

Wojciech PÓLCHŁOPEK, Roman RUMIANKATEDRA ELEKTRONIKI, AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA,
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków**Układ kompresji z dopasowaną transformacją falkową podwójnej gęstości dla detektora cząstek**

Dr inż. Wojciech PÓLCHŁOPEK

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH, obronił z wyróżnieniem pracę doktorską w 2007r. Jest adiunktem w Katedrze Elektroniki. Jego zainteresowania naukowe to algorytmy przetwarzania sygnałów cyfrowych w systemach audio, systemy przetwarzania sygnałów audio, systemy elektroakustyczne oraz systemy pomiarowe z wbudowanym przetwarzaniem sygnałów.



e-mail: ph@agh.edu.pl

Dr inż. Roman RUMIAN

Adiunkt w Katedrze Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Specjalista z zakresu systemów mikroprocesorowych, architektury komputerów i zastosowania procesorów sygnałowych w przetwarzaniu sygnałów akustycznych i medycynie.



e-mail: rumian@agh.edu.pl

Streszczenie

Artykuł prezentuje projekt nowego procesora Podwójnej Gęstości Dyskretnej Transformacji Falkowej (ang. DDWT) z użyciem filtra dopasowanego i ekstrakcją ROI (ang. ROI – region of interest). Układ zbudowano w celu detekcji cząstek elementarnych w eksperymencie ICARUS (ang. Imaging Cosmic And Rare Underground Signals). Układ wyszukujący ROI zaprojektowany jest w oparciu o analizę szumową i filtrację dopasowaną Wienera oraz DDWT, w celu efektywnej implementacji. Dla poprawienia jakości detekcji wykorzystuje również filtry niedopasowane będące sąsiednimi poziomami DDWT. Zaimplementowano w pełni 32-kanalowy (o przepływności 160Mbps) procesor w tanim układzie FPGA dzięki zaletom szybkiej, stałoprzecinkowej transformacji falkowej (FIAWT) [9].

Słowa kluczowe: detekcja sygnału, algorytmy przetwarzania sygnałów, filtry Wienera, transformacje spektralne, systemy czasu dyskretnego.

Matched DDWT ROI compression engine for the imaging particle detector**Abstract**

A new multirate DDWT (Double Density Wavelet Transform) matched filter ROI (region of interest) processor for the ICARUS (Imaging Cosmic And Rare Underground Signals) particle detector [1] has been designed. The ROI extraction engine is based on matched and unmatched Wiener filtering using coupled DWT and DDWT processing. High throughput image-like ICARUS detector data (160Mbps data rate per crate) is able to be compressed 600 times using multi-stage compression with ROI extraction. The 32-channel (160Mbps data rate) processor has been fully implemented in a low cost FPGA device thanks to Fast Integer Arithmetic Wavelet Transform (FIAWT) [9] algorithm implementation. The paper presents analysis of the ICARUS detector signal and noise using Wiener optimal filtering (Sections 1 and 2) [5, 10]. The main part of the paper deals with a new concept of detection scheme using the Wiener matched filter in multirate DDWT implementation instead of useless in the real-time CWT detection [4] (Sections 3 and 4). The ROI compression results and false detection ratio are given in Table 1 and Section 5. FPGA implementation summary of the ROI extraction engine (Section 6), the block diagram of the ROI processor (Fig. 4) and conclusions (Section 7) are also included.

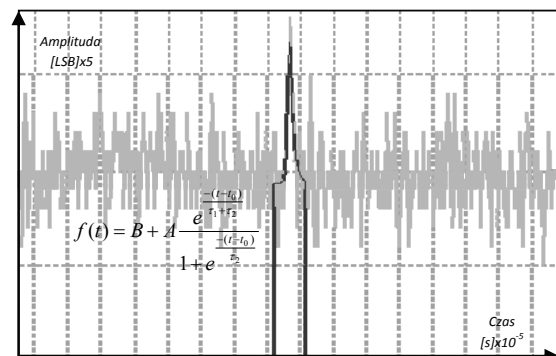
Keywords: signal detection, signal processing algorithms, Wiener filters, spectral transformations, real-time systems.

