

Tomasz ORŻANOWSKI, Tomasz SOSNOWSKI, Mariusz KASTEK
WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI

Implementacja algorytmu korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej w układzie programowalnym

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: detektory mikrobolometryczne, metody korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycowych detektorów podczerwieni, zastosowanie układów programowalnych w technice podczerwieni. 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 cyfrowych, cyfrową analizą sygnału, analizą obrazu termograficznego, a także zastosowaniem układów programowanych i mikroprocesorowych w technice podczerwieni i analizie sygnałów wibroakustycznych.

e-mail: tsosnowski@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 problematyką detekcji obiektów w systemach czujników podczerwieni stosowanych w systemach ochrony, a także analizą sygnałów oraz algorytmami detekcji implementowanymi w czujnikach podczerwieni. Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Optoelektroniki WAT.

e-mail: mkastek@wat.edu.pl



The proposed NUC algorithm was tested with the ULIS 384×288 microbolometer FPA with 35µm pixel-pitch. During tests the microbolometer FPA response nonuniformity (RNU) after correction was obtained under 0.16% (std dev/mean) at the blackbody temperature range from 20°C to 50°C and the ambient temperature change of ±2.5°C. The RNU value was equaled 8.1% without any correction.

Keywords: micobolometer, nonuniformity correction, FPGA device.

1. Wprowadzenie

Produkowane obecnie matryce mikrobolometryczne mają coraz lepsze parametry, a technologia ich wytwarzania jest stale rozwijana i ulepszana [1, 2]. Ponieważ są one dużo tańsze od chłodzonych matryc z detektorami fotonowymi, to są stosowane w niedrogich kamerach termowizyjnych do zastosowań cywilnych i wojskowych.

Matryce mikrobolometryczne podobnie jak matryce chłodzone charakteryzują się pewną niejednorodnością odpowiedzi (*response nonuniformity*) poszczególnych detektorów na padające promieniowanie podczerwone (IR) o tej samej mocy. W rezultacie w obrazie generowanym przez matrycę występuje stały wzór szumu FPN (*fixed pattern noise*), który pogarsza obraz oraz zmniejsza efektywną rozdzielczość temperaturową NETD (*noise equivalent temperature difference*) kamery. Podstawowym źródłem szumu FPN jest rozrzut charakterystyk detektorów w matrycy wynikający z rozrzutu technologicznego parametrów detektorów i właściwości układu odczytu ROIC (*readout integrated circuit*) [3, 4].

Ponieważ matryce mikrobolometryczne są niechłodzone i mają szeroki kąt pola widzenia $FOV > 120^\circ$ (*field of view*), to promieniowanie IR pochodzące od bezpośredniego otoczenia matrycy staje się istotnym problemem. Wpływ promieniowania obudowy kamery na odpowiedź matrycy jest znaczny, ponieważ czułość mikrobolometrów na to promieniowanie jest prawie trzy razy większa od czułości dla użytecznego promieniowania IR docierającego przez obiektyw [5]. W chłodzonych matrycach z detektorami fotonowymi stosuje się specjalne zimne osłony (*cold shields*) zintegrowane z chłodziarką w celu ograniczenia kąta FOV i zmniejszenia wpływu promieniowania obudowy kamery oraz promieniowania rozproszonego (*stray light*). W układzie optycznym do matrycy mikrobolometrycznej stosuje się specjalne osłony ograniczające kąt pola widzenia matrycy. Są one połączone z obudową i wyczernione w celu uzyskania wysokiego współczynnika rozproszenia i absorpcji promieniowania podczerwonego. Chociaż osłony te nie są chłodzone, to ich temperatura jest stała (z powodu dużej masy obudowy) i bliska temperaturze otoczenia.

Do identyfikacji i kompensacji wpływu promieniowania podczerwonego obudowy służy wewnętrzna migawka (*shutter*), która zasłania matrycę przed promieniowaniem padającym przez obiektyw. Migawka jest odpowiednio wyczerzona, a jej

