowania podczerwieni używane w stanowiskach do pomiaru współczynników korekcyjnych parametrów detektorów matryc powinny charakteryzować się bardzo dobrymi następującymi parametrami:

- dokładność regulacji temperatury,
- stabilność temperaturowa powierzchni długo i krótkookresowa,
- jednorodność powierzchni wzorca,
- emisyjność powierzchni wzorca.

2. Pomiar dokładności regulacji temperatury wzorca promieniowania podczerwieni

Pomiar temperatury jest najmniej dokładnym pomiarem wielkości fizycznej. Najdokładniejsze metody pomiarowe zapewniają pomiar temperatury z dokładnością 0,0001 °C [5]. Wymagają posiadania mierników najwyższej klasy oraz przeprowadzania pomiarów w warunkach klimatyzowanych przez obsługę przeszkoloną.

Do pomiaru dokładności regulacji temperatury wzorca promieniowania użyto precyzyjnego miernika temperatury typu DP251 firmy OMEGA. Podstawowe parametry miernika zestawiono w tabeli 1. Parametry jego potwierdzone są świadectwem kalibracji NIST (*National Institute of Standards and Technology*).

Tab. 1. Podstawowe parametry precyzyjnego miernika temperatury DP 251
Tab. 1. Parameters of the precise thermometer DP251

Nazwa parametru	Wartość
Dokładność pomiaru temperatury w zakresie -50 °C÷250 °C [°C]	0,025
Rozdzielczość [°C]	0,001
Powtarzalność [°C]	0,002
Stabilność [°C/rok]	0,005
Współczynnik temperaturowy [°C/°C]	±0,0005
Zakres temperatur pracy [°C]	0÷50

Elementem pomiarowym w mierniku jest kalibrowany czujnik typu PT100 klasy A. Pracuje on w układzie mostkowym. Zapewnia to bardzo dokładny pomiar temperatury ale kosztem stałej czasowej układu pomiarowego. Dlatego miernik ten nie umożliwia pomiarów szybkozmiennych temperatury.

Aby zapewnić wymaganą dokładność pomiaru należy wyeliminować wpływ otoczenia na wynik pomiaru. W tym celu miernik temperatury umieszczono w promienniku wzorca promieniowania i odizolowano termicznie od otoczenia. Pomiary wykonano dla czterech wartości temperatury, w warunkach ustabilizowanej pracy wzorca. Pomiary dokonano w czasie 120 sekund w odstępach 1 sekundowych. Wyniki pomiaru temperatury dla badanych wzorców promieniowania zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wyniki pomiaru dokładności regulacji temperatury wzorców promieniowania podczerwieni

Tab. 2. Measurement results of the regulation stability

Temperatura miernika typu DP251 [°C]	Wzorec typu BB-4-T	
	T_{sr}	ΔT
15,00	15,00	0,010
25,00	25,00	0,005
30,00	30,00	0,01
40,00	40,00	0,01
60,00	60,00	0,01
80,00	80,00	0,02

3. Pomiar stabilności długo i krótkookresowej wzorca promieniowania podczerwieni

Pomiary stabilności długo i krótkookresowej dokonano za pomocą kamer termowizyjnych typu SC5600 oraz SC7600 firmy FLIR (rys.4). Wykorzystanie kamer termowizyjnych do pomiaru parametrów czasowych powierzchniowych wzorców promieniowania jest metodą powszechnie stosowaną przez producentów źródeł promieniowania podczerwonego [8, 9, 10]. Podstawowe parametry kamer zestawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Podstawowe parametry kamer termowizyjnych SC5600 oraz SC7600
Tab. 3. Parameters of thermal cameras SC5600 and SC7600

Nazwa parametru	Kamera SC5600	Kamera SC7600
Zakres widmowy	2,5 – 5,1 μm	7,7-11,5 μm
Typ detektora	InSb	MCT
Rozmiar matrycy	640x512	320x256
Rozmiar piksela	15 μm	30 μm
Czułość temperaturowa	<25mK	<25mK
Maksymalna częstotliwość pomiaru pełnej ramki	100Hz	230

Kamery te ze względu na bardzo wysoką czułość temperaturową bardzo dobrze nadają się do pomiaru zmian temperatury na powierzchni przedmiotów. Wyposażone są w oprogramowanie Altair firmy FLIR umożliwiające wyznaczenie podstawowych parametrów rozkładu temperatury na badanej powierzchni.

