

Mariusz KASTEK, Jarosław BAREŁA, Krzysztof FIRMANTY, Michał KRUPIŃSKI
 INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA,
 ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Stanowisko pomiarowe do wyznaczania współczynników korekcji niejednorodności detektorów matrycy mikrobolometrycznej

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 problematyką detekcji obiektów w systemach podczerwieni, a także analizą sygnałów oraz algorytmami detekcji implementowanymi w urządzeniach podczerwieni. Autor i współautor ponad 70 publikacji. Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Optoelektroniki WAT.

e-mail: mkastek@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. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 50 publikacji, w tym artykuły, referaty, patenty i wdrożenia. Wielokrotnie nagradzany na krajowych i międzynarodowych wystawach wynalazczości. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na metrologii urządzeń podczerwieni. Wielokrotnie brał udział w wielu pracach badawczych.

e-mail: kfirmanty@wat.edu.pl



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 30 publikacji, w tym artykuły, referaty i wdrożenia.

e-mail: jbarela@wat.edu.pl



Mgr inż. Michał KRUPIŃSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (2010). Od 2010 roku jest pracownikiem Wojskowej Akademii Technicznej. Zajmuje się problematyką związaną z projektowaniem i programowaniem systemów cyfrowych, cyfrową analizą i przetwarzaniem obrazu termograficznego, a także zastosowaniem układów programowanych w technice podczerwieni.

e-mail: mkrupinski@wat.edu.pl



Streszczenie

Korekcja niejednorodności kamer detektorów matryc mikrobolometrycznych to problem z którym borykają się konstruktorzy współczesnych kamer termowizyjnych. Stanowisko pomiarowe oparte na zintegrowanym dwupowierzchniowym cieple doskonale czarnym pozwala na wyznaczanie współczynników korekcji niejednorodności. Przedstawiona konstrukcja oraz wyniki badań ciała doskonale czarnego pozwoliły na uzyskanie wyników jednorodności rozkładu temperatury na jego powierzchni na poziomie $\pm 0.011 \div 0.015^\circ\text{C}$. Przeprowadzone pomiary współczynników niejednorodności detektorów matrycy mikrobolometrycznej potwierdzają poprawność koncepcji działania stanowiska pomiarowego.

Słowa kluczowe: korekcja niejednorodności, ciało doskonale czarne.

A test stand for measuring nonuniformity correction coefficients of microbolometer detectors

Abstract

Modern microbolometer array detectors commonly used to sense infrared radiation in 8 - 12 μm range exhibit a non-uniform response of particular array pixels for the same incident power. As a result of this non-uniformity an image degradation called the fixed pattern noise (FPN) occurs. It introduces an additional error component in the thermal representation of the observed scene, thus worsening the performance of an IR camera. In order to compensate this non-uniformity, several correction methods can be employed. Those methods usually base on laboratory measurements on specialized test stands, in which precise blackbody radiation sources are key metrological elements. The presented dual emitter blackbody set meets the high requirements of a standard blackbody for metrological applications. The design of emitters and the applied method of temperature stabilization ensure high uniformity and stability of the temperature distribution over the entire blackbody surface, which was positively verified during laboratory measurements. As a result, the presented blackbody can be used to perform non-uniformity correction of microbolometer focal plane arrays.

Keywords: nonuniformity correction, blackbodies.

1. Wprowadzenie

Matryce mikrobolometryczne należą do grupy detektorów termicznych i są stosowane do detekcji promieniowania podczerwonego w zakresie 7 – 14 μm . Zasada działania detektorów termicznych polega na zmianie wartości jednego z parametrów fizycznych aktywnego obszaru detektora w funkcji zmian jego temperatury. Dla bolometrów jest to rezystancja, w przypadku piroelektryków jest to zmiana spontanicznej polaryzacji elektrycznej. Dodatkowo produkowane są również termopary czy komórki Golaya. We wszystkich wymienionych detektorach padające promieniowanie zwiększa temperaturę części detekcyjnej detektora, co z kolei prowadzi do zmiany ich właściwości fizycznych. Odpowiedni układ odczytu mierzy określony parametr fizyczny i przetwarza go na sygnał wyjściowy. W kamerze termowizyjnej, w której zastosowano matrycę detektorów mikrobolometrycznych, promieniowanie przechodzi przez okno wejściowe wykonane z germanu a następnie jest absorbowane przez membranę pokrytą materiałem o dużym współczynniku absorpcji. W przypadku bolometrów membrana najczęściej wykonywana jest z amorficznego krzemu (aSi) lub tlenku wanadu (Vox). Padające promieniowanie zmienia temperaturę elementu detekcyjnego a tym samym jego rezystancję. Bolometr jest podłączony do układu odczytu, który przetwarza zmianę rezystancji na napięcie odczytywane za pomocą układu pomiarowego.

