

Ryszard SZPLET, Zbigniew JACHNA, Józef KALISZ, Krzysztof RÓŻYC
WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI

Scalony licznik czasu i częstotliwości z użyciem odwrotnościowej metody pomiaru częstotliwości i ulepszonej metody tworzenia histogramu

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@wel.wat.edu.pl

Dr inż. Zbigniew JACHNA

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki WAT, obronił pracę doktorską w 2003 r. Jest adiunktem w Instytucie Telekomunikacji Wydziału Elektroniki WAT. Jego zainteresowania naukowe to projektowanie układów cyfrowych oraz tworzenie oprogramowania w zakresie precyzyjnej metrologii czasu.



e-mail: zjachna@wat.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Józef KALISZ

Jest specjalistą w zakresie techniki cyfrowej i precyzyjnej metrologii odcinka czasu. Jest autorem wielu oryginalnych metod pomiarowych i projektów konwerterów czasowo-cyfrowych. Strona internetowa: <http://jkalisz.wel.wat.edu.pl/kalisz.htm>.



e-mail: jkalisz@wel.wat.edu.pl

Inż. Krzysztof RÓŻYC

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (2000). Jest specjalistą naukowo-technicznym w Instytucie Telekomunikacji WAT. Jego zainteresowania zawodowe dotyczą precyzyjnej metrologii czasu oraz projektowania urządzeń z użyciem układów programowalnych.



e-mail: krozyc@wel.wat.edu.pl

Streszczenie

Opisany jest projekt i wyniki badań precyzyjnego licznika czasu i częstotliwości zrealizowanego w układzie programowalnym FPGA oraz metody pomiaru i przetwarzania danych umożliwiające zwiększenie dokładności. Pomiar odcinka czasu jest realizowany w oparciu o metodę Nutta, a pomiar częstotliwości z użyciem metody odwrotnościowej lub klasycznej metody bramkowej. W celu zwiększenia dokładności wyznaczania histogramu serii pomiarów zastosowano ulepszoną metodę opartą na sumowaniu rozkładów prawdopodobieństw. Opracowany licznik ma rozdzielczość 200 ps i niepewność pomiarową poniżej 150 ps. Układ wykonany został w programowalnej matrycy bramkowej QL16x24B serii pASIC firmy *QuickLogic*.

Słowa kluczowe: precyzyjna metrologia czasu, pomiar częstotliwości, korekta nieliniowości.

Integrated time and frequency counter with the use of reciprocal method for frequency measurement and improved method for histogram calculation

Abstract

This paper describes design and test results of precise time and frequency counter implemented in a general purpose FPGA device. Methods for frequency measurement and advanced data processing leading to accuracy improvement are also presented. In the designed counter, time intervals are measured with the use of the interpolation Nutt method while for frequency measurements two methods are involved: classical gating and reciprocal method. To increase accuracy of the histogram of measurement results an improved method of calculation is adopted. This method is based on aggregation of probability distributions related to consecutive measurement results and evaluated during the initial calibration process. The described counter featuring 200 ps resolution and 150 ps accuracy was integrated in programmable device QL16x24B from pASIC family (*QuickLogic*).

Keywords: precise time metrology, frequency measurements, nonlinearity correction.

1. Wstęp

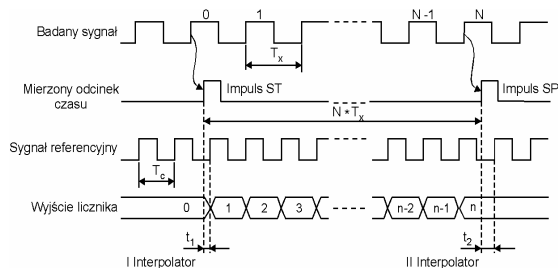
Do precyzyjnych pomiarów odcinka czasu stosowane są scalone liczniki czasu realizowane w technologii CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) jako układy specjalizowane ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) lub programowalne matryce bramkowe FPGA (*Field Programmable Gate Array*) [1]. Najczęściej stosowaną metodą konwersji czasowo-cyfrowej jest konwersja bezpośrednia (jedno lub dwustopniowa) z użyciem cyfrowej linii kodującej. W celu zwiększenia zakresu pomiarowego zazwyczaj stosuje się dwa precyzyjne konwertery czas-liczba współpracujące z wielobitowym licznikiem dwójkowym (interpolacyjna metoda Nutta) [2]. Taka metoda została zastosowana w precyzyjnym liczniku czasu o rozdzielczości 200 ps i zakresie pomiarowym 43 s [3]. Nowy układ interpolacyjnego licznika czasu i częstotliwości (ILCC) umożliwia oprócz pomiarów odcinka czasu również pomiary częstotliwości dwoma metodami oraz pomiary parametrów sygnałów impulsowych: czasów narastania i opadania zboczy i czasu trwania impulsu.

