

Tomasz SOSNOWSKI, Tomasz ORŻANOWSKI, Mariusz KASTEK

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, ZAKŁAD TECHNIKI PODCZERWIENI I TERMOWIZJI

Przetwarzanie sygnału w kamerze termowizyjnej z zastosowaniem układu programowalnego**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. 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. Mariusz KASTEK**

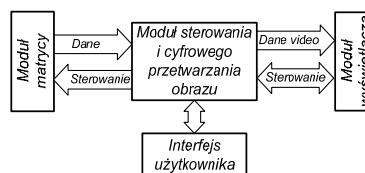
Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1997 roku jest pracownikiem Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2002. Zajmuje się problematyką detekcji obiektów w systemach czujników podczerwieni stosowanych w systemach ochrony, a także analizą sygnałów oraz algorytmami detekcji implementowanymi w czujnikach podczerwieni. Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Optoelektroniki WAT.

e-mail: mkastek@wat.edu.pl**Keywords:** termovision, signal processing.**1. Wprowadzenie**

Coraz częściej kamery termowizyjne są stosowane jako urządzenia obserwacyjne w systemach ochrony, systemach militarnych, systemach rozpoznania, wykrywania skażeń itp. W tego typu systemach bardzo ważne jest takie przetworzenie informacji termowizyjnej, aby uzyskany obraz jak najwierniej odzwierciedlał obserwowaną sytuację. Powszechność stosowania kamer termowizyjnych jako urządzeń obserwacyjnych powoduje, że powinny być one jak najprostsze w obsłudze. Wymusza to konieczność zastosowania w kamerach metod przetwarzania i analizy obrazu termowizyjnego. Metody te pozwalają uprościć obsługę kamery poprzez automatyczne dobranie parametrów pracy kamery termowizyjnej. Zastosowane metody powinny także umożliwiać pracę kamery termowizyjnej nie tylko jako narzędzia wspomagającego obserwację, ale także do wykrywania i rozpoznawania pojawiających się obiektów i zjawisk. Stosowane w danym urządzeniu metody przetwarzania informacji zależą od konkretnego zastosowania i od rodzaju analizowanej informacji [1], w związku z tym nie mogą one być uniwersalne ani wybrane raz na zawsze. Ponadto często systemy realizujące automatyczne przetwarzanie i analizę obrazu muszą charakteryzować się względnie niedużymi rozmiarami i małym poborem energii. Generalnie zespół elektroniczny kamery termowizyjnej składa się z trzech zasadniczych modułów [2]:

- modułu matrycy detektorów,
- modułu sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazu,
- modułu wyświetlacza.

Ogólny uproszczony schemat zespołu elektronicznego kamery termowizyjnej został przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat modułów kamery bolometrycznej
Fig. 1. Scheme of bolometer camera modules

Streszczenie

W artykule przedstawiono system do cyfrowej analizy i przetwarzania obrazu zastosowany w kamerze termowizyjnej. Zaprojektowany system realizuje szereg czynności, do których należą: sterowanie układem matrycy mikrobolometrycznej, wykonanie korekcji niejednorodności detektorów matrycy, wyznaczenie wartości sygnału dla uszkodzonych detektorów, sterowanie wyświetlaniem obrazu termowizyjnego. System został tak zaprojektowany, że algorytmy przetwarzania danych niezbędne do konkretnego zastosowania mogą zostać zaimplementowane w systemie bez ingerencji w elementy sprzętowe. Zostało to uzyskane przez zastosowanie układu programowalnego FPGA oraz układu mikroprocesorowego, które mogą być programowane w systemie.

Słowa kluczowe: termowizja, przetwarzanie sygnałów.

