

Grzegorz GRZĘDA, Dominik SONDEJ, Ryszard SZPLET

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA,
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49

Oprogramowanie diagnostyczno-sterujące interpolacyjnego licznika czasu w układzie programowalnym

Inż. Grzegorz GRZĘDA

Ukończył studia I° na Wydziale Elektroniki (WEL) Wojskowej Akademii Technicznej (WAT), gdzie aktualnie kontynuuje studia II°, uczestnicząc w realizacji projektów badawczych w Instytucie Telekomunikacji WEL WAT. Jego zainteresowania dotyczą projektowania systemów wbudowanych z układami mikroprocesorowymi i układami programowalnymi oraz tworzenia oprogramowania sterującego i pomiarowego.



e-mail: grzegorz.grzeda@gmail.com

Mgr inż. Dominik SONDEJ

Ukończył studia II° na Wydziale Elektroniki (WEL) Wojskowej Akademii Technicznej (WAT). Jest doktorantem w Instytucie Telekomunikacji WEL WAT. Jego zainteresowania naukowe to projektowanie układów cyfrowych z użyciem układów programowalnych oraz tworzenie oprogramowania w zakresie precyzyjnej metrologii czasu.



e-mail: dsondej@wat.edu.pl

Dr hab. inż. Ryszard SZPLET

Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Wydziału Elektroniki (WEL) Wojskowej Akademii Technicznej (WAT), wykładowcą przedmiotów dotyczących teorii układów cyfrowych oraz projektowania systemów cyfrowych z użyciem układów programowalnych i specjalizowanych. Jego aktywność naukowo-badawcza koncentruje się na opracowywaniu metod i technik precyzyjnego pomiaru i generacji odcinka czasu. Kieruje zespołem badawczym metrologii czasu w Zakładzie Techniki Cyfrowej WEL WAT.



e-mail: rszplet@wat.edu.pl

Streszczenie

W artykule opisano projekt oprogramowania diagnostyczno-sterującego licznika czasu z kodowaniem wielokrotnym w niezależnych liniach kodujących, wykonanego w układzie programowalnym Spartan-6 firmy Xilinx. Przedstawiono sposób sterowania licznikiem czasu, koncepcję oprogramowania sterującego, jego zadania oraz warstwową budowę. Opisano graficzny interfejs użytkownika programu i jego funkcjonalność. Prezentowane są także wyniki badań eksperymentalnych licznika czasu.

Słowa kluczowe: precyzyjna metrologia czasu, oprogramowanie diagnostyczno-sterujące, kodowanie wielokrotne w niezależnych liniach kodujących, model warstwowy.

Diagnostic and control software for the interpolating time counter implemented in a programmable device

Abstract

This paper presents the diagnostic and control software of a time interval counter with multi-edge coding in independent coding lines, implemented in the Spartan-6 FPGA device manufactured by Xilinx. The method of time-to-digital conversion [1] is presented along with the design of the time interval counter (Fig. 1). Subsequently, the main goals of the control software, along with its logical structure, are described. The paper shows the layer model (Fig. 2) of the program, reveals the method of communication with the time counter and the way of decoding measurement frames. The bottom-most communication layer transfers the data through USB to the device. The next control layer operates on hardware registers and the measurement layer calibrates the counter and triggers measurements. Finally, the graphic user interface (GUI) layer binds the application together and steers the user interface. The program operates in two main modes: calibration and time interval measurement. Apart from both these modes, the data flow across the layers and the way of saving data generated during counter operation are described. The GUI (Fig. 3) is described as well, showing the main types of operation along with the capabilities of configuring the calibration and measurement processes. Finally, the paper presents the test results of the time counter in both main operation modes (Fig. 4).

Keywords: precise time metrology, diagnostic-control software, multi-edge coding in independent coding lines, layer model.

1. Wstęp

Duże zaawansowanie technologiczne i funkcjonalne współczesnych przyrządów pomiarowych powoduje, że można je traktować jak złożone systemy pomiarowe, których integralnym elementem jest oprogramowanie sterujące. Coraz częściej oprócz typowych funkcji kontrolnych oprogramowanie to realizuje wiele funkcji diagnostycznych i obliczeniowych. Jego złożoność zależy od stopnia skomplikowania przyrządu pomiarowego i złożoności zastosowanej metody pomiarowej. W niniejszym artykule opisano udaną próbę opracowania wirtualnego panelu sterującego dla pikosekundowego licznika czasu z przetwarzaniem dwustopniowym, zrealizowanego w technologii układów programowalnych FPGA.