1. Wstęp

Detektor cząstek ICARUS T600 [1, 2] jest dużą, podwójną elektroniczną komorą pęcherzykową (każda wypełniona 300 tonami ciekłego Argonu) dostarczającą kilka gigabajtów danych na sekundę. Sygnały detektora mają niski stosunek sygnał/szum wynikający z jego zasady działania. Ciekły Argon jonizują głównie niskoenergetyczne cząstki tworząc ładunek zgromadzony w dużej objętości komór przy stałym polu elektrycznym – jony zbierane są w elektrodach tzw. warstwy „collection”. Istotne i interesujące dane będące śladami cząstek stanowią zaledwie

0.5% objętości zbieranych informacji. Typowy sygnał z detektora o małej amplitudzie przedstawia rysunek 1 – sygnał ten dobrze aproksymuje funkcja o pięciu parametrach [1]:

$$f(t) = B + A \frac{e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_1 + \tau_2}}}{1 + e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_2}}} \quad (1.1)$$



Rys. 1. Typowy sygnał z detektora ICARUS i dopasowana funkcja (1.1)
Fig. 1. Typical signal from ICARUS detector and fitted signal

Układ detekcji sygnałów DAEDALUS [3], pracujący w dziedzinie czasu, został zaprojektowany dla sygnałów o parametrze SNR powyżej 20dB i nie był zdolny do detekcji zasumionych (blisko 0dB SNR) sygnałów 600-tonowego modułu ICARUS (został zbudowany dla wczesnego prototypu 50l). Z uwagi na to opracowano detektor czasowo-częstotliwościowy o rozdzielczości czasowej (współczynnika decymacji) 32 okresów próbkowania, z uwagi na szerokość okna ROI wynoszącej 64 okresów próbkowania.

2. Analiza sygnałów i szumów detektora T600 (rozwiązanie Wienera)

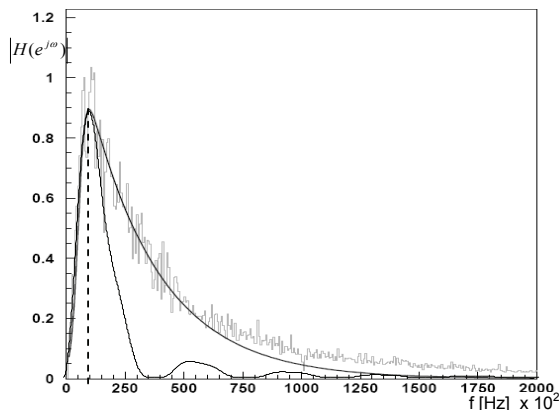
Testy detektora ICARUS wykazały znacznie niższy od spodziewanego stosunek sygnału do szumu oraz obecność wielu, stacjonarnych i niestacjonarnych szumów i interferencji. Wyniki analizy szumowej zaprezentowanej w [4] pokazano na rysunku 2 (pierwiastek funkcji widmowej gęstości mocy sygnałów został uzyskany poprzez dopasowanie pierwiastka funkcji (2.2) do widma amplitudowego $H(f)$ (2.1) danych poniżej).

Analiza prowadzi do statystycznie optymalnego rozwiązania Wienera korzystającego z funkcji PSD sygnałów $S_s(f)$ i szumów $S_n(f)$ [5]:

$$|H(f)|^2 = \frac{S_s(f)}{S_s(f) + S_n(f)} \quad (2.1)$$

co można dobrze przybliżyć wykładniczą funkcją o trzech parametrach [4]:

$$|H_{fit}(f)|^2 = \left(\frac{1}{1 + e^{\frac{f-b}{a}}} e^{\frac{f}{c}} \right)^2 \quad (2.2)$$



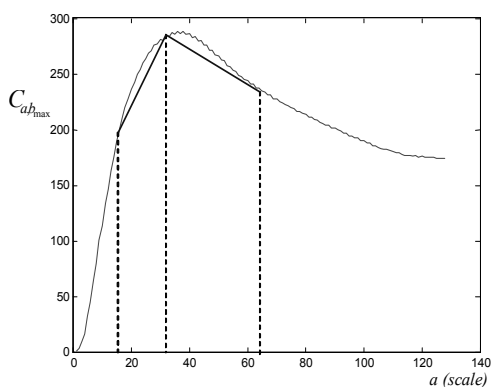
Rys. 2. Widmo amplitudowe filtru Wienera dla sygnałów z detektora ICARUS zgodnie z (2.1), z dopasowaniem funkcją $H_{fit}(f)$ [4] oraz widmo amplitudowe falki CDF(2,2) (skala 32)

