

**Tomasz ORŻANOWSKI, Tomasz SOSNOWSKI**  
WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI,  
ZAKŁAD TECHNIKI PODCZERWIENI I TERMOWIZJI

## Implementacja algorytmów korekcji niejednorodności matryc detektorów mikrobolometrycznych w układzie FPGA

Dr inż. Tomasz ORŻANOWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 2004 roku w dyscyplinie naukowej elektronika, specjalność systemy cyfrowe. Zainteresowania naukowe: projektowanie układów cyfrowych w strukturach programowalnych FPGA z użyciem języka VHDL, cyfrowe pętle fazowe DLL. Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Optoelektroniki WAT.



e-mail: torzanowski@wat.edu.pl

Dr inż. Tomasz SOSNOWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1996 roku jest pracownikiem Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2003. Zajmuje się problematyką związaną z projektowaniem i programowaniem systemów mikroprocesorowych, cyfrową analizą sygnału, analizą obrazu termograficznego, a także zastosowaniem układów mikroprocesorowych w technice podczerwieni i analizie sygnałów wibroakustycznych. Autor i współautor ponad 20 publikacji.



e-mail: tsosnowski@wat.edu.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono realizację sprzętową algorytmów korekcji niejednorodności odpowiedzi detektorów w matrycach mikrobolometrycznych. Opisano dwie podstawowe metody kalibracyjne: jednopunktową (OPC) i dwupunktową (TPC). Na podstawie danych pomiarowych matrycy mikrobolometrycznej firmy ULIS wyznaczono współczynniki korekcyjne oraz odpowiedź matrycy zawierającą stały wzorzec szumu (FPN). Do wykonania sprzętowej korekcji niejednorodności użyto zestawu uruchomieniowego DSP Development Kit Stratix II Edition (Altera). W wyniku implementacji algorytmu TPC uzyskano maksymalną wartość niejednorodności resztkowej (RNU) 0,15 % w zakresie temperatury od 273 K do 343 K. W przypadku korekcji jednopunktowej maksymalna wartość RNU była ponad 3 razy większa dla tego samego zakresu temperatury.

**Słowa kluczowe:** mikrobolometr, korekcja niejednorodności, FPGA

### Implementation of nonuniformity correction algorithms of microbolometer focal plane arrays in FPGA device

#### Abstract

In this paper the hardware implementation of response nonuniformity correction (NUC) algorithms of microbolometer focal plane arrays (FPAs) is presented. Two basic calibration methods: one-point correction (OPC) and two-point correction (TPC) are described. The NUC coefficients and FPA response containing fixed pattern noise have been evaluated on the basis of measurement data of the ULIS microbolometer FPA. The DSP Development Kit Stratix II Edition (Altera) has been used to perform the hardware NUC. As a result of TPC algorithm implementation, we have obtained the residual nonuniformity (RNU) of 0.15 % (max.) in temperature range from 273 K to 343 K. In case of OPC implementation the RNU maximum value was over three times higher at the same temperature range.

**Keywords:** microbolometer, nonuniformity correction

## 1. Wprowadzenie

Wskutek rozwoju technologii wytwarzania matryc detektorów mikrobolometrycznych stają się one teraz bardziej dostępne i są stosowane nie tylko w sprzęcie wojskowym, ale również w przeznaczonym do zastosowań cywilnych. Produkowane obecnie matryce mikrobolometryczne mają coraz lepsze parametry i są wielokrotnie tańsze od matryc z chłodzonymi detektorami fotonowymi.

W Europie firma ULIS (Francja) produkuje matryce mikrobolometryczne dla zakresu widmowego 8-12  $\mu\text{m}$ , według technologii monolitycznej opracowanej w laboratorium badawczym CEA/LETI (Francja).

W technologii tej mikrobolometry są wykonywane w postaci mikromostków o wymiarach 35  $\mu\text{m}$   $\times$  35  $\mu\text{m}$  z krzemu amorficznego domieszkowanego wodorem ( $\alpha\text{-Si:H}$ ). Matryce mikrobolometryczne firmy ULIS osiągają rozdzielczość temperaturową NEDT = 40 mK (dla 300 K FPA,  $f\# = 1$ , 60 Hz) i niejednorodność odpowiedzi mniejszą od 25 mK, po korekcji charakterystyk mikrobolometrów w matrycy [1, 2].

