

**Ryszard SZPLET**, Dominik SONDEJ, Grzegorz GRZĘDA

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

## Bezpośredni przetwornik czas-liczba z kodowaniem wielokrotnym

**Dr inż. Ryszard SZPLET**

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. W 1997 r. obronił pracę doktorską. Odbędł staż naukowy na Uniwersytecie w Oulu (Finlandia). Jest adiunktem w Instytucie Telekomunikacji WAT. Jego zainteresowania naukowe dotyczą precyzyjnej metrologii czasu i projektowania układów cyfrowych z użyciem układów programowalnych i specjalizowanych.



e-mail: rszplet@wat.edu.pl

**Mgr inż. Dominik SONDEJ**

Ukończył studia II<sup>o</sup> na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Jest doktorantem w Instytucie Telekomunikacji Wydziału Elektroniki 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

### Streszczenie

W artykule opisane są projekt i wyniki badań przetwornika czas-liczba o rozdzielcości 5,3 ps (1 LSB) i zakresie pomiarowym 428 ps. Do przetwarzania czasowo-cyfrowego użta została metoda kodowania wielokrotnego. Metoda ta umożliwia pokonanie ograniczeń technologicznych współczesnych układów scalonych i uzyskanie wartości rozdzielcości mniejszej niż czas propagacji pojedynczej komórki linii kodującej. Przetwornik został zrealizowany w układzie programowalnym Spartan-6 firmy Xilinx.

**Słowa kluczowe:** precyzyjna metrologia czasu, przetwornik czas-liczba, metoda kodowania wielokrotnego, układy FPGA.

### A direct time-to-digital converter with multiple coding

#### Abstract

This paper presents the implementation and tests results of a time-to-digital converter based on the wave union method and implemented in Spartan-6 FPGA (Xilinx). The converter has the resolution of 5,3 ps (1 LSB) in the measurement range of 428 ps and the integral nonlinearity of 3,8 LSB (Fig. 7). In the wave union method, contrary to the typical conversion methods with a single coding, the resolution is lower than the FPGA cell delay thanks to coding several transitions of the time event signal (Fig. 2). In addition, the linearity of conversion is increased by reducing the width of wide bins. Although, using a multi-transition pattern gives better performance, it also brings more problems to be solved. The main problems such as implementation of a pattern generator for certain amount of transitions, minimal delays between transitions and elimination of bubble errors are discussed in this paper. The pattern generator (Fig. 3) is implemented with use of carry chain. It enables controlling the pattern by means of diagnostic and measurement software. Bubble errors (Fig. 4) are eliminated with a fast asynchronous encoder (Fig. 5). The diagnostic-control software (Fig. 6) allows to configure the pattern generator, launch the measurement session and generate a text file with all information needed to calculate conversion characteristics of the time-to-digital converter.

**Keywords:** precise time metrology, time-to-digital converter, wave union method, FPGA devices.

**Grzegorz GRZĘDA**

Student 3-go roku studiów na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Realizuje indywidualny program studiów o specjalizacji Systemy Cyfrowe. Jego zainteresowania dotyczą projektowania systemów wbudowanych oraz tworzenia oprogramowania sterującego i pomiarowego.



