

**Krzysztof GADEK, Marek DUDZIK**

POLITECHNIKA KRAKOWSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII ELEKTRYCZNEJ I KOMPUTEROWEJ, KATEDRA ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Polska  
POLITECHNIKA KRAKOWSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII ELEKTRYCZNEJ I KOMPUTEROWEJ, KATEDRA TRAKCJI I STEROWANIA RUCHEM, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Polska

## Optimalizacja parametrów modulatora w ultradźwiękowym układzie do pomiaru odległości metodą korelacyjną

Dr inż. Krzysztof GADEK

Autor pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Krakowskiej gdzie zajmuje się badaniami związanymi z mikroprocesorową analizą sygnałów pochodzących z przetworników ultradźwiękowych, prowadzi wykłady z mikroprocesorowych technik pomiarowych oraz programowania w środowisku LabVIEW.



e-mail: [chris@nexus.eletron.pk.edu.pl](mailto:chris@nexus.eletron.pk.edu.pl)

Mgr inż. Marek DUDZIK

Jest pracownikiem naukowo dydaktycznym Politechniki Krakowskiej, Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej. W ostatnim okresie zajmuje się między innymi zagadnieniami związanymi ze sztucznymi sieciami neuronowymi.



e-mail: [marekdudzik@pk.edu.pl](mailto:marekdudzik@pk.edu.pl)

### Streszczenie

Artykuł prezentuje metodę optymalizacji parametrów modulatora ultradźwiękowego układu pomiaru odległości. W celu optymalizacji wprowadzono parametry sygnału służące jako kryterium optymalizacyjne. Przedstawione wyniki badań dotyczą parametrów modulacji fazy jak i częstotliwości. W artykule zestawiono wyniki tradycyjnych metod detektorów progowych z metodami korelacyjnymi z modulatorami fazy i częstotliwości. Układ pomiarowy zaimplementowano na mikrokontrolerze z rdzeniem ARM® Cortex™-M4 a sam układ analizy danych zabudowano na bazie programu LabVIEW. Wyniki badań pozwoliły na ustalenie optymalnych parametrów samego sygnału modulatora jak i binarnego ciągu modulującego, dla którego dane pomiarowe były maksymalnie jednoznaczne przy zachowaniu kryterium minimalnego błędu pomiaru odległości.

**Słowa kluczowe:** pomiary ultradźwiękowe, badania nieniszczące, algorytm pomiaru odległości.

### Parameter optimization of the ultrasonic modulator system for distance measurement

#### Abstract

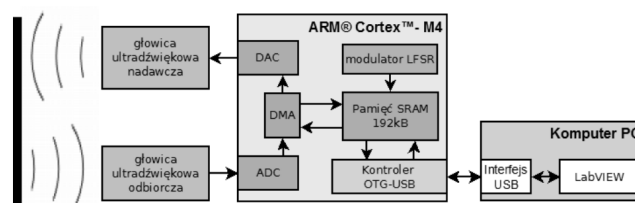
Ultrasonic time of flight (TOF) measurement methods are commonly used. The methods can be used for distance measurement in a liquid environment, for example water, glycerol or other environments in which ultrasonic wave can propagate. The correlation measurement method based on signal analysis can be used for such measurements. The signal analysis takes into account the signal emitted by a transmitter and the signal received in a receiver. The analysis is based on calculation of correlation between the signals. If the emitted signal propagates in liquid environment, the signal received in the receiver can be distorted because the ultrasonic wave can be reflected in such environment due to various factors. This paper presents a method to optimize the parameters of an ultrasonic distance measuring system modulator. For the purpose of optimization the parameters of the signal were introduced as a criterion for optimization. In the paper the results obtained with the traditional threshold detector methods are compared with those obtained by the correlation methods with phase and frequency modulators. The measuring system was implemented on a microcontroller core ARM® Cortex™-M4 and was connected to the system of data analysis based on LabVIEW. The results allowed us to determine the optimal parameters of the signal modulator and the binary code modulator, for which the data were maximally unambiguous with maintaining the criterion of a minimum distance measurement error.