Matryce mikrobolometryczne, podobnie jak matryce z detektorami chłodzonymi, charakteryzują się pewną niejednorodnością odpowiedzi (*response nonuniformity*) poszczególnych mikrobolometrów dla takiej samej mocy promieniowania podczerwonego (IR). Efektem niejednorodności jest występowanie w obrazie termicznym generowanym przez matrycę tzw. stałego wzorca szumu FPN (*fixed pattern noise*). Niejednorodność odpowiedzi matrycy na strumień jednorodnego promieniowania IR jest powodowana rozrzutem technologicznym: rezystancji własnej, współczynnika temperaturowego rezystancji (TCR) oraz rezystancji i pojemności termicznej mikrobolometrów w matrycy. Generalnie, zintegrowany z matrycą układ odczytu (ROIC) nie realizuje funkcji korekcji niejednorodności NUC (*nonuniformity correction*). Konieczne jest więc zastosowanie oddzielnych układów, które przetwarzają odpowiednio sygnał wyjściowy generowany z matrycy w celu usunięcia szumu FPN [3].

## 2. Metody korekcji niejednorodności (NUC)

Podstawowymi metodami kalibracyjnymi NUC są: korekcja jednopunktowa OPC (*one-point correction*) i dwupunktowa TPC (*two-point correction*). W metodach tych zakłada się, że odpowiedź  $U_{ij}(\Phi)$  detektora na pozycji  $(i, j)$  w matrycy na strumień  $\Phi$  promieniowania podczerwonego opisana jest równaniem liniowym [4]:

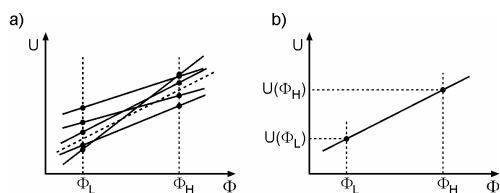
$$U_{ij}(\Phi) = R_{ij}\Phi + O_{ij}, \quad (1)$$

gdzie  $R_{ij}$  jest nachyleniem charakterystyki przejściowej (*gain*) detektora, a  $O_{ij}$  odpowiada stałemu przesunięciu charakterystyki (*offset*).

W metodzie TPC wyznaczane są najpierw odpowiedzi wszystkich detektorów w matrycy na strumień jednorodnego promieniowania podczerwonego, odpowiednio dla niskiej ( $\Phi_L$ ) i wysokiej ( $\Phi_H$ ) temperatury ciała czarnego (rys. 1a). Następnie obliczane są odpowiedzi uśrednione  $U(\Phi_L)$  i  $U(\Phi_H)$  dla całej matrycy według zależności:

$$\mu_u = U(\Phi) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N U_{ij}(\Phi), \quad (2)$$

gdzie  $M$  jest liczbą wierszy, a  $N$  jest liczbą kolumn w matrycy.



Rys. 1. Charakterystyki przejściowe detektorów podczerwieni w macierzy:

a) przed korekcją NUC, b) po korekcji NUC

Fig. 1. Infrared detectors characteristics in a focal plane array:

a) before NUC, b) after NUC

Algorytm TPC wykonywany jest według formuły:

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

gdzie  $G_{ij}$  jest współczynnikiem NUC dla wzmocnienia, a  $Q_{ij}$  jest współczynnikiem korekcji przesunięcia charakterystyki detektora na pozycji  $(i, j)$ . Ponieważ odpowiedzi  $U_{ij}(\Phi)$  poszczególnych detektorów w punktach kalibracji  $\Phi_L$  i  $\Phi_H$  są sprowadzane do wartości  $U(\Phi_L)$  i  $U(\Phi_H)$ , to zgodnie z (3) współczynniki NUC  $G_{ij}$  i  $Q_{ij}$  są określone wyrażeniami:

$$G_{ij} = \frac{U(\Phi_H) - U(\Phi_L)}{U_{ij}(\Phi_H) - U_{ij}(\Phi_L)}, \quad (4)$$

$$Q_{ij} = \frac{U(\Phi_L)U_{ij}(\Phi_H) - U(\Phi_H)U_{ij}(\Phi_L)}{U_{ij}(\Phi_H) - U_{ij}(\Phi_L)}. \quad (5)$$

Algorytm korekcji jednopunktowej OPC jest prostszy i opisany wyrażeniem:

$$U_{ij}^*(\Phi) = U_{ij}(\Phi) + (U_{ij}(\Phi_{cal}) - U(\Phi_{cal})) = U_{ij}(\Phi) + Q_{ij}. \quad (6)$$

Z równania (6) wynika, że w metodzie OPC korygowane są tylko przesunięcia charakterystyk detektorów.

