



Ocena skuteczności kalibracyjnych metod korekcji niejednorodności w zastosowaniu do matrycy detektorów mikrobolometrycznych

TOMASZ ORŻANOWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, torzanowski@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań metod korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy detektorów podczerwieni (IR), w których współczynniki korekcyjne wyznacza się na podstawie odpowiedzi matrycy na jednorodne promieniowanie IR ciała czarnego. Badania prowadzone były przy użyciu matrycy mikrobolometrycznej wykonanej w technologii krzemu amorficznego oraz systemu i cyfrowego przetwarzania sygnału z matrycy, zaprojektowanego w układzie programowalnym FPGA. Jako źródeł promieniowania IR użyto powierzchniowych ciał czarnych wykonanych w Instytucie Optoelektroniki WAT. Testowane były algorytmy korekcji niejednorodności z liniową oraz nieliniową aproksymacją charakterystyk detektorów IR w matrycy. Przedstawiono również modyfikację algorytmu korekcji dwupunktowej, w którym do kompensacji niejednorodności odpowiedzi detektorów bolometrycznych użyto zewnętrznej przesłony na obiektach.

Słowa kluczowe: korekcja niejednorodności, mikrobolometr, matryca detektorów IR

1. Wprowadzenie

Bolometry rezystancyjne są detektorami IR i należą do grupy detektorów termicznych. Ponieważ nie wymagają chłodzenia kriogenicznego, nazywane są również detektorami niechłodzonymi (*uncooled detectors*) [1]. Między innymi z tego powodu są często stosowane w niedrogich kamerach termowizyjnych i systemach zobrazowania w podczerwieni. Działanie bolometru polega na przemianie energii padającego promieniowania IR w ciepło za pomocą cienkiej (8 nm) warstwy absorbera (TiN) naniesionej na termoczuły mikromostek (*a*-Si:H) nazywany termometrem [2]. Wydzielone ciepło w termometrze powoduje zmianę jego rezystancji,

która jest następnie zamieniana na użyteczny sygnał wyjściowy w układzie odczytu ROIC, (*readout integrated circuit*) [3]. Podstawowym wymaganiem technologicznym dla projektowanego mikrobolometru jest zapewnienie jak największej izolacji (rezystancji) termicznej mikromostka, w celu uzyskania jak największej czułości detektora na promieniowanie IR. Ponieważ pojemność termiczna mikrobolometru jest bardzo mała, to termiczna stała czasowa określająca szybkość działania detektora wynosi od 4 do 7 ms dla mikrobolometrów *a-Si* [3].

Miniaturowe bolometry (mikrobolometry) rozmieszczone w postaci tablicy prostokątnej, zintegrowanej z elektronicznym układem odczytu ROIC tworzą matrycę mikrobolometryczną IRFPA (*infrared focal plane array*), którą umieszcza się w specjalnej obudowie próżniowej z oknem germanowym. Najczęściej stosowanymi materiałami do produkcji mikrobolometrów są krzem amorficzny domieszkowany wodorem (*a-Si:H*) oraz mieszanina tlenków wanadu (VO_x). Matryce mikrobolometryczne wytwarzane w technologii krzemu amorficznego charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami, ponieważ ich proces technologiczny jest dobrze opanowany i zgodny z standardowym procesem CMOS, w którym jest wytwarzany krzemowy układ odczytu ROIC. W przypadku mikrobolometrów VO_x proces technologiczny jest nieco bardziej złożony, a detektory mają strukturę dwupoziomową z uwagi na trudności w osadzaniu mikromostka z tlenku wanadu na podłożu krzemowym. Oferowane obecnie matryce mikrobolometryczne z detektorami *a-Si* mają rozdzielczość XGA 1024×768 pikseli przy rozmiarze detektora (*pixel-pitch*) równym $17 \mu\text{m}$ i osiągają rozdzielczość temperaturową NETD (*noise equivalent temperature difference*) równą 40 mK dla układu optycznego $F/1$, częstotliwości ramki 30 Hz i temperatury tła 300 K [4].