**Keywords:** measurement of ultrasonic wave, non-destructive testing, the algorithm of distance measurement.

### 1. Wstęp

Metody pomiaru czasu przelotu fali ultradźwiękowej stosowane są powszechnie w szerokiej gamie układów pomiarowych. Wzbudzenie mechaniczne odbywa się w układzie przetwornika piezoelektrycznego pobudzanego impulsem elektrycznym. Częstotliwość tak

wygenerowanej fali jest zdefiniowana rezonansem mechanicznym przetwornika, który jest silnie zależny od grubości elementu piezoelektrycznego. Najczęściej stosowane częstotliwości fali dobrane są z zakresu od 1 do 10 MHz. Fala ultradźwiękowa gdy napotyka na granice ośrodków, ulega odbiciu. Fala stanowiąca superpozycję wszystkich odbić dociera ponownie do przetwornika piezoelektrycznego, gdzie zostaje zamieniona na niskonapięciowy sygnał elektryczny. Metody analizy powyższego sygnału elektrycznego, stanowią istotę metod pomiaru odległości. Badania ograniczające się do analizy impulsu fali ultradźwiękowej rozchodzącej się wzdłuż ośrodka są niewystarczające i nie dają zadowalających i jednoznacznych wyników w przypadkach, gdy parametry ośrodka są złożone lub ulegają szybkim zmianom. Metody korelacyjne opisane w artykule opierają się na analizie sygnału odbieranego i porównaniu jego parametrów ze zmodulowanym sygnałem wzbudzenia. Wykorzystanie modułu (rys. 1.) mikrokontrolera ARM® Cortex™-M4 do ciągłej modulacji wzbudzonej fali ultradźwiękowej umożliwia zwiększenie częstotliwości pomiarów, przez co uzyskać można lepszą rozdzielczość sygnału, która to ograniczona jest częstotliwością pracy zegara taktującego modulatora fali wymuszenia.



Rys. 1. Schemat blokowy wykorzystania modułu pomiarowego do wyznaczenia odległości

Fig. 1. Block diagram of the measuring module used to determine the distance

Wyznaczenie parametrów modulatora takich jak głębokość modulacji, parametry generatora modulującego LFSR oraz wyznaczenie skuteczności metody modulacji fazy lub częstotliwości na podstawie wprowadzonych kryteriów stanowi istotę poniższego artykułu. Skuteczność metod korelacyjnych z wymuszeniem w układzie modulacji fazy i częstotliwości używanych do pomiaru odległości, została zestawiona z dwiema klasycznymi metodami z detektorami progowymi. Metody korelacyjne omawiane w literaturze [8, 9] zostały zmodyfikowane do potrzeb mikroprocesorowych przez autora i zaimplementowane w układach FPGA [1] jak i systemie mikrokontrolera wykorzystującego rdzeń ARM® Cortex™-M4. Wykorzystując wbudowany interfejs USB dane pomiarowe przesyłane są do komputera PC w celu dalszej analizy. Użycie komputera PC umożliwia gromadzenie danych pomiarowych i porównanie różnych metod pomiarowych w celu wyzna-

czenia ich skuteczności poprzez porównanie takich parametrów jak odchylenie standardowe, błąd względny i bezwzględny.

## 2. Układ modulatora fali wymuszenia

W celu zastosowania ciągłej analizy sygnału odbieranego wykorzystano ciągłą modulację sygnału wymuszającego. Analiza doboru takiego sygnału zakłada możliwość wykorzystania modulatora fazy jak i częstotliwości. W układzie modulatora fazy fali nośnej  $FM(t)$  sygnał opisany jest równaniem (1).

$$FM(t) = A_m \cos(2\pi f_n t + k \cdot KCM(t)) \quad (1)$$

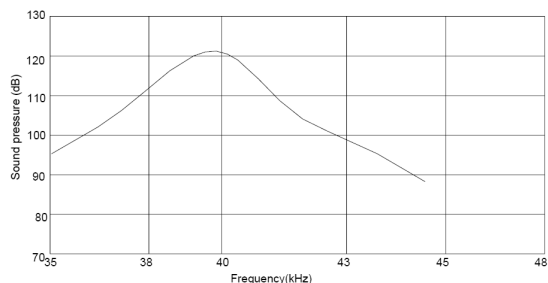
analogicznie w układzie modulatora częstotliwości fali nośnej  $CM(t)$  sygnał opisuje równanie (2).

$$CM(t) = A_m \cos(2\pi(f_n + k \cdot KCM(t))t) \quad (2)$$

Sygnały wymuszenia modulowane są kodem binarnym  $KCM(t)$ . Sekwencja kodu modulującego KCM generowana jest w generatorze [6] liczb pseudolosowych LFSR (ang. Linear Feedback Shift Register). Siedmiobitowy rejestr przesuwany z liniowym sprzężeniem zwrotnym, którego parametry zostały wyznaczone w procesie optymalizacji opisany jest wielomianem  $W(x)$ .

$$W(x) = x^7 + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + 1 \quad (3)$$

Modulacja fazy jak i częstotliwości nie ma wpływu na amplitudę sygnału. Poprzez fakt symetrycznego rozkładu zer i jedynek kodu KCM częstotliwość fali nośnej nie ulega przesunięciu [7]. Fakt ten ma znaczenie z uwagi na wąskie pasmo nadajnika fali ultradźwiękowej (rys. 2). Charakterystyka częstotliwościowa odpowiedzi układu rezonansowego przetwornika piezoelektrycznego posiada maksimum dla częstości rezonansowej  $f_n \approx 40$  [kHz].