W celu wyeliminowania wpływu otoczenia na wynik pomiaru badania dokonano na stanowisku pomiarowym umieszczonym w komorze klimatycznej typu NCZ3010N firmy NEMA. Zapewnia ona stabilizację temperatury z dokładnością $\pm 0,5$ °C.

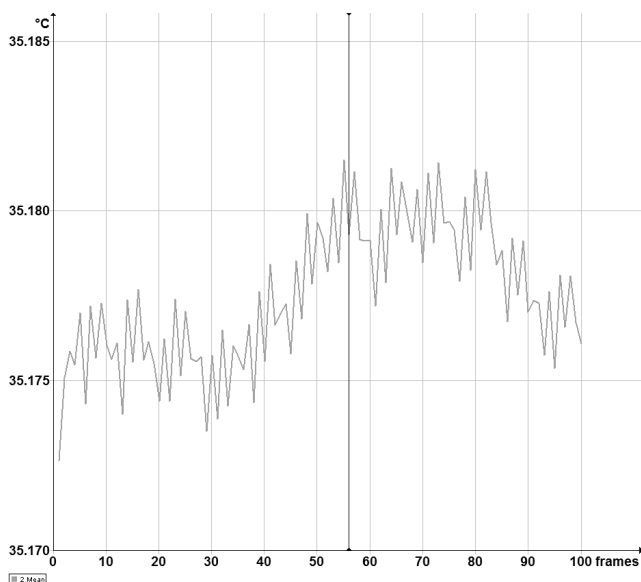


Rys. 3. Stanowisko do pomiaru stabilności krótko i długookresowej oraz jednorodności rozkładu temperatury wzorca promieniowania podczerwieni
Fig. 3. The setup for measuring the stability and uniformity of the blackbody

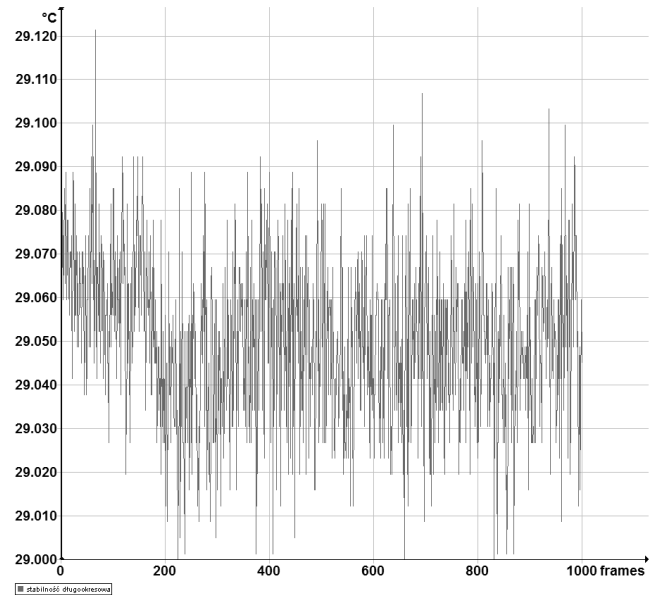
Producenci wzorców promieniowania [8, 9, 10] różnie definiują stabilność długo i krótkookresową. Różnie definiują zarówno temperaturę wzorca, dla której podają wyniki pomiaru, jak i czasy w których dokonują pomiaru stabilności. W wielu przypadkach podają tylko stabilność krótkookresową, co jest niewystarczające dla konstruktorów stanowisk pomiarowych. Dlatego trudno jednoznacznie porównać parametry wzorców promieniowania na podstawie danych katalogowych oraz dobrać odpowiedni wzorec do stanowiska pomiarowego [6, 7].

Stabilność krótkookresową określono jako maksymalną zmianę temperatury na powierzchni wzorca promieniowania mierzoną w czasie 5 sekund. Pomiarów dokonywano z częstotliwością 20 Hz (rys. 4). Stabilność długookresową określono jako maksymalną zmianę temperatury na powierzchni wzorca promieniowania mierzoną w czasie 120 sekund (rys. 5).

Dobór parametrów pomiaru bezpośrednio wynika z procedury do wyznaczania współczynników korekcji parametrów detektorów matryc podczerwieni. Czas akwizycji danych podczas procedury kalibracyjnej zależy od wielkości matrycy, ale nawet przy wylczeniu współczynników korekcji na podstawie kilkudziesięciu ramek nie trwa dłużej niż 100 s.



