

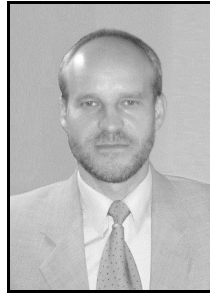
Ryszard SZPLET, Dominik SONDEJ, Grzegorz GRZĘDA

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. Odbił 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° 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

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

Streszczenie

W artykule opisane są projekt i wyniki badań przetwornika czas-liczba o rozdzielczości 5,3 ps (1 LSB) i zakresie pomiarowym 428 ps. Do przetwarzania czasowo-cyfrowego użyta została metoda kodowania wielokrotnego. Metoda ta umożliwia pokonanie ograniczeń technologicznych współczesnych układów scalonych i uzyskanie wartości rozdzielczości 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 a 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.

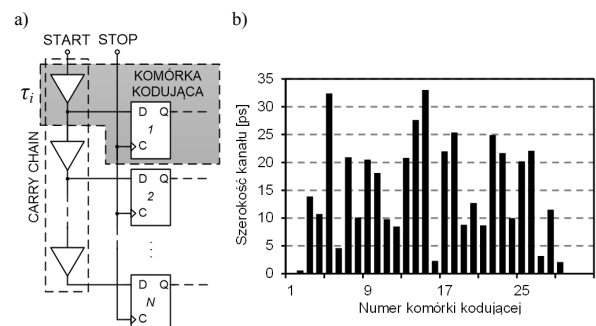
Keywords: precise time metrology, time-to-digital converter, wave union method, FPGA devices.

1. Wstęp

Do precyzyjnej konwersji czasowo-cyfrowej powszechnie stosowane są metody cyfrowe, w szczególności metoda bezpośredniej konwersji z kodowaniem pojedynczym w dyskretnej 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 multiplekserów szybkich przeniesień arytmetycznych *carry chain* oraz z przerzutników typu D (rys. 1a). Multipleksery są łączone są ze sobą bez pośrednictwa matryc połączeniowych, wobec czego charakteryzują się najkrótszymi opóźnieniami jednostkowymi w układzie. Przerzutniki stosowane są do zapamiętania poziomu sygnału START na wyjściach multiplekserów, w chwili pojawienia się aktywnego zbocza sygnału STOP. Ze względu na istniejące rozrzuty technologiczne oraz nierównomierność rozlokowania elementów łańcucha *carry chain* i przerzutników na płycie krzemowej, opóźnienia τ komórek linii kodującej są nierównomierne (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, rozdzielczość metody oraz liniowość konwersji są ograniczone odpowiednio wartością czasu propagacji pojedynczej komórki linii kodującej oraz nierównomiernością tych czasów w linii [2].



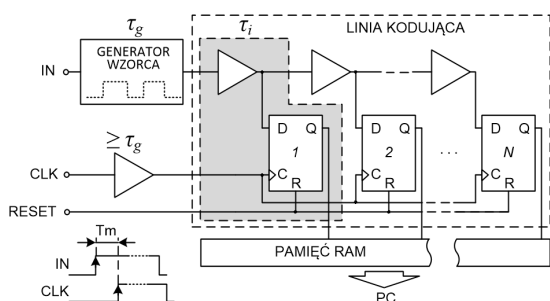
Rys. 1. Linia kodująca (a) oraz szerokości przedziałów kwantowania linii (b)
Fig. 1. A single time coding line (a) and the bin width plot (b)

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

czasy propagacji elementów linii opóźniającej. Jednakże takie rozwiązanie jest zwykle czasochłonne, kosztowne i nie zawsze możliwe. Innymi znanymi 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 bezpośredniej 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 τ_t . Pełny ciąg zostaje wygenerowany z pewnym stałym opóźnieniem τ_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 określone są numery tych przerzutników, które zakodowały początki i końce 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:

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

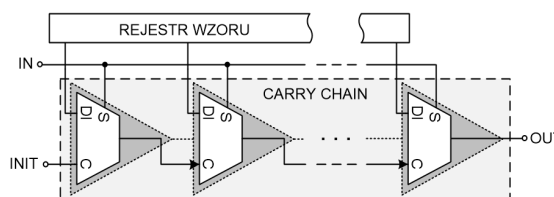
gdzie: x_k - liczba zliczonych trafień do przedziału k , zp - zakres pomiarowy przetwornika, N - liczba wykonanych pomiarów.

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

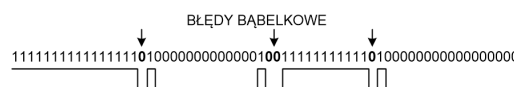
Użyty w przetworniku generator wytwarza sygnał wzorca o trzech zboczach (dwa narastające i jedno opadające).



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

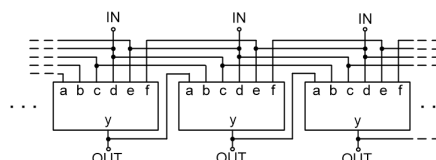
4. Błędy bąbelkowe

Badając łańcuchy przeniesień, wbudowane w układy programowalne zauważono, że zapamiętany w przerzutnikach stan linii opóźniającej nie odpowiada kolejności, jaka mogłaby 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 własności 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 linię propagują się obydwa zbocza sygnału. Skutecznym rozwiązaniem jest zastosowanie enkodera wykrywającego i eliminującego błędy bąbelkowe. 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