W urządzeniu, takim jak kamera termowizyjna, wartości współczynników NUC, charakterystyczne dla danego egzemplarza macierzy, są wyznaczone w procesie kalibracji. Następnie są zapamiętywane w pamięci nieulotnej i wykorzystywane do korekcji sygnału odczytanego z macierzy.

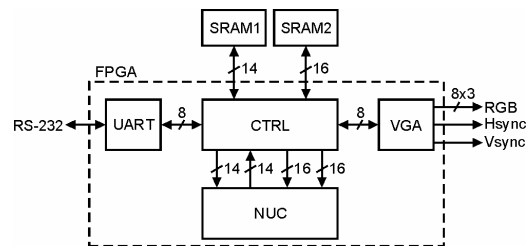
Do oceny stopnia niejednorodności macierzy detektorów podczerwieni oraz oceny skuteczności algorytmów NUC stosuje się różne miary niejednorodności. Najczęściej stosowaną miarą jest odchylenie standardowe  $\delta_u$  odpowiedzi macierzy na strumień jednorodnego promieniowania podczerwonego, odniesione do wartości średniej  $\mu_u$ :

$$RNU = \frac{\delta_u}{\mu_u} = \frac{1}{\mu_u} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (U_{ij}(\Phi) - \mu_u)^2}. \quad (7)$$

Wskaźnik niejednorodności resztkowej  $RNU$  (*residual nonuniformity*) wyrażony jest zwykle w procentach.

### 3. Realizacja sprzętowa algorytmów NUC

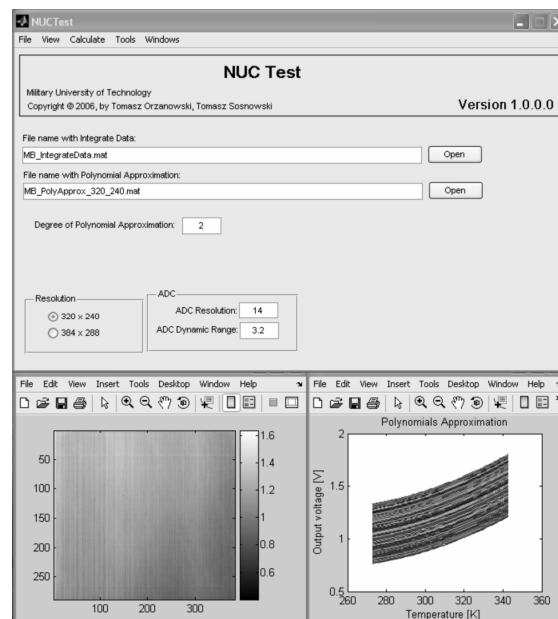
Realizacja sprzętowa algorytmów TPC i OPC została wykonana za pomocą zestawu uruchomieniowego *DSP Development Kit Stratix II Edition* firmy *Altera* (USA). Płytką testową zawiera m. in.: układ programowalny FPGA *Stratix II EP2S60-1020C4* wykonany w technologii CMOS 0,65  $\mu\text{m}$ , dwie pamięci SRAM 512 MB, pamięć SDRAM 32 MB, interfejs komunikacyjny RS-232, interfejs graficzny VGA oraz przetworniki ADC i DAC [5]. W układzie testowym wykorzystano tylko część modułów funkcjonalnych dostępnych w zestawie. Na rys. 2 przedstawiono uproszczony schemat blokowy układu korekcji NUC.

Rys. 2. Schemat blokowy realizacji sprzętowej algorytmów korekcji NUC  
Fig. 2. Hardware implementation block diagram of NUC algorithms

Korekcja NUC polega na odczytaniu z pamięci SRAM1 obrazu (jednej ramki) zawierającego szum FPN, odczytaniu współczynników NUC z pamięci SRAM2 i wykonaniu korekcji niejednorodności odpowiedzi przez moduł NUC. Wynik korekcji zapisywany jest do pamięci SRAM1 w innej przestrzeni adresowej i przesyłany do komputera PC. Moduł *CTRL* steruje odczytem i zapisem danych do pamięci SRAM. Zaprojektowany interfejs VGA umożliwia wyświetlanie obrazu na monitorze komputerowym przed i po wykonaniu korekcji NUC.

