

Tomasz SOSNOWSKI
Tomasz ORŻANOWSKI
Mariusz KASTEK

SYSTEM CYFROWEGO STEROWANIA I PRZETWARZANIA OBRAZU Z MIKROBOLOMETRYCZNEJ MATRYCY DETEKTORÓW PODCZERWIENI

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono system do cyfrowego sterowania i przetwarzania obrazu termowizyjnego cechujący się znaczną elastycznością stosowanych metod i algorytmów. Zaprojektowany system realizuje szereg czynności, do których należą: odczytanie i sterowanie modułem matrycy detektorów IR, wykonanie korekcji niejednorodności detektorów matrycy, wyznaczenie wartości pikseli dla uszkodzonych detektorów, sterowanie wyświetlaniem obrazu termowizyjnego w ustalonym formacie. Ponadto system może zostać uzupełniony o algorytmy przetwarzania danych zależne od jego konkretnego zastosowania. System został tak zaprojektowany, że algorytmy przetwarzania danych niezbędne do konkretnego zastosowania mogą zostać zaimplementowane w systemie bez ingerencji w elementy sprzętowe.*

Słowa kluczowe: *termowizja, kamera termowizyjna, przetwarzanie obrazu*

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

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

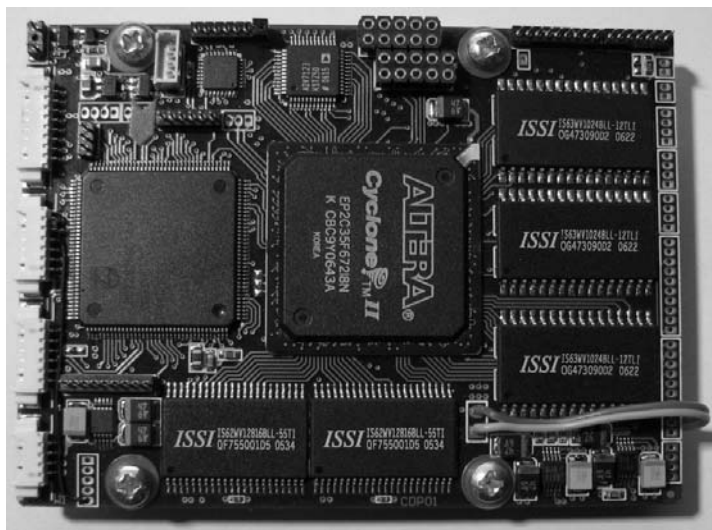
dr inż. Mariusz KASTEK
e-mail: mkastek@wat.edu.pl

Zakład Techniki Podczerwieni i Termowizji
Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 234, 2008

1. WSTĘP

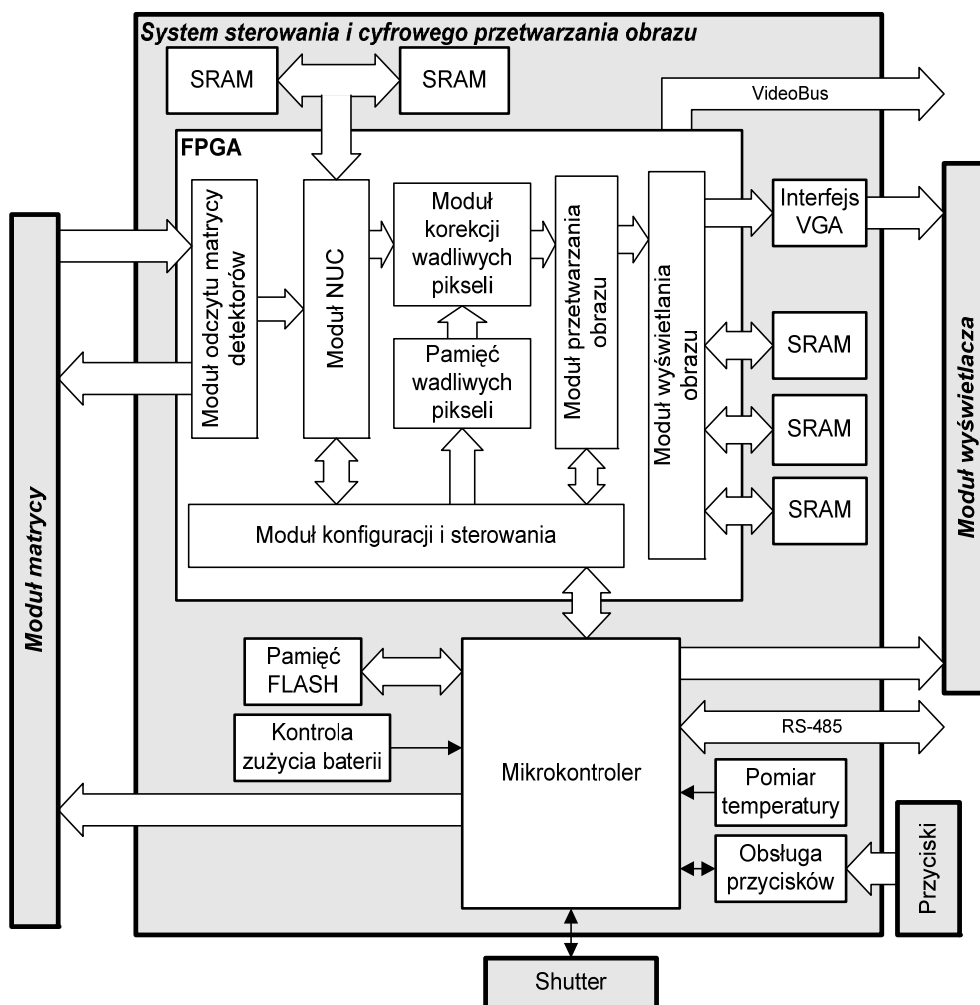
Coraz częściej kamery termowizyjne są stosowane jako urządzenia obserwacyjne w systemach ochrony, systemach militarnych, systemach rozpoznania i wykrywania skażeń itp. W tego typu systemach bardzo ważne jest takie przetworzenie informacji termowizyjnej, aby uzyskany obraz jak najwierniej odzwierciedlał obserwowaną sytuację. Powszechność stosowania kamer termowizyjnych jako urządzeń obserwacyjnych sprawia, że powinny być one jak najprostsze w obsłudze. Wynika z tego konieczność zastosowania w kamerach odpowiednich metod przetwarzania i analizy obrazu termowizyjnego [3]. Metody te pozwalają uprościć obsługę kamery poprzez automatyczne dobranie parametrów pracy kamery termowizyjnej. Zastosowane metody powinny także prowadzić do umożliwienia zastosowania kamery termowizyjnej nie tylko jako narzędzia wspomagającego obserwację, ale także do wykrywania i rozpoznawania pojawiających się obiektów i zjawisk [1, 3, 4, 9, 11]. Stosowane w danym urządzeniu metody przetwarzania informacji zależą od konkretnego zastosowania i od rodzaju analizowanej informacji, w związku z tym nie mogą one być uniwersalne ani wybrane raz