Rys. 4. Wykres stabilności krótkookresowej wzorca promieniowania podczerwonego typu BB-4-T
Fig. 4. The short time stability of the blackbody BB-4-T

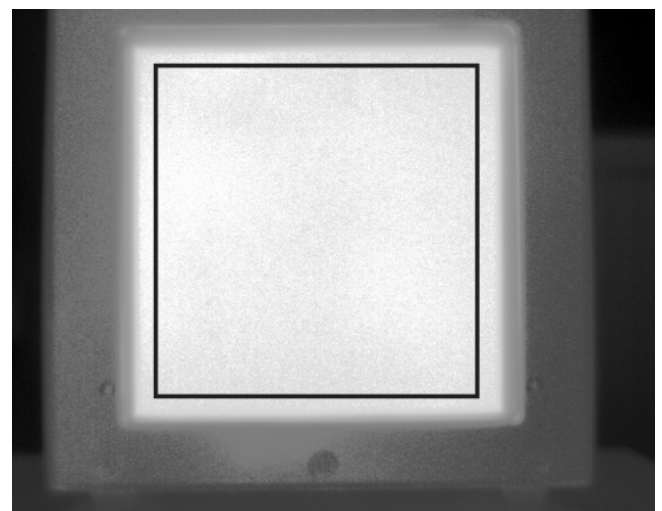


Rys. 5. Wykres stabilności długookresowej wzorca promieniowania podczerwonego typu BB-4-T
Fig. 5. The long time stability of the blackbody BB-4-T

Pomiary stabilności długo i krótkookresowej przeprowadzono dla różnej wartości ustabilizowanej temperatury. W tabeli 4 podano stabilności długo i krótkookresowe dla różnicy temperatury wzorca promieniowania względem otoczenia równej $+10^{\circ}\text{C}$.

4. Pomiar jednorodności rozkładu temperatury na powierzchni wzorca

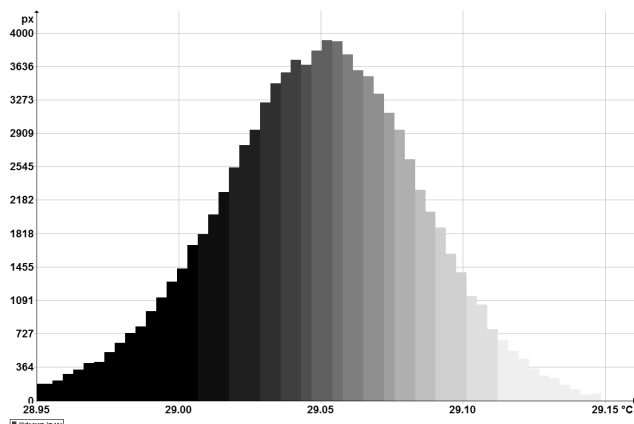
Jednorodność rozkładu temperatury, podobnie jak pomiarów stabilności, dokonano za pomocą kamer termowizyjnych typu SC5600 oraz SC7600. Wyznaczoną ją na podstawie zarejestrowanych termogramów [8, 9, 10]. Analizie poddano obszar obejmujący 80% powierzchni źródła promieniowania podczerwonego (rys. 6). Następnie korzystając z programu do analizy termogramów wyznaczono wartości statystyczne, opisujące rozkład temperatury na powierzchni źródła promieniowania.



Rys. 6. Termogram powierzchni źródła promieniowania typu BB-4-T o temperaturze 35°C (ramką zaznaczono obszar obejmujący 80% powierzchni wzorca)
Fig. 6. Thermal image of a blackbody at 35°C (the frame includes 80% of the blackbody)

Jednorodność rozkładu temperatury określono jako odchylenie standardowe z rozkładu temperatury na powierzchni wzorca podzieloną przez różnicę temperatur między wzorcem, a otoczeniem.

Powyższa metoda wyznaczania jednorodności rozkładu temperatury jest poprawna jeżeli zapewnimy, że sygnał szumy na powierzchni wzorca promieniowania ma rozkład normalny. Aby zweryfikować powyższe założenie wyznaczono: temperatura minimalna T_{min} , temperatura maksymalna T_{max} , różnica temperatur $T_{max} - T_{min}$, wartość średnia temperatury T , odchylenie standardowe δT oraz rozkład temperatury na powierzchni wzorca (rys. 7). Następnie dokonano analizy rozkładu szumu sygnału na powierzchni wzorca. Przeprowadzona analiza pokazała, że szum sygnału na powierzchni wzorca ma rozkład normalny.