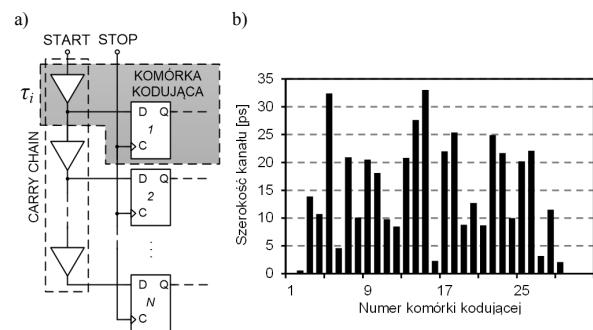
e-mail: grzegorz.grzeda@gmail.com

### 1. Wstęp

Do precyzyjnej konwersji czasowo-cyfrowej powszechnie stosowane są metody cyfrowe, w szczególności metoda bezpośredniej konwersji z kodowaniem pojedynczym w dyskretniej linii kodującej. Ze względu na łatwość implementacji oraz krótki czas konwersji metoda ta znalazła zastosowanie także w przetwornikach wykonanych w układach programowalnych FPGA [1]. Linie kodujące są budowane między innymi z łańcuchów multiplekserek szybkich przeniesień arytmetycznych *carry chain* oraz z przerzutników typu D (rys. 1a). Multipleksery są łączone są ze sobą bez pośrednictwa matryc połączeniowych, wobec czego charakteryzuje się najkrótszymi opóźnieniami jednostkowymi w układzie. Przerzutniki stosowane są do zapamiętania poziomu sygnału START na wyjściach multiplekserek, w chwili pojawienia się aktywnego zbocza sygnału STOP. Ze względu na istniejące rozrzuty technologiczne oraz nierównomierność rozlokowania elementów łańcucha *carry chain* i przerzutników na płytce krzemowej, opóźnienia  $\tau$  komórek linii kodującej są nierównomiernie (rys. 1b). W metodzie kodowania pojedynczego, na podstawie informacji zapisanej w przerzutnikach ustalany jest  $n$ -ty numer komórki, do której dotarł sygnał START w chwili pojawienia się sygnału STOP. Wartość odcinka czasu  $T_m$  pomiędzy zboczami wiodącymi sygnałów wejściowych jest obliczana zgodnie ze wzorem:

$$T_m = \left( \sum_{i=1}^{n-1} \tau_i \right) + \frac{1}{2} \tau_n . \quad (1)$$

W metodzie tej szerokości przedziałów kwantowania odpowiadają opóźnieniom komórek linii. W związku z tym, rozdzielcość metody oraz liniowość konwersji są ograniczone odpowiednio wartością czasu propagacji pojedynczej komórki linii kodującej oraz nierównomiernością tych czasów w linii [2].



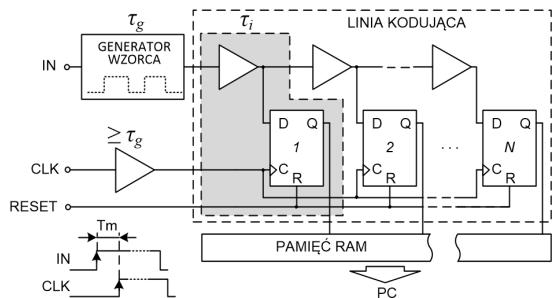
Rys. 1. Linia kodująca (a) oraz szerokości przedziałów kwantowania linii (b)  
Fig. 1. A single time coding line (a) and the bin width plot (b)

Polepszenie rozdzielcości metody konwersji z kodowaniem pojedynczym można uzyskać poprzez zmianę technologii, w jakiej realizowany jest układ scalony na taką, która zapewni krótsze

czasu propagacji elementów linii opóźniającej. Jednakże takie rozwiązanie jest zwykle czasochłonne, kosztowne i nie zawsze możliwe. Innymi znymi sposobami są między innymi użycie równoległych linii skalowanych [3] i wielokrotnych niezależnych linii kodujących [4]. Implementacja tych metod skutkuje dużą zajętością zasobów logicznych układu. Alternatywą jest metoda kodowania wielokrotnego, która umożliwia uzyskanie wartości rozdzielczości mniejszej niż czas propagacji pojedynczej komórki, bez potrzeby zwielokrotniania linii kodujących. Uzyskiwane jest to poprzez kodowanie nie jednego, a kilku zboczy sygnału wzorca niosącego informację o mierzonym odcinku czasu. Takie rozwiązanie niesie ze sobą konieczność między innymi opracowania generatora wzorca, który wytwarza ciąg impulsów o stałych parametrach.

## 2. Metoda przetwarzania

Uproszczony schemat blokowy układu przetwornika opartego o metodę bezpośrednią konwersji z kodowaniem wielokrotnym, jest pokazany na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy konwertera z kodowaniem wielokrotnym w pojedynczej linii kodującej  
 Fig. 2. Block diagram of the time-to-digital converter with multiple coding in a single coding line