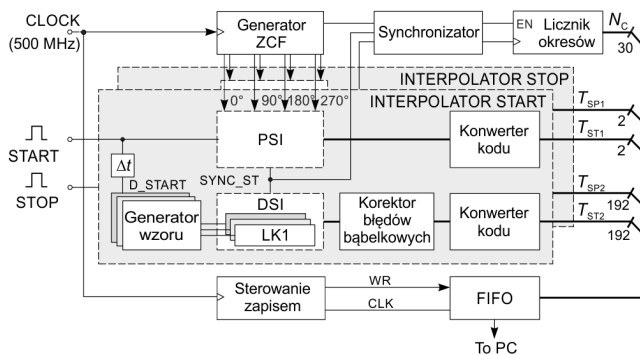
Zastosowana metoda dwustopniowego przetwarzania z kodowaniem wielokrotnym w niezależnych liniach kodujących [1], umożliwia uzyskanie wysokiej rozdzielczości o wartości mniejszej niż czas propagacji najszybszego pojedynczego bufora w układzie scalonym, typowo stosowanego do budowy linii kodujących. Jednakże osiągnięcie tak wysokiej rozdzielczości wymaga utworzenia wirtualnej ekwiwalentnej linii kodującej w oparciu o dane z kilku (co najmniej dwóch) rzeczywistych linii opóźniających. Im większa liczba tych linii, tym wyższa rozdzielczość przetwarzania, ale również większa złożoność projektowania topograficznego i podatność układu na zakłócenia. Głównymi źródłami zakłóceń, oprócz szumów napięć zasilających i dryfu temperatury otoczenia, są przesłuchcy pomiędzy liniami kodującymi oraz od linii danych i sterowania. Poziom tych zakłóceń zależy więc pośrednio od budowy i złożoności układów przetwarzania danych i sterowania, które są scalone wraz z przetwornikiem. Z wcześniejszych doświadczeń projektowych wynika, że w kontekście jakości przetwarzania możliwie wiele operacji związanych z dekodowaniem danych pomiarowych, tworzeniem charakterystyk przetwarzania licznika oraz interpretacją wyników pomiarów powinno być wykonywanych poza układem scalonym, przez oprogramowanie uruchamiane na komputerze sterującym [2].

Do najważniejszych zadań oprogramowania sterującego należy: prawidłowe wykrycie dołączonych do komputera liczników czasu, nawiązanie połączenia z wybranym licznikiem, skonfigurowanie licznika do procesu kalibracji lub pomiarów, odbieranie i dekodowanie ramek pomiarowych, określanie charakterystyk przejściowych interpolatorów oraz obliczanie i prezentowanie wyników pomiarów z użyciem graficznego interfejsu użytkownika. Ponadto oprogramowanie powinno umożliwiać przeprowadzenie diagnostyki i badań testowych licznika czasu, mających na celu określenie jego podstawowych parametrów metrologicznych.

2. Metoda przetwarzania

Jedną z najbardziej popularnych metod precyzyjnej metrologii krótkich odcinków czasu jest metoda bezpośredniej konwersji,

oparta na pojedynczej linii opóźniającej [3]. W układach scalonych do budowy linii opóźniającej używa się buforów i przrzutników typu D. Rozdzielczość takiego przetwornika jest równa opóźnieniu elementu logicznego zastosowanego jako bufor opóźniający, a zakres pomiarowy jest proporcjonalny do długości linii kodującej. W długiej linii trudno jest uzyskać równomierność opóźnień jednostkowych, ze względu na rozrzut technologiczny i niejednorodność struktury układu programowalnego. Pojawiająca się nierównomierność pogarsza liniowość przetwornika. W celu zmniejszenia nieliniowości przetwarzania możliwe jest zastosowanie bardziej zaawansowanych metod przetwarzania, m.in. metody kodowania wielokrotnego [4, 5], w której poprawę parametrów konwersji uzyskuje się poprzez zwiększenie liczby zboczny sygnału propagującego się w linii opóźniającej. Jednak zwiększanie liczby zboczy sygnału powoduje konieczność wydłużania linii opóźniającej, co zwiększa jej wrażliwość na dryf napięcia zasilania oraz temperatury otoczenia [2]. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie niezależnych linii kodujących [6], w których pomiar odcinka czasu dokonywany jest w kilku liniach jednocześnie, co z kolei wiąże się z większą zajętością zasobów logicznych układu. Rozwiązaniem optymalnym pod względem zajętości logicznej układu i długości linii opóźniającej jest połączenie obu wymienionych metod. Nowa metoda kodowania wielokrotnego w niezależnych liniach kodujących [7], została użyta w interpolacyjnym liczniku czasu, którego schemat blokowy został przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy interpolacyjnego licznika z kodowaniem wielokrotnym w niezależnych liniach kodujących
Fig. 1. Block diagram of the interpolation time counter based on multiple coding in independent coding lines