Rys. 7. Histogram rozkładu temperatury na powierzchni wzorca promieniowania podczerwieni BB-4-T

Fig. 7. The temperature histogram of the blackbody BB-4-T

5. Pomiar emisyjności wzorca promieniowania podczerwieni

Do pomiaru emisyjności powierzchni wzorca promieniowania wykorzystano spektrometr obrazujący typu Hyper-Cam firmy TELOPS (rys. 8). Urządzenie to wyposażone jest w dwa certyfikowane wzorce promieniowania o bardzo wysokiej emisyjności równej 0,9997.

Emisyjność wzorca promieniowania wyznaczono, metodą emisyjności odniesienia (*reference emissivity technique*), porównując moc emitowaną przez badany wzorce promieniowania z mocą emitowaną przez wzorec spektrometru. Uzyskane wyniki umieszczono w tabeli 4.



Rys. 8. Stanowisko do pomiaru emisyjności wzorca promieniowania

Fig. 8. The setup for measuring the blackbody emissivity

Tab. 4. Zestawienie badanych parametrów wzorców promieniowania podczerwonego

Tab. 4. The parameters of measured the blackbody

Nazwa parametru	Wzorec BB-4-T
Dokładności regulacji temperatury [°C]	±0,01
Stabilność długookresowa [°C]	±0,02
Stabilność krótkookresowa [°C]	±0,005
Jednorodność powierzchni [°C]	±0,01
Emisyjność	>0,97±0,01

6. Podsumowanie

Wzorce promieniowania podczerwonego stosowane w stanowiskach do pomiaru współczynników korekcji detektorów matryc termowizyjnych powinny charakteryzować się parametrami temperaturowymi lepszymi niż szumy detektorów matrycy. NETD matryc detektorów chłodzonych ma wartość 25mK. Oznacza to, że stabilność temperatury wzorca promieniowania, w czasie całego procesu kalibracji, oraz jednorodność rozkładu temperatury powinna być mniejsza od tej wartości. Chcąc przeprowadzić pomiary wzorców promieniowania należy dysponować sprzętem pomiarowym najwyższej klasy.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wzorec promieniowania typu BB-4-T może być stosowany w stanowiskach pomiarowych do wyznaczania współczynników korekcji zarówno matryc niechłodzonych jak i chłodzonych. Porównując uzyskane wyniki pomiaru z danymi katalogowymi największych producentów wzorców promieniowania podczerwonego można stwierdzić, że parametry wzorca BB-4-T nie odbiegają od parametrów wzorców promieniowania oferowanych przez te firmy [8, 9, 10].

Wymagania dla stanowiska pomiarowego przeznaczonego do wyznaczania współczynników korekcji parametrów matryc powodują, że zastosowane w nich wzorce muszą być bardzo dokładne, a przez to bardzo drogie. Stanowisko pomiarowe powinno znajdować się w pomieszczeniu stabilizowanym termicznie, ponieważ nawet niewielki ruch powietrza powoduje wahania temperatury na powierzchni wzorca.

7. Literatura

- [1] Bieszczad G., Orzanowski T., Sosnowski T., Kastek M.: Method of detectors offset correction in thermovision camera with uncooled microbolometric focal plane array, Proceedings of SPIE Vol. 7481, 74810O (2009).
- [2] Bieszczad G., Sosnowski T., Orzanowski T.: Stanowisko do kalibracji i wyznaczania parametrów celownika termowizyjnego do broni strzeleckiej, Materiały Konferencyjne Międzynarodowej Konferencji Naukowo - Techniczna Uzbrojenie 2009.
- [3] Tissot J.L., Trouilleau C., Fieque B., Crastes A. and Legras O.: Uncooled microbolometer detector: recent developments at ULIS, Opto-Electron. Rev. 14(1), 2006.
- [4] www.sofradir.com
- [5] Michalski L., Eckersdorf K.: Pomiary temperatury. WNT, Warszawa 1986.
- [6] Bareła J., Kastek M., Firmanty K., Polakowski H.: Precyzyjne ciało czarne z półprzewodnikowymi modułami termoelektrycznymi, Pomiar Automatyka Kontrola, vol.6 s. 562-566, 2010.
- [7] Chrzanowski K.: Testing Thermal Imagers. Practical guide, MUT, Warszawa 2010.
- [8] www.ci-system.com
- [9] www.sbir.com
- [10] www.hgh.fr