Rys. 1. Widok płytki systemu cyfrowego sterowania i przetwarzania obrazu

na zawsze [10, 12]. Ponadto najczęściej systemy realizujące automatyczne przetwarzanie i analizę obrazu muszą charakteryzować się względnie niewielkimi rozmiarami i małym poborem energii. W związku z powyższym kamery termowizyjne muszą być wyposażone w systemy realizujące zaawansowane funkcje sterowania i przetwarzania obrazu.

W artykule przedstawiono opracowany w Wojskowej Akademii Technicznej system cyfrowego sterowania i przetwarzania obrazu z mikrobolometrycznej matrycy detektorów podczerwieni cechujący się znaczną elastycznością stosowanych metod i algorytmów. Na rysunku 1 został przedstawiony widok płytki elektronicznej systemu cyfrowego sterowania i przetwarzania obrazu.



Rys. 2. Schemat funkcjonalny systemu cyfrowego sterowania i przetwarzania obrazu

Zaprojektowany system sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazu, ma za zadanie sterowanie wszystkimi układami kamery termowizyjnej oraz przetworzenie danych odebranych z matrycy bolometrycznej. Podstawowymi zadaniami, realizowanymi przez moduł sterowania i przetwarzania obrazu, są następujące czynności [10]:

- sterowanie układem matrycy w celu odczytania wartości wszystkich bolometrów,
- korekcja niejednorodności bolometrów matrycy,
- korekcja wartości wadliwych bolometrów,
- wygenerowanie danych dla modułu wyświetlacza.

System sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazu został zbudowany w oparciu o dwa podstawowe układy: układ programowalny i układ mikrokontrolerowy.

lera. Układ programowalny FPGA realizuje przetwarzanie danych obrazowych, które wymaga znacznych mocy obliczeniowych. Do podstawowych jego zadań należą: wygenerowanie sygnałów sterujących odczytem matrycy bolometrycznej, wykonanie korekcji niejednorodności 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 niedużym nakładem obliczeniowym. Schemat blokowy modułu sterowania i cyfrowego przetwarzania obrazu z układem FPGA został przedstawiony na rysunku 2.

2. SYSTEM MIKROPROCESOROWY

Jako układ mikroprocesorowy wybrany został mikrokontroler LPC2292 firmy PHILIPS, będący przedstawicielem rodziny 32-bitowych procesorów ARM 7.

Mikrokontroler LPC2292 jest oparty o 32-bitowe CPU typu ARM7TDMI-S z wbudowanym systemem obsługi pułapek i 256 kB wewnętrzną pamięcią FLASH. Mikrokontroler posiada 128-bitowy wewnętrzny interfejs pamięci oraz unikalną architekturę pozwalającą wykonywać 32-bitowy program z maksymalną szybkością. Dla aplikacji, w których krytycznym parametrem jest rozmiar kodu programu, można zastosować 16-bitowy tryb Thumb. Pozwala to zredukować o 30% rozmiar kodu programu przy nieznacznym obniżeniu wydajności procesora. Procesor cechuje się względnie niedużym poborem energii. Posiada bardzo rozbudowane zasoby peryferyjne takie jak: 10 – bitowy przetwornik, 32 układy czasowo-licznikowe (timer'y), interfejsy SPI, I2C, CAN i UART. Ponadto mikrokontroler LPC2292 posiada niezbędną liczbę portów ogólnego przeznaczenia (GPIO) oraz jest wyposażony w interfejs obsługi zewnętrznej pamięci.

Podstawowym zadaniem mikrokontrolera jest nadzorowanie na każdym etapie procesu przetwarzania obrazu. Ponadto układ mikroprocesorowy nadzoruje i steruje układami kamery. Do podstawowych zadań realizowanych przez mikrokontroler należą:

- sterowanie napięciami zasilania układu matrycy bolometrycznej,
- pomiar temperatury matrycy bolometrycznej,
- pomiar temperatury otoczenia, sterowanie przysłoną,
- sterowanie procesem autokalibracji,
- konfiguracja wyświetlacza OLED,

- modyfikacja (za pośrednictwem układu FPGA) parametrów NUC w pamięciach SRAM,
- wyznaczanie parametrów niezbędnych do korekcji współczynników NUC.