Rys. 2. Charakterystyka częstotliwościowa przetwornika BPU-1640IOAH12 (źródło: BESTAR ELECTRONICS INDUSTRY CO.,LTD)

Fig. 2. Frequency characteristic of the converter BPU-1640IOAH12 (Source: BESTAR ELECTRONICS INDUSTRY CO., LTD., LTD)

W celu zachowania maksymalnej informacji w transmitowanym sygnale, widmo częstotliwościowe sygnałów modulowanych powinno w największym możliwym stopniu pokrywać się z charakterystyką częstotliwościową używanych przetworników ultradźwiękowych [5]. Przekształcając (1) i (2) otrzymujemy,

$$M(t) \approx A_m [\cos(2\pi f_n t) - k \cdot KCM(t) \sin(2\pi f_n t)] \quad (4)$$

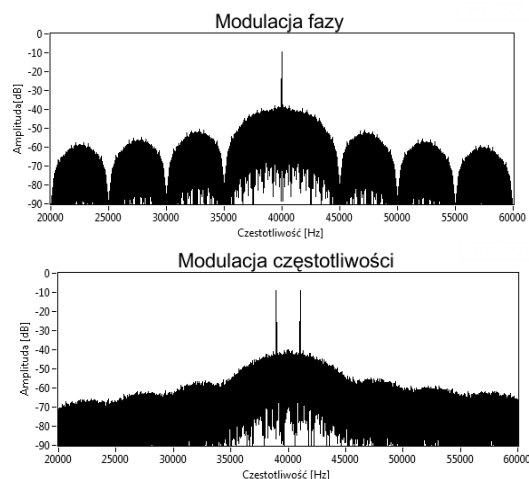
Z równania (4) można wyznaczyć [2] charakterystykę częstotliwościową zmodulowanego sygnału,

$$B_T = A_m \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \cos[2\pi(nf_m + f_n)t] \quad (5)$$

gdzie:  $f_n$  – częstotliwość sygnału fali nośnej modulowana sygnałem  $f_m$ ,  $J_n(\beta)$  – funkcja Bessela opisana równaniem (6).

$$J_n(\beta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j[\beta \sin(\theta - n\theta)]} d\theta \quad (6)$$

Rysunek 3 prezentuje wyznaczone z (5) charakterystyki częstotliwościowe sygnałów wymuszenia dla modulacji częstotliwościowej i fazowej.



Rys. 3. Charakterystyki częstotliwościowe sygnału modulatora fazy oraz częstotliwości fali ultradźwiękowej

Fig. 3. Frequency characteristics of the phase modulator signal and the ultrasound wave frequency

Analiza charakterystyk zawartych na rysunkach 2 i 3 prowadzi do wniosku, że modulacja fazy umożliwi korzystniejsze przekazanie informacji zawartej w modulowanym sygnale przy uwzględnieniu transmitancji przetworników ultradźwiękowych.

## 3. Układ korelatora wymuszenia i fali odbitej

Pomiar opóźnienia fali odbitej odbywa się w układzie programowego korelatora modulowanego sygnału  $M(t)$  z sygnałem elektrycznym odtworzonym przez głowicę ultradźwiękową. Dla sygnałów  $g(t)$  i  $h(t)$  o ograniczonej energii funkcja korelacji wzajemnej określona jest wzorem [3],

$$\phi_{gh}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g^*(t) h(t + \tau) dt \quad (7)$$

gdzie:  $g^*(t)$  - funkcja zespolona sprzężona do  $g(t)$

Dla sygnałów dyskretnych  $g_n$  i  $h_n$  przesuniętych względem siebie o całkowitą liczbę próbek  $m$ , dyskretna postać funkcji korelacji wzajemnej wyznaczona z równania (7) ma postać:

$$\phi_{gh}(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_n h_{n-m}^* \quad (8)$$

Maksymalna wartość równania (8) przyjmuje dla poszukiwanej opóźnienia identyfikującego poszukiwaną odległość  $l$ .

$$|\phi_{gh}(m)| > \max\{\phi_{gh}(1), \phi_{gh}(2), \dots, \phi_{gh}(L)\} \quad (9)$$

gdzie:  $L$  – długość korelowanych ciągów.