Odcinek czasu mierzony jest przez licznik okresów z rozdzielczością równą okresowi sygnału zegarowego, natomiast w zakresie pojedynczego okresu zegara referencyjnego ze znacznie wyższą rozdzielczością, przez dwustopniowy interpolator. W pierwszym stopniu interpolacji (PSI) określany jest czas jaki upłynął pomiędzy impulsem wejściowym a najbliższym zboczem zegara, mierzony szerokościami faz zegara czterofazowego (ZCF). W drugim stopniu interpolacji (DSI) określany jest odcinek pomiędzy impulsem wejściowym a najbliższym zboczem zegara ZCF [6].

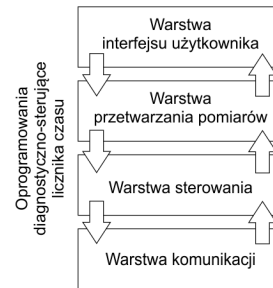
Dane z obu interpolatorów (START i STOP) kompresowane są do postaci czterech 128 bitowych ramek, a następnie przy pomocy pamięci kolejkowej FIFO zapisywane są do pamięci DDR RAM, z której przesyłane są w postaci strumienia bajtów do komputera PC.

3. Warstwowy model oprogramowania

Oprogramowanie sterujące napisane zostało w języku C++, w środowisku C++ Builder 2006 RAD Studio firmy CodeGear. Język ten wybrano ze względu na dostępność gotowych bibliotek ze sterownikiem do mostu komunikacyjnego oraz możliwość sterowania dynamicznym przydzielaniem pamięci dla danych pomiarowych.

Przyjęto czterowarstwowy model oprogramowania (rys. 2), który umożliwił zhierarchizowanie projektu, poprzez wydzielanie modułów kodu odpowiedzialnych za realizowanie poszczególnych

zadań programu oraz komunikacji z licznikiem czasu. Każda z warstw została napisana jako odrębna klasa, przy czym stosując mechanizm dziedziczenia, warstwy niższe są klasami pierwotnymi względem wyższych.



Rys. 2. Czterowarstwowy model oprogramowania aplikacji licznika czasu
Fig. 2. Four-layer model of the control software

W warstwie komunikacji zawarte są funkcje odpowiedzialne za wykrywanie podłączonego do komputera licznika czasu, nawiązywanie z nim połączenia, transfer danych między aplikacją a licznikiem czasu, prawidłowe rozwiązywanie połączenia po zakończeniu pracy programu. Każda z funkcji zwraca status wykonania polecenia, informując warstwę wyższą o poprawności przeprowadzonych operacji. W warstwie tej nie występuje pojęcie licznika czasu, a jedynie mostu USB (układu FT 2232 firmy Future Technology Device International Ltd.), realizującego interfejs z magistrali USB do równoległej, asynchronicznej buforowanej magistrali danych.

Kolejna warstwa odpowiada za sterowanie licznikiem czasu. Komendy sterujące, uprzednio uformowane w strumień bajtów, transmitowane są przez warstwę komunikacji do urządzenia. Wysyłane do licznika komendy odwołują się do zestawu rejestrów sterujących jego pracą. Poprzez te rejestry można skonfigurować tory wejściowe w tryb kalibracji lub pomiaru, określić progi napięć dla komparatorów sygnałów wejściowych oraz dokonać wyboru źródła sygnału zegarowego. Oprócz wysyłania poleceń do licznika, warstwa odczytuje również status wykonania określonego zadania przez licznik oraz odczytuje i dekoduje ramki pomiarowe, przechowywane w buforze FIFO licznika czasu. Dodatkowo, odczytywane są informacje dotyczące m.in. liczby wykonanych pomiarów, odczytu wartości rejestrów sterujących, odczytu flagi błędów.