2. Odwrotnościowa metoda pomiaru częstotliwości

W opracowanym ILCC do pomiaru częstotliwości stosowane są dwie metody: klasyczna metoda bramkowa i metoda odwrotnościowa. Zaletą metody bramkowej jest stosunkowo prosta realizacja układowa. Natomiast zasadniczą wadą tej metody jest konieczność zwiększenia czasu trwania pomiaru w celu zwiększenia jego dokładności. Znacznie wyższą dokładność pomiaru częstotliwości przy względnie krótkim czasie jego trwania zapewnia metoda odwrotnościowa. Polega ona na precyzyjnym pomiarze czasu trwania wybranej, całkowitej liczby N okresów sygnału badanego T_x (rys. 1).

Wartość mierzonej częstotliwości obliczana jest jako $f_x = 1/T_x = N/(nT_c + t_1 - t_2)$, gdzie T_c jest okresem sygnału referencyjnego, n jest stanem licznika, a t_1 i t_2 oznaczają krótkie odcinki czasu (nie dłuższe niż T_c) pomiędzy impulsami oznaczającymi odpowiednio

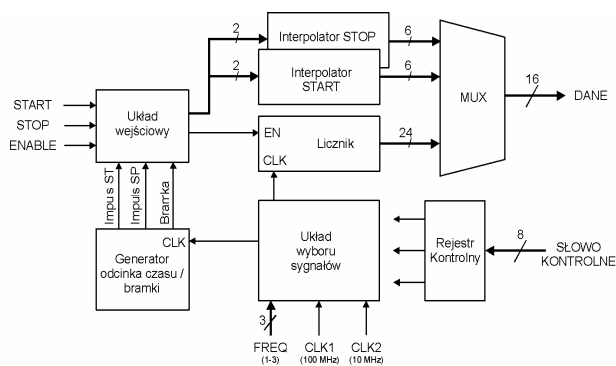
początek i koniec mierzonego odcinka NT_x i najbliższymi narastającymi zboczami sygnału referencyjnego. Precyzyjny pomiar odcinków t_1 i t_2 w metodzie odwrotnościowej umożliwia znaczne polepszenie dokładności pomiaru w stosunku do metody bramkowej, w której obydwie te odcinki nie są mierzone, a ich wpływ na wynik pomiaru może być minimalizowany poprzez uśrednianie.



Rys. 1. Zasada pomiaru częstotliwości z użyciem metody odwrotnościowej
Fig. 1. Principle of reciprocal method for frequency measurement

3. Budowa scalonego licznika czasu i częstotliwości. Wyniki pomiarów

Schemat blokowy ILCC zrealizowanego w układzie FPGA jest pokazany na rys. 2.



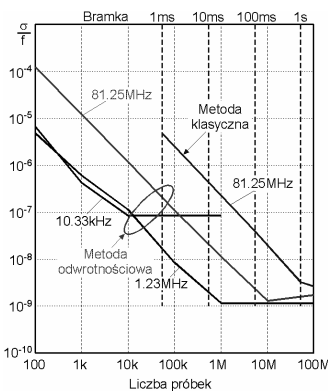
Rys. 2. Schemat blokowy scalonego licznika czasu i częstotliwości
Fig. 2. Block diagram of the time and frequency counter