Z równania (9) wynika, że maksimum funkcji korelacji pozwala wyznaczyć opóźnienie, przy którym zachodzi maksymalna korelacja sygnału z głowicy ultradźwiękowej z sygnałem programowo odtwarzanym w układzie odbiornika. Zadaniem korelatora odbiornika jest odnalezienie maksimum funkcji  $\phi_{gh}$  korelacji w funkcji programowego opóźnienia  $\tau$ .

#### 4. Kryterium jakości sygnału pomiarowego

W celu wyznaczenia optymalnych parametrów sygnału modulowanego przyjęto kryterium jakości sygnału pomiarowego jako maksymalny stosunek wartości piku korelacji do wartości średniej sygnału  $\phi_{gh}$ ,

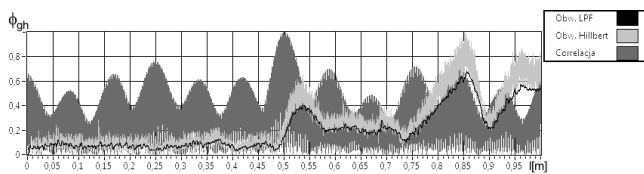
$$k(l) = \frac{\max(\phi_{gh})}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N g_n h^*(n-m)} \quad (10)$$

Przyjęte kryterium (10) pozwoliło wyznaczyć optymalne współczynniki modulacji oraz określić skuteczność przyjętych założeń w badanym zakresie pomiarowym. Wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na bazie powyższych założeń przedstawiono w pkt 5.

Dodatkowo w celu określenia metody umożliwiającej porównanie zastosowanych algorytmów w odniesieniu do tradycyjnych metod detektora progowego z filtrem obwiedniowym LP i Tr. Hilberta wykorzystano odchylenie standardowe obliczone ze 100 próbek pomiarowych ( $N=100$ ). Rozkład uchybów odczytów jest rozkładem normalnym.

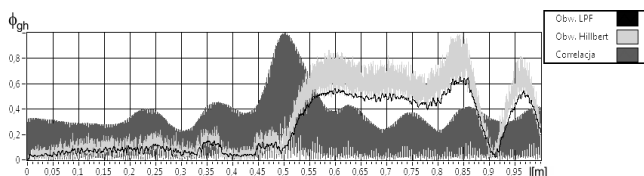
#### 5. Wyniki optymalizacji badań laboratoryjnych

W celu wyznaczenia optymalnych wartości modulatorów przeprowadzono szereg badań i testów laboratoryjnych w trakcie których poszukiwano maksymalnej wartości  $k(l)$ . Uzyskano tą drogą szereg danych pomiarowych (rys. 4, rys. 5) które pozwoliły wyznaczyć najlepsze współczynniki modulatora a przez to również metodę pomiarową.



Rys. 4. Wyniki badań laboratoryjnych dla przeszkody w odległość 0,5m uzyskane dla 3 metod: detektora progowego LPF, detektora progowego z Tr. Hilberta oraz metody korelacji z modulatorem częstotliwości

Fig. 4. Results of laboratory tests for the obstacle at a distance of 0.5 m obtained for 3 methods: the LPF threshold detector, the Hilbert transformation threshold detector and the method of correlation with frequency modulator



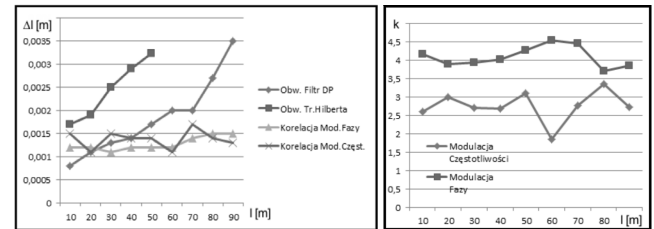
Rys. 5. Wyniki badań laboratoryjnych dla przeszkody w odległość 0,5m uzyskane dla 3 metod: detektora progowego LPF, detektora progowego z Tr. Hilberta oraz metody korelacji z modulatorem fazy

Fig. 5. Results of laboratory tests for the obstacle at a distance of 0.5 m obtained for 3 methods: the LPF threshold detector, the Hilbert transformation threshold detector and the method of correlation with phase modulator