Różni się on od przetwornika z kodowaniem pojedynczym użyciem generatora wzorca. Generator ten, pobudzony sygnałem wejściowym, wytwarza ciąg impulsów zwany wzorcem. Ciąg ten propaguje się przez kolejne komórki linii kodującej o opóźnieniu jednostkowym  $\tau_i$ . Pełny ciąg zostaje wygenerowany z pewnym stałym opóźnieniem  $\tau_g$ , przez co sygnał podawany na wejścia zegarowe przerzutników również musi być opóźniony o stałą wartość  $\geq \tau_g$ . Spełnienie tego warunku umożliwia zakodowanie sygnału wzorca w całości. Po zakodowaniu informacji w przerzutnikach określane są numery tych przerzutników, które zako-dowały początki i konie impulsów wzorca. Suma numerów tych przerzutników określa  $k$ -ty przedział kwantowania w ekwiwalentnej linii kodującej, w który trafił sygnał wejściowy. Wynik konwersji może być obliczony zgodnie ze wzorem (1), w którym opóźnieniom komórek odpowiadają szerokości przedziałów ekwiwalentnej linii kodującej. Identyfikacja przedziałów ekwiwalentnej linii kodującej następuje w procesie kalibracji, który jest przeprowadzany z użyciem statystycznego testu gęstości kodu [5]. Szerokości przedziałów kwantowania określonych przez  $k$ -tą sumę numerów przerzutników, w których zapamiętane zostały zbocza wzorca, są obliczane zgodnie ze wzorem:

$$q_k = \frac{x_k \times zp}{N}, \quad (2)$$

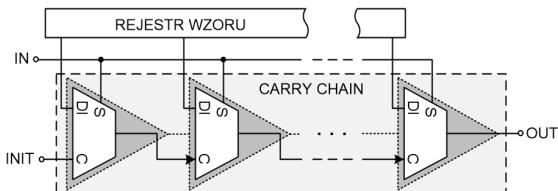
gdzie:  $x_k$  - liczba zliczonych trafień do przedziału  $k$ ,  $zp$  - zakres pomiarowy przetwornika,  $N$  - liczba wykonanych pomiarów.

### 3. Generator wzorca

W metodzie kodowania wielokrotnego konieczne jest wygenerowanie ciągu impulsów o określonej liczbie zboczy. Do tego celu

można użyć generatora wzorca zbudowanego z użyciem 64 dwuwejściowych multiplekserów łańcucha przeniesień połączonych szeregowo (rys. 3). Do wejść adresowych multiplekserów został doprowadzony sygnał wejściowy (IN). Pierwsze wejścia danych (DI) są połączone z rejestrem wzoru, natomiast do drugich (C) dołączono sygnały z poprzednich multiplekserów. Połączenie generatora z rejestrem daje możliwość wprowadzenia wzoru określonego z użyciem oprogramowania diagnostyczno-sterującego, bez konieczności reprogramowania układu FPGA. Stan niski sygnału wejściowego powoduje zaadresowanie wejść multiplekserów podłączonych do rejestrów wzoru, co umożliwia przepisanie wzorca do łańcucha przeniesień. Po zmianie stanu sygnału wejściowego następuje propagacja wzorca do wyjścia generatora (OUT).

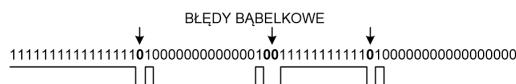
Użyty w przetworniku generator wytworza sygnał wzorca o trzech zboczach (dwa narastające i jedno opadające).



Rys. 3. Generator wzorca oparty na łańcuchu szybkich przeniesień  
 Fig. 3. The pattern generator based on a carry chain

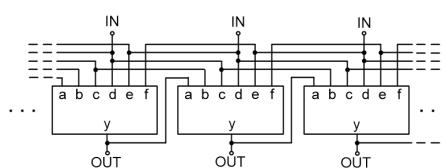
#### **4. Błędy bąbelkowe**

Badając łańcuchy przeniesień, wbudowane w układy programowalne zauważono, że zapamiętany w przerzutnikach stan linii opóźniającej nie dopowiada kolejności, jaka mogłyby wynikać ze schematu połączeń publikowanych przez producenta [6, 7]. Wynikać to może z nierównomiernych opóźnień propagacyjnych pomiędzy elementami łańcucha przeniesień, a przerzutnikami oraz niejednakowymi opóźnieniami w sieci dystrybucji sygnału zegarowego do przerzutników. Ponadto, kolejność ta jest odmienna dla przeciwnych zboczy sygnału propagującego się w linii. Zaobserwowane właściwości powodują powstawanie błędów bąbelkowych (*bubble errors*), objawiających się występowaniem błędów w kodzie wyjściowym linii kodującej. Ciąg impulsów zakodowany w linii z błędami bąbelkowymi jest pokazany na rys. 4.