Chociaż technologie wytwarzania bolometrów rezystancyjnych są ciągle rozwijane i udoskonalane, to każda matryca IRFPA charakteryzuje się pewną niejednorodnością odpowiedzi (*response nonuniformity*) poszczególnych detektorów IR na padające promieniowanie podczerwone. Efektem niejednorodności jest występowanie szumu FPN (*fixed pattern noise*) w obrazie termicznym generowanym przez matrycę i w rezultacie pogorszenie rozdzielczości NETD kamery termowizyjnej. Głównym źródłem szumu FPN jest rozrzut charakterystyk detektorów IR w matrycy powodowany: rozrzutem technologicznym parametrów detektorów, właściwościami układu ROIC oraz parametrami zastosowanego obiektywu. W przypadku detektorów niechłodzonych, pasożytnicze promieniowanie IR od otoczenia detektora (obudowy kamery) ma również istotny wpływ na wartość niejednorodności odpowiedzi matrycy.

W celu usunięcia szumu FPN z obrazu generowanego przez matrycę IRFPA stosuje się różne metody korekcji niejednorodności NUC (*non-uniformity correction*), które polegają na odpowiednim przetwarzaniu sygnału wyjściowego z matrycy. W dalszej części artykułu przedstawione są metody korekcji NUC, w których do wyznaczenia współczynników korekcyjnych używa się źródeł promieniowania IR,

tw. ciał czarnych. W rozdziale 3 jest opisana implementacja sprzętowa systemu cyfrowego do odczytu i przetwarzania sygnału z matrycy mikrobolometrycznej w układzie programowalnym. Wyniki badań skuteczności metod korekcji NUC są przedstawione w rozdziale 4, a wnioski końcowe i podsumowanie są zawarte w rozdziale 5.

2. Kalibracyjne metody korekcji NUC

Podstawowymi metodami korekcji NUC stosowanymi w kamerach termowizyjnych są korekcja jednopunktowa OPC (*one-point correction*) oraz korekcja dwupunktowa TPC (*two-point correction*). Obie metody zakładają liniowy model odpowiedzi detektorów IR w matrycy na padające promieniowanie podczerwone [5]. Metoda TPC pozwala kompensować wpływ rozrzutu nachyleń i przesunięć charakterystyk poszczególnych detektorów w matrycy. Algorytm korekcji TPC jest opisany wyrażeniem

$$Y_{ij}^*(\varphi) = G_{ij} Y_{ij}(\varphi) + O_{ij}, \quad (1)$$

gdzie G_{ij} jest współczynnikiem korekcji nachylenia, a O_{ij} współczynnikiem korekcji przesunięcia charakterystyki detektora ij w matrycy, $Y_{ij}(\varphi)$ jest rzeczywistą odpowiedzią detektora na padający strumień φ promieniowania IR, a $Y_{ij}^*(\varphi)$ jest odpowiedzią detektora po korekcji NUC. Współczynniki korekcji nachylenia (G_{ij}) i przesunięcia charakterystyki (O_{ij}) są wyznaczone według wzorów:

$$G_{ij} = \frac{\bar{R}}{R_{ij}} = \frac{\bar{Y}(\varphi_2) - \bar{Y}(\varphi_1)}{Y_{ij}(\varphi_2) - Y_{ij}(\varphi_1)}, \quad (2)$$

$$O_{ij} = \bar{Y}(\varphi_1) - G_{ij} Y_{ij}(\varphi_1), \quad (3)$$

gdzie $Y_{ij}(\varphi_1)$ i $Y_{ij}(\varphi_2)$ są odpowiedziami detektora ij na jednorodny strumień φ promieniowania IR kolejno od ciała czarnego o temperaturze T_1 i T_2 , przy czym $T_2 > T_1$, a $\bar{Y}(\varphi)$ stanowi wartość średnią odpowiedzi wszystkich aktywnych detektorów w matrycy na jednorodny strumień φ promieniowania IR ciała czarnego. W celu zmniejszenia wpływu szumu losowego, wartości współczynników korekcji NUC oblicza się na podstawie uśrednionych odpowiedzi matrycy IRFPA z co najmniej 100 kolejnych ramek obrazowych. Jeśli przyjmiemy, że współczynnik korekcji nachylenia charakterystyki (G_{ij}) jest równy jeden we wzorze (1), to otrzymujemy równanie opisujące algorytm OPC, w którym kompensowany jest tylko rozrzut przesunięć charakterystyk detektorów IR w matrycy. Ponadto ze wzoru (2) wynika, że współczynnik korekcji nachylenia G_{ij} odpowiada stosunkowi średniej wartości czułości detektorów IR w matrycy do czułości R_{ij} detektora ij .