Podczas pomiaru częstotliwości metodą odwrotnościową, badany sygnał o częstotliwości f_x (podawany na jedno z trzech wejść FREQ licznika) przekazywany jest przez układ wyboru sygnałów do generatora odcinka czasu. Generator ten wytwarza parę impulsów (Impuls ST i Impuls SP) odległych od siebie o odcinek czasu równy NT_x . Następnie odcinek ten jest precyzyjnie mierzony z użyciem interpolacyjnej metody Nutta. Zgodnie z tą metodą licznik zlicza całkowitą liczbę n okresów T_e zegara referencyjnego (CLK1, 100 MHz) jakie podane zostaną na jego wejście w mierzonym odcinku czasu NT_x (rys. 1). Interpolatory START i STOP, wykonane jako różnicowe linie opóźniające z przerzutnikami zatraskowymi [3], mierzą odcinki czasu t_1 i t_2 z rozdzielczością 200 ps. Wartość mierzonego odcinka czasu zależy od częstotliwości f_x sygnału mierzonego i liczby N zliczanych okresów. Maksymalny czas trwania tego odcinka ograniczony jest zakresem pomiarowym 24-bitowego licznika głównego. Przy częstotliwości sygnału referencyjnego równej 100 MHz mierzony odcinek czasu nie może być dłuższy niż 168 ms. Oznacza to, że dla najmniejszej możliwej liczby $N = 100$ okresów sygnału badanego, najniższa częstotliwość mierzona w tym trybie wynosi ok. 600 Hz. Górny kres mierzonych częstotliwości wyznaczany jest maksymalną szybkością działania generatora odcinka czasu, który zbudowany został jako synchroniczny dzielnik częstotliwości z dekadowym wyborem podzakresu w przedziale od 10^2 do 10^9 . Dzięki zastoso-

waniu liniowego rejestru przesuwającego w pierwszym stopniu podziału częstotliwości (przez 100) maksymalna wartość częstotliwości mierzonej bezpośrednio wynosi około 170 MHz. Zwiększenie zakresu pomiarowego w kierunku niższych oraz wyższych częstotliwości wymaga odpowiednio zwiększenia pojemności licznika i zastosowania zewnętrznego dzielnika częstotliwości [3].

Przy stosowaniu metody bramkowej pomiaru częstotliwości bramki czasowe wytwarzane są w oparciu o drugi sygnał referencyjny CLK2 o częstotliwości 10 MHz. Czasy trwania tych bramek ustalane są dekadowo w zakresie od 10 μ s do 100 s. Jeśli zachodzi potrzeba użycia dłuższej bramki czasowej, to istnieje możliwość wykorzystania zewnętrznego sygnału sterującego jako sygnału zezwolenia dla licznika (wejście ENABLE).

Zaprojektowany ILCC został zrealizowany w układzie programowalnym FPGA QL16X24B (QuickLogic). Podczas testów licznika określono m. in. dokładność pomiaru częstotliwości zarówno z użyciem metody odwrotnościowej (dla liczby okresów od 10^2 do 10^9) jak i metody bramkowej (dla bramek od 1 ms do 1 s). Wyniki testów ilustruje rys. 3.



Rys. 3. Porównanie dokładności pomiaru częstotliwości metodami bramkową i odwrotnościową

Fig. 3. Comparison of the accuracy of gating and reciprocal methods

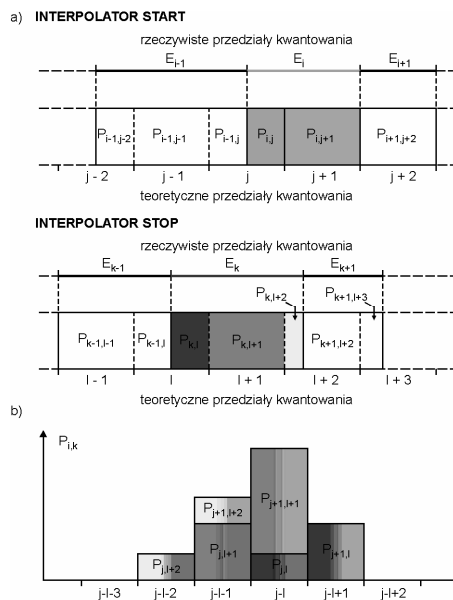
Jak widać, metoda odwrotnościowa charakteryzuje się większą dokładnością niż metoda bramkowa, przy tym samym czasie trwania pomiaru. W obydwu metodach dokładność pomiaru zwiększa się wraz ze wzrostem tego czasu, co wynika z uśredniania statystycznego większej liczby okresów. Jednakże przy znacznym wzroście czasu trwania pomiaru zwiększa się niekorzystny wpływ niestacjonarności częstotliwości zarówno sygnału mierzonego, jak i sygnału referencyjnego na dokładność pomiaru.