Fig. 2. Wiener filter frequency response for ICARUS signals (Eq. 2.1), fitted with function $H_{fit}(f)$ [4] and CDF(2,2) synthesis wavelet (scale 32) amplitude spectrum

Wykorzystana w analizie wykładnicza funkcja aproksymująca (2.1) została wybrana ze względu na podobieństwo jej widma do widma falki CDF [6]. Funkcja $H_{fit}(f)$ o parametrach $a=0.33 \cdot b$; $c=2.5 \cdot b$ dobrze aproksymuje widmo CDF(2,2) w istotnym zakresie częstotliwości (do 100kHz - rysunek 2). Dla zapewnienia precyzyjnej detekcji czasu wystąpienia sygnału konieczne jest zastosowanie filtrów o liniowej fazie, co dodatkowo uzasadnia użycie biortogonalnej transformaty falkowej CDF.

3. Falkowy schemat detekcji sygnałów

Procedura detekcji opisana w [4], wykorzystująca ciągłą transformatę falkową, może być wykorzystana dla sygnałów z detektora ICARUS.



Rys. 3. Maksimum (b_{max}) współczynników CWT

Fig. 3. Maximum (b_{max}) coefficients of CWT

Wyszukiwane są lokalne maksima ciągłej transformaty falkowej sygnału:

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3.1)$$

a indeks maksimum b_{max} daje jednowymiarową funkcję (rys. 3) z tym indeksem jako parametrem. Kształt tej funkcji jest następnie sprawdzany pod kątem korelacji z sygnałem bez szumu.

Procedura ta korzysta z CWT, która jest skomplikowana obliczeniowo, a więc niemożliwa do implementacji w czasie rzeczywistym w systemie akwizycji ICARUS. Należy dodać, że falki biortogonalne, z uwagi na liniową fazę filtrów dekompozycji, są najodpowiedniejsze do precyzyjnej detekcji sygnałów.

4. Detekcja DDWT oparta na filtrach rozwiązania Wienera

Rozwiązanie działające w czasie rzeczywistym możliwe jest przy aproksymacji CWT opartej na DDWT. Kształt funkcji $C_{a,b_{max}}$ redukowany jest do trzypunktowej aproksymacji DWT (dla lepszej rozdzielczości czasowej wykorzystywana jest DDWT). Aproksymacja CWT wykorzystująca DDWT jest efektywna pod warunkiem dopasowania filtru środkowego (skala 32 - rys. 2 i 3) do optymalnego filtru Wienera, a pozostałe dwa filtry (skala 16 i 64 - rys. 3) pracują bez dopasowania. Takie rozwiązanie wymaga sześciu stopni dekompozycji DDWT zaimplementowanej w formie algorytmu a'trous DDWT FIAWT [7, 8, 9]. Sygnał z wyjścia dopasowanego filtru jest następnie sprawdzany w procedurze nadprogowej. Sygnały z wyjść niedopasowanych filtrów DDWT porównywane są z dynamicznymi progami (ich amplituda musi być mniejsza od sygnału z wyjścia dopasowanego filtru).