Ponieważ charakterystyki mikrobolometrów są nieliniowe, to skuteczność korekcji dwupunktowej TPC pogarsza się poza punktami kalibracji (φ_1, φ_2). Stąd dla szerokich zakresów dynamicznych obserwowanej scenerii stosuje się korekcję wielopunktową z aproksymacją linią łamaną charakterystyk detektorów IR w macierzy. Wadą tej metody jest wzrost liczby tablic współczynników korekcyjnych przy dużej liczbie odcinków aproksymujących charakterystyki detektorów. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie aproksymacji charakterystyk wielomianami n -tego stopnia. W publikacji [6] autorzy przedstawili algorytm korekcji NUC, w którym odchyłka odpowiedzi $\Delta Y_{ij}(\varphi)$ detektora ij od wartości średniej $\bar{Y}(\varphi)$ odpowiedzi detektorów w macierzy dla takiego samego strumienia φ promieniowania IR jest aproksymowana wielomianem n -tego stopnia zmiennej $Y(\varphi)$

$$\Delta Y_{ij}(\varphi) = Y_{ij}(\varphi) - \bar{Y}(\varphi) = \sum_{n=0}^N a_{n,ij} \bar{Y}^n(\varphi). \quad (4)$$

Współczynniki $a_{0,ij}, a_{1,ij}, \dots, a_{n,ij}$ wielomianu są wyznaczone dla poszczególnych detektorów w macierzy metodą najmniejszych kwadratów. Pewną wadą tej metody korekcji NUC jest duża złożoność końcowej formuły obliczeniowej dla wielomianów wyższego rzędu. Na przykład dla aproksymacji wielomianem 2. stopnia formuła określająca wartość odpowiedzi detektora po korekcji wyraża się wzorem [6]

$$Y_{ij}^*(\varphi) = -\frac{1 + a_{1,ij}}{2a_{2,ij}} + \sqrt{\frac{(1 + a_{1,ij})^2}{4a_{2,ij}^2} + \frac{Y_{ij}(\varphi) - a_{0,ij}}{a_{2,ij}}}. \quad (5)$$

W publikacji [7] autorzy zaproponowali pewną modyfikację algorytmu Shulza i Caldwell'a polegającą na zamianie zmiennej $Y(\varphi)$ w wielomianie (4) zmienną $Y_{ij}(\varphi)$ stanowiącą rzeczywistą odpowiedź detektora na promieniowanie IR. W rezultacie formuła obliczeniowa dla korekcji NUC jest prostsza i łatwiejsza do implementacji w sprzęcie nawet przy aproksymacji wielomianami wyższego rzędu. Formuła opisująca odpowiedź detektora po korekcji według algorytmu Wanga i in. ma następującą postać

$$Y_{ij}^*(\varphi) = Y_{ij}(\varphi) - \sum_{n=0}^N a_{n,ij} Y_{ij}^n(\varphi). \quad (6)$$

Współczynniki korekcji NUC są ważne, gdy temperatura macierzy IRFPA oraz temperatura otoczenia (tła) nie zmieniają się, w przeciwnym razie jest wymagana ponowna kalibracja kamery termowizyjnej. W celu uzyskania wysokich parametrów, temperaturę macierzy mikrobolometrycznej stabilizuje się za pomocą chłodziarki termoelektrycznej (TEC) zintegrowanej z macierzą. Typowa wartość temperatury macierzy wynosi 30°C i musi być stabilizowana z dokładnością co najmniej 10 mK. Pomimo spełnienia powyższego kryterium, kamera termowizyjna z macierzą mikrobolometryczną wymaga wykonania co pewien czas (5-20 minut) dodatkowej kalibracji w celu kompensacji wpływu pasożytniczego promieniowania

IR pochodzącego od obudowy kamery oraz wprowadzenia poprawek ze względu na dryf przesunięć (*offsets*) charakterystyk mikrobolometrów.