Streszczenie

W artykule jest przedstawiony algorytm korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej oraz jego implementacja w układzie programowalnym FPGA. Algorytm NUC (*nonuniformity correction*) łączy właściwości korekcji jednopunktowej i korekcji dwupunktowej, które są stosowane do kompensacji niejednorodności odpowiedzi matrycy detektorów podczerwieni. Podstawowa różnica między zaproponowanym algorytmem NUC a standardowym algorytmem korekcji dwupunktowej jest w sposobie wyznaczania współczynników korekcji przesunięć charakterystyk poszczególnych mikrobolometrów w matrycy. Pozwala to zredukować liczbę operacji matematycznych wykonywanych sprzętowo podczas korekcji do jednego mnożenia i dwóch operacji dodawania. Wszystkie moduły cyfrowe użyte do przetwarzania sygnału wyjściowego z matrycy, zbierania danych i wyświetlania obrazu zostały zaprojektowane za pomocą zestawu laboratoryjnego *Altera DSP Development Kit Stratix II Edition*. Zaproponowany algorytm NUC był testowany z matrycą mikrobolometryczną 384×288 pikseli o rozmiarze detektora 35µm firmy ULIS (Francja). Podczas badań uzyskano niejednorodność odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej po korekcji NUC poniżej 0,16% (std dev/mean) dla zakresu temperatury ciała czarnego od 20 °C do 50 °C i zmiany temperatury otoczenia ±2,5 °C. Niejednorodność odpowiedzi matrycy bez korekcji wynosiła 8,1%.

Słowa kluczowe: mikrobolometr, korekcja niejednorodności, układ FPGA.

Implementation of response nonuniformity correction algorithm of microbolometer focal plane array in programmable logic device

Abstract

A nonuniformity correction (NUC) algorithm for microbolometer infrared focal plane array (FPA) and its implementation on a field programmable gate array (FPGA) device are presented. The NUC algorithm integrates features of the one-point correction and the two-point correction (TPC) to compensate FPA response nonuniformity. The main difference between the proposed NUC algorithm and the standard TPC is in the way of offset coefficients evaluation for individual microbolometers in FPA. It allows reducing the number of mathematical operations performed by hardware to one multiplication and two additions. All digital modules for processing of FPA output, data collection, and image displaying have been designed by the use of the Altera DSP Development Kit Stratix II Edition.

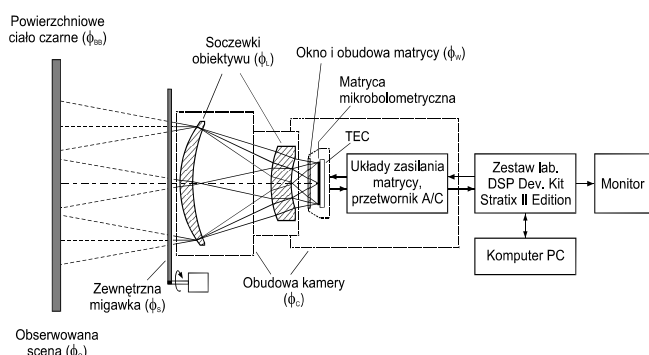
temperatura jest równa temperaturze obudowy. Zarejestrowana odpowiedź matrycy po zamknięciu migawki jest dalej używana do korekcji niejednorodności NUC matrycy. Czasami w specjalnych systemach zobrazowania w podczerwieni stosuje się dodatkową zewnętrzną migawkę w postaci pokrywy na obiektyw, która jest zamykana podczas kalibracji.

Korekcja NUC polega na odpowiednim przetwarzaniu sygnału wyjściowego z matrycy detektorów IR w celu usunięcia szumu FPN. Podstawowymi algorytmami NUC stosowanymi w kamerach termowizyjnych są: algorytm korekcji dwupunktowej TPC (*two-point correction*) i algorytm korekcji jednopunktowej OPC (*one-point correction*). W algorytmie TPC są kompensowane rozrzuty nachyleń (*gains*) i przesunięć (*offsets*) charakterystyk detektorów w matrycy a w algorytmie OPC tylko przesunięcia. Ponieważ charakterystyki detektorów IR są nieliniowe, to odpowiedź matrycy zawiera resztkową wartość szumu FPN dla obserwowanej sceny o temperaturze różnej od temperatury punktu kalibracji [6]. Punkty kalibracji ustala się w taki sposób, aby wartość szumu FPN po korekcji była poniżej rozdzielczości NETD matrycy dla danego zakresu temperaturowego obserwowanej sceny.

Współczynniki NUC dla nachyleń i przesunięć są ważne, gdy temperatura matrycy i temperatura otoczenia nie zmieniają się, w przeciwnym razie kalibracja kamery musi być powtórzona. Do stabilizacji temperatury matrycy mikrobolometrycznej stosuje się chłodziarkę termoelektryczną TEC (*thermoelectric cooler*) w postaci zintegrowanego z matrycą ogniwa Peltiera. Typowa wartość temperatury pracy matrycy wynosi 30 °C i musi być stabilizowana z dokładnością 0,01 °C.