Układ FPGA został połączony z mikrokontrolerem za pomocą magistrali SystemBus. Magistrala SystemBus składa się z następujących sygnałów: 23 – bitowej magistrali adresowej, 16 – bitowej magistrali danych, 2 linii sygnalizacji przerwań, 5 linii ogólnego przeznaczenia, 2 linii sterowania pamięcią, 2 linii wyboru układu. Magistrala adresowa, magistrala danych oraz sygnały sterowania pamięcią i wyboru układu stanowią interfejs obsługi pamięci zewnętrznej mikroprocesora LPC2292. Linie sygnalizacji przerwań służą układowi FPGA do sygnalizowania mikroprocesorowi swojego stanu, zaś linie ogólnego przeznaczenia są to linie wyjściowe mikroprocesora służące do komunikacji z układem FPGA.

W celu testowania i zdalnego sterowania, kamera IR została wyposażona w interfejs RS-485. Komunikacja odbywa się zgodnie z opracowanym w WAT protokołem UPCD (Universal Protocol of Communication Devices) przystosowanym dla kamery IR. Protokół transmisji danych UPCD umożliwia komunikację pomiędzy urządzeniem MASTER (np. komputer) z urządzeniem SLAVE (kamera IR). Protokół komunikacyjny został zaimplementowany w kamerze IR jako program wykonywany przez procesor sterujący. Za pośrednictwem tego protokołu można wydawać kamerze szereg poleceń oraz odczytywać jej konfigurację. W szczególności dane na temat parametrów pracy matrycy mikrobolometrycznej (np. temperatury), czy odczytywanie i korygowanie parametrów NUC.

3. UKŁAD FPGA

W każdym systemie przetwarzania obrazu wideo mamy bardzo dużą liczbę danych, które należy przetworzyć w określonym czasie [10, 12]. Dane te należy przetwarzać na bieżąco (w czasie rzeczywistym) bez znacznych opóźnień. Należy zaznaczyć, że ze względu na ciągłość przetwarzania wprowadzane w systemie opóźnienia muszą mieć charakter stały tzn. nie mogą się kumulować w czasie. Oznacza to konieczność stosowania metod zrównoleglenia przeprowadzanych operacji obrazowych.

W związku z koniecznością uzyskania względnie dużej wydajności oraz zrównoleglenia operacji przetwarzania obrazu, do realizacji układu sterowania

odczytem matrycy mikrobolometrycznej został zastosowany układ FPGA EP2C35F672 firmy ALTERA. Układ ten zapewnia wymaganą wydajność przetwarzania z jednoczesnym względnie niewielkim zapotrzebowaniem energetycznym. Zastosowany układ posiada wymaganą liczbę końcówek (portów IO) oraz dostateczną liczbę elementów logicznych (LEs). Ponadto układ posiada następujące właściwości:

- 483 840 bitów pamięci RAM,
- cztery układy PLL umożliwiające wygenerowanie odpowiednich przebiegów czasowych,
- 35 wbudowanych układów mnożących (sprzętowych multiplikatorów).

Należy podkreślić istnienie sprzętowych multiplikatorów. Pozwalają one 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 niedużym poborze energii.

W układzie FPGA zaimplementowano następujące moduły służące do przetwarzania obrazu w czasie rzeczywistym:

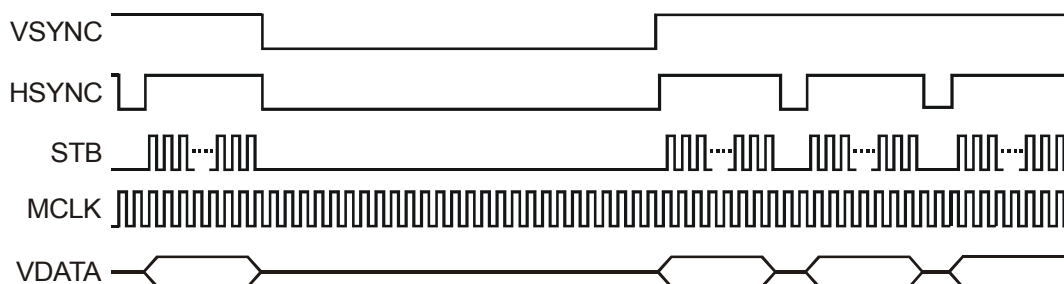
- moduł odczytu matrycy detektorów,
- moduł NUC,
- moduł korekcji wadliwych pikseli,
- moduł przetwarzania obrazu,
- moduł wyświetlania obrazu.

3.1. Magistrala VideoBus

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. Ponadto magistrala została wyprowadzona na specjalne złącze, dzięki któremu możliwe było przetestowanie działania modułu cyfrowego przetwarzania obrazu na każdym etapie przetwarzania.

