

Tomasz ORŻANOWSKI
Tomasz SOSNOWSKI
Mariusz KASTEK

KOMPENSACJA ROZRZUTU CZUŁOŚCI DETEKTORÓW MIKROBOLOMETRYCZNYCH W OBSERWACYJNEJ KAMERZE TERMOWIZYJNEJ^{*)}

STRESZCZENIE *W artykule jest przedstawiony algorytm kompensacji rozrzutu czułości detektorów mikrobolometrycznych oraz jego realizacja sprzętowa i zastosowanie. Algorytm zawiera właściwości korekcji jednopunktowej i korekcji dwupunktowej, które są stosowane do kompensacji niejednorodności odpowiedzi matryc detektorów podczerwieni. W zaproponowanym algorytmie liczba operacji matematycznych wykonywanych sprzętowo podczas korekcji odpowiedzi detektora w matrycy jest ograniczona do jednego mnożenia i dwóch operacji dodawania. Algorytm korekcji był testowany z matrycą mikrobolometryczną o rozdzielczości 384x288 pikseli i rozmiarze detektora 35 μm firmy ULIS (Francja). Źródłem jednorodnego promieniowania podczerwonego było specjalne ciało czarne o dużej powierzchni promieniującej. W wyniku badań uzyskano niejednorodność odpowiedzi matrycy po korekcji poniżej 0,16 % dla zakresu temperatury ciała czarnego od 20°C do 50°C i temperatury otoczenia 21°C \pm 2,5°C. Niejednorodność odpowiedzi matrycy bez korekcji wynosiła 8,1 %.*

Słowa kluczowe: *mikrobolometr, korekcja niejednorodności*

^{*)} Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy.

dr inż. Tomasz ORŻANOWSKI
e-mail: torzanowski@wat.edu.pl

dr inż. Tomasz SOSNOWSKI
e-mail: tsosnowski@wat.edu.pl

dr inż. Mariusz KASTEK
e-mail: mkastek@wat.edu.pl

Zakład Techniki Podczerwieni i Termowizji
Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna

1. WPROWADZENIE

Bolometry rezystancyjne (*resistive bolometer*) są detektorami promieniowania podczerwonego i należą do grupy detektorów termicznych (*thermal detectors*). Ponieważ nie wymagają chłodzenia kriogenicznego i mogą pracować w temperaturze pokojowej, to są nazywane często detektorami niechłodzonymi (*uncooled detectors*). Działanie bolometru polega na przemianie (za pomocą absorbera) energii promieniowania podczerwonego w ciepło, które powoduje zmianę rezystancji materiału użytego do budowy detektora [1]. Odpowiedni układ odczytu wykrywa zmianę rezystancji bolometru i generuje na wyjściu odpowiadający jej sygnał napięciowy. Miniaturowe bolometry (mikrobolometry) rozmieszczone w formie tablicy o M wierszach i N kolumnach tworzą matrycę mikrobolometryczną. Produkowane obecnie matryce mikrobolometryczne mają coraz lepsze parametry, a technologia ich wytwarzania jest stale rozwijana i ulepszana [2, 3]. 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*) [4, 5].

Ponieważ matryce mikrobolometryczne są niechłodzone i mają szeroki kąt pola widzenia ($FOV > 120^\circ$), 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 [6]. 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 współczyn-

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

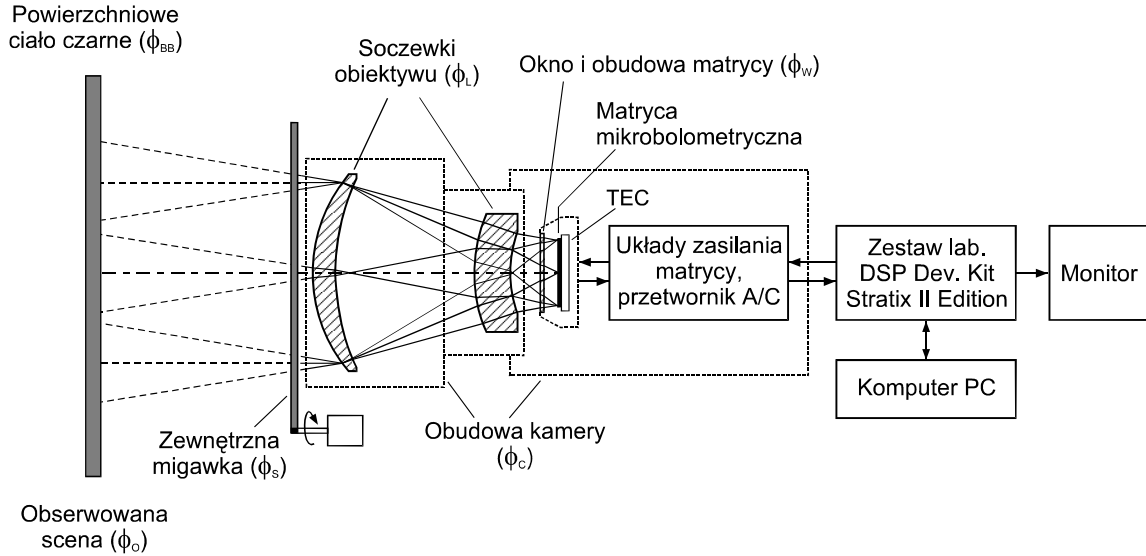
Korekcja NUC polega na odpowiednim przetwarzaniu sygnału wyjściowego z matrycy detektorów IR w celu usunięcia szumu FPN. Podstawowymi algorytmami NUC stosowanymi w kamerach termowizyjnych są: algorytm korekcji dwupunktowej TPC (*two-point correction*) i algorytm korekcji jednopunktowej OPC (*one-point 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 [7]. Punkty kalibracji ustala się w taki sposób, aby wartość szumu FPN po korekcji była poniżej rozdzielczości NETD matrycy dla zadanego zakresu temperaturowego obserwowanej scenarii.