Rys. 4. Przykład kodu wyjściowego linii kodującej z zaznaczonymi błędami bąbelkowymi  
 Fig. 4 Example of the output code of a coding line with bubble errors

W metodzie z kodowaniem pojedynczym, w której przez linię propaguje jedno zbocze sygnału, możliwe jest wyeliminowanie tych błędów poprzez wirtualną zmianę uporządkowania przerzutników. Jednak w metodzie z kodowaniem wielokrotnym rozwiązanie to nie daje pożądanego efektu, ponieważ przez linie propagują się obydwa zbocza sygnału. Skutecznym rozwiązaniem jest zastosowanie enkodera wykrywającego i eliminującego błędy babelkowe. Na rys. 5 pokazany jest schemat enkodera zastosowanego w niniejszym projekcie. Jest on zbudowany z użyciem tablic przeglądowych LUT realizujących funkcję  $y(a,b,c,d,e,f) = \Sigma[14, 22, 26, 38, 42, 44, 50, 52, 56]$ .

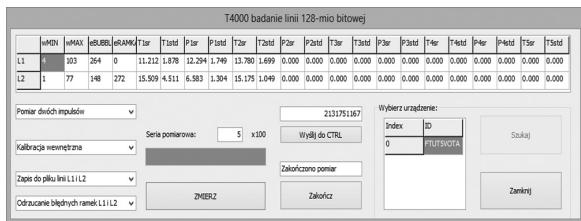


Rys. 5. Enkoder błędów bąbelkowych  
 Fig. 5. The bubble error correction circuit

Wejścia enkodera połączone są z wyjściami przerutników linii kodującej. Enkoder usuwa pojedyncze (010111) pojawiające się zarówno na końcu jak i na początku kodowanego impulsu jak i podwójne błędy bąbelkowe (010011) pojawiające się na końcu impulsu. Usunięcie błędu odbywa się poprzez dosunięcie odstających bitów do ciągu bitowego o tej samej wartości.

## 5. Program diagnostyczno-sterujący

Sterowanie przetwornikiem, automatyzacja procesu pomiarowego oraz przetwarzanie wyników pomiaru odbywa się z użyciem programu, którego interfejs użytkownika pokazany jest na rys. 6.



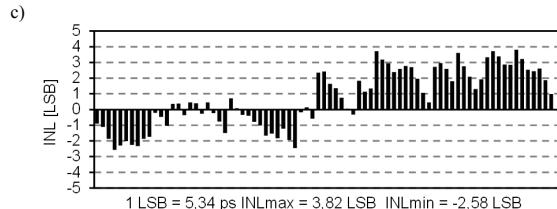
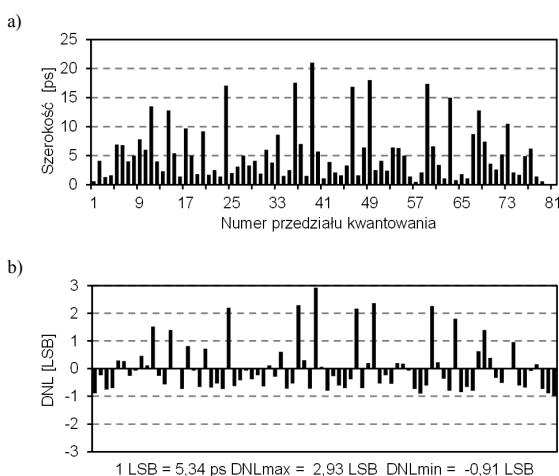
Rys. 6. Interfejs użytkownika programu diagnostyczno-sterującego  
Fig. 6. User interface of control and data processing software

Program sterujący został napisany w środowisku programistycznym Code Gear RAD Studio 2007, w języku C++. Umożliwia konfigurację generatora wzorca, uruchamianie pomiarów seryjnych oraz obliczanie podstawowych parametrów statystycznych dla serii pomiarów, takich jak: wartość średnia, odchylenie standardowe oraz wartości minimalna i maksymalna dla odstępu czasu między zboczami wzorca. Konfiguracja generatora wzorca polega na wpisaniu do rejestru generatora słowa o wartości binarnej reprezentującej przebieg czasowy wzorca sygnału. Istnieje opcja programowej obsługi wykrywania i korekcji błędów bąbelkowych. Ponadto, program wytworzy plik tekstowy, który zawiera m. in. numery kolejnych przerutników, które zapamiętały początek i koniec impulsów generowanego wzorca oraz zawiera obliczone wartości statystyczne dla serii pomiarów.