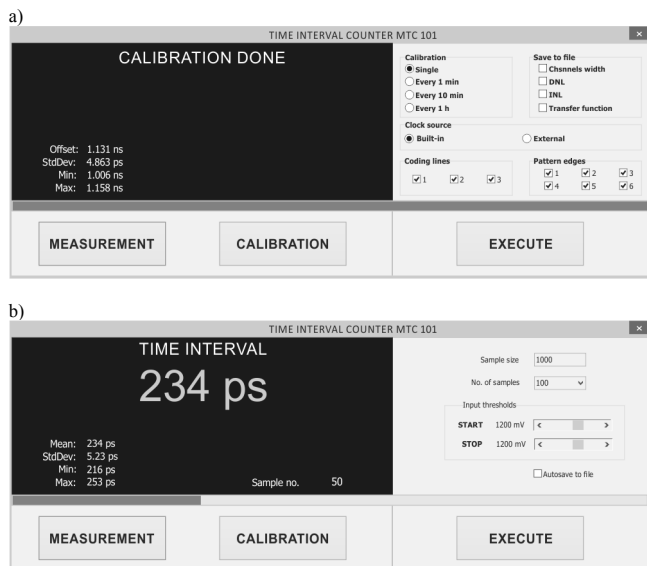
Warstwa pomiaru odpowiada za uruchamianie procesu kalibracji licznika czasu lub pomiarów odcinka czasu. Kalibracja jest realizowana poprzez wykonanie serii pomiarowej o liczności miliona odcinków czasu, których czasy trwania mają równomierny rozkład gęstości prawdopodobieństwa w zakresie pojedynczego okresu zegara. Po przesłaniu ramek pomiarowych do pamięci komputera i zdekodowaniu ich określa kolejno charakterystyki napełnień kanałów obu interpolatorów i charakterystyki przejściowe licznika. Ponadto określane są charakterystyki nieliniowości różnicowej DNL oraz sumacyjnej INL. W warstwie tej zaimplementowano również wątek systemowy, w którym znajduje się automat skończony, koordynujący pracę warstwy. Wyższa warstwa przesyła polecenia do automatu, który je analizuje i podejmuje odpowiednie działania.

Warstwa interfejsu użytkownika realizuje wyświetlanie wirtualnego panelu czołowego licznika czasu, obrazując informacje przesyłane przez warstwy niższe, tj. wyniki kalibracji i pomiarów. Ponadto, nadzoruje pracę niższych warstw i obsługuje zapis danych na dysk komputera. W tej warstwie zawarto drugi wątek systemowy, również z automatem skończonym, obsługującym komunikację z warstwami niższymi.

4. Interfejs użytkownika

Sterowanie interfejsem użytkownika odbywa się w warstwie najwyższej, odpowiadającej za interakcje z użytkownikiem, wy-

konywanie jego poleceń oraz wyświetlanie wyników pracy licznika czasu. Na rys. 3 pokazano interfejs graficzny licznika, pracującego w trybach kalibracji (a) i pomiaru (b).



Rys. 3. Wirtualny panel sterujący licznika czasu w trybach kalibracji (a) i pomiaru (b)
Fig. 3. Virtual control panel of the time counter in calibration (a) and measurement (b) mode

Interfejs graficzny podzielony jest na trzy obszary: wirtualnego wyświetlacza (lewy górny obszar), pola opcji (prawy górny obszar) oraz pola przycisków sterujących (dolny obszar). Dla każdego z trybów pracy w polu wyświetlacza oraz polu opcji obrazowane są adekwatne pola informacyjne oraz sterujące.

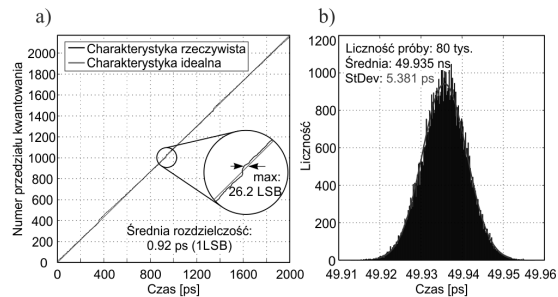
W trybie kalibracji (rys. 3a) pole opcji umożliwia określenie czasu powtarzania kalibracji (pojedyncze wykonanie, co 1 minutę, co 10 minut, co 1 godzinę), wybór charakterystyk, które mają być zapisane do pliku wynikowego (napętnienia kanałów pomiarowych, nieliniowości DNL i INL oraz charakterystyki przejściowej przetworników), źródła zegara referencyjnego (generator wbudowany lub zewnętrzny), a ponadto zapewnia wybór linii kodujących oraz zboczy sygnału wzorca, które mają brać udział w kalibracji i pomiarach. Wirtualny wyświetlacz po zakończeniu kalibracji obrazuje informacje o precyzji pomiarów, wstępnym przesunięciu czasowym (*offset*) pomiędzy torem START i STOP oraz wartości minimalnej i maksymalnej dla próbki pomiarowej.