Wszystkie bloki funkcjonalne zaimplementowane w układzie FPGA zostały opisane w języku VHDL i skompilowane za pomocą systemu projektowego *Quartus II* (*Altera*).

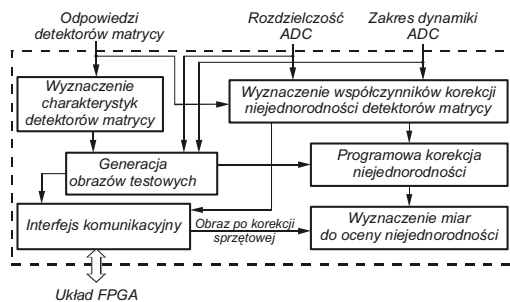
W celu przygotowania danych wejściowych dla układu FPGA i analizy wyników realizacji sprzętowej algorytmów korekcji niejednorodności detektorów macierzy mikrobolometrycznej został opracowany specjalistyczny program *NUC Test*. Program, działający w środowisku *MATLAB*, komunikuje się z układem FPGA za pomocą interfejsu komunikacyjnego (łącze szeregowe RS-232). Widok wybranych okien programu zaprezentowano na rys. 3.

Rys. 3. Widok wybranych okien programu *NUC Test*Fig. 3. The chosen windows of the *NUC Test* program

Podstawowym zadaniem oprogramowania *NUC Test* jest wyznaczenie współczynników korekcji niejednorodności detektorów macierzy mikrobolometrycznej. Współczynniki korekcji są wyznaczone na podstawie zmierzonych odpowiedzi detektorów macierzy dla różnych wartości temperatury oraz dla zadanych parametrów przetwornika analogowo-cyfrowego. Na podstawie odpowiedzi detektorów macierzy są wyznaczone także ich charakterystyki przejściowe dla wybranego zakresu wartości temperatury. Wyznaczenie charakterystyk polega na ich aproksymacji wielomianem wybranego stopnia. W oparciu o charakterystyki przejściowe i parametry przetwornika analogowo-cyfrowego, oprogramowanie

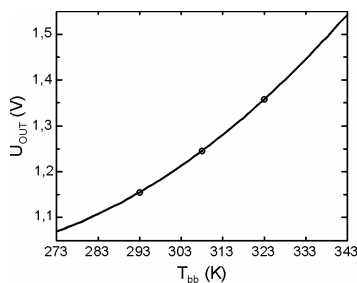
*NUC Test* umożliwia wygenerowanie obrazów testowych. Obrazy testowe oraz wyznaczone współczynniki korekcji niejednorodności detektorów matrycy są przesyłane do układu FPGA za pomocą interfejsu komunikacyjnego. Oprogramowanie umożliwia także odebranie z układu FPGA obrazu po przeprowadzonej sprzętowej korekcji niejednorodności.

Program *NUC Test* umożliwia wyznaczenie miar niejednorodności dla wygenerowanych obrazów po korekcji sprzętowej i programowej. Ponadto, w celu sprawdzenia poprawności wyznaczenia współczynników korekcji niejednorodności detektorów, oprogramowanie może wykonać programową korekcję obrazów testowych. Schemat blokowy oprogramowania *NUC Test* został przedstawiony na rys 4.

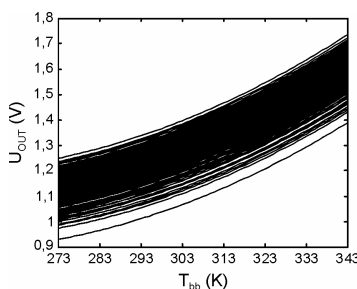


Rys. 4. Schemat blokowy programu *NUC Test*  
Fig. 4. Block diagram of the *NUC Test* program

W badaniach realizacji sprzętowej korekcji TPC i OPC zostały wykorzystane, otrzymane z firmy ULIS, rzeczywiste dane pomiarowe, tj. odpowiedzi detektorów matrycy mikrobolometrycznej o wymiarach  $384 \times 288$  pikseli dla 293 K, 308 K i 323 K. Za pomocą programu *NUC Test* i wymienionych wyżej danych pomiarowych określono charakterystyki przejściowe i wyznaczono współczynniki NUC dla korekcji TPC i OPC. Na podstawie obliczonych danych wygenerowano odpowiedzi matrycy zawierające szum FPN. Okazało się, że z wystarczająco dobrym przybliżeniem (rys. 5) można aproksymować charakterystyki detektorów wielomianem 2-go stopnia dla zakresu temperatury od 273 K do 343 K. Na rys. 6 pokazane są charakterystyki detektorów z wiersza 68. matrycy.