W publikacji [8] zaproponowano modyfikację standardowej metody korekcji TPC, która polega na użyciu do korekcji niejednorodności wprost odpowiedzi matrycy IRFPA wyznaczonej przy zamkniętej, zewnętrznej przesłonie obiektywu. Zmodyfikowany algorytm MTPC jest opisany wyrażeniem

$$Y_{ij}^*(\varphi) = G_{ij} \left[Y_{ij}(\varphi_o, e_c) - Q_{ij}(\varphi_s, \varphi_c) \right] + \overline{Q}(\varphi_s, \varphi_c), \quad (7)$$

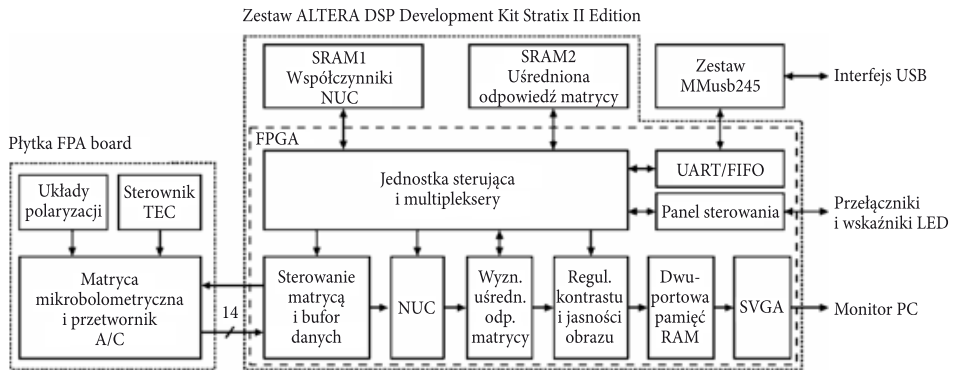
gdzie $Y_{ij}(\varphi_o, \varphi_c)$ jest odpowiedzią detektora ij na promieniowanie podczerwone pochodzące od obserwowanej scenarii (φ_o) oraz od obudowy kamery (φ_c), $Q_{ij}(\varphi_s, \varphi_c)$ jest odpowiedzią detektora na promieniowanie IR pochodzące od zewnętrznej przesłony (φ_s) i obudowy kamery (φ_c), $\overline{Q}(\varphi_s, \varphi_c)$ jest średnią wartością odpowiedzi detektorów w matrycy IRFPA dla zamkniętej przesłony obiektywu. Współczynniki korekcji nachylenia charakterystyk detektorów G_{ij} są wyznaczone w taki sam sposób, jak w metodzie TPC.

3. Opis układu pomiarowego

Opisane powyżej kalibracyjne metody korekcji NUC były testowane z matrycą mikrobolometryczną UL03081 firmy ULIS (Francja) o rozdzielczości 384×288 pikseli i rozmiarze pojedynczego detektora $35 \mu\text{m}$. Matryce mikrobolometryczne ULIS, wytwarzane w technologii krzemu amorficznego $a\text{-Si:H}$, z detektorami o rozmiarze $35 \mu\text{m}$, charakteryzują się czułością $7,2 \text{ mV/K}$ ($\sigma = 1,1\%$), termiczną stałą czasową mniejszą niż 7 ms oraz rozdzielczością temperaturową NETD równą 43 mK dla układu optycznego $F/1$, częstotliwości ramki 50 Hz i temperatury IRFPA 303 K [9].

W układzie odczytu matrycy UL03081 zastosowano obiektyw *Umicore Gasir Standard Lens* o ogniskowej 60 mm , aperturze optycznej $F/1.1$, kącie pola widzenia $18,5^\circ$ i transmisji 92% dla zakresu długofalowego podczerwieni (LWIR) $8\text{--}14 \mu\text{m}$. Matryca mikrobolometryczna pracowała w trybie 384×288 pikseli z częstotliwością ramki 53 Hz . Czas całkowania sygnału z mikrobolometrów wynosił $61,18 \mu\text{s}$, a częstotliwość odczytu sygnału z matrycy była równa $6,67 \text{ MHz}$ (okres piksela 150 ns). Temperatura matrycy IRFPA była stabilizowana za pomocą wewnętrznej chłodziarki TEC i wynosiła 30°C .

Na rysunku 1 pokazano uproszczony schemat blokowy układu odczytu do matrycy mikrobolometrycznej UL03081 zaprojektowany przez autora. Poszczególne moduły systemu cyfrowego przetwarzania sygnału z matrycy, rejestracji danych i wyświetlania obrazu na monitorze PC zostały wykonane przy użyciu zestawu laboratoryjnego *Altera DSP Development Kit Stratix II Edition* [10].