Signal processing in a thermal camera using programmable logic device**Abstract**

The paper presents a system for image digital analysis and processing used in a thermal camera. A programmable system ensures significant flexibility for registration of methods and algorithms. It means that it is possible to change or add the processing algorithms, of the data from detectors array, performed in the camera. The system designed for digital analysis and processing of a thermal image controls a system of a microbolometer focal plane array in order to read a value of the signal from all detector arrays, corrects non-uniformities of detectors array, determines a signal value for bad pixels, and controls displaying a thermal image of a specific format. Moreover, data processing algorithms can be added to the system in dependence on its predicted application. Thus, camera service can be simplified by automatic selection of parameters of thermal camera operation. By applying the methods of signal analysis, a thermal camera can be used not only for observation but also for detection and recognition of appearing objects and phenomena. Data processing methods, employed in a given device, depend on a definite application and on a kind of the analysed data. Thus, they cannot be universal ones and not chosen once and for all. The system has been designed in such a way that data processing algorithms, indispensable for the defined application, can be implemented in the system with no interference in hardware elements. It has been obtained using FPGA programmable device and microprocessor system that are in-system programmable.

W module matrycy detektorów znajduje się układ przetwornika analogowo - cyfrowego przetwarzającego odczytany obraz na postać cyfrową przesyłaną dalej do modułu sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazów. W module matrycy detektorów znajdują się także analogowe układy zasilające wyposażone w odpowiednie układy filtrujące i przeciwzakłóceniamiowe dostarczające głównych napięć wymaganych do zasilania matrycy.

Z modułu sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazów wysyłane są natomiast podstawowe impulsy sterujące odpowiedzialne za prawidłowy odczyt sygnałów z matrycy detektorów [3]. W przypadku, gdy detektorem IR jest niechłodzona matryca mikrobolometryczna pracująca w szerokim zakresie temperatury bez wykorzystania układu stabilizacji temperatury niezbędne jest zapewnienie odpowiedniej regulacji napięć zasilających. Napięcia te w znacznej mierze odpowiadają za czułość detektorów matrycy oraz za utrzymanie odpowiedniego poziomu sygnału wyjściowego. Stąd napięcia te sterowane są przez układ automatycznego sterowania napięciami detektorów zrealizowanego na bazie układu mikroprocesorowego. Na podstawie analizy wartości sygnału analogowego odczytanego z matrycy detektorów za pośrednictwem przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC) mikroprocesor ustawia odpowiednie napięcia matrycy detektorów. Zadanie utrzymania napięć na odpowiednim poziomie jest realizowane za pomocą przetwornika cyfrowo-analogowego, z którym mikroprocesor komunikuje się za pośrednictwem magistrali SPI.

Moduł wyświetlania jest to urządzenie zobrazowania informacji wideo w formacie VGA takie jak monitor CRT, wyświetlacz LCD, wyświetlacz OLED. Sygnały wideo RED, GREEN, BLUE oraz impulsy synchronizacji linii (HS) i ramki (VS) są generowane przez moduł sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazów. Sygnał wideo jest obliczany na podstawie przetworzonego na postać cyfrową analogowego sygnału matrycy detektorów oraz zapamiętanych współczynników kalibracyjnych przechowywanych w pamięci typu FLASH modułu sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazów. Obliczona wartość jest ponownie przetwarzana na postać analogową przez specjalny układ zawierający trzy przetworniki cyfrowo-analogowe.

2. Moduł sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazu

Moduł sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazu ma za zadanie sterowanie wszystkimi układami oraz przetworzenie danych odebranych z matrycy detektorów. Podstawowymi zadaniami realizowanymi przez moduł sterowania i przetwarzania obrazu są następujące czynności: sterowanie układem matrycy w celu odczytania wartości wszystkich detektorów matrycy, korekcja niejednorodności detektorów matrycy, korekcja wartości wadliwych detektorów, wygenerowanie danych dla modułu wyświetlacza.