Rys. 5. Charakterystyka wypadkowa dla całej matrycy mikrobolometrycznej  
Fig. 5. Averaging characteristic for whole microbolometer focal plane array

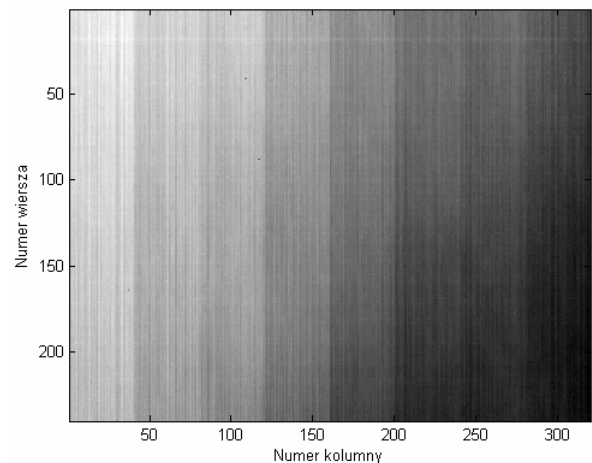


Rys. 6. Charakterystyki mikrobolometrów z wiersza 68  
Fig. 6. Characteristics of microbolometers in row 68

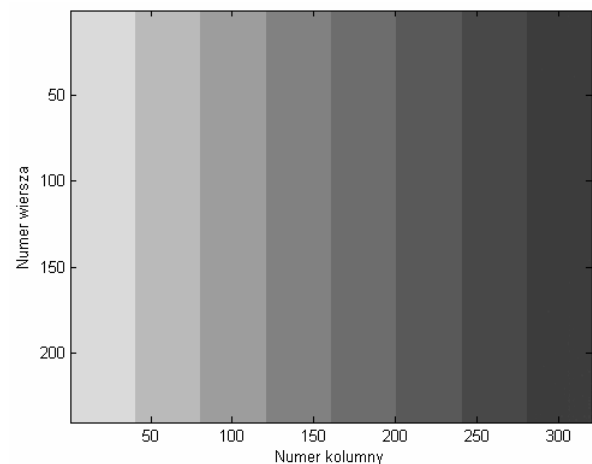
Niejednorodność odpowiedzi matrycy dla temperatury ciała czarnego  $T_{bb} = 308$  K wynosiła 8,1 % (bez korekcji NUC).

#### 4. Wyniki badań

W czasie przeprowadzonych badań sprzętowej korekcji niejednorodności detektorów matrycy mikrobolometrycznej, do układu FPGA przesłano obraz testowy dla 8 wartości temperatury z zakresu od 273 K do 343 K. Powyższy obraz testowy został przedstawiony na rys 7. Następnie do układu FPGA przesłano kolejno wyznaczone za pomocą programu *NUC Test* współczynniki korekcji TPC dla kalibracji przy 293 K i 323 K oraz dla kalibracji przy 293 K i 308 K, a także współczynniki korekcji OPC dla kalibracji przy 308 K. W wyniku działania układu FPGA uzyskano obraz po wykonaniu sprzętowej korekcji niejednorodności. Przykładowy obraz uzyskany po korekcji niejednorodności (korekcji TPC z kalibracją przy 293 K i 323 K) został przedstawiony na rys. 8.

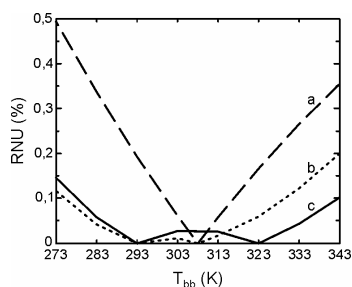


Rys. 7. Odpowiedź matrycy dla 8 wartości temperatury od 273 K do 343 K bez korekcji NUC  
Fig. 7. Focal plane array response to 8 temperature values from 273 K to 343 K without NUC



Rys. 8. Odpowiedź matrycy dla 8 wartości temperatury od 273 K do 343 K po korekcji TPC dla kalibracji przy 293 K i 323 K  
Fig. 8. Focal plane array response to 8 temperature values from 273 K to 343 K after TPC with calibration at 293 K and 323 K

Na podstawie obrazów uzyskanych dla różnych metod korekcji wyznaczono wartości niejednorodności resztkowej. Na rys. 9 przedstawiono wartość niejednorodności resztkowej  $RNU$  dla korekcji TPC i OPC w funkcji temperatury ciała czarnego  $T_{bb}$ .