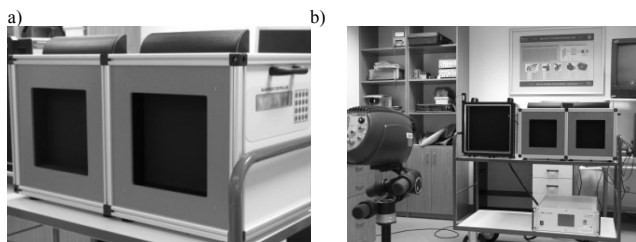


Rys. 1. Obraz przed korekcją (a) i po korekcji niejednorodności (b)
 Fig. 1. The image recorded by an infrared camera before (a) and after (b) correction

Matryce detektorów podczerwieni charakteryzują się niejednorodnością odpowiedzi poszczególnych detektorów (pikseli) dla takiej samej mocy padającego promieniowania podczerwonego. Efektem niejednorodności detektorów jest zakłócenie zwane szumem FPN (ang. fixed pattern noise), który wprowadza błąd odwzorowania termicznego obserwowanej sceny i w rezultacie pogorszenie parametrów użytkowych kamery termowizyjnej [1].

W celu kompensacji niejednorodności odpowiedzi matrycy detektorów stosuje się różne metody korekcji niejednorodności NUC (ang. nonuniformity correction). Metody te opierają się na pomiarach wykonanych na specjalizowanych stanowiskach pomiarowych, w których głównym elementem metrologicznym są powierzchniowe wzorce ciała doskonale czarne. W zależności od zastosowanej metody na stanowiskach pomiarowych używa się dwóch lub więcej wzorców promieniowania. Wzorce promieniowania podczerwonego powinny charakteryzować się stabilnymi parametrami takimi jak: jednorodność rozkładu temperatury i stabilność temperatury. Parametry te odpowiednio powinny wynosić nie więcej niż: $\pm 0.015^\circ\text{C}$ ($\Delta T < 10^\circ\text{C}$) i $\pm 0.02^\circ\text{C}$ ($\Delta T < 10^\circ\text{C}$) [2].

W ramach realizowanych prac badawczych w Instytucie Optoelektroniki opracowano zintegrowane dwupowierzchniowe wzorce ciała doskonale czarne. Zintegrowanie dwóch powierzchni czynnych (dwa promienniki) umożliwia pracę takiego systemu w dwóch trybach: w trybie absolutnej temperatury zadanej i w trybie różnicowym. Podczas konstrukcji systemu założono możliwość pracy urządzenia w komorze klimatycznej (minimalna temperatura -10°C), a osiągnięte wyniki zakresu stabilizacji temperatury absolutnej $+15^\circ\text{C} \div 100^\circ\text{C}$ i zakresu stabilizacji temperatury różnicowej $-10^\circ\text{C} \div 75^\circ\text{C}$ dają szerokie możliwości zastosowania systemu podczas pomiarów. Na rys. 2a przedstawiono widok zintegrowanego dwupowierzchniowego ciała doskonale czarnego.



Rys. 2. Zintegrowane dwupowierzchniowe ciało doskonale czarne (a) i pomiar parametrów urządzenia podczas testów laboratoryjnych (b)
Fig. 2. The double emitter blackbody with integrated controller (a) and the measurement of device parameters during laboratory tests (b)

2. Zintegrowane dwupowierzchniowe ciało doskonale czarne

Kontroler wzorca promieniowania podczerwieni ma budowę modułową. Składa się z modułu mikroprocesorowego, modułu mocy, modułu pomiaru temperatury oraz modułu zasilającego.