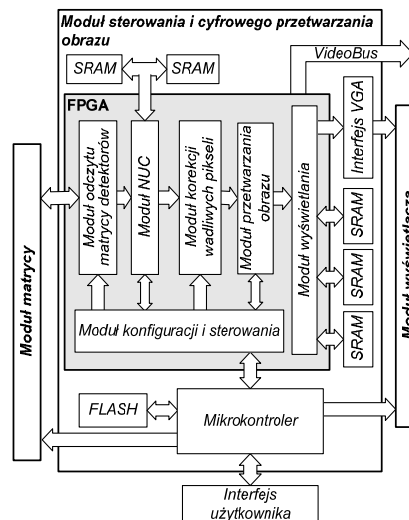
Moduł sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazu został zbudowany w oparciu o dwa podstawowe układy: układ programowalny FPGA i układ mikrokontrolera. Układ programowalny FPGA realizuje przetwarzanie danych obrazowych, które wymaga znacznych mocy obliczeniowych. Do podstawowych jego zadań należą: wygenerowanie sygnałów sterujących odczytem matrycy detektorów, wykonanie korekcji niejednorodności odpowiedzi poszczególnych bolometrów matrycy, wykonanie korekcji wartości wadliwych pikseli, wygenerowanie sygnałów dla modułu wyświetlacza. Układ mikroprocesorowy realizuje wszystkie czynności związane ze sterowaniem całym urządzeniem i inne czynności charakteryzujące się względnie niewielkim nakładem obliczeniowym. Schemat blokowy modułu sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazu z układem FPGA został przedstawiony na rys. 2.

Podstawowym zadaniem mikrokontrolera jest nadzorowanie (na każdym etapie) procesu przetwarzania obrazu. Do podstawowych zadań realizowanych przez mikrokontroler należą:

- sterowanie napięciami zasilania układu matrycy detektorów,
- pomiar temperatury matrycy detektorów,
- pomiar temperatury otoczenia,
- sterowanie przesłoną,
- sterowanie procesem autokalibracji,
- konfiguracja wyświetlacza,
- modyfikacja parametrów NUC,
- wyznaczanie parametrów niezbędnych do korekcji współczynników NUC.

Jako układ mikroprocesorowy został wybrany mikrokontroler LPC2292 firmy PHILIPS będący przedstawicielem rodziny

32-bitowych procesorów ARM 7. Mikrokontroler posiada architekturę pozwalającą wykonywać 32-bitowy program z bardzo dużą szybkością. Dla aplikacji, w których krytycznym parametrem jest rozmiar kodu programu można zastosować 16-bitowy tryb Thumb. Pozwala to zredukować o ok. 30 % rozmiar kodu programu przy nieznacznym obniżeniu wydajności procesora. Procesor posiada bardzo rozbudowane zasoby peryferyjne takie jak: 10 – bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy, 32 układy czasowolicznikowe, interfejsy komunikacyjne SPI, I2C, CAN i UART. Ponadto mikrokontroler LPC2292 posiada znaczną liczbę portów ogólnego przeznaczenia (GPIO) oraz jest wyposażony w interfejs obsługi zewnętrznej pamięci.



Rys. 2. Schemat funkcjonalny modułu sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazu z układem FPGA

Fig. 2. Functional diagram of control module and digital processing of an image with FPGA system

Układ mikroprocesorowy został połączony z układem FPGA za pomocą specjalnej magistrali komunikacyjnej, której obsługa była wspomagana przez wbudowany w mikroprocesor interfejs obsługi pamięci zewnętrznej.

Jako układ FPGA zastosowany został układ EP2C35F672 firmy ALTERA. Układ ten zapewnia znaczną wydajność przetwarzania przy względnie niewielkim zapotrzebowaniu energetycznym. Zastosowany układ posiada dużą liczbę portów IO, 33 216 elementów logicznych (LEs), 483 840 bitów pamięci RAM, cztery układy PLL umożliwiające wygenerowanie odpowiednich przebiegów czasowych, 35 wbudowanych układów mnożących (sprzętowych multiplikatorów). Należy podkreślić, że sprzętowe multiplikatory pozwalają na zaprojektowanie w układzie FPGA bloków funkcjonalnych wykonujących złożone obliczenia matematyczne z bardzo dużą szybkością, przy jednocześnie niewielkim zapotrzebowaniu na zasoby logiczne i przy względnie niewielkim poborze energii.

W układzie FPGA zaimplementowano następujące moduły służące do przetwarzania obrazu w czasie rzeczywistym: moduł odczytu matrycy detektorów, moduł NUC [4], moduł korekcji wadliwych pikseli, moduł przetwarzania obrazu, konwerter danych odczytanych z detektorów na format VGA.