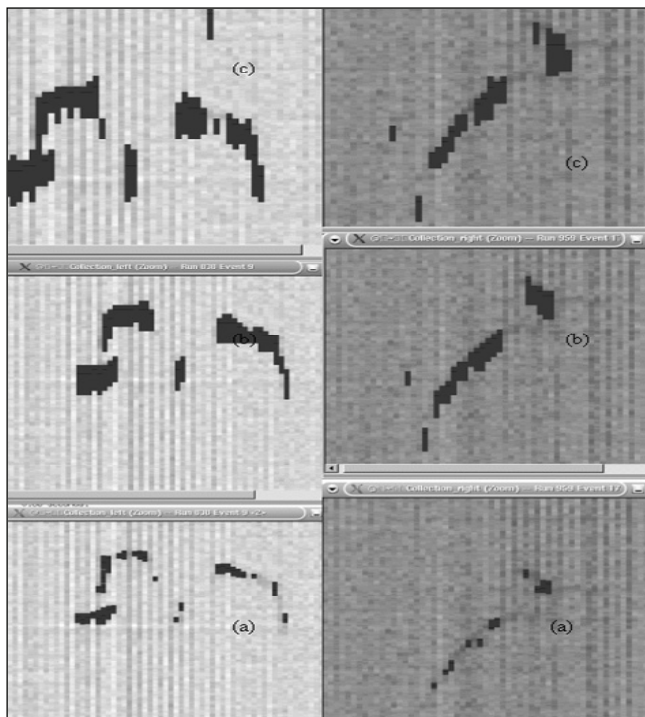
5. Kodowanie ROI i kompresja wyników

Wyniki kompresji zostały wyliczone programem Qscan napisanym w języku C++, służącym do analizy danych i kompresji z interfejsem ekstrakcji ROI. Program ten został zaprojektowany dla przetwarzania plików z surowymi danymi ICARUS-a.

Końcowe wyniki ekstrakcji ROI wraz z kompresją zamieszczone są w tabeli 1. Procedura DDWT z dopasowaniem filtru wykazuje wysoką odporność na szum i niski stopień fałszywych detekcji. Dwuwymiarowe obrazy (rys. 4) pokazują czułość algorytmu na sygnały o niskich amplitudach i SNR (0dB i mniej), oraz potwierdzają skuteczność algorytmu DDWT z dopasowaniem filtru.

Tab. 1. Porównanie wyników ekstrakcji ROI i kompresji
Tab. 1. Comparison of ROI extraction and compression results

	Analiza czasowa DAEDALUS	DDWT filtry niedopasowane	DDWT filtry dopasowane
Ilość wykrytych bloków ROI (komora lewa - niski SNR)	16017,15	5526,83	5918,07
Ilość wykrytych bloków ROI (komora prawa - lepszy SNR)	5257,55	4768,64	5885,82
Współczynnik kompresji dla okna ROI o długości 64 próbki	34,46	71,21	62,11
Współczynnik kompresji przy bezstratnej falkowej kompresji FIAWT [11,12]	172	356	310
Współczynnik kompresji przy wysokiej jakości stratnej falkowej kompresji FIAWT [11,12]	344	712	620
Detekcje błędne z uwagi na szumy	67,18%	13,72%	0,54%

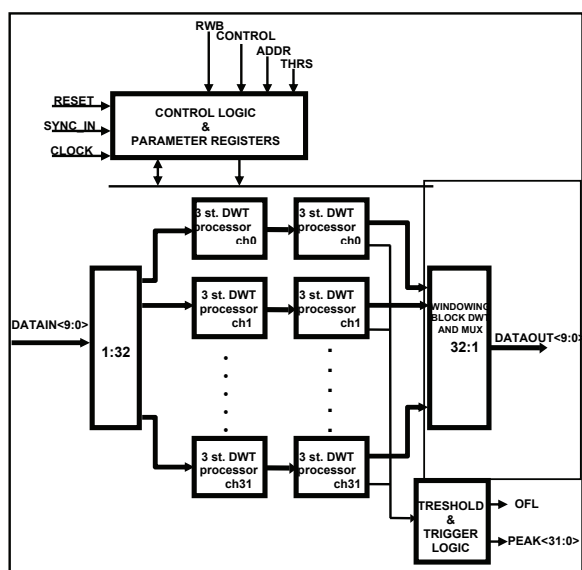


Rys. 4. Wyniki rozpoznawania sygnału (wyzwalanie ekstrakcją ROI): algorytm działający w dziedzinie czasu (a), algorytm DDWT z dopasowaniem filtrów (b), algorytm DDWT (bez dopasowania filtrów)(c)

Fig. 4. Signal recognition (ROI extraction trigger) results: time domain algorithm (a), DDWT matched filters algorithm (b) and DDWT algorithm (filters not matched) (c)

6. Implementacja sprzętowa

Aplikacja ekstrakcji ROI pracująca w czasie rzeczywistym opiera się na algorytmach DWT i DDWT (odwrotna CDF(2,2)) oraz bloku porównania z progiem. Implementacja wykorzystuje nadpróbkowaną FIAWT [9] (zgodnie z algorytmem a'trous). Moduły DWT i DDWT działają synchronicznie korzystając z pełnej implementacji algorytmu FIAWT [9, 10]. Procesor DDWT ROI realizujący opisane algorytmy zaimplementowano układzie FPGA – Xilinx XC3S1500FG456-4 (speed grade 4 - 3,328CLBs).