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 KOREKCJI NIEJEDNORODNOŚCI

Na rysunku 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 układu korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej

Zaproponowany algorytm korekcji NUC jest opisany równaniem

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

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:

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

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

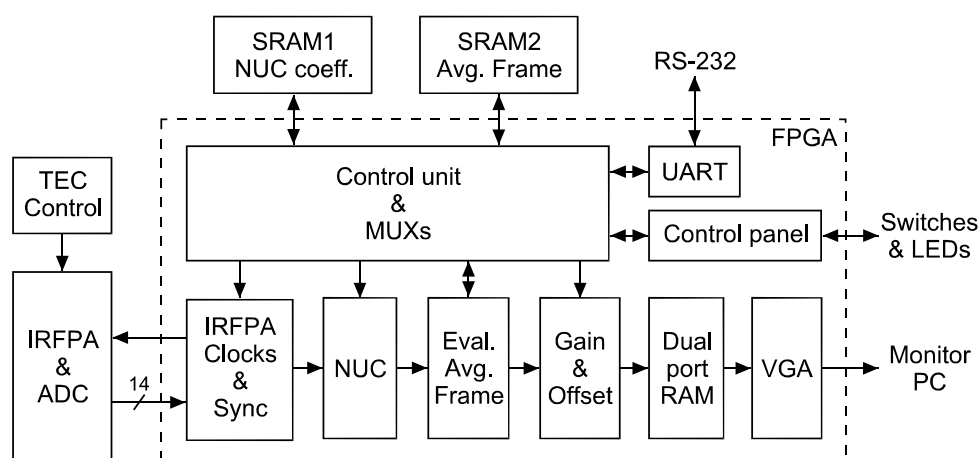
gdzie $Y_{ij}(\phi_{bb1}, \phi_{cr})$ i $Y_{ij}(\phi_{bb2}, \phi_{cr})$ są odpowiedziami matrycy na jednorodny strumień promieniowania IR ciała czarnego o temperaturze T_{bb1} i T_{bb2} i strumień ϕ_{cr}

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 I ZASTOSOWANIE

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 podczerwieni (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 [8].

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



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

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.

Na rysunku 3 jest pokazany model prototypowy obserwacyjnej kamery termowizyjnej, w której jest testowany opisany wcześniej algorytm kompensacji rozrzutu czułości detektorów mikrobolometrycznych.