W układzie FPGA została zaimplementowana magistrala danych obrazowych VideoBus. Wszystkie moduły zaimplementowane w układzie FPGA wymieniają dane za pomocą magistrali danych obrazowych VideoBus. W ten sposób uzyskano możliwość zamiany kolejności wykonywanych operacji przetwarzania obrazu bez ingerencji w same moduły. Spowodowało to uzyskanie dużej elastyczności w projektowaniu systemu przetwarzania obrazu termowizyjnego. Magistrala VideoBus została wyprowadzona na specjalne złącze. Dzięki temu możliwe jest analizowanie działania modułu cyfrowego przetwarzania obrazu na każdym etapie przetwarzania.

3. Wnioski

Dla wszystkich modułów zaimplementowanych w układzie FPGA Cyclone II EP2C35F672 przeprowadzono analizę parametrów czasowych dla najgorszego przypadku (worst case). Z analizy parametrów czasowych (timing analyzer summary) wynika, że maksymalny czas opóźnienia elementów kombinacyjnych w poszczególnych modułach wynosi 5,548 ns, a maksymalna częstotliwość sygnału zegarowego magistrali VideoBus wynosi 68,1 MHz [5]. Układ przebadano także na stanowisku laboratoryjnym. Z przeprowadzonych badań wynika, że zaprojektowany system działa poprawnie i spełnia postawione wcześniej wymagania projektowe. Wszystkie algorytmy są realizowane przez układ w czasie rzeczywistym ze stałym opóźnieniem w torze cyfrowego przetwarzania sygnału wynoszącym w zależności od zastosowanego sposobu analizy obrazu, od kilku do kilkudziesięciu pikseli. Wykonany system pobiera poniżej 600 mW energii.

Układ mikroprocesorowy został oprogramowany z zastosowaniem metody hybrydowej stanowiącej połączenie języka C i języka asemblera. Pozwoliło to na uzyskanie dużej szybkości wykonywania części algorytmów opisanych w języku asemblera oraz zwężności kodu poprzez zastosowanie języka C w procedurach, które mogą być wykonywane z mniejszą szybkością. Tak opro-

gramowany mikroprocesor sterował poprawnie działaniem kamery zapewniając wymaganą wydajność.

4. Literatura

- [1] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, Digital Image Processing (2nd Edition), Prentice-Hall 2002
- [2] T. Sosnowski, T. Orzanowski, M. Kastek, K. Chmielewski: Digital image processing system for thermal cameras, Advanced Infrared Technology and Applications AITA 9, Leon (8-12.10.2007)
- [3] T. Orzanowski, H. Madura, E. Powiada, J. Pasierbiński, „Analiza układu odczytu do matrycy detektorów mikrobolometrycznych”, Pomiary Automatyka Kontrola Nr 9, rok 2006, str. 16-20
- [4] T. Orzanowski, T. Sosnowski, „Implementacja algorytmów korekcji niejednorodności matryc detektorów mikrobolometrycznych w układzie FPGA”, Pomiary Automatyka Kontrola Nr 11, 2006 str. 8÷11
- [5] T. Orzanowski, H. Madura, T. Sosnowski, „Symulacja sprzętowa algorytmów korekcji niejednorodności matryc detektorów podczerwieni”. VII Krajowa Konferencja Termografia i Termometria w Podczerniewi TTP2006, 16 18.11.2006 Ustroń-Jaszowiec, pp. 211÷215.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Jubileusz Profesora Eugeniusza Ratajczyka

Na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej odbyła się 20 czerwca 2008 roku uroczystość poświęcona pięćdziesięcioleciu pracy zawodowej i 75. rocznicy urodzin prof. zw. dra inż. Eugeniusza Ratajczyka. Wzięło w niej udział wiele osobistości naukowych z kraju, Władze Uczelni, Rada Wydziału Mechatroniki oraz zaproszeni goście. W okolicznościowych wystąpieniach mówcy ukazywali niepospolite osiągnięcia Jubilata w pracy naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej, życząc zachowania znakomitej kondycji i kolejnych sukcesów. Jego Magnificencja Rektor Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kurnik, wręczył Jubilatowi odznakę „Zasłużony dla Politechniki Warszawskiej”.