W trybie pomiarowym (rys. 3b) pole opcji umożliwia określenie liczności próbki pomiarowej, liczby powtórzeń próbki pomiarowej, wartości napięć progowych komparatorów wejściowych oraz możliwości zapisania wyników pomiarów na dysk komputera celem ich dalszego przetwarzania. Wyświetlane są informacje o wartości średniej, odchyleniu standardowym oraz wartościach minimalnej i maksymalnej uzyskanych z próbki pomiarowej.

5. Badania eksperymentalne

Opracowany licznik oraz oprogramowanie diagnostyczno-sterujące poddano badaniom eksperymentalnym, mającym na celu sprawdzenie zarówno niezawodności oprogramowania, jak i precyzji licznika. W pierwszym badaniu przeprowadzono pomiary serii kalibracyjnej o liczności 2 milionów, na podstawie której określono szerokości przedziałów kwantowania licznika. Dzięki zastosowaniu trzech linii kodujących z kodowaniem sześciobitowym możliwe było uzyskanie rozdzielczości licznika równej 0.9 ps (1 LSB). Na rys. 4a pokazane są charakterystyki przetwarzania, rzeczywista i idealna, interpolatora toru START. Maksymalny błąd nieliniowości sumacyjnej interpolatora wynosi 26.2 LSB. Wysoka precyzja prezentowanego licznika potwierdzona jest małą wartością odchylenia standardowego (5.381 ps) obliczonego dla próbki pomiarowej o liczności 80 tys. pomiarów odcinka czasu

o wartości 50 ns, wytworzonego przez precyzyjny generator opóźnień GFT1004 firmy *Greenfield Technology* (rys. 4b).



Rys. 4. Charakterystyka przetwarzania interpolatora toru START (a) oraz histogram wyników pomiaru przykładowego odcinka czasu (b)

Fig. 4. Transfer function of the START interpolator (a) and histogram of measurements of an example time interval (b)

6. Podsumowanie

Oprogramowanie diagnostyczno-sterujące stanowi integralny element precyzyjnego interpolacyjnego licznika czasu. Daje użytkownikowi możliwość kontrolowania procesów kalibracji i pomiarów odcinka czasu, wyświetlanie wyników kalibracji i pomiarów oraz ich zapisu na dysk komputera celem dalszego przetwarzania.

Warstwowa struktura programu oraz zastosowanie szeregu możliwości oferowanych przez język C++ nadają programowi cech uniwersalności. Dzięki nim programista może w łatwy sposób zmodyfikować działanie programu, dostosowując go do wprowadzanych zmian w projekcie licznika czasu. Ponadto, modularność oprogramowania zapewnia przejrzystość kodu oraz przyspiesza proces usuwania błędów powstałych podczas modyfikowania programu.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer UMO-2011/01/B/ST7/03278.

7. Literatura

- [1] Szplet R., Sondej D., Grzęda G.: Subpicosecond-resolution time-to-digital converter with multi-edge coding in independent coding lines, International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Montevideo, 12-15 May 2014.
- [2] Kwiatkowski P., Szymanowski R., Szplet R.: Identyfikacja parametrów dynamicznych linii szybkich przeniesień oraz globalnych linii zegarowych w układach programowalnych Spartan -6, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 59, no. 8, s. 757-759, 2013.
- [3] Kalisz J.: Review of methods for time interval, *Metrologia*, vol. 41, no. 1, s. 17-32, 2004.
- [4] Wu J., Shi Z.: The 10-ps Wave Union TDC: Improving FPGA TDC Resolution beyond Its Cell Delay, *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, s. 3440-3446, 19-25 Oct. 2008.
- [5] Szplet R., Sondej D., Grzęda G.: Bezpośredni przetwornik czas-liczba z kodowaniem wielokrotnym, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 59, no. 8, s. 842-844, 2013.
- [6] Szplet R., Jachna Z., Kwiatkowski P., Rózyc K.: A 2.9 ps equivalent resolution interpolating time counter based on multiple independent coding lines, *Measurement Science and Technology*, vol. 24, no. 3, 2013.
- [7] Szplet R., Sondej D., Grzęda G.: Interpolating time counter with multi-edge coding, 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, s. 321-324, 21-25 Jul. 2013.

otrzymano / received: 09.04.2014

przyjęto do druku / accepted: 02.06.2014

artykuł recenzowany / revised paper