Rys. 5. Schemat blokowy Modułu FPGA THESEUS

Fig. 5. Block diagram of THESEUS FPGA module

Ostateczny projekt FPGA (o roboczej nazwie THESEUS) składa się z trzech stopni DWT (CDF (2,2)) i trzech uproszczonych DDWT (CDF (2,2)) służących do analizy danych w każdym z 32 kanałów próbkowanych z częstotliwością 2,5MHz. Każdy stopień DWT wykorzystuje 54 bloki podstawowe FPGA (tzw. ang. slices) i może pracować z częstotliwością taktowania do 50 MHz.

Schemat modułu THESEUS pokazany jest na rysunku 5.

7. Wnioski

Nowy, całkowitoliczbowy algorytm ekstrakcji ROI i kompresji w oparciu o dopasowaną DDWT z użyciem szybkiej aplikacji FIAWT jest odpowiedni do zastosowań w systemach czasu rzeczywistego akwizycji i selekcji danych. Najważniejszą cechą proponowanej koncepcji jest możliwość prostej i szybkiej aplikacji w układzie FPGA lub ASIC. Kompresja on-line była dotychczas stosowana w części systemu akwizycji wyłącznie w celach testowych.

Specjalne podziękowania autorzy kierują do współpracującej w eksperymencie ICARUS grupy z Padwy (Wydział Fizyki Uniwersytetu w Padwie) i polskiej grupy ICARUS, a w szczególności do prof. Agnieszki Zalewskiej (IFJ, Kraków).

8. Literatura

- [1] Amerio S., [et al.], Pólchłopek W., [et al.], (ICARUS Collaboration): Design, construction and tests of the ICARUS T600 detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume: 527, Issue: 3, July 21, pp. 329-410, ELSEVIER SCIENCE 2004.
- [2] Ankowski A., [et al.], W. Pólchłopek, [et al.](ICARUS Collaboration): Energy reconstruction of electromagnetic showers from π^0 decays with the ICARUS T600 Liquid Argon TPC. Acta Physica Polonica B; ISSN 0587-4254. —2010 vol. 41 nr 1 s. 103–125, Institute of Physics, Jagellonian University 2010.
- [3] Arneodo F., Benetti [et. al.] (ICARUS Collaboration): Performance evaluation of a hit finding algorithm for the ICARUS detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume: 412, Issue: 2-3, August 1, pp. 440-453, ELSEVIER SCIENCE 1998.
- [4] Gibin D.: Wire signals: a first look for their usage in a local trigger. ICARUS Granada Meeting internal note, 2003.
- [5] Wiener N.: Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. The Technology Press and Wiley 1950.
- [6] Cohen A., Daubechies I., Feauveau J.C.: Biorthogonal bases of compactly supported wavelets”, Commun. on Pure and Appl. Math., vol. 45, pp. 485–560, John Wiley & Sons, Inc. 1992.
- [7] Pólchłopek W., Ziólko M.: Wavelet Transform Compression and Denoising in Real-Time System. Proceedings of CNDSP Conference, Stafford, pp. 141-148, 2002.
- [8] Pólchłopek W., Ventura S., Pietropaolo F.: Wavelet Transform Compression and Denoising in Real-Time System (Proposal for the ICARUS DAQ System). ICARUS TM2002/12, Padova - ICARUS collaboration internal note: for pdf copy write to author, 2002.
- [9] Pólchłopek W., Maj W., Padee W.: Fast Integer Arithmetic Wavelet Transform. Properties and Application in FPGA/DSP System. Proceedings of EUSIPCO 2006 Conference, Florence 2006.
- [10] Batko W., Mikulski A.: Wavelet Transform of Impulse Signals. Machine Dynamics Problems, vol. 23, no. 2, pp. 139-146, Warsaw University of Technology 1999.
- [11] Pólchłopek W.: Falkowe techniki przetwarzania sygnałów dyskretnych w systemach czasu rzeczywistego. rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2006.

otrzymano / received: 15.10.2010

przyjęto do druku / accepted: 01.12.2010

artykuł recenzowany