

doi:10.15199/48.2021.09.14

Badania symulacyjne fazowej metody pomiaru opóźnienia sygnałów losowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania symulacyjne metody pomiaru czasu opóźnienia sygnałów losowych wykorzystującą fazę wzajemnej gęstości widmowej. Analizę oparto na modelach sygnałów stochastycznych, symulujących sygnały pochodzące z detektorów scyntylacyjnych wykorzystywanych w pomiarach przepływów dwufazowych w rurociągu poziomym.

Abstract. In this paper simulation studies of the method of time delay measurement of random signals based on the phase of cross-spectral density function is presented. The analysis is based on models of stochastic signals from scintillation detectors used in the measurements of two-phase flows in a horizontal pipeline. (Simulation tests of the phase method for measurements of the time delay of random signals).

Słowa kluczowe: sygnał losowy, estymacja czasu opóźnienia, wzajemna gęstość widmowa, przepływ dwufazowy.

Keywords: random signal, time delay estimation, cross-spectral density function, two-phase flow.

Wstęp

Problem estymacji opóźnień czasowych jest istotnym tematem w wielu zastosowaniach, takich jak systemy radarowe i sonarowe, akustyka, diagnostyka medyczna czy pomiary przepływów dwufazowych.

W ciągu ostatnich kilku dekad zaproponowano wiele metod szacowania opóźnienia czasowego [1-6]. W celu określenia opóźnienia stacjonarnych sygnałów losowych, uzyskanych z dwóch lub więcej źródeł, stosuje się metody statystyczne. Klasyczne techniki estymacji opóźnień czasowych wykorzystują funkcję korelacji wzajemnej, funkcje różnicowe (średni moduł różnicy amplitud, średni kwadrat różnicy amplitud) i funkcje złożone, będące połączeniem korelacji wzajemnej i ww. funkcji różnicowych [7]. W niektórych sytuacjach możliwe jest także zastosowanie metod opartych na warunkowym uśrednianiu sygnałów [8]. Są to metody wykorzystujące analizę w dziedzinie czasu.

Alternatywną metodę stanowi analiza w dziedzinie częstotliwości i wykorzystanie charakterystyki fazowej wzajemnej gęstości widmowej mocy [1, 9]. Metoda fazowa jest mniej popularna niż metody analizy w dziedzinie czasu i stosunkowo rzadko stosowana.

W niniejszej pracy przedstawiono badania symulacyjne metody fazy wzajemnej gęstości widmowej, przeprowadzone dla komputerowych modeli wzajemnie opóźnionych sygnałów stochastycznych. Parametry modeli dobrano w ten sposób, aby odpowiadały sygnałom uzyskiwanym w radioizotopowych pomiarach przepływu ciecz-gaz [10].

Zasada wyznaczania opóźnienia sygnałów losowych z fazy wzajemnej gęstości widmowej

W pomiarach opóźnień transportowych z wykorzystaniem dwóch czujników często wykorzystywane są modele sygnałów losowych $x(t)$ oraz $y(t)$, których wzajemną zależność można wyrazić za pomocą równania:

$$(1) \quad y(t) = c \cdot x(t - \tau_0) + z(t)$$

gdzie: $x(t)$ – stacjonarny, ergodyczny sygnał losowy o rozkładzie prawdopodobieństwa $N(0, \sigma_x)$, c – stały współczynnik, $\tau_0 = d/V$ – opóźnienie transportowe, d – odległość rozmieszczenia czujników, V – prędkość sygnału, $z(t)$ – stacjonarny, nieskorelowany z $x(t)$ szum biały o rozkładzie prawdopodobieństwa $N(0, \sigma_z)$.

Dla sygnałów opisanych równaniem (1) można zapisać funkcję korelacji wzajemnej w postaci ogólnej:

$$(2) \quad K_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t + \tau)]$$

która po przekształceniu przyjmie postać:

$$(3) \quad K_{xy}(\tau) = cK_{xx}(\tau - \tau_0)$$

gdzie: $E[\]$ – wartość oczekiwana, $K_{xx}(\tau)$ – funkcja autokorelacji sygnału $x(t)$.

Korzystając z zależności między funkcjami korelacji a funkcjami gęstości widmowych mocy, bazując na równaniu (3) można otrzymać wyrażenie (4) opisujące wzajemną jednostronną gęstość widmową (WGW) [1]:

$$(4) \quad G_{xy}(f) = cG_{xx}(f)e^{-j2\pi f\tau_0}$$

WGW jest wielkością zespoloną, w związku z czym można wyznaczyć jej moduł (5) oraz argument (fazę) (6).

$$(5) \quad |G_{xy}(f)| = cG_{xx}(f)$$

$$(6) \quad \Phi_{xy}(f) = \arg(G_{xy}(f)) = 2\pi f\tau_0$$

Przy stałej prędkości ($V = const$) argument wzajemnej gęstości widmowej mocy jest funkcją częstotliwości o liniowym charakterze.