4. Ulepszona metoda wyznaczania histogramu

Opracowane oprogramowanie sterujące działaniem ILCC umożliwia m.in. przedstawianie rozrzutu serii pomiarów w postaci histogramu. Standardowa metoda wyznaczania histogramu polega na określaniu liczb wystąpień dyskretnych wartości wyników pomiarów w zadanych przedziałach wartości. Dokładność wyznaczenia histogramu jest bezpośrednio związana z dokładnością wykonania poszczególnych pomiarów należących do analizowanej próby. Często stosowanym sposobem polepszania dokładności pomiarów, a zatem i wyznaczenia histogramu, jest korekcja nieliniowości charakterystyk przetwarzania konwertera [4]. Dalsze zwiększenie dokładności wyznaczenia histogramu jest możliwe dzięki zastosowaniu innej metody jego tworzenia, polegającej na sumowaniu rozkładów prawdopodobieństw wystąpienia poszczególnych wyników w serii pomiarowej [5].

W metodzie tej proces tworzenia histogramu można podzielić na cztery etapy. W pierwszym etapie przeprowadzana jest procedura kalibracyjna, mająca na celu możliwie dokładną identyfikację charakterystyk przetwarzania interpolatorów [6]. W wyniku kalibracji określone zostają wartości rzeczywistych przedziałów kwantowania, na jakie podzielone zostały zakresy pomiarowe

obydwu interpolatorów (rys. 4a). W drugim etapie zakresy te dzielone są na pewną całkowitą liczbę teoretycznych przedziałów kwantowania o jednakowych wartościach. Następnie badane jest wzajemne pokrycie rzeczywistych i teoretycznych przedziałów kwantowania i wyznaczane są prawdopodobieństwa P_{ij} , oznaczające wartość udziału i -tego eksperymentalnego przedziału kwantowania w j -tym teoretycznym przedziale kwantowania. Innymi słowy P_{ij} określa prawdopodobieństwo, z jakim impuls START (STOP), trafiając w i -ty (k) przedział eksperymentalny, mógł pojawić się w j -tym (l) przedziale teoretycznym. W kolejnym etapie wyznaczania histogramu każdej parze (np. i i k) rzeczywistych przedziałów kwantowania z interpolatorów START i STOP przyporządkowany zostaje pewien histogram cząstkowy (rys. 4b).



Rys. 4. Zasada wyznaczania histogramu cząstkowego dla przedziałów kwantowania i i k ; a) wyznaczanie wzajemnego pokrycia rzeczywistych i teoretycznych przedziałów kwantowania, b) histogram cząstkowy

Fig. 4. Principle of calculation of the partial histogram for quantization steps i and k ; a) overlapping of experimental and theoretical quantization steps, b) partial histogram

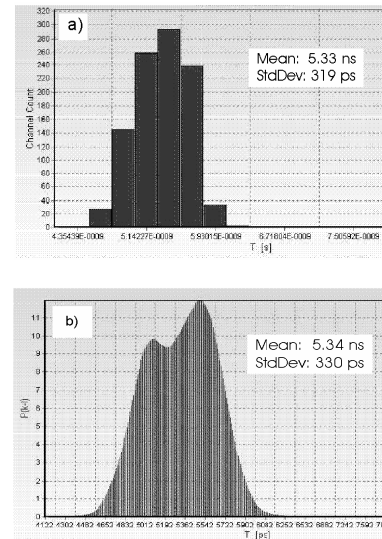
Histogram taki zawiera wartości prawdopodobieństw dla wszystkich możliwych różnic teoretycznych przedziałów kwantowania j i l , w których udział mają rzeczywiste przedziały kwantowania i i k . Wartości prawdopodobieństw różnic obliczane są przy użyciu wzoru

$$P_{i,k}(j,l) = \sum_{\{j=0, l=0\}}^{\{N-1, N-1\}} P_{i,j} P_{k,l}$$

gdzie N oznacza liczbę teoretycznych przedziałów kwantowania. Po zakończeniu każdego pomiaru uzyskany histogram jest uzupełniany o wartości prawdopodobieństw z kolejnych histogramów cząstkowych. Jest to ostatni etap wyznaczania histogramu serii pomiarów.