Dla 7 bitowego wielomianu kodującego LFSR, optymalny wielomian  $W(x)$  ustalony został na podstawie optymalizacji według kryterium jakości sygnału  $k(l)$ . Optymalny wielomian  $W(x) = 0x76$  umożliwia wygenerowanie unikatowego ciągu 62-bitowego, co przy częstotliwości kodowania  $f_k = 5$  kHz i fali nośnej  $f_n = 40$  kHz umożliwia pomiar w zakresie (0 - 2,1) m. Optymalna głębokość modulacji  $\phi_m = 122^\circ$  dla modulatora fazy oraz optymalna dewiacja częstotliwości  $\Delta f = 1,05$  kHz.

W celu wyznaczenia skuteczności poszczególnych metod pomiarowych obliczono odchylenie standardowe obliczone ze 100 próbek pomiarowych. Za odległość zmierzoną uznano średnią ze 100 pomiarów jednostkowych. Przyjmując ze rozdzielczość  $\Delta l$  definiujemy jako sytuację, w której prawdopodobieństwo tego, że

odczyt zaliczyć można do jednej lub drugiej odległości, wynosi 50%, to  $\Delta l = 2/3 \cdot \sigma$ . Przykładowe zależność  $\Delta l$  od mierzonej odległości czterema metodami (metodą detektora progowego z zastosowaniem obwiedni uzyskanej przy pomocy transformaty Hilberta, metoda korelacji z modulatorem fazy oraz metodą korelacji z modulacją częstotliwości) w zakresie 0.1- 1m przedstawia poniższy wykres (rys. 6).



Rys. 4. Wyniki badań porównawczych czterech metod pomiarowych wg.

kryterium min. błędów pomiarowych oraz wyniki badań porównawczych

Fig. 4. Comparison of four measuring methods by the criterion of the minimum measurement error and the results of comparative tests of two correlation methods by the criterion of the maximum signal quality k

Wyniki badań potwierdziły lepszą jakość sygnału z modulacją fazy wg. kryterium jakości (10) sygnału  $\phi_{gh}$ . Porównując wykresy na rysunkach 4 i 5 można zauważyć korzystniejszy stosunek piku korelacji do wartości średniej sygnału dla modulatora częstotliwości.

#### 6. Podsumowanie

Opracowano metodę pozwalającą wyznaczyć optymalny generator LFSR dla metod korelacyjnych. Metoda kryterium jakości sygnału pozwoliła wyznaczyć optymalną głębokość modulacji. Badania potwierdziły, że metoda modulacji fazy jest skuteczniejsza od modulacji częstotliwości do wyznaczania odległości metodą korelacji sygnałów.

#### 7. Literatura

- [1] Gądek K., Jagiełło A., Dudzik M.: Pomiar opóźnień fali ultradźwiękowej w układzie modulacji fazy realizowanej za pomocą układu FPGA, Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i Mechatroniki, vol. 32, Gliwice, 2012, s. 27-31.
- [2] Abramson N.: Bandwidth and Spectra of Phase-and-Frequency-Modulated Waves, IEEE Transactions on Communications Systems, December 1968, s. 407-414.
- [3] Gądek K.: Wzorce czasu w metrologii cyfrowej i mikroprocesowej, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011, 7-87.
- [4] Marwan Younis: Digital Beam-Forming for High Resolution Wide Swath Real and Synthetic Aperture Radar, DISSERTATION July 2004.
- [5] Riley K., Hobson M., Bence S.: Mathematical Methods for Physics and Engineering, Cambridge University Press, New York, 2006.
- [6] Tsuneda A., Miyazaki Y.: Performance Evaluation of LFSR-Based Spreading Sequences with Negative Auto-correlation Designed by Chaos Theory of Modulo-2 Added Sequences, IEEE 2009, 141-144.
- [7] Tsuneda A., Miyazaki Y.: Design and Evaluation of Spreading Sequences with Negative Auto-correlations Based on Chaos Theory and LFSR Sequences, IEEE 2008, 725-729.
- [8] Zhao X., Luo Q., Han B, A Novel: Ultrasonic Ranging System Based on the Self-correlation of Pseudo-random Sequence, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Information and Automation, Zhuhai/Macau, China 2009, 1124-1128.
- [9] Granja F., Jimenez A.R.: Ultrasound modulation and codification for localization systems, New Acoustics II, CSIC Biblioteca de Ciencias, 2006, pp. 167-186.