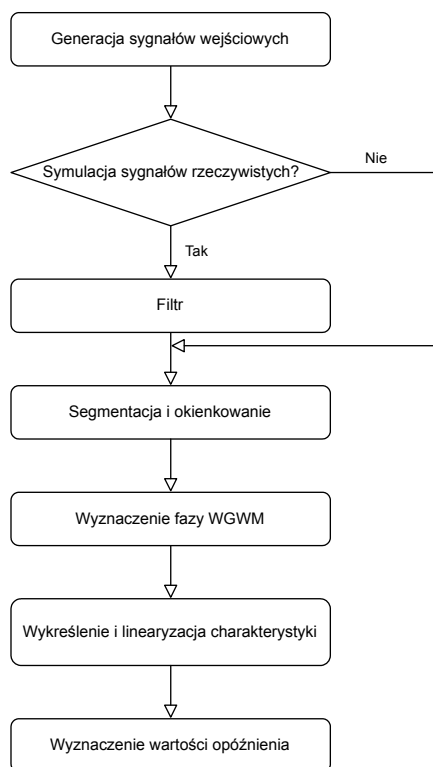
Przekształcając równanie (6) można wyznaczyć zależność (7) umożliwiającą wyznaczenie opóźnienia, która przyjmuje postać:

$$(7) \quad \tau_0 = \frac{\Phi_{xy}(f)}{2\pi f}$$

Z równania (7) wynika, że do wyznaczenia opóźnienia dla wybranej częstotliwości $f = f_0$ wystarczy znajomość wartości funkcji $\Phi_{xy}(f_0)$ wyrażonej w radianach. W przypadku gdy nie jest konieczna znajomość opóźnienia dla konkretnej wartości częstotliwości, celowe jest zastosowanie do aproksymacji charakterystyki fazowej WGWMM metody regresji liniowej [9].

Algorytm zastosowanej metody

Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony algorytm zaimplementowany do badań symulacyjnych pomiaru opóźnienia sygnałów losowych z wykorzystaniem metody fazowej. Algorytm ten został zaimplementowany w środowisku programistycznym LabVIEW.



Rys. 1. Algorytm wyznaczania opóźnienia sygnałów losowych z wykorzystaniem metody fazowej

W pierwszej kolejności w programie następuje generowanie sygnałów wejściowych. W aplikacji zaimplementowano sygnały wejściowe $x(t)$ i $y(t)$, których modele w postaci dyskretnej mają postać:

$$(8) \quad x(n) = s(n) + z_1(n)$$

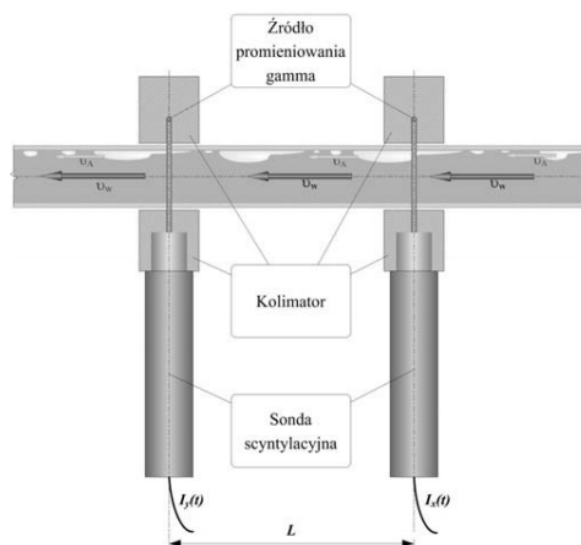
$$(9) \quad y(n) = s(n - l_0) + z_2(n)$$

gdzie: $s(n)$ – dyskretna postać generowanego sygnału, l_0 – dyskretna wartość opóźnienia, $z_1(n)$, $z_2(n)$ – dyskretne wartości wzajemnie nieskorelowanych szumów białych o rozkładach $N(0, \sigma_z)$.

Modele (8) i (9) odpowiadają sygnałom uzyskiwanym w pomiarach przepływu ciecz-gaz w rurociągu poziomym przy zastosowaniu radioizotopowej metody absorpcyjnej. Idea pomiaru przedstawiona jest na rysunku 2. Emitowane przez źródła wiązki promieniowania gamma, kształtowane przez kolimatory, prześwietlają przepływającą mieszaninę. Sondy scyntylicyjne umożliwiają wykrycie zmian absorpcji promieniowania, na podstawie których uzyskuje się wzajemnie opóźnione sygnały stochastyczne [10]. Aby symulowane sygnały odpowiadały sygnałom rzeczywistym rejestrowanym przez detektory w aplikacji zaimplementowano filtr, którego typ i parametry mogą być zmieniane zależnie od wykonywanej symulacji.

W kolejnym kroku następuje podział sygnałów na mniejsze, nienachodzące na siebie segmenty. Aby ograniczyć możliwość wystąpienia przecieku widma wykonywane jest okienkowanie sygