

**Robert OLBRYCHT, Bogusław WIĘCEK**

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI,  
ul. Wólczarska 211/215, 90-924 Łódź

## Wpływ rodzaju promiennika podczerwieni na skuteczność korekcji wzmocnienia matryc mikrobolometrycznych

Mgr inż. Robert OLBRYCHT



Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej (2007). Od 2008 roku pracownik Instytutu Elektroniki Politechniki Łódzkiej. W ramach prac na rozprawę doktorską prowadzi projekt oraz badania nad nową metodą korekcji niejednorodności matryc mikrobolometrycznych w kamerach termowizyjnych. Robert Olbrycht jest członkiem komitetu organizacyjnego Konferencji Termografia i Termometria w Podczerwieni (TTP).

e-mail: robert.olbrycht@p.lodz.pl

Dr hab. inż. Bogusław WIĘCEK



Specjalizuje się w termografii w podczerwieni i w modelowaniu zjawisk złożonej wymiany ciepła w elektronice. Jest autorem i współautorem ponad 250 publikacji. Bogusław Więcek jest członkiem komitetów naukowych: Quantitative Infrared Thermography, Thermal Engineering and Thermometry oraz Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Jest organizatorem cyklicznej krajowej konferencji „Termografia i Termometria w Podczerwieni” – TTP.

e-mail: boguslaw.wiecek@p.lodz.pl

### Streszczenie

Artykuł porusza problem korekcji współczynników wzmocnienia matryc mikrobolometrycznych w kamerach termowizyjnych przy użyciu promienników podczerwieni. Przedstawiona metoda nie wymaga używania dwóch modeli ciał doskonale czarnych. Nowością jest porównanie efektów uzyskiwanych przy użyciu dużego (pierścieniowego) i małego (punktowego) promiennika podczerwieni. Wskazano możliwość wystąpienia artefaktów w macierzy wyznaczonej przy użyciu małego promiennika, oraz stwierdzono ich brak podczas stosowania dużego promiennika.

**Słowa kluczowe:** termowizja, mikrobolometr, promiennik, NUC.

### Influence of infrared emitter on efficiency of gain correction in microbolometer detectors

#### Abstract

The paper describes the problem of correcting microbolometer gain coefficients in thermal cameras. There is presented the reference approach (Section 2) which requires to record thermograms of two blackbody model surfaces in different temperatures [1, 2, 3]. The authors propose a different method (Section 3) [4, 5], which is based on using an infrared emitter built into the thermal camera (Fig. 2). The novelty in this paper is analysis of the dependence between the emitter size and correction efficiency. In particular, the comparison of small, spotlight emitter (Fig. 1a) and larger, toroidal one (Fig. 1b) is provided. For qualitative comparison of correction results, the matrices of the calculated gain correction factors are shown in Fig. 3. One may notice some artifacts in Fig. 3c (obtained with the small emitter). The quantitative analysis (namely, the calculated values of the root mean square error for centre regions of matrices) confirms the presence of artifacts. Also the histograms of the calculated matrices (Fig. 4) are in coherence with the above observations. The conclusion is that a large emitter is better for determination of gain correction factors with the proposed method (root mean square error was about 0,0096 in this particular case). In case of a small emitter the unwanted point artifacts may occur.

**Keywords:** thermovision, microbolometer, infrared emitter, NUC.

### 1. Wstęp

W mikrobolometrycznych kamerach pomiarowych powszechnie stosowany jest mechanizm migawki, który umożliwia automatyczne przeprowadzanie korekcji niejednorodności dryftu temperaturowego. Jest to konieczne ze względu na fakt, iż podczas pracy kamery matryca mikrobolometryczna może zmieniać swoją temperaturę nie tylko pod wpływem promieniowania podczerwonego obserwowanej sceny, ale również otaczających ją źródeł ciepła (zjawisko dryftu temperaturowego). Może to powodować powstawanie błędów pomiarowych, który musi być okresowo korygowany przy pomocy mechanizmu migawki, którego okresowe zadziaływanie wiąże się z chwilowym przerwaniem możliwości prowadzenia obserwacji termowizyjnej. W tym czasie kamera rejestruje termogramy powierzchni migawki, uśrednia je i wykorzystuje do wyznaczenia współczynników korygujących dla

każdego piksela (mikrobolometru) w matrycy. Następnie współczynniki te są uwzględniane podczas obserwacji termowizyjnej i rejestracji termogramów, aż do momentu ich uaktualnienia w momencie ponownego zadziaływania mechanizmu migawki [1, 2, 3].

### 2. Korekcja niejednorodności

Jeśli przedmiotem wyżej opisanej korekcji niejednorodności jest tylko wpływ dryftu temperaturowego, który powoduje przesunięcie (*ang. offset*) charakterystyk opisujących odpowiedź detektora, mówimy o korekcji jednopunktowej. W praktyce jednakże stosowana jest korekcja dwupunktowa, która obejmuje również współczynniki wzmocnienia (wyznaczone na etapie produkcji kamery) mikrobolometrów w matrycy. Najczęściej korekcja ta odbywa się na zasadzie okresowego stosowania mechanizmu migawki do wyznaczenia współczynników korygujących przesunięcie charakterystyk odpowiedzi poszczególnych mikrobolometrów, natomiast współczynniki korekcji nachylenia tych charakterystyk (wzmocnienia mikrobolometrów, *ang. gain*) są odczytywane z tablicy wyznaczonej na etapie produkcji i kalibracji kamery. W ten sposób mikrobolometryczne kamery termowizyjne okresowo, w sposób całkowicie automatyczny, podczas swojej pracy przeprowadzają dwupunktową korekcję niejednorodności. Korekcja ta charakteryzuje się wysoką skutecznością zarówno z punktu widzenia ilościowego jak i jakościowego. Bazuje ona na założeniu, iż współczynniki wzmocnienia mikrobolometrów nie ulegają zmianie.

Oprogramowanie wybranych modeli kamer termowizyjnych stwarza jednakże ich użytkownikom możliwość samodzielnego przeprowadzenia dwupunktowej korekcji niejednorodności – w tym celu wymagane jest posiadanie dwóch modeli ciał doskonale czarnych i ustawienie na nich dwóch różnych temperatur:  $T_{ref1}$  oraz  $T_{ref2}$ . Następnie trzeba zarejestrować, w możliwie krótkim odstępie czasowym, termogramy  $Y_{ij}(T_{ref1})$  oraz  $Y_{ij}(T_{ref2})$  powierzchni tych modeli ciał. Pierwszym etapem korekcji jest wyznaczenie wartości współczynników korekcji wzmocnienia  $g_{ij}$  dla każdego z mikrobolometrów w matrycy na pozycji  $(i,j)$ , korzystając z równania (2). W tym celu konieczne jest wyznaczenie średniej wartości  $\bar{Y}$  zmian sygnału w zakresie  $T \in (T_{ref1}, T_{ref2})$  dla wszystkich detektorów w matrycy – równanie (1).

$$\bar{\Delta Y} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta Y_{ij}}{MN} \quad (1)$$

$$g_{ij} = \frac{\bar{Y}(T_{ref2}) - \bar{Y}(T_{ref1})}{\Delta Y_{ij}} \quad (2)$$

gdzie:  $M$  – liczba wierszy w matrycy mikrobolometrycznej,  $N$  – liczba kolumn w matrycy mikrobolometrycznej.

Następnie wyznacza się wartości  $o_{ij}$  współczynników korekcji przesunięcia, korzystając z równania (3). Ostatnim etapem jest zastosowanie równania (4) w celu wyznaczenia wartości  $Y^*$  sygnału po korekcji dwupunktowej [2, 3].

$$o_{ij} = \bar{Y}(T_{ref1}) - g_{ij} Y_{ij}(T_{ref1}) \quad (3)$$

$$Y_{ij}^*(T) = g_{ij} Y_{ij}(T) + o_{ij} \quad (4)$$

### 3. Automatyczne wyznaczanie współczynników korekcji wzmocnienia

Wyżej opisana metoda korekcji dwupunktowej może zostać zastosowana przez użytkownika kamery termowizyjnej jeśli pozwala na to jej oprogramowanie i posiada on przynajmniej jeden model ciała doskonale czarnego. Autorzy proponują rozwiązanie, które po zaimplementowaniu w kamerze umożliwi automatyczne wyznaczenie współczynników korekcji wzmocnienia bez konieczności ingerencji ze strony użytkownika. Jest ono tematem zgłoszenia patentowego [4] i publikacji [5]. Ze względu na specyfikę proponowanej metody, koszt materiałów oraz implementacji nie jest znaczący.

Ideą proponowanej metody jest zastosowanie promiennika podczerwieni wbudowanego w kamerę termowizyjną. Uruchomienie promiennika spowoduje, iż wyemitowane przez niego promieniowanie podczerwone dotrze do matrycy mikrobolometrycznej równoległe z promieniowaniem podczerwonym obserwowanej sceny. W celu skorzystania z metody należy zasłonić obiektyw (lub w inny sposób zapewnić niezmiennosc sceny, co jest warunkiem koniecznym działania proponowanej metody) i zarejestrować dwie sekwencje termogramów – pierwszą z wyłączonym promiennikiem, drugą z załączonym. Następnie należy wyznaczyć dwa uśrednione w czasie termogramy ( $\bar{Y1}$ ,  $\bar{Y2}$ ) odpowiednio dla pierwszej i drugiej sekwencji. Uśrednianie pozwala na eliminację wpływu szumów.

Zasłonięcie obiektywu zapewnia, że różnicą pomiędzy termogramami  $\bar{Y1}_{ij}$ ,  $\bar{Y2}_{ij}$  będzie jedynie składowa promieniowania pochodząca od promiennika, gdyż promieniowanie pochodzące od elementu zasłaniającego obiektyw będzie jednakowe w momencie rejestracji obu sekwencji. W celu wyznaczenia wartości  $g_{ij}$  współczynników korekcji wzmocnienia mikrobolometrów teoretycznie wystarczyłoby skorzystać z równania (5).

$$g_{ij} = \frac{\overline{\Delta Y}}{Y2_{ij} - Y1_{ij}}, \quad (5)$$

gdzie:

$$\overline{\Delta Y} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\bar{Y2}_{ij} - \bar{Y1}_{ij})}{MN}. \quad (6)$$

Równanie (5) jednakże jest prawdziwe tylko w przypadku, gdy zapewnimy idealnie równomierne oświetlenie matrycy przez promiennik. W praktyce nie jest to możliwe, dlatego konieczna jest modyfikacja równania (5) do postaci (7).

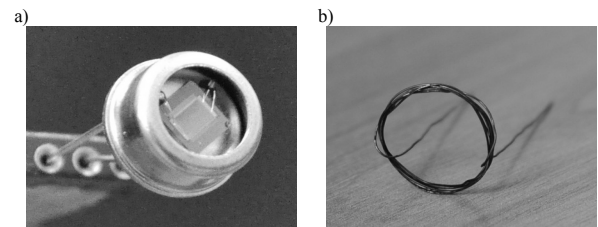
$$g_{ij} = \frac{\overline{\Delta Y}}{m_{ij}(Y2_{ij} - Y1_{ij})}, \quad (7)$$

gdzie  $m$  jest macierzą o wymiarach  $(M, N)$  zawierającą współczynniki korygujące nierównomierność oświetlenia matrycy przez promiennik. Macierz  $m$  wystarczy wyznaczyć tylko raz, na etapie implementacji promiennika w kamerze, bezpośrednio po wykonaniu korekcji dwupunktowej metodą opisaną w rozdziale 2. Stosując wtedy wzór (5) uzyskalibyśmy informację o intensywności oświetlenia każdego z mikrobolometrów przez promiennik. Stosu-

jąc odwrotność wzoru (5) uzyskamy macierz  $m$ , która zawiera współczynniki korygujące nierównomierność oświetlenia.

### 4. Wpływ rozmiaru promiennika na skuteczność proponowanej metody

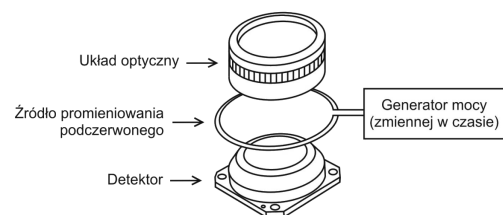
Tematem niniejszego artykułu jest porównanie efektów wyznaczenia współczynników korekcji wzmocnienia mikrobolometrów w matrycy przy użyciu proponowanej metody z wykorzystaniem dwóch promienników podczerwieni o różnej wielkości – punkowego (rys. 1a) i pierścieniowego (rys. 1b). W przypadku promiennika punkowego źródłem promieniowania jest cienka warstwa węgla amorficznego o powierzchni około  $2 \times 3$  mm umieszczona w otwartej obudowie typu TO-5. Promiennik pierścieniowy został uformowany poprzez nawinięcie 5 zwojów drutu o średnicy około 0,35 mm na walcu o średnicy 2 cm. Źródłem promieniowania podczerwonego jest cała powierzchnia drutu. Do badań wykorzystano kamerę termowizyjną z detektorem typu VOx (tlenek wana-du) o rozdzielczości  $384 \times 288$ .



Rys. 1. a) Punkowy, b) pierścieniowy promiennik podczerwieni  
Fig. 1. a) Spotlight infrared emitter, b) ring infrared emitter

Badanie polegało na:

- wyznaczeniu referencyjnej macierzy współczynników  $g_{ij}$  korekcji wzmocnienia mikrobolometrów metodą opisaną w rozdziale 2 (wynik na rys. 3a),
- umieszczeniu promiennika pierścieniowego w odległości około 3cm od powierzchni okna detektora mikrobolometrycznego w sposób pokazany na rys. 2 i zastosowaniu procedury opisanej w rozdziale 3 (wynik na rys. 3b),
- powtórzeniu tej czynności dla promiennika punkowego (wynik na rys. 3c),
- oszacowaniu różnic oraz błędu średniokwadratowego i histogramów otrzymanych wyników w stosunku do referencyjnej macierzy współczynników  $g_{ij}$  korekcji wzmocnienia mikrobolometrów.

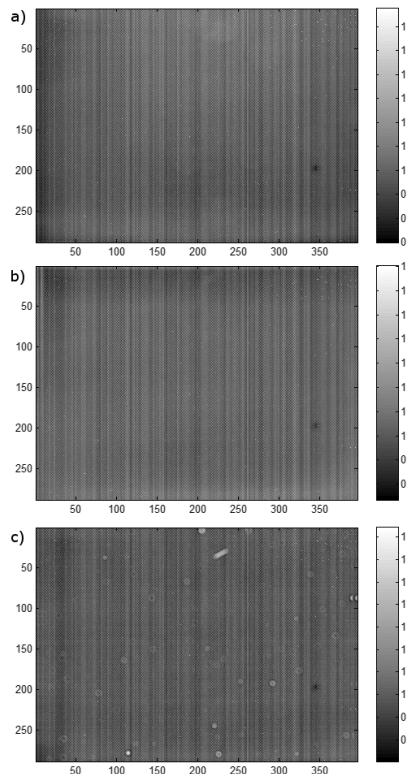


Rys. 2. Sposób umieszczenia pierścieniowego promiennika podczerwieni (badania przeprowadzono bez układu optycznego) [6]

Fig. 2. The location of ring infrared emitter (the experiment was carried out without the lens) [6]

Otrzymane wyniki zaprezentowano na rys. 3. Różnice pomiędzy macierzą referencyjną współczynników  $g_{ij}$  korekcji wzmocnienia (rys. 3a) i macierzą uzyskaną przy pomocy promiennika pierścieniowego (rys. 3b) są praktycznie niezauważalne gołym okiem. Inaczej jest w przypadku macierzy wyznaczonej przy użyciu promiennika punkowego (rys. 3c) – w tym przypadku widoczne są niepożądane punktowe artefakty. Ich obecność wynika ze zjawisk optycznych na zewnętrznej powierzchni okna detektora mikrobolometrycznego w punktach, w których przypuszczalnie mogą znajdować się drobinki kurzu lub innych zanieczyszczeń. W tym przypadku duża ich liczba wynika z faktu, iż kamera

użyta do badań miała bardzo często zdejmowany układ optyczny, co sprzyjało osiadaniu mikroskopijnych zanieczyszczeń na zewnętrznej powierzchni okna detektora. W przypadku kamer z niewymiennym (lub niewymienianym od nowości) układem optycznym ten problem praktycznie nie powinien występować.



Rys. 3. Macierze współczynników  $g_{ij}$  korekcji wzmocnienia mikrobolometrów typu VOx wyznaczone przy pomocy: a) dwóch modeli ciał doskonale czarnych (macierz referencyjna), b) pierścieniowego promiennika podczerwieni, c) punktowego promiennika podczerwieni

Fig. 3. Matrices of gain compensation factors ( $g_{ij}$ ) for VOx camera, obtained with a) two blackbody models (reference matrix), b) ring emitter, c) spotlight emitter

Mając na uwadze otrzymane wyniki, stwierdzono iż uaktualnianie macierzy współczynników korekcji wzmocnienia mikrobolometrów przy użyciu metody opisywanej w rozdziale 3 korzystnie jest wykonywać przy użyciu promiennika pierścieniowego zamiast punktowego.

## 5. Oszacowanie błędów

Do ilościowej oceny skuteczności metody opisywanej w rozdziale 3 wykorzystano następujące kryteria:

- pierwiastek kwadratowy błędu średniokwadratowego (ang. *RMSE – Root Mean Square Error*) macierzy wyznaczonych przy pomocy promienników względem macierzy referencyjnej – ogólny wzór (8),
- histogramy wyznaczonych macierzy.