2. Algorytm NUC

Na rys. 1 jest pokazany uproszczony schemat blokowy stanowiska do badania matrycy mikrobolometrycznej z układem korekcji NUC. Zaznaczone są tam również niepożądane źródła promieniowania podczerwonego takie, jak: promieniowanie IR pochodzące od obudowy kamery, obiektywu i najbliższego otoczenia matrycy, które dociera do matrycy. W celu kompensacji wpływu niepożądanego promieniowania IR na odpowiedź matrycy zastosowano rozwiązanie z zewnętrzną migawką.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska do badania matrycy mikrobolometrycznej
Fig. 1. Block diagram of test stand for microbolometer focal plane array

Zaproponowany algorytm korekcji NUC jest opisany formułą

$$Y_{ij}^*(\phi_o, \phi_c) = [Y_{ij}(\phi_o, \phi_c) - Q_{ij}(\phi_s, \phi_c)]G_{ij} + O_{ij}, \quad (1)$$

gdzie $Y_{ij}(\phi_o, \phi_c)$ jest odpowiedzią detektora (i, j) na strumień ϕ_o promieniowania IR pochodzącego od obserwowanej sceny i strumień ϕ_c pochodzący od obudowy kamery, a $Q_{ij}(\phi_s, \phi_c)$ jest odpowiedzią detektora na strumień pochodzący od zewnętrznej migawki (ϕ_s) i od obudowy (ϕ_c). Współczynniki NUC dla korekcji nachyleń (G_{ij}) i przesunięć (O_{ij}) dla poszczególnych detektorów w matrycy są określone wyrażeniami:

$$G_{ij} = \frac{\bar{Y}(\phi_{bb2}, \phi_{cr}) - \bar{Y}(\phi_{bb1}, \phi_{cr})}{Y_{ij}(\phi_{bb2}, \phi_{cr}) - Y_{ij}(\phi_{bb1}, \phi_{cr})}, \quad (2)$$

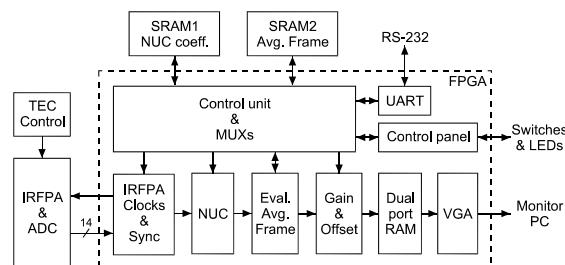
$$O_{ij} = \bar{Y}(\phi_{bb1}, \phi_{cr}) - [Y_{ij}(\phi_{bb1}, \phi_{cr}) - Q_{ij}(\phi_{sr}, \phi_{cr})]G_{ij}, \quad (3)$$

gdzie $Y_{ij}(\phi_{bb1}, \phi_{cr})$ i $Y_{ij}(\phi_{bb2}, \phi_{cr})$ są odpowiedziami matrycy na jednorodny strumień promieniowania IR ciała czarnego o temperaturze T_{bb1} i T_{bb2} i strumień ϕ_{cr} pochodzący od obudowy, $Q_{ij}(\phi_{sr}, \phi_{cr})$ jest odpowiedzią matrycy dla zamkniętej migawki i referencyjnej temperatury otoczenia. $\bar{Y}(\phi_{bb}, \phi_{cr})$ oznacza wartość średnią odpowiedzi wszystkich detektorów w matrycy. Podczas kalibracji temperatura obudowy kamery i zewnętrznej migawki jest stabilizowana za pomocą komory klimatycznej. Należy zaznaczyć, że odpowiedzi $Y_{ij}(\phi_{bb1}, \phi_{cr})$ i $Y_{ij}(\phi_{bb2}, \phi_{cr})$ powinny być wyznaczone jako uśrednione odpowiedzi z co najmniej 100 kolejnych ramek w celu minimalizacji wpływu szumu losowego.

3. Realizacja sprzętowa algorytmu

Opisany powyżej algorytm NUC był testowany z matrycą mikrobolometryczną UL03041 (*ULIS*, Francja) o rozdzielczości 384×288 pikseli i rozmiarze detektora 35 μm. Matryca pracuje w długofalowym zakresie widmowym (LWIR) 8-14 μm i charakteryzuje się wysokimi parametrami technicznymi: czułość 7,2 mV/K (std dev = 1,1 %), termiczna stała czasowa 7 ms, rozdzielczość temperaturowa NETD = 40 mK dla układu optycznego o aperturze F/1, temperaturze matrycy 30 °C i częstotliwości ramki 60 Hz [7].