Rys. 1. Schemat blokowy układu odczytu matrycy mikrobolometrycznej

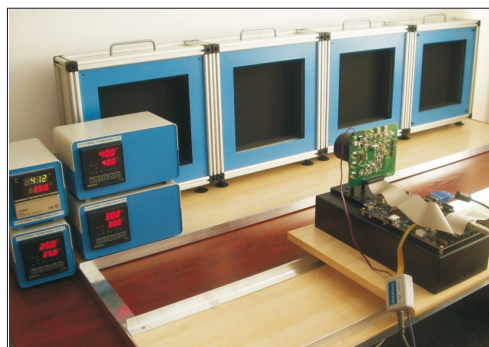
Niskoszumne układy zasilania i polaryzacji matrycy IRFPA, 14-bitowy przetwornik A/C typu ADS850Y (*Burr-Brown*) oraz sterownik chłodziarki TEC typu ADN8831 (*Analog Devices*) wraz z innymi elementami są umieszczone na oddzielnej płycie drukowanej *FPAboard* zaprojektowanej przez autora.

Wymagane sygnały sterujące (zegarowe) dla układu ROIC w matrycy oraz dla przetwornika A/C są wytwarzane przez moduł sterowania matrycą IRFPA zaprojektowany w układzie FPGA. Współczynniki korekcji NUC są przechowywane w pamięci SRAM1, a uśredniona odpowiedź matrycy mikrobolometrycznej, wyznaczona dla zamkniętej przesłony obiektywu jest zapisywana do pamięci SRAM2. Korekcja niejednorodność odpowiedzi detektorów w matrycy jest wykonywana w czasie rzeczywistym, ponieważ czas przetwarzania danych obrazowych w module NUC jest krótszy niż okres odczytu (150 ns) pojedynczego piksela w matrycy. Zaprojektowano również specjalny moduł do wyznaczania uśrednionej odpowiedzi matrycy IRFPA przed i po korekcji NUC na podstawie 128 kolejnych ramek obrazowych. Wynik uśredniania jest przechowywany w pamięci SRAM2. Obraz generowany przez matrycę mikrobolometryczną jest wyświetlany na monitorze PC za pomocą sterownika SVGA z funkcją dwukrotnego powiększenia obrazu oraz dwuportowej pamięci RAM zaimplementowanych w układzie programowalnym FPGA. Interfejs sterowania i akwizycji danych obrazowych z matrycy IRFPA jest wykonany przy użyciu zestawu laboratoryjnego MMusb245 z układem komunikacji USB FT245BM (*FTDI*), który umożliwia przesyłanie danych z prędkością 1 MB/s.

Do sterowania trybami pracy układu odczytu matrycy, rejestracji i analizy danych obrazowych służy specjalnie opracowany program komputerowy *IRFPA Test*.

4. Wyniki badań

Badania matrycy mikrobolometrycznej z opracowanym do niej układem odczytu były prowadzone na stanowisku laboratoryjnym pokazanym na rysunku 2. Koncepcja i projekt stanowiska zostały opracowane przez autora. Stanowisko zawierało cztery powierzchniowe ciała czarne BB-10F wykonane w Instytucie Optoelektroniki WAT. Powierzchnia promieniująca ciała wynosi $250 \times 250 \text{ mm}^2$, a zakres regulacji temperatury jest od temperatur otoczenia do 120°C (tylko funkcja grzania). Współczynnik emisyjności ciała wynosi 0,98, a niejednorodność temperatury powierzchni zmierzona radiacyjnie nie przekracza 70 mK.

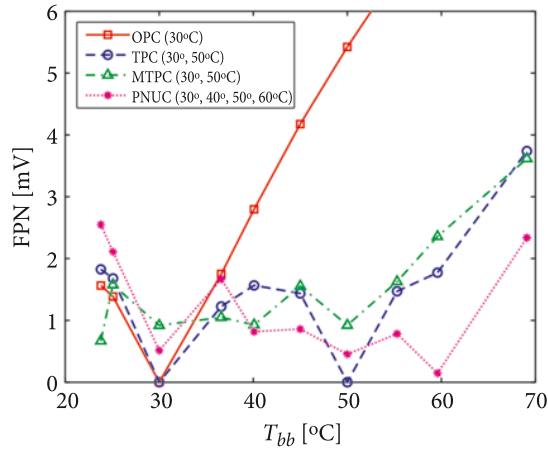


Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne do badania metod korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej

Matryca mikrobolometryczna z obiektywem była przesuwana przed frontem ciał czarnych, a jej odpowiedzi na padające promieniowanie IR były rejestrowane za pomocą zaprojektowanego układu odczytu i przesyłane do komputera w celu określenia wartości niejednorodności i innych parametrów, np. czułości detektora w mV/K.