Moduł mikroprocesorowy został zbudowany na dwóch mikroprocesorach STM32. Pierwszy procesor zapewnia interfejs z użytkownikiem. Do jego zadań należy: obsługa klawiatury, obsługa wyświetlacza LCD, wysyłanie i odbieranie danych z komputera. Drugi procesor realizuje regulację pracy wzorca promieniowania. Zapewnia on sterowanie pracą przetwornika A/C, odczyt temperatury wzorca oraz otoczenia, sterowanie stopni wyjściowych mocy, odczyt parametrów kalibrujących z pamięci FLASH. Komunikacja pomiędzy procesorami odbywa się z wykorzystaniem sprzętowego interfejsu SPI.

Moduł mocy ma za zadanie sterować mocą dostarczaną do elementu Peltier'a. Musi on zapewnić płynną regulację z rozdzielczością odpowiadającą zmianie temperatury wzorca promieniowania równej $\pm 0,001^\circ\text{C}$. Moduł mocy powinien zapewniać regulację temperatury wzorca poniżej i powyżej temperatury otoczenia [3].

Układ pomiarowy zapewnia pomiar temperatury z rozdzielczością $\pm 0,001^\circ\text{C}$. Aby zrealizować tak wysokie wymagania jako czujniki temperatury zastosowano czujniki typu PT100 klasy 1/3B. W układzie pomiarowym zastosowano 24-bitowy przetwornik A/C z filtrem cyfrowym, zapewniający zakładaną dokładność przetwarzania sygnału. Minimalizacja poziomu szumów wymaga ustawienia pasma filtrów cyfrowych na poziomie 20Hz. Dane pomiarowe przesyłane są do systemu mikroprocesorowego z wykorzystaniem sprzętowego interfejsu SPI.

Moduł zasilający dostarcza wszystkich niezbędnych napięć potrzebnych do prawidłowej pracy sterownika charakteryzujących się niskim poziomem szumów własnych.

Termoelektryczne wzorce promieniowania podczerwieni jako element wykonawczy wykorzystują element Peltier'a do regulacji temperatury promiennika. Układ sterowania zapewnia optymalną pracę elementów Peltier'a. Najlepszą efektywność grzania oraz chłodzenia uzyskujemy gdy jest on zasilany napięciem optymalnym. Jest to możliwe tylko wówczas, gdy będziemy sterować czasem przepływu prądu przez element Peltier'a. Dlatego do sterowania jego pracą wykorzystano regulatory PWM. W celu zapewnienia przepływu prądu w dwóch kierunkach element Peltier'a pracuje w układzie mostkowym zbudowanym z tranzystorów MOSFET. Czas przepływu prądu jest wyliczany na podstawie wartości zmierzonych temperatur, temperatury zadanej i rodzaju pracy elementu Peltier'a.

Na podstawie doświadczenia zdobytego podczas praktycznych implementacji algorytmów zdecydowano się na implementację w sterowniku zmodyfikowanego algorytmu PID o dwóch stopniach swobody. Z uwagi na znaczne wady, jakie mają algorytmy analogowe (rozstrajanie się regulatora w wyniku starzenia się elementów) zdecydowano się na zastosowanie wersji cyfrowej ww. algorytmu. Algorytm PID w mikroprocesorowych systemach sterowania musi być realizowany przez szczególną postać regulatora, która może być nazwana regulatorem cyfrowym. Cechą charakterystyczną takiego regulatora jest praca ze stałym okresem próbkowania T_s . Układ próbkowania sygnału wyjściowego obiektu regulacji na podstawie sygnału $y(t)$ wyznacza ciąg wartości dyskretnych $y(k)$. Algorytm regulacji na podstawie ciągów wartości dyskretnych uchybu regulacji $e(k)$ określa ciąg dyskretnych wartości sygnału sterującego $u(k)$. Na wyjściu regulatora cyfrowego znajduje się układ ekstrapolacji, który na podstawie tego ciągu wartości dyskretnych wypracowuje sygnał sterujący obiektu $u(t)$ dla każdej chwili czasu t . Po przekształceniu cyfrowy algorytm PID dla struktury szeregowej będzie miał postać:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = q_0 \cdot e(k) + q_1 \cdot e(k-1) + q_2 \cdot e(k-2), \quad (1)$$

gdzie:

$$q_0 = K_p \left(1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right); \quad q_1 = -K_p \left(1 + 2 \frac{T_d}{T_s} \right); \quad q_2 = K_p \frac{T_d}{T_s}, \quad (2)$$

przy czym: K_p – współczynnik proporcjonalności wzmocnienia w torze regulacji; T_d – czas różniczkowania (wyrzedzenia); T_i – czas całkowania (zdwojenia).

Do określenia wartości nastaw K_p , T_d , T_i wykorzystano metodę odpowiedzi skokowej (metoda Zieglera-Nicholsa). Wartości współczynników obliczono za pomocą oprogramowania MATLAB z wykorzystaniem narzędzia Identification Tools.

Powierzchniowe źródło podczerwieni zostało poddane badaniom, których celem było określenie jego stabilności oraz równomierności rozkładu temperatury na jego powierzchni (rys. 2b). W celu określenia tych parametrów pomiary przeprowadzono z użyciem pomiarowej kamery termowizyjnej typ SC 5600 produkcji firmy FLIR. Posiada ona detektor typu InSb, który umożliwia przeprowadzenie rejestracji termogramów z częstotliwością 50 Hz. Krótki czas rejestracji jest istotny przy określaniu krótkoczasowej stabilności dwupowierzchniowego ciała doskonale czarnego.

Pomiary zostały przeprowadzone w dwóch cyklach pomiarowych: pierwszy związany był z określeniem szybkości osiągania zadanej temperatury, drugi cykl pozwolił określić parametry stabilności osiągniętej temperatury powierzchniowego źródła podczerwieni. W obu przypadkach zapisywane były dane pomiarowe w formie ciągłej rejestracji, natomiast do analizy wybierane były poszczególne termogramy z każdej rejestracji [4].

Tab. 1. Wyniki pomiarów parametrów czasowych powierzchniowego źródła promieniowania.

Tab. 1. Measurement results of parameters of the double emitter blackbody with integrated controller

Temperatura początkowa T_p [°C]	Zmiana ΔT [°C]	Średnia temperatura końcowa T_k [°C]	Średni czas \bar{t} [s]
30	5	35,009	9,7
35	5	39,969	10,1
40	5	45,029	10,2

Pierwsza część przeprowadzonych pomiarów dotyczyła określenia parametrów czasowych zmiany temperatury źródła przy zmianie temperatury zadanej o $\Delta T = 5$ °C. W celu określenia czasu potrzebnego do osiągnięcia zadanej temperatury przeprowadzono 10 próbnych pomiarów dla trzech wartości temperatury początkowej T_p . Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1. Parametr T_k oznacza temperaturę końcową uśrednioną natomiast \bar{t} oznacza uśredniony czas osiągnięcia zadanej temperatury dla 10 kolejnych pomiarów. Czas osiągania zadanej temperatury przy ustalonej $\Delta T = 5$ °C dla trzech wartości temperatury początkowej wynosił ok. 10 s.

Dla każdego pomiaru wykonano rejestracje ciągłe, z których wybrano po kilka termogramów do określenia jednorodności rozkładu temperatury na powierzchni źródła. W celu określenia jednorodności rozkładu temperatury na każdym zarejestrowanym termogramie zaznaczono wybrane fragmenty powierzchni źródła w postaci dwóch kwadratów 10 cm x 10 cm przesuniętych w stosunku do siebie tak, aby różnica pomiędzy udziałem powierzchni jednego w stosunku do drugiego kwadratu wynosiła 30%. Następnie korzystając z programu do analizy termogramów wyznaczono wartości statystyczne opisujące jednorodność rozkładu temperatury na powierzchni:

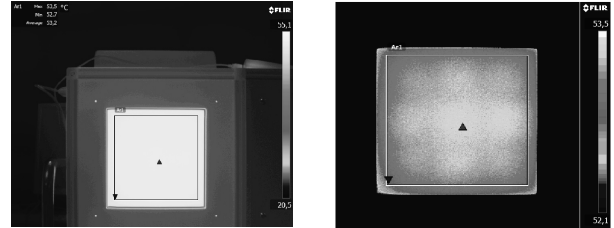
- temperatura minimalna T_{min} ,
- temperatura maksymalna T_{max} ,
- różnica temperatur $T_{max} - T_{min}$,
- wartość średnia temperatury \bar{T} ,
- odchylenie standardowe δT .

Wartości parametrów statystycznych określone były dla każdego wybranego kwadratu i porównywane ze sobą. W ten sposób oceniono jednorodność rozkładu temperatury na powierzchni źródła podczas dochodzenia do zadanej temperatury. Podczas rejestracji dla danych przedstawionych w tabeli 1 obliczono wszystkie wartości statystyczne wymienione powyżej dla każdej ustalonej powierzchni kwadratów porównawczych. Na podstawie analizy tych danych można określić jednorodność rozkładu temperatury na powierzchni źródła podczerwieni podczas procesu osiągania zadanej temperatury. Z otrzymanych wyników można określić jednorodność na poziomie $\pm 0,011 \pm 0,015$ °C podczas osiągania zadanej temperatury.

Następny etap badań parametrów źródła powierzchniowego polegał na określeniu parametrów stabilności temperaturowej źródła oraz jednorodności rozkładu temperatury podczas procesu stabilizacji zadanej temperatury. Pomiary te polegały na ciągłej rejestracji termogramów w czasie ok. 1 minuty od czasu osiągnięcia zadanej temperatury. W ten sposób określono czas stabilizacji źródła oraz określono parametry stabilności źródła.

Na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych dla warunków początkowych przedstawionych w tabeli 1 określono czas stabilizacji źródła do zadanej temperatury na poziomie 35 s. Na podstawie analizy parametrów statystycznych określono jednorodność rozkładu temperatury powierzchniowego źródła na poziomie

$\pm 0,009 - 0,011$ °C. Dla każdej rejestracji sprawdzano rozkład temperatury wzdłuż wybranych profili na powierzchni źródła (rys. 4). Na ich podstawie sprawdzono jednorodność rozkładu temperatury na powierzchni źródła. Każdy z pomiarów przedstawionych na rys. 8, odpowiada rozkładowi temperatury dla trzech termogramów zarejestrowanych kolejno z odstępem czasowym 200 ms.



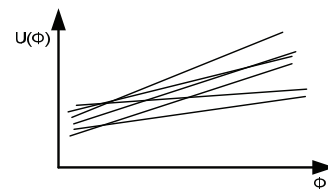
Rys. 4. Termogram zarejestrowany podczas testów zintegrowanego dwupowierzchniowego ciała doskonale czarnego.

Fig. 4. The thermogram registered during the tests of the double emitter blackbody with integrated controller

Na podstawie otrzymanych wyników z przeprowadzonych testów za pomocą kamer termowizyjnych można stwierdzić, że zaprojektowane zintegrowane dwupowierzchniowe ciało doskonale czarne nadaje się do użycia podczas procesu wyznaczania współczynników korekcji NUC dla mikrobolometrycznych kamer termowizyjnych [5]. Stanowisko pomiarowe z zintegrowanym dwupowierzchniowym ciałem doskonale czarnym zostało wyposażone dodatkowo w stolik liniowy, zapewniający przemieszczanie się kamery termowizyjnej pomiędzy dwoma promiennikami.

3. Wyznaczanie współczynników korekcji detektorów mikrobolometrycznych

Korekcja niejednorodności NUC polega na odpowiednim cyfrowym przetwarzaniu sygnału wyjściowego z matrycy detektorów podczerwieni w celu usunięcia szumu FPN w generowanym termogramie. Odpowiednie współczynniki korekcyjne są obliczane na podstawie zarejestrowanych wcześniej sygnałów odpowiednio detektorów dla kilku wartości strumienia promieniowania podczerwonego wzorcowych promienników podczerwieni (ciał czarnych).



Rys. 3. Charakterystyki odpowiedzi napięciowej bolometrów w funkcji mocy padającego promieniowania przed korekcją niejednorodności

Fig. 3. Pixel response curves before non-uniformity correction

Najczęściej stosowanym algorytmem korekcji niejednorodności jest algorytm korekcji dwupunktowej, wykonywany według wzoru:

$$U_{ij}^*(\Phi) = G_{ij} U_{ij}(\Phi) + O_{ij}, \quad (3)$$

gdzie $U_{ij}(\Phi)$ jest odpowiedzią detektora ij przed korekcją a $U_{ij}^*(\Phi)$ odpowiedzią po korekcji, G_{ij} i O_{ij} są współczynnikami korekcji nachylenia (GAIN) i przesunięcia (OFFSET) charakterystyki detektora. Współczynniki korekcyjne GAIN i OFFSET są opisane wyrażeniami [6]:

$$G_{ij} = \frac{U_{ij}(\Phi_2) - U_{ij}(\Phi_1)}{U_{ij}(\Phi_2) - U_{ij}(\Phi_1)}, \quad (4)$$

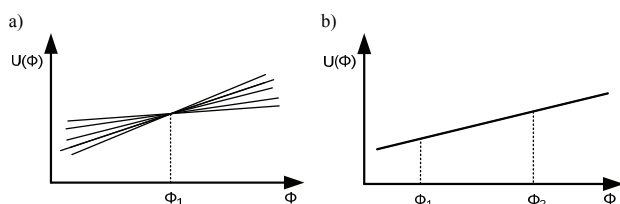
$$O_{ij} = U_{ij}(\Phi_1) - G_{ij} U_{ij}(\Phi_1), \quad (5)$$

gdzie $U_{ij}(\Phi_1)$ i $U_{ij}(\Phi_2)$ są odpowiedziami detektora ij na strumień

Φ jednorodnego promieniowania podczerwonego od ciał czarnych o temperaturach T_1 i T_2 , $U(\Phi_1)$ i $U(\Phi_2)$ są wartościami średnimi odpowiedzi matrycy wyznaczonymi według wzoru:

$$U(\Phi) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N U_{ij}(\Phi), \quad (6)$$

gdzie $U_{ij}(\Phi)$ jest odpowiedzią detektora ij na padający strumień Φ od promiennika podczerwieni o temperaturze T , M jest liczbą wierszy, a N jest liczbą kolumn w matrycy.

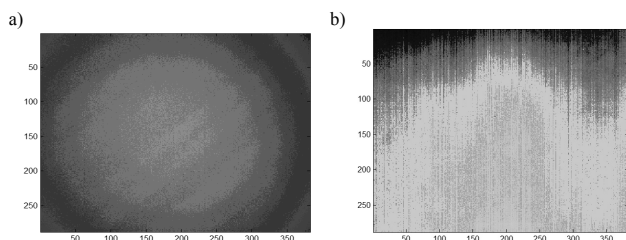


Rys. 4. Charakterystyki odpowiedzi napięciowej detektorów bolometrycznych w funkcji mocy padającego promieniowania po korekcji (a) jednopunktowej, (b) dwupunktowej

Fig. 4. Pixel response curves after one-point (a) and two-point (b) non-uniformity correction

Wyznaczone dla poszczególnych detektorów w matrycy współczynniki NUC są zapisywane do pamięci kamery termowizyjnej i używane następnie podczas korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy.

W celu kompensacji rozrzutu nachylenia i położenia charakterystyk detektorów podczerwieni, najczęściej stosuje się metodę korekcji dwupunktowej. W tym celu należy zastosować dwa ciała czarne o ustalonej temperaturze np. $T_1=15^\circ\text{C}$, $T_2=40^\circ\text{C}$. Procedurę korekcji należy przeprowadzić w stabilnych warunkach temperatury. W tym celu korekcję najlepiej jest przeprowadzić w komorze klimatycznej lub z użyciem chłodziarki termoelektrycznej (TEC), które zapewnią stabilną temperaturę detektora podczas pomiaru. W celu wyeliminowania wpływu szumu losowego, do obliczeń współczynników kalibracyjnych stosuje się uśrednione w czasie wartości pikseli z kilkudziesięciu ramek. Współczynniki wzmocnienia wyznacza się na podstawie wzoru (4). Na rys. 5a przedstawiona jest wyznaczona tablica współczynników korekcyjnych wzmocnienie dla każdego detektora.