Magistrala danych obrazowych składa się z 14-bitowej magistrali danych, sygnału synchronizacji pionowej (VSYNC) i poziomej (HSYNC) oraz sygnału stroboju (STB). Sygnał synchronizacji pionowej (VSYNC) przyjmuje poziom wysoki podczas przesyłania całej ramki obrazowej. Zaś sygnał synchronizacji poziomej (HSYNC) przyjmuje poziom wysoki podczas odczytu kolejnych

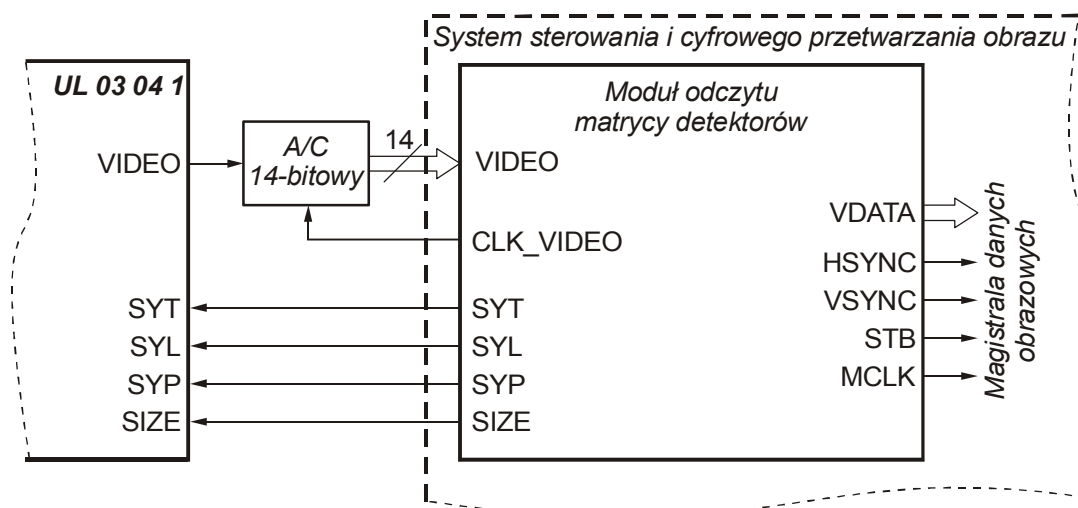
wierszy. Zmiana poziomu sygnału STB z niskiego na wysoki (zbrocze narastające) informuje, że na magistrali (VDATA) dane są gotowe (stabilne) do odebrania. Dane na magistrali VDATA są utrzymywane przez cały czas utrzymywania poziomu wysokiego sygnału STB. Przebiegi czasowe magistrali danych obrazowych VideoBus zostały przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Przebiegi magistrali danych obrazowych VideoBus

3.2. Moduł odczytu matrycy detektorów

Moduł odczytu detektorów został zrealizowany jako blok funkcjonalny w układzie FPGA. Schemat blokowy modułu został przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat działania modułu odczytu matrycy detektorów

Podstawowym zadaniem tego modułu jest wygenerowanie sygnałów sterujących układem matrycy mikrobolometrycznej w celu odczytania wartości

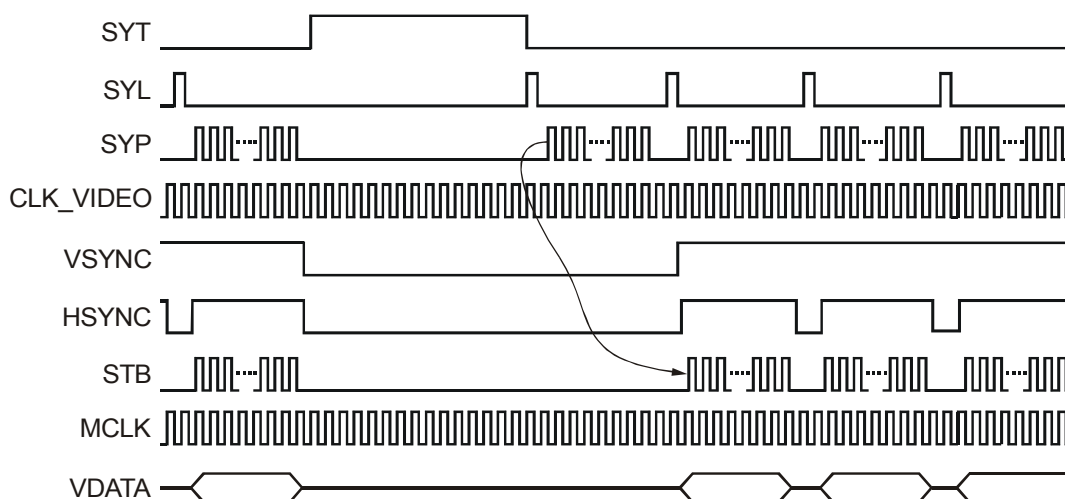
poszczególnych bolometrów. Są to następujące sygnały CLK_VIDEO, SIZE, SYT, SYL, SYP. W wyniku działania modułu zostaje odczytana wartość poszczególnych bolometrów matrycy a następnie wartość ta jest przekazywana do dalszego przetwarzania za pośrednictwem magistrali danych obrazowych [10].

Podstawowym zadaniem systemu sterowania i przetwarzania obrazu jest wygenerowanie sygnałów sterujących, które umożliwią odczytanie wartości dla wszystkich detektorów (pikseli) matrycy mikrobolometrycznej UL 03 04 1 firmy ULIS. W tym celu opracowano moduł odczytu matrycy detektorów, który generuje sygnały i podaje je na końcówki SYT, SYL oraz SYP matrycy. W wyniku odpowiedniej sekwencji sygnałów sterowania na wyjściu VIDEO matrycy detektorów pojawia się sygnał analogowy, który jest proporcjonalny do odbieranego przez dany detektor promieniowania podczerwonego. Niezbędne jest także odpowiednie ustawienie sygnału SIZE za pomocą, którego dokonuje się wyboru jednej z dwóch rozdzielczości pracy matrycy: 320×204 lub 384×288.