Rys. 9. Wartość niejednorodności resztkowej ( $RNU$ ) w funkcji temperatury ciała czarnego: a) dla korekcji OPC przy 308 K, b) dla korekcji TPC przy 293 K i 308 K, c) dla korekcji TPC przy 293 K i 323 K

Fig. 9. Residual nonuniformity ( $RNU$ ) versus black body temperature: a) for OPC at 308 K, b) for TPC at 293 K and 308 K, c) for TPC at 293 K and 323 K

Z przebiegu charakterystyk  $RNU(T_{bb})$  wynika, że korekcja niejednorodności detektorów matrycy jest najlepsza w pobliżu punktów kalibracji. Najlepszy wynik uzyskano dla korekcji TPC z kalibracją przy 293 K i 323 K. Dla tego przypadku wartość niejednorodności resztkowej  $RNU$  nie przekraczała 0,15 % dla zakresu temperatury od 273 K do 343 K. W przypadku korekcji jednopunktowej wartość  $RNU$  była ponad 3 razy większa dla tego samego zakresu temperatury.

## 5. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że sprzętowa korekcja jest realizowana z dużą szybkością (poniżej 100ns dla jednego detektora) i jednocześnie znacznie zmniejsza zależność obrazu wynikowego (końcowego) od niejednorodności charakterystyk detektorów matrycy mikrobolometrycznej. Tak znaczną wydajność uzyskano dzięki zastosowaniu wbudowanych w układ FPGA multiplikatorów. Ponadto zauważono, że skuteczność kalibracyjnych metod korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy detektorów podczerwieni zależy od określenia punktów

kalibracji. Dla „wąskich” zakresów obserwowanej temperatury korekcja jednopunktowa (OPC) może okazać się wystarczająca. W przypadku szerokiego zakresu temperaturowego, dla korekcji dwupunktowej (TPC) należy odpowiednio „szeroko” wyznaczyć punkty kalibracji. Jeśli nieliniowość charakterystyk detektorów w matrycy jest duża, to należy zastosować korekcję wielopunktową MPC (*multi-point correction*), aby odpowiednio skompensować niejednorodność odpowiedzi matrycy.

Autorzy pragną podziękować Cirille Trouilleau i Arnaud Crastes z firmy ULIS za udostępnienie danych pomiarowych oraz cenne wskazówki dotyczące korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznych.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2008 jako projekt badawczy.

## 6. Literatura

- [1] J. L. Tissot, C. Trouilleau, B. Fieque, A. Crastes, and O. Legras: Uncooled microbolometer detector: recent developments at ULIS, *Opto-Electron. Rev.*, Vol. 14, No. 1, 2006, pp. 25-32.
- [2] C. Trouilleau, A. Crastes, O. Legras, J. L. Tissot, J.P. Chatard: 35  $\mu$ m pitch at ULIS, a breakthrough, *Proc. SPIE Vol. 5783*, 2005, 578-585.
- [3] T. Orżanowski, H. Madura, E. Powiada, J. Pasierbiński: Analiza układu odczytu do matrycy detektorów mikrobolometrycznych, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Nr 9, 2006, 16-20.
- [4] D. L. Perry, E. L. Dereniak: Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors, *Opt. Eng.*, Vol. 32, No. 8, 1993, 1854-1859.
- [5] Data sheet: Stratix II EP2S60 DSP Development Board, Altera Corporation, DS-S29804-1.1, May 2005.

Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

# Zapraszamy do PRENUMERATY czasopisma PAK w 2007 roku

Cena prenumeraty rocznej: 180,00 zł/1 egz.  
Cena prenumeraty półrocznej: 90,00 zł/1 egz.

Prenumeratę i kolportaż prowadzą:

**WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA**  
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 535, 00-050 Warszawa,  
tel./fax: (0-22) 827 25 40, e-mail: pak@data.pl

**Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA**  
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,  
tel./fax: (0-32) 237 19 45, e-mail: pak.redaktor@polsl.pl

Dane o prenumeracie dostępne są na stronie internetowej: [www.pak.home.pl](http://www.pak.home.pl)

Druk zamówienia jest dołączony jako wkładka do czasopisma.

Prenumeratę można rozpocząć w dowolnym momencie.

Koszt wysyłki czasopisma pokrywa Redakcja.