Na rys.2 jest pokazany uproszczony schemat blokowy układu odczytu sygnału z matrycy mikrobolometrycznej.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy układu odczytu sygnału z matrycy mikrobolometrycznej

Fig. 2. Simplified block diagram of readout circuit for microbolometer IRFPA

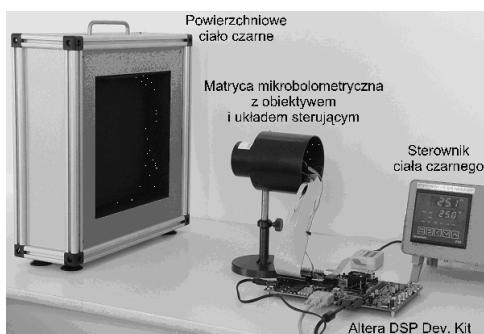
Wszystkie moduły do cyfrowego przetwarzania sygnału z matrycy, zbierania danych pomiarowych i wyświetlania obrazu zostały zaprojektowane przy użyciu zestawu laboratoryjnego *Altera DSP Development Kit Stratix II Edition*. Płytkę zestawu zawierała: układ FPGA EP2S60-1020C4, dwie pamięci SRAM 256K×16-bitów, pamięć SDRAM 32 MB, dwa przetworniki A/C i C/A, interfejs RS-232, Ethernet oraz interfejs graficzny VGA. Niektóre z elementów zostały zastosowane w układzie odczytu.

Matryca mikrobolometryczna razem z układem wytwarzania napięć polaryzacji i 14-bitowym przetwornikiem A/C była umieszczona na oddzielnej płytce drukowanej. Wymagane sygnały zegarowe dla matrycy i przetwornika A/C są generowane przez moduł *IRFPA Clocks & Sync*, który zawiera bufor danych i generuje odpowiednie sygnały synchronizacji. Współczynniki NUC G_{ij} i O_{ij} są przechowywane w pamięci SRAM1 a odpowiedź matrycy dla zamkniętej migawki (Q_{ij}) jest zapamiętywana w pamięci SRAM2. Korekcja NUC jest wykonywana na bieżąco, ponieważ czas przetwarzania danych przez moduł NUC jest krótszy niż czas odczytu sygnału (160 ns) pojedynczego detektora w matrycy. W celu wyznaczenia uśrednionej odpowiedzi matrycy przed i po korekcji NUC zaprojektowano specjalny moduł *Eval. Avg. Frame*. Pozwala on na uśrednianie 128, 64 lub 32 kolejnych ramek a wynik jest zapisywany do pamięci SRAM2. Do

wyświetlania obrazu na monitorze służy sterownik *VGA* z dwuportową pamięcią RAM na wejściu. Sterownik *UART* z szybkością transmisji 115,2 kb/s zapewnia wymianę danych między układem odczytu a komputerem PC. Wszystkie moduły cyfrowe zaimplementowane w układzie FPGA są opisane w języku VHDL. W celu sprawdzenia działania całego systemu cyfrowego, odpowiednie testy symulacyjne zostały wykonane przed podłączeniem układu odczytu do matrycy.

4. Wyniki badań

W badaniach układu korekcji NUC do matrycy mikrobolometrycznej zastosowano specjalne powierzchniowe źródło promieniowania podczerwonego BB-10F, opracowane w WAT. Zastosowane źródło (ciało czarne) ma powierzchnię czynną o wymiarach 260×260 mm i współczynniku emisyjności większym niż 0,97. Temperatura ciała czarnego jest regulowana w zakresie od temperatury otoczenia do +80 °C z rozdzielczością 0,1 °C. Główne elementy stanowiska do badania skuteczności algorytmu NUC są pokazane na rys. 3.



Rys. 3. Stanowisko do badania skuteczności algorytmu NUC
Fig. 3. Test stand for evaluation of NUC algorithm efficiency

Odpowiedni układ optyczny dla matrycy mikrobolometrycznej został wykonany przy użyciu obiektywu *Umicore Gasir Standard Lens 60 mm F/1.1*. Obiektyw składa się z dwóch soczewek asferycznych, ma kąt FOV równy 18,5° i współczynnik transmisji powyżej 92 % w zakresie widmowym 8-12 μm.