W celu odczytania sygnału z poszczególnych detektorów matrycy mikrobolometrycznej został zaprojektowany specjalny układ sterowania. Celem układu sterowania odczytem jest wyznaczenie dla każdego detektora matrycy mikrobolometrycznej cyfrowych wartości sygnału proporcjonalnego do padającego promieniowania podczerwonego. Dane odczytane z matrycy są przekazywane do następnych układów kamery termowizyjnej za pomocą magistrali danych obrazowych (VideoBus). Do przetwarzania danych obrazowych konieczna jest konwersja odczytanego (dla wszystkich z detektorów) sygnału analogowego (VIDEO) do postaci cyfrowej (DVIDEO). Konwersja sygnału została zrealizowana za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego, który wymaga podania sygnału zegarowego (CLK_VIDEO) wykorzystywanego do sterowania procesem przetwarzania analogowo-cyfrowego.

Z danych katalogowych parametrów czasowych sygnałów sterujących wynika, że można je wygenerować korzystając z jednego sygnału zegarowego o okresie równym TSYP. W związku z tym do wygenerowania sygnałów sterujących został zastosowany automat zawierający pięć stanów, który wykorzystuje dane z dwóch synchronicznych liczników. Pierwszy licznik służy do wyznaczenia stanów występujących w sygnale SYT i zlicza cykle zegarowe w czasie odczytu całego obrazu. Zaś drugi licznik jest związany z wyznaczeniem stanów dla sygnałów SYL i SYP i odlicza cykle w czasie odczytu jednego wiersza obrazu. Na podstawie sygnałów SYT, SYL oraz SYP są jednocześnie generowane sygnały magistrali danych obrazowych: VSYNC, HSYNC, STD, MCLK, VDATA. Ze względu na sposób działania matrycy mikrobolometrycznej UL 03 04 1 sygnały magistrali danych są opóźnione o czas odczytu jednego wiersza. Dzieje się tak dlatego, że na początku operacji odczytywania każdego obrazu najpierw jest wykonywana operacja całkowania sygnału z poszczególnych detektorów pierwszego wiersza. Następnie, gdy pierwszy wiersz jest

odczytywany to jest dokonywane całkowanie sygnału dla detektorów drugiego wiersza itd. W związku z tym liczba generowanych sygnałów dla odczytu wiersza jest o jeden większa niż wynosi faktyczna liczba wierszy występująca w macy. Przebiegi czasowe generowanych sygnałów przedstawiono na rysunku 5.



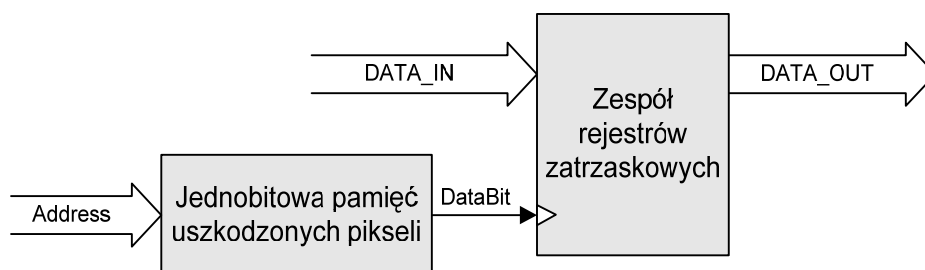
Rys. 5. Przebiegi czasowe sygnałów sterujących matrycą mikrobolometryczną UL 03 04 1 firmy ULIS

Zastosowany w systemie odczytu matrycy przetwornik analogowo-cyfrowy AD9240 firmy ANALOG DEVICES posiada tzw. czas opóźnienia (Latency) odczytu danych, który wynosi trzy cykle zegarowe. Oznacza to, że wynik konwersji sygnału analogowego na postać cyfrową jest dostępny dopiero po wyzwoleniu czwartego pomiaru (narastającym zboczem sygnału zegarowego). Ponadto od wystąpienia narastającego zbocza sygnału zegarowego do pojawienia się danych (opóźnionych o trzy cykle) na wyjściu przetwornika mija czas sięgający 19 ns (delay output). W związku z tym przepisywanie danych z wyjść przetwornika (DVIDEO) na wyjście magistrali (VDATA) zostało opóźnione o cztery cykle zegarowe oraz jest wyzwalane opadającym zboczem sygnału zegarowego. Następnie przy narastającym zboczach sygnału zegarowego jest generowane narastające zbocze sygnału STB.

3.3. Moduł korekcji wadliwych pikseli

W praktyce w każdej matrycy detektorów występują bolometry, które działają w sposób niewłaściwy. W związku z tym ważnym problemem jest korekcja wadliwych pikseli. Na etapie kalibracji kamery IR określane jest, które

z bolometrów zwracają niewłaściwe wartości. Na tej podstawie jest wyznaczana zawartość jednobitowej pamięci uszkodzonych pikseli. W pamięci tej każdy bit odpowiada jednemu pikselowi (bolometrowi) obrazu. Jeśli dany bolometr jest uszkodzony (należy skorygować jego wartość) wówczas odpowiedni bit pamięci ma wartość 1. W przypadku gdy piksel nie wymaga korygowania wartość bitu pamięci wynosi 0. Na podstawie zawartości pamięci uszkodzonych pikseli jest podejmowana decyzja czy wartość odczytana z bolometru zostanie wyświetlona. W przypadku napotkania na uszkodzony piksel (bolometr) wyświetlana jest poprzednia wartość. Uproszczony schemat działania modułu korekcji wadliwych pikseli został przedstawiony na rysunku 6.