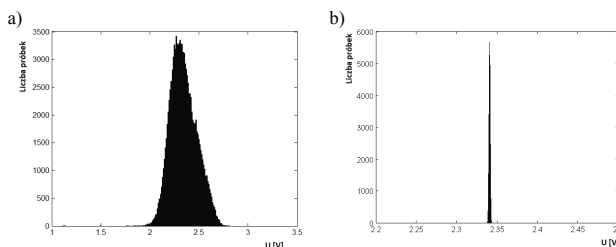


Rys. 5. Tablica współczynników korekcji nachylenia charakterystyk a) i przesunięć b) dla każdego detektora

Fig. 5. The values of gain (a) and offset (b) correction coefficients for all the detectors in an array

W kolejnym etapie wyznaczane są współczynniki korekcji przesunięcia charakterystyk dla każdego z detektorów zgodnie ze wzorem (5). Ostatecznie, wzmocnienie i przesunięcie charakterystyki każdego detektora jest korygowane zgodnie z równaniem (3). Współczynniki korekcji zostały wyznaczone na podstawie odpowiedzi matrycy detektorów na promieniowanie promienników podczerwieni o temperaturach: $T_1=15^\circ\text{C}$ i $T_2=40^\circ\text{C}$.

Wyznaczone współczynniki zostały sprawdzone dla odpowiedzi matrycy dla promiennika o temperaturze $T_x=23^\circ\text{C}$. W wyniku korekcji dwupunktowej, niejednorodność odpowiedzi detektorów matrycy zmalała z 5,7% do 0,034%. Na rys. 6 przedstawia rozkład wartości wszystkich detektorów przed i po korekcji NUC.

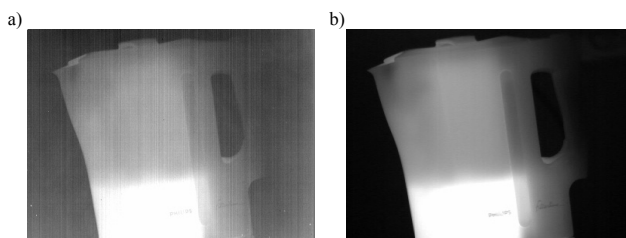


Rys. 6. Rozkład wartości sygnału matrycy przed a) i po korekcji b) dwupunktowej

Fig. 6. Histogram of array signal before (a) and after (b) two-point correction

4. Wnioski

Zaprojektowane i wykonane zintegrowane dwupowierzchniowe ciało doskonale czarne może zostać zastosowane jako element stanowiska pomiarowego przeznaczonego do wyznaczania współczynników korekcji niejednorodności detektorów matryc mikrobolometrycznych. Uzyskane parametry techniczne urządzenia umożliwiają wykonywanie procedur wyznaczania współczynników korekcyjnych, a uzyskiwana jakość obrazów z kamery termowizyjnej z matrycą mikrobolometryczną jest zadawalająca.



Rys. 7. Obrazy zarejestrowane modelem obserwacyjnej kamery termowizyjnej przed korekcją (a) i po korekcji niejednorodności (b)

Fig. 7. Thermal images recorded by a prototype IR camera before (a) and after (b) non-uniformity correction

Na rys. 7 przedstawiono wyniki obrazujące jakość uzyskanego obrazu po korekcji niejednorodności. Analiza miar statystycznych uzyskanych wyników potwierdza parametry zintegrowanego dwupowierzchniowego ciała doskonale czarnego. Dodatkowo urządzenie to może zostać użyte do wzorcowania termowizyjnych kamer pomiarowych w zakresie regulacji temperatury.

5. Literatura

- [1] Orzanowski T., Sosnowski T., Kastek M.: Implementacja algorytmu korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej w układzie programowalnym, *Pomiary Automatyka Kontrola* nr 8, s. 526-528, 2008.
- [2] Bareła J., Firmanty K., Kastek M., Polakowski H.: Wzorce promieniowania podczerwonego używane do kalibracji urządzeń termowizyjnych, *Biuletyn WAT* Vol. LXI, Nr 2, str. 81-91, 2012.
- [3] Bareła J., Firmanty K., Kastek M., Polakowski H.: Precyzyjne ciało czarne z półprzewodnikowymi modułami termoelektrycznymi, *Pomiary Automatyka Kontrola* nr 06, s. 562-565 2010.
- [4] Bareła J., Firmanty K., Kastek M., Polakowski H.: Weryfikacja parametrów wzorców promieniowania podczerwonego, *Pomiary Automatyka Kontrola* nr 10, s. 1130-1133, 2011.
- [5] Bieszczad G., Sosnowski T., Madura H., Kastek M., Firmanty K.: The calibration stand for thermal camera module with infrared focal plane array, *Proc. of SPIE* Vol. 7660, 76603Y (2010).
- [6] 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).