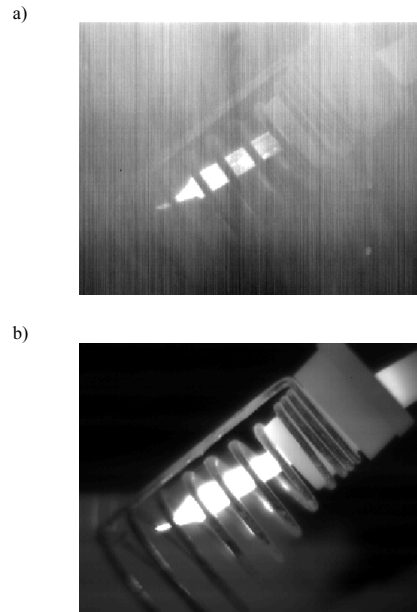
Wartości niejednorodności odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej przed i po korekcji niejednorodności według zaproponowanego algorytmu NUC są przedstawione w tabeli 1. W celu redukcji szumu losowego, uśrednione odpowiedzi były wyznaczane na podstawie 128 kolejnych ramek. Przykłady obrazów uzyskanych z matrycy mikrobolometrycznej podczas testów z układem korekcji NUC są przedstawione na rys. 4.

Tab. 1. Niejednorodność odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej przed i po korekcji według zaproponowanego algorytmu NUC
Tab. 1. Microbolometer FPA response nonuniformity before and after correction according to the proposed NUC algorithm

T_{bb} [°C]	Std dev/mean [%] bez korekcji NUC	Std dev/mean [%] po korekcji NUC
20	8,6	0,11
30	8,5	0,13
40	8,4	0,12
50	8,1	0,16
60	8,0	0,26
70	7,8	0,37

Matryca mikrobolometryczna pracowała w trybie 320×240 pikseli (1/4 VGA) z częstotliwością ramki 60 Hz. Czas całkowania wynosił 59,5 μs przy częstotliwości sygnału wyjściowego równej 6,25 MHz. Matryca była stabilizowana termicznie a jej temperatura wynosiła 30 °C. Współczynniki NUC G_{ij} i O_{ij} były wyznaczone na podstawie dwóch uśrednionych odpowiedzi matrycy dla ciała czarnego o temperaturze 20 °C

i 40 °C. Podczas badań temperatura otoczenia była równa 20 °C ± 2,5 °C.



Rys. 4. Odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej uzyskane podczas badań: a) bez korekcji NUC, b) po korekcji NUC
Fig. 4. Microbolometer FPA response acquired during tests: a) without NUC, b) after NUC

5. Podsumowanie

Przedstawiony został zmodyfikowany algorytm dwupunktowej korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej. Wymagania sprzętowe na realizację algorytmu nie są wysokie. Ponadto algorytm zaimplementowany w układzie FPGA jest wykonywany w czasie rzeczywistym. Zastosowanie zewnętrznej migawki zapewnia kompensację wpływu promieniowania podczerwonego pochodzącego od obudowy kamery przy zmianach temperatury otoczenia.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 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.* 14(1), 2006.
- [2] J. L. Tissot, B. Fieque, C. Trouilleau, P. Robert, A. Crastes, C. Minassian, O. Legras: First demonstration of 640x480 uncooled amorphous silicon IRFPA with 25 μm pixel-pitch, *Proc. SPIE* 6206, 2006.
- [3] B. Dupont, M. Vilain: Towards lower uncooled IR-FPA system integration cost, *Proc. SPIE* 6542, 2007.
- [4] T. Orzanowski, H. Madura, E. Powiada, J. Pasierbiński: Analiza układu odczytu do matrycy detektorów mikrobolometrycznych, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Nr 9, 2006.
- [5] J. L. Tissot: Uncooled infrared detectors: state of the art, VII Krajowa Konferencja Termografia i Termometria w Podczerwieni TTP 2006, Ustroń-Jaszowiec, 16-18 listopada, 2006.
- [6] D. L. Perry, E. L. Dereniak: Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors, *Opt. Eng.* Vol. 32, No. 8, 1993.
- [7] C. Trouilleau, A. Crastes, O. Legras, J. L. Tissot, J. P. Chatard: 35 μm pitch at ULIS, a breakthrough, *Proc. SPIE* 5783, 2005.