## 6. Badania eksperymentalne

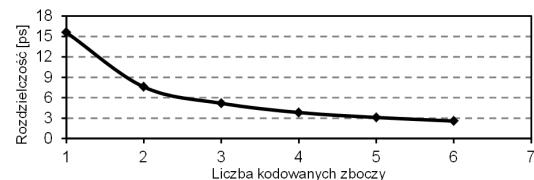
Przetwornik poddano badaniom statystycznym [5], w temperaturze pokojowej i z użyciem napięć zasilających typowych dla układu Spartan-6. Uzyskane charakterystyki szerokości przedziałów kwantowania, nieliniowości różnicowej i sumacyjnej przetwornika uzyskane dla kodowania trzech zboczy wzorca są pokazane na rys. 7.

Charakterystyka zawiera 80 przedziałów kwantowania, co przy zakresie pomiarowym równym 428 ps daje średnią rozdzielcość 5,34 ps. Maksymalne wartości błędów liniowości różnicowej i sumacyjnej wynoszą odpowiednio 2,93 LSB (15,6 ps) i 3,82 LSB (20,4 ps).



Rys. 7. Szerokości przedziałów kwantowania (a), nieliniowość różnicowa (b) oraz nieliniowość sumacyjna przetwornika z kodowaniem trzech zboczy wzorca  
Fig. 7. Bin widths (a), differential (b) and integral nonlinearity (c) of the time-to-digital converter with coding of three pattern transitions

W kolejnym badaniu zweryfikowano wpływ liczby kodowanych zboczy wzorca, uwzględnionych podczas tworzenia linii ekwiwalentnej, na jej rozdzielcość. Wyniki są pokazane na rys. 8. Rozdzielcość zwiększa się wraz ze zwiększaniem liczby kodowanych zboczy, ale wzrost ten nie jest liniowy i dla liczby zboczy powyżej trzech jest nieznaczny (1,25 ps). Zwiększenie liczby zboczy wiąże się natomiast z wydłużaniem wzorca oraz linii kodującej, co pogarsza liniowość konwersji. Ponadto, dłuża linia kodująca jest wrażliwa na zmiany temperatury otoczenia i napięcia zasilającego.



Rys. 8. Wpływ liczby zboczy na rozdzielcość konwertera  
Fig. 8. Influence of the number of transitions on the converter resolution

## 7. Podsumowanie

Opracowany przetwornik czas-liczba charakteryzuje się wysoką rozdzielcością 5,34 ps i małym błędem liniowości przetwarzania 3,82 LSB. Uzyskanie wysokich parametrów było możliwe dzięki zastosowaniu w przetworniku precyzyjnego generatora wzorca i eliminacji błędów bąbelkowych oraz starannie przygotowanemu projektowi topograficznemu przetwornika. Może być on użyty do precyzyjnej konwersji czasowo-cyfrowej w wąskim zakresie przetwarzania lub jako interpolator w liczniku czasu, zapewniającym szeroki zakres pomiarowy.

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

## 8. Literatura

- [1] Kalisz J.: Review of methods for time interval, Metrologia, vol. 41, no. 1, 2004.
- [2] Wu J., Shi Z.: The 10-ps Wave Union TDC: Improving FPGA TDC Resolution beyond Its Cell Delay, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2008, str. 3440 – 3446.
- [3] Jansson J., Mantyniemi A., Kostamovaara J.: A CMOS time-to-digital converter with better than 10 ps single-shot precision; Journal of Solid-State Circuits, vol. 41, no. 6, 2006, str. 1286-1296.
- [4] Szplet R., Jachna Z., Kwiatkowski P., Różyc 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.
- [5] Cova S., Bertolaccini M.: Differential linearity testing and precision calibration of multichannel time sorters, Nuclear Instruments and Methods, vol. 77, no. 2, 1970.
- [6] Xilinx, Spartan-6 FPGA Configurable Logic Block User Guide, User Guide, February 2010.
- [7] Kwiatkowski P., Szymanowski R., Szplet R.: Identyfikacja parametrów dynamicznych linii szybkich przeniesień oraz globalnych linii zegarowych w układach programowalnych Spartan-6, XVI Konferencja naukowa Reprogramowalne Układy Cyfrowe, 23-24 maja 2013, Szczecin.