Rys. 3. Model prototypowy obserwacyjnej kamery termowizyjnej

4. WYNIKI BADAŃ

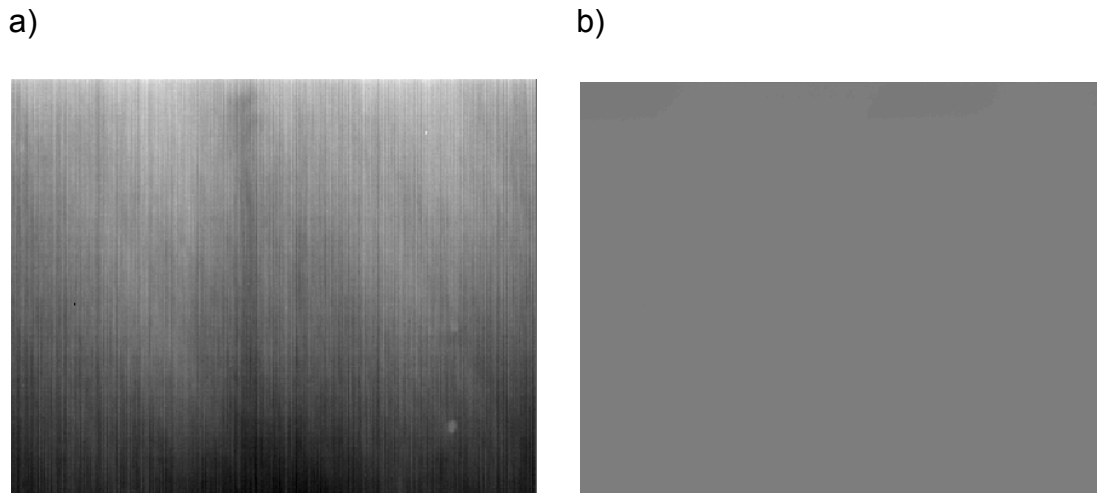
W badaniach układu korekcji NUC do matrycy mikrobolometrycznej zastosowano specjalne powierzchniowe źródło promieniowania podczerwonego BB-10F, opracowane w WAT. Zastosowane źródło (ciało czarne) ma powierzchnię czynną o wymiarach 260×260 mm i współczynniku emisyjności większym niż 0,97. Temperatura 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 rysunku 4.



Rys. 4. Stanowisko do badania skuteczności algorytmu NUC

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% dla zakresu widmowego 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 rysunku 5.



Rys. 5. Odpowiedź matrycy mikrobolometrycznej na promieniowanie ciała czarnego o temperaturze $T_{bb} = 25^{\circ}\text{C}$: a) bez korekcji NUC (std dev/mean = 8,5%), b) po korekcji NUC (std dev/mean = 0,11%)

TABELA 1

Niejednorodność odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej przed i po korekcji według zaproponowanego algorytmu NUC.

T_{bb} [$^{\circ}\text{C}$]	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 $59,5 \mu\text{s}$ 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 $21^{\circ}\text{C} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawiony został zmodyfikowany algorytm dwupunktowej korekcji niejednorodności odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej i jego zastosowanie w obserwacyjnej kamerze termowizyjnej. 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.

LITERATURA

1. Tissot J. L., Rothan F., Mendel C., Vilaian M., Yon J. J.: LETI/LIR's uncooled microbolometer development, Proc. SPIE 3436, 1998.
2. Tissot J. L., Trouilleau C., Fieque B., Crastes A., and Legras O.: Uncooled microbolometer detector: recent developments at ULIS, Opto-Electron. Rev. 14(1), 2006.
3. Tissot J. L., Fieque B., Trouilleau C., Robert P., Crastes A., Minassian C., Legras O.: First demonstration of 640x480 uncooled amorphous silicon IRFPA with 25 μm pixel-pitch, Proc. SPIE 6206, 2006.
4. Dupont B., Vilain M.: Towards lower uncooled IR-FPA system integration cost, Proc. SPIE 6542, 2007.
5. Orzanowski T., Madura H., Powiada E., Pasierbiński J.: Analiza układu odczytu do matrycy detektorów mikrobolometrycznych, Pomiary Automatyka Kontrola, Nr 9, 2006.
6. Tissot J. L.: Uncooled infrared detectors: state of the art, VII Krajowa Konferencja Termografia i Termometria w Podczerwieni TTP 2006, Ustroń-Jaszowiec, 16-18 listopada, 2006.
7. Perry D. L., Dereniak E. L.: Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors, Opt. Eng. Vol. 32, No. 8, 1993.
8. Trouilleau C., Crastes A., Legras O., Tissot J. L., Chatard J. P.: 35 μm pitch at ULIS, a breakthrough, Proc. SPIE 5783, 2005.

Rękopis dostarczono dnia 10.04.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Władysław Dybczyński

MICROBOLOMETERS RESPONSIVITY
SPREAD COMPENSATION
IN OBSERVATIONAL INFRARED CAMERA

Tomasz ORŻANOWSKI, Tomasz SOSNOWSKI,
Mariusz KASTEK

ABSTRACT *A nonuniformity correction (NUC) algorithm for microbolometer infrared focal plane array (FPA) and its hardware implementation and application are presented. The NUC algorithm includes features of the one-point correction and the two-point correction which are used for compensation of FPA response nonuniformity. In proposed NUC algorithm the number of mathematical operations performed by hardware to compensate a response nonuniformity of particular detectors in array is reduced to one multiplication and two additions. As the uniform infrared source a special extended black body was applied. The NUC algorithm was tested with the 384x288 microbolometers FPA with 35 μ m pixel-pitch manufactured by ULIS (France). 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 of 21°C \pm 2.5°C. The RNU value without any correction was equaled 8.1%.*



Dr inż. Tomasz Orzanowski, 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.