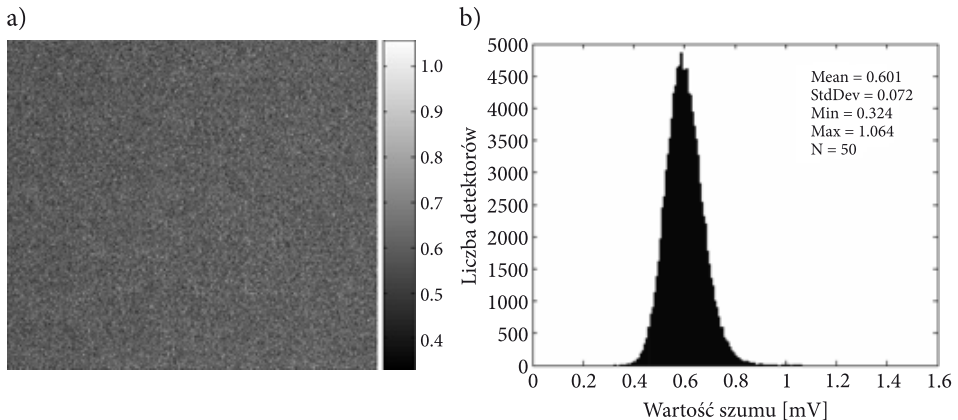
Niejednorodność odpowiedzi mikrobolometrów w matrycy była badana dla zakresu temperatury ciała czarnego od 23°C (temperatura otoczenia) do 70°C . Wartość szumu FPN po korekcji dla opisanych wyżej algorytmów NUC jest przedstawiona na rysunku 3. Szum FPN był określany jako odchylenie standardowe (rozrzut) odpowiedzi detektorów w matrycy na jednorodne promieniowanie IR ciała czarnego o temperaturze T_{bb} . Wartość szumu FPN bez korekcji wynosiła 300 mV przy wzmacnieniu 1,43 w torze analogowym układu odczytu matrycy.

Dla standardowej metody korekcji dwupunktowej TPC i zmodyfikowanej MTPC punktami kalibracji były odpowiednio temperatury 30°C i 50°C . W przypadku korekcji MTPC, zewnętrzna przesłona na obiektyw była używana w odstępach 20-minutowych. Współczynniki wielomianu korekcyjnego 2. stopnia dla metody korekcji nieliniowej PNUC (*polynomial NUC*) określono na podstawie odpowiedzi



Rys. 3. Wartość szumu FPN po korekcji dla badanych algorytmów NUC

matrycy detektorów na promieniowanie IR ciał czarnych o temperaturze: 30°C, 40°C, 50°C i 60°C. Szum losowy (rms) detektorów IR w matrycy wyniósł 601 μ V dla próby $N = 50$ ramek i temperatury tła 303 K (rys. 4b). To dało średnią wartość rozdzielczości temperaturowej NETD całego systemu termowizyjnego równą 128 mK przy czułości matrycy 4,69 mV/K określonej dla zakresu (25°C, 40°C) z obiektywem F/1.1 i częstotliwością ramki 53 Hz.



Rys. 4. Wartość szumu losowego matrycy mikrobolometrycznej dla temperatury tła 303 K: a) mapa szumu, b) histogram

Przykład obrazu termowizyjnego, zarejestrowany za pomocą matrycy mikrobolometrycznej z opracowanym układem odczytu i zaimplementowanym algorytmem korekcji MTPC pokazany jest na rysunku 5.