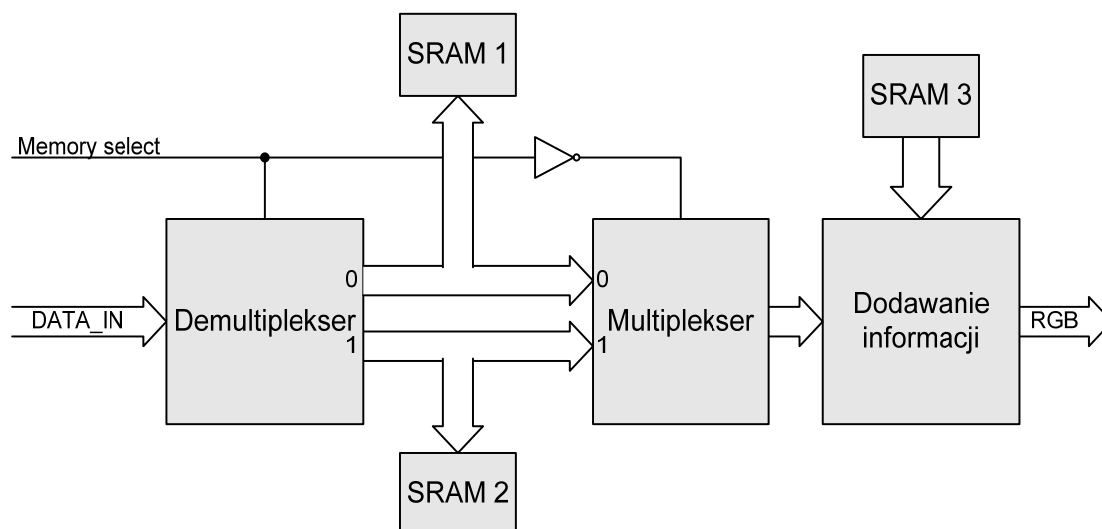


Rys. 6. Schemat działania modułu korekcji wadliwych pikseli

3.4. Moduł wyświetlania obrazu

Jednym z problemów występującym w cyfrowym przetwarzaniu danych jest przypadek, gdy częstotliwość odczytywania danych z matrycy jest inna niż częstotliwość wyświetlania. Przy czym w kamerach termowizyjnych najczęściej częstotliwość wyświetlania jest wyższa niż częstotliwość odczytywania danych z matrycy. Powyższe zjawisko wymagało zastosowania specjalnego modułu, którego uproszczony schemat działania został przedstawiony na rysunku 7.

Moduł wyświetlania korzysta z dwóch pamięci SRAM 1 i SRAM 2. Do jednej z tych pamięci (np. SRAM 1) zapisywane są kolejne piksele odczytywane matrycy mikrobolometrycznej. W tym czasie z drugiej pamięci (np. SRAM 2) odczytywane są dane do wyświetlenia. W przypadku, gdy z matrycy bolometrycznej zostanie odczytany cały obraz, wówczas za pomocą sygnału Memory select jest zmieniana rola jaką pełnią pamięci SRAM 1 i SRAM 2. Z pamięci (np. SRAM 1), do której poprzednio zapisywano dane z matrycy są odczytywane dane do wyświetlenia. Zaś do pamięci (np. SRAM 2), z której odczytywano dane do wyświetlenia są zapisywane dane z matrycy.



Rys. 7. Schemat działania modułu wyświetlania danych obrazowych oraz dodawania informacji do strumienia wideo

Inną funkcją pełnioną przez moduł wyświetlania jest dodawanie informacji do niezależnego strumienia wideo. Dodanie informacji do sygnału wideo ma na celu zaimplementowanie interfejsu użytkownika, a także wyświetlenie na ekranie takich elementów jak np. wskaźnik zużycia baterii.

Zaprojektowany moduł wyświetlania zawiera także sterownik VGA, który jest układem dostarczającym sygnały sterujące pracą monitora.

3.5. Moduł korekcji NUC w układzie FPGA

Matryca detektorów mikrobolometrycznych charakteryzuje się pewną niejednorodnością odpowiedzi poszczególnych detektorów dla takiej samej mocy padającego promieniowania podczerwonego (IR) [2, 6, 8, 13, 14]. Efektem niejednorodności jest występowanie w obrazie generowanym przez matrycę tzw. stałego wzoru szumu FPN (fixed pattern noise) i w rezultacie pogorszenie wartości przestrzennej rozdzielczości temperaturowej spacial NETD kamery termowizyjnej. Typowa wartość niejednorodności odpowiedzi dla matryc mikrobolometrycznych wynosi 8-10% (std/mean).

W celu kompensacji niejednorodności odpowiedzi matrycy detektorów IR stosuje się różne metody korekcji NUC (nonuniformity correction). Najczęściej są stosowane metody polegające na cyfrowym przetwarzaniu sygnału generowanego przez matrycę. Odpowiednie dane do korekcji tzw. współczynniki NUC są wyznaczone podczas kalibracji kamery z użyciem źródeł jednorodnego promieniowania IR.