Fot. 1. Wystąpienie Jubilata podczas uroczystości na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej w dniu 20 czerwca 2008. Siedzą (od lewej): dziekan Wydziału Mechatroniki - prof. nzw. dr hab. inż. Krzysztof Lewenstein, rektor PW – prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kurnik

Z Politechniką Warszawską Jubilat związany jest od 1957 roku, kiedy to podjął pracę jako asystent w Katedrze Metrologii Technicznej. W pracy doktorskiej (1965) rozwinął teorię przetworników sprężynowych, która została wykorzystana przy konstruowaniu pierwszych polskich czujników mikrokatorowych, charakteryzujących się bardzo dobrymi właściwościami metrologicznymi. Wyprodukowano ich kilka tysięcy na potrzeby rozwijającego się przemysłu łożyskowego i elektronicznego. Dalsze badania, prowadzone w latach 1970-1978 pod kierunkiem Jubilata, doprowadziły do opracowania kilku odmian przyrządów pomiarowych o nazwie metrotest i ich produkcji w Kombinacie Przemysłu Narzędziowego VIS.

Na początku lat osiemdziesiątych pasją naukową Jubilata stały się współrzędnościowe maszyny pomiarowe. Efektem wieloletnich działań na tym polu jest m.in. podręcznik *Współrzędnościowa technika pomiarowa* (1994, 2005) - najczęściej w Polsce cytowane źródło bibliograficzne z tej dziedziny.

Tytuł naukowego profesora otrzymał Jubilat w roku 1986, na stanowisko profesora zwyczajnego Politechniki Warszawskiej został powołany w roku 1994. Jego dorobek naukowy obejmuje ponad 200 prac własnych, tyleż recenzji, liczne opracowania inżynierskie, jak też 11 wypromowanych doktorów.

Profesor Eugeniusz Ratajczyk jest inicjatorem sympozjów krajowych dotyczących techniki współrzędnościowej, które przekształciły się w międzynarodowe konferencje *Coordinate Measuring Technique*, odbywające się co dwa lata w Bielsku Białej pod jego przewodnictwem. Jest także animatorem i wieloletnim przewodniczącym komitetu naukowego cyklicznych konferencji *Metrologia w technikach wytwarzania maszyn*, organizowanych pod patronatem Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN oraz Komitetu Budowy Maszyn PAN. Od 1971 roku pełni funkcję redaktora działu pomiarów miesięcznika *Mechanik*, a od 1989 roku - zastępcę przewodniczącego zespołu redakcyjnego kwartalnika *Metrology and Measurement Systems*.

Jubilat jest bardzo wysoko ceniony jako utalentowany dydaktyk i niezwykle sprawny organizator działań naukowych. Przez trzy kadencje był dziekanem Wydziału Mechatroniki, przyczyniając się istotnie do jego rozwoju. Wiele lat sprawował funkcję kierownika Zakładu Metrologii i Inżynierii Jakości w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych. Był bardzo aktywny na forum Uczelni, m.in. jako członek Senatu PW i przewodniczący Senackiej Komisji ds. Mienia i Finansów, a obecnie kieruje pracami Rektorskiej Komisji ds. Akademickiej Służby Zdrowia.

Pełnił odpowiedzialne i zaszczytne funkcje, świadczące o jego umiejętnościach i pozycji w środowisku naukowym - był m.in. przewodniczącym Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, członkiem Rady Konsultacji Głównego Urzędu Miar, członkiem Rady Nauki przy Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

W uznaniu zasług Jubilat otrzymał liczne nagrody i odznaczenia, m.in. 8 nagród ministra, 9 nagród rektora, Nagrodę Mistrza Techniki, Medal Komisji Edukacji Narodowej, Krzyż Oficerski Orderu Odrodzenia Polski oraz Złote Honorowe Odznaki SIMP i NOT.

Sabina ŻEBROWSKA-LUCYK