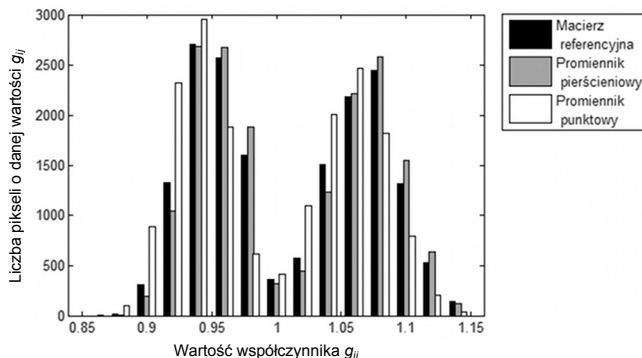
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (g_{ij}^{REF} - g_{ij}^{PROM})^2}{MN}}, \quad (8)$$

gdzie:  $g_{ij}^{REF}$  – wartość na pozycji  $(i,j)$  w macierzy referencyjnej,  $g_{ij}^{PROM}$  – wartość na pozycji  $(i,j)$  w macierzy wyznaczonej przy pomocy promiennika.

Do analizy błędów wykorzystano centralne obszary wyznaczonych macierzy współczynników korekcji – nie brano pod uwagę współczynników na pozycjach, których odległość od krawędzi była niższa niż 100 „pikseli”. Było to celowe ze względu na niedokładność wyznaczenia macierzy  $m$  korygującej nierównomier-

ność oświetlenia matrycy mikrobolometrycznej przez promienniki (na etapie dalszych prac zostanie to poprawione). Dla promiennika pierścieniowego otrzymano wartość *RMSE* wynoszącą 0,0096 natomiast dla promiennika punktowego wartość ta wynosiła 0,0167. W badanym przypadku wyższa wartość *RMSE* dla promiennika punktowego wynikała z obecności punktowych artefaktów w wyznaczonej macierzy współczynników korekcji (rys. 3c).

W celu ilustracji różnic wynikających z typu zastosowanego promiennika przedstawiono histogramy (rys. 4) wyznaczonych macierzy współczynników korekcji. Wyniki uzyskane przy pomocy promiennika punktowego wykazują większe odchylenia od referencyjnych, niż w przypadku promiennika pierścieniowego.



Rys. 4. Histogramy wyznaczonych macierzy współczynników korekcji wzmocnienia (dla matrycy mikrobolometrów typu VOx)

Fig. 4. Histograms of the calculated matrices of the gain compensation factors for VOx

## 6. Wnioski

Przeprowadzone badania wskazują, iż uaktualnianie macierzy współczynników korekcji wzmocnienia matrycy mikrobolometrycznej przy użyciu metody opisywanej w rozdziale 3 przy użyciu dużego promiennika pierścieniowego (o średnicy porównywalnej ze średnicą okna w obudowie matrycy mikrobolometrycznej) pozwala uzyskać efekty satysfakcjonujące z punktu widzenia metrologicznego. W przypadku promiennika o małych rozmiarach względem wymiarów matrycy mikrobolometrycznej (punktowego) w wyznaczonej macierzy współczynników mogą występować artefakty utrudniające wykorzystanie tej macierzy do korekcji niejednorodności.

*Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.*

## 7. Literatura

- [1] Więcek B.: Wybrane zagadnienia współczesnej termowizji w podczerwieni. Politechnika Łódzka, 2009.
- [2] Orzanowski T., Madura H., Powiada E., Pasierbiński J.: Analiza układu odczytu do matrycy detektorów mikrobolometrycznych. *Pomiary Automatyka Kontrola*, (9):16–20, 2006.
- [3] Orzanowski T., Sosnowski T.: Implementacja algorytmów korekcji niejednorodności matrycy detektorów mikrobolometrycznych w układzie FPGA. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 11 :8–11, 2006.
- [4] Więcek B., Olbrycht R., Kastek M., Orzanowski T., Sosnowski T.: Sposób korekcji niejednorodności wzmocnienia matrycy mikrobolometrycznych, zgłoszenie patentowe nr P-387173 z dnia 02.02.2009.
- [5] Olbrycht R., Więcek B., Świączak T.: Shutterless method for gain nonuniformity correction of microbolometer detectors. *Przegląd Elektrotechniczny*, 86(11a):120–122, 2010.
- [6] Kuliński M., Ostrowski B., Więcek B.: Mikrobolometryczna kamera termowizyjna o rozdzielczości 384x288. VII Konferencja Krajowa Termografia i Termometria w Pod-czerwieni TTP2006, 2006.