Podstawową metodą korekcji NUC jest korekcja dwupunktowa TPC (two-point correction). Algorytm TPC jest realizowany według następującej formuły [8, 14]

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

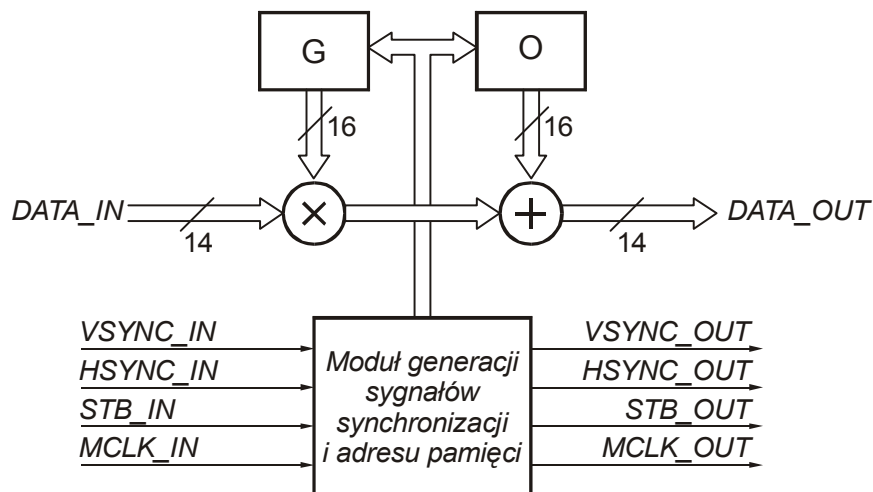
gdzie N_{ij} jest wartością cyfrową odpowiedzi detektora o współrzędnych (i, j) , G_{ij} i O_{ij} są współczynnikami korekcji nachylenia (gain) i przesunięcia (offset) charakterystyki detektora, a N_{ij}^* jest wartością odpowiedzi detektora po korekcji.

Współczynniki NUC dla korekcji TPC są określone wyrażeniami [8, 14]:

$$G_{ij} = \frac{N(T_H) - N(T_L)}{N_{ij}(T_H) - N_{ij}(T_L)}$$

$$O_{ij} = \frac{N(T_L)N_{ij}(T_H) - N(T_H)N_{ij}(T_L)}{N_{ij}(T_H) - N_{ij}(T_L)}, \quad (2)$$

gdzie $N_{ij}(T_H)$ i $N_{ij}(T_L)$ są wartościami cyfrowymi odpowiedzi detektorów dla wysokiej (T_H) i niskiej (T_L) temperatury źródła jednorodnego promieniowania IR, $N(T_H)$ i $N(T_L)$ są wartościami średnimi odpowiedzi detektorów w macyry dla temperatury T_H i T_L .



Rys. 8. Schemat blokowy realizacji sprzętowej korekcji NUC

Na podstawie przeprowadzonej analizy i wykonanych symulacji określono, że dane obrazowe są 14-bitowe (rozdzielczość przetwornika ADC), a współ-

czynniki NUC są 16-bitowe [5, 7, 8]. Ponadto z równania (1) wynika, że układ cyfrowy realizujący algorytm TPC musi wykonać jedną operację mnożenia i jedną operację dodawania. W takim wypadku, gdy operacje arytmetyczne są wykonywane na liczbach stałoprzecinkowych, to w celu zwiększenia dokładności obliczeń (wyniku korekcji) współczynniki NUC powinny być odpowiednio przeskalowane. Na rysunku 8 jest pokazany schemat blokowy realizacji sprzętowej algorytmu dwupunktowej korekcji NUC.

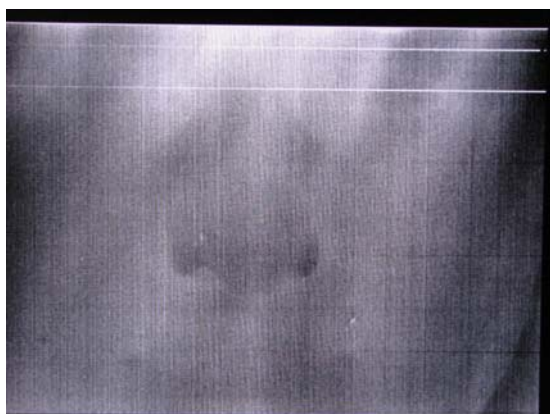
Korekcja niejednorodności jest realizowana „na bieżąco” tzn. czas wykonania wymaganych obliczeń jest krótszy niż czas odczytu sygnału z pojedynczego mikrobolometru w matrycy. Ponadto sygnały wejściowe i wyjściowe dla modułu NUC są zgodne z magistralą danych obrazowych VideoBus.

Na podstawie powyższych wymagań został zaprojektowany moduł korekcji NUC, który realizuje algorytm TPC, generuje sygnały wyjściowe dla magistrali VideoBus oraz adres dla pamięci SRAM, w których zapisane są współczynniki korekcyjne.

Moduł korekcji NUC został opisany w języku VHDL jako jednostka (entity) parametryzowana. Projektant w zależności od potrzeb może zmienić takie parametry jak liczba wierszy i kolumn matrycy, długość słowa danych i długość słowa współczynników. W ten sposób moduł NUC może być użyty w projekcie układu odczytu dla dowolnej matrycy detektorów podczerwieni.

Na rysunku 9 zostały przedstawione dwa obrazy termowizyjne. Jeden bez korekcji NUC i drugi po przeprowadzeniu korekcji NUC za pomocą opracowanego modułu korekcji niejednorodności.

a)



b)



Rys. 9. Obraz uzyskiwany z kamery termowizyjnej przed (a) i po (b) zastosowaniu korekcji NUC

4. WNIOSKI

Wykonane badania symulacyjne oraz przeprowadzone na stanowisku badawczym badania laboratoryjne [2, 5] z wykorzystaniem analizatora stanów logicznych potwierdzają prawidłowe działanie systemu sterowania i przetwarzania obrazu. Parametry czasowe przebiegów symulowanych są zgodne z parametrami dynamicznymi określonymi w danych technicznych dotyczących sterowania układem odczytu matrycy mikrobolometrycznej.