W celu zweryfikowania tej metody wykonano serię 1000 pomiarów odcinka czasu, którego wartość zmieniono w czasie trwania pomiaru z 5.1 ns (ok. 450 pomiarów) na 5.5 ns (ok. 550). Następnie wyznaczone zostały histogramy wyników z użyciem metody tradycyjnej (rys. 5a) i metody sumowania rozkładów cząstkowych (rys. 5b). Histogram sporządzony z użyciem metody sumowania rozkładów cząstkowych, w którym zastosowano przedziały kwantowania o wartości 10 ps, wyraźnie wyróżnia dwa maksima odpowiadające dwóm mierzonym odcinkom czasu. Jest więc bardziej dokładny od histogramu uzyskanego metodą tradycyjną i wierniej oddaje przebieg eksperymentu. Należy jednak zauważyć, że podstawowe miary statystyczne takie jak wartość średnia i odchylenie standardowe wyznaczone dla obydwu metod

mają bardzo zbliżone wartości. Oznacza to, że jeśli szczegółowy kształt histogramu nie ma w eksperymencie znaczenia, to można stosować metodę tradycyjną, która jest mniej złożona obliczeniowo.



Rys. 5. Histogramy serii 1000 pomiarów dwóch odcinków czasu wyznaczone metodami tradycyjną (a) i sumowania rozkładów cząstkowych (b)

Fig. 5. Histograms of 1000 measurements of two time intervals calculated with the use of standard method (a) and based on aggregation of partial histograms (b)

5. Wnioski

Wprowadzona w ulepszonym ILCC metoda odwrotnościowa pomiaru częstotliwości pozwala na uzyskanie znacznie lepszej dokładności przy wyraźnie krótszym czasie pomiaru w porównaniu z klasyczną metodą bramkową, zwłaszcza przy pomiarach niskich częstotliwości.

W oprogramowaniu sterującym licznika wykorzystano metodę tworzenia histogramu serii pomiarów opartą na sumowaniu rozkładów prawdopodobieństw, niosących informację o charakterystykach interpolatorów użytych w liczniku i wyznaczonych w procesie kalibracji wstępnej. Kształt uzyskanego w ten sposób histogramu jest bardziej szczegółowy niż otrzymanego w sposób tradycyjny i pozwala wykryć stosunkowo nieznaczne zmiany wartości mierzonego odcinka czasu, jakie zaszły podczas pomiaru. Badania eksperymentalne potwierdziły celowość stosowania tej metody pomimo dużej złożoności obliczeniowej.

6. Literatura

- [1] J. Kalisz: Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution, *Metrologia*, Vol. 41 (2004), No. 1, pp.17-32
- [2] J. Kalisz, R. Szplet, R. Pełka: Single-chip interpolating time counter with 200-ps resolution and 43-s range, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 46, No. 4, August 1997, pp. 851-856
- [3] J. Kalisz, R. Szplet: A PC-based time interval counter, 35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, San Diego, December, 2003
- [4] R. Pełka, J. Kalisz, R. Szplet: Nonlinearity correction of the integrated time-to-digital converter with direct coding, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 46, No. 2, April 1997, pp. 449-452
- [5] D. Chaberski: System pomiaru funkcji intensywności strumienia jonów w spektrometrii masowej czasu przelotu, *Rozprawa Doktorska*, WAT, Warszawa 2006
- [6] J. Kalisz, M. Pawłowski, R. Pełka: Error analysis and design of the Nutt time-interval digitiser with picosecond resolution, *Journal of Physics E: Scientific Instrumentation*, vol. 20, 1987, pp. 1330-1341