Rys. 5. Przykład obrazu termowizyjnego uzyskany z matrycy mikrobolometrycznej za pomocą opracowanego układu odczytu (teren WAT, 03.2009)

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono kalibracyjne metody korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycowych detektorów podczerwieni oraz ich implementacje w układzie odczytu dla niechłodzonego detektora mikrobolometrycznego. Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie prostej korekcji przesunięć charakterystyk mikrobolometrów w matrycy, tzw. korekcji jednopunktowej, jest wystarczające dla wąskich zakresów dynamicznych temperatury obserwowanej scenarii, tj. poniżej 10°C . Dla szerszych zakresów należy wprowadzić dodatkowo korekcję nachyleń charakterystyk detektorów IR w matrycy. Ze względu na nieliniowość charakterystyk mikrobolometrów, skuteczność metody korekcji dwupunktowej pogarsza się poza punktami kalibracji. Stąd odstęp między punktami kalibracji nie przekracza zwykle 20°C . Dla bardzo szerokich zakresów dynamicznych, powyżej 40°C , stosuje się korekcję nieliniową, na przykład z aproksymacją charakterystyk detektorów wielomianami 2. lub wyższego stopnia. Zgodnie z zaproponowaną modyfikacją algorytmu TPC, uśredniona odpowiedź matrycy mikrobolometrycznej zarejestrowana przy zamkniętej przesłonie na obiektyw może być skutecznie użyta do kompensacji szumu FPN powodowanego zmianą temperatury obudowy kamery.

Praca finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007-2009 w ramach projektu badawczego nr O N515 0063 33.

Artykuł wpłynął do redakcji 1.12.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2011 r.

LITERATURA

- [1] A. ROGALSKI, *Infrared detectors: status and trends*, Prog. Quantum Electron., 27, 2003, 59-210.
- [2] C. MENDEL, J. L. MARTIN, J. L. OUVRIER-BUFFET, J. L. TISSOT, M. VILAIN, J. J. YON, *Amorphous silicon based uncooled microbolometer IRFPA*, Proc. SPIE 3698, 1999, 276-283.

- [3] J. L. TISSOT, C. TROUILLEAU, B. FIÈQUE, A. CRASTES, O. LEGRAS, *Uncooled microbolometer detector: recent developments at ULIS*, Opto-Electron. Rev., 14, 2006, 25-32.
- [4] C. TROUILLEAU, B. FIÈQUE, S. NOBLET, F. GINER, D. POHCIC, A. DURAND, P. ROBERT, S. CORTIAL, M. VILAIN, J. L. TISSOT, J. J. YON, *High-performance uncooled amorphous silicon TEC less XGA IRFPA with 17 μm pixel-pitch*, Proc. SPIE 7298, 2009, 1-6.
- [5] D. L. PERRY, E. L. DERENIAK, *Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors*, Opt. Eng., 32, 1993, 1854-1859.
- [6] M. SHULZ, L. CALDWELL, *Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays*, Infrared Phys. Techn., 36, 1995, 763-777.
- [7] R. WANG, P. CHEN, P. TSIEN, *An improved nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays which is easy to implement*, Infrared Phys. Techn., 39, 1998, 15-21.
- [8] T. ORŻANOWSKI, H. MADURA, *Test and evaluation of reference-based nonuniformity correction methods for microbolometer infrared detectors*, Opto-Electron. Rev., 18, 1, 2010, 91-94.
- [9] C. TROUILLEAU, A. CRASTES, O. LEGRAS, J. L. TISSOT, J. P. CHATARD, *35 μm pitch at ULIS, a breakthrough*, Proc. SPIE 5783, 2005, 578-585.
- [10] ALTERA CORPORATION, *Stratix II EP2S60 DSP development board*, DS-S29804-1, 2005, 1-56.

T. ORŻANOWSKI

**Assessment of efficiency of reference-based nonuniformity correction methods
for microbolometer infrared focal plane array**

Abstract. In this paper, the nonuniformity correction (NUC) methods for an uncooled infrared focal plane array (IRFPA) that use the detectors response on a uniform radiance of infrared reference to calculate the suitable NUC coefficients are evaluated. Tests were carried on an amorphous silicon microbolometer IRFPA by using a digital system implemented on a field-programmable gate array (FPGA) device to readout the IRFPA output. As the infrared references, extended surface blackbodies developed at the Institute of Optoelectronics, MUT were applied to tests. The NUC algorithms with linear and nonlinear approximations of the IR detector characteristics were examined. Moreover, the modified two-point nonuniformity correction method which uses an external shutter of the lens to compensate an influence of a camera housing temperature change on the microbolometers response is also presented.

Keywords: nonuniformity correction, microbolometer, IRFPA