Wykonano również analizę parametrów czasowych dla poszczególnych modułów w układzie FPGA dla najgorszego przypadku (worst case). Z analizy parametrów czasowych (timing analyzer summary) wynika, że maksymalny czas opóźnienia elementów kombinacyjnych w układzie wynosi 5,548 ns, a maksymalna częstotliwość sygnału zegarowego magistrali VideoBus wynosi 68,1 MHz. Wynika z tego, że opracowany system spełnia wymagania projektowe z nadmiarem, ponieważ częstotliwość sygnałów magistrali VideoBus w projektowanym układzie odczytu do matrycy mikrobolometrycznej wynosi 6,25 MHz.

Dodatkowym atutem zaprojektowanego systemu jest jego elastyczność polegająca na możliwości zmiany realizowanych funkcji i algorytmów bez konieczności zmian sprzętowych. Ponadto moduły układu FPGA opisano przy użyciu standardowego języka opisu sprzętu VHDL. Oznacza to, że mogą one być implementowane w dowolnej strukturze programowalnej.

LITERATURA

1. Kastek M., Madura H., Sosnowski T., Polakowski H.: Thermovision method of gas detection in far infrared range, *Advanced Infrared Technology and Applications AITA 9*, Leon (8-12.10.2007)
2. Kastek M., Orzanowski T., Sosnowski T., Bareła J.: Test stand for determination of NUC parameters for infrared detector arrays, *Advanced Infrared Technology and Applications AITA 9*, Leon (8-12.10.2007)
3. Madura H.: Method of signal processing in passive infrared detectors for security systems, *Computational Methods and Experimental Measurements*, Wydawnictwo WITPress, Southampton, Boston, UK, str. 757-768, 2007
4. Madura H., Dąbrowski M., Sosnowski T., Trzaskawka P.: Method of automatic recognition of objects flying at low altitudes, *Advanced Infrared Technology and Applications AITA 9*, Leon (8-12.10.2007)
5. Orzanowski T., Madura H., Sosnowski T.: Symulacja sprzętowa algorytmów korekcji niejednorodności matryc detektorów podczerwieni, VII Krajowa Konferencja Termografia i Termometria w Podczerwieni TTP2006, 16-18.11.2006 Ustroń-Jaszowiec, 6 str. (211÷215)

6. Orzanowski T., Madura H., Powiada E., Pasierbiński J.: Analiza układu odczytu do matrycy detektorów mikrobolometrycznych. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, nr 9, str. 16-20, (2006)
7. Orzanowski T., Sosnowski T.: Implementacja algorytmów korekcji niejednorodności matrycy detektorów mikrobolometrycznych w układzie FPGA, *Pomiary Automatyka Kontrola* Nr 11, 2006, (8÷11)
8. Orzanowski T., Madura H., Kastek M., Sosnowski T.: Nonuniformity correction algorithm for microbolometer infrared focal plane array, *Advanced Infrared Technology and Applications AITA 9, Leon* (8-12.10.2007)
9. Sosnowski T., Orzanowski T., Kastek M., Madura H.: Hardware implementation of object detection algorithms in thermovision observation systems, *Advanced Infrared Technology and Applications AITA 9, Leon* (8-12.10.2007)
10. Sosnowski T., Orzanowski T., Kastek M., Chmielewski K.: Digital image processing system for thermal cameras, *Advanced Infrared Technology and Applications AITA 9, Leon* (8-12.10.2007)
11. Sosnowski T., Bieszczad G.: Rozpoznawanie obiektów na podstawie analizy obrazu termowizyjnego, VII Krajowa Konferencja Termografia i Termometria w Podczzerwieni TTP2006, 16-18.11.2006 Ustroń-Jaszowiec, 6 str. (205÷210)
12. Wiatr K.: Akceleracja obliczeń w systemach wizyjnych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003
13. Venkateswarlu R., Gan M.H. Er, Y.H., Fong Y.C.: Nonuniformity compensation for IR focal plane array sensors, *Proc. SPIE*, Vol. 3061, 1997, pp. 915-926.
14. Zhou B., Wang Y., Ye Y., Wu X., Ying J.: Realize multi-point method for real-time correction of nonuniformity of uncooled IRFPA, *Proc. SPIE*, Vol. 5640, 2005, pp. 368-375.

Rękopis dostarczono, dnia 10.04.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Władysław Dybczyński

DIGITAL CONTROL SYSTEM
AND IMAGE PROCESSING FOR MICROBOLOMETER
INFRARED FOCAL PLANE ARRAY

Tomasz SOSNOWSKI, Tomasz ORŻANOWSKI,
Mariusz KASTEK

ABSTRACT *A digital system for control and thermal image processing which has high flexibility regarding implemented methods and algorithms is presented. The designed system performs many actions: control signal readout from infrared focal plane array, nonuniformity correction of detectors response in array, bad pixels replacement, and producing thermal image in required format for the display. Moreover, other digital signal processing algorithms can be implemented in this system depending on the application. The algorithm implementation is made without any change in hardware.*



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. Autor i współautor ponad 35 publikacji.

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.



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. Autor i współautor ponad 30 publikacji. Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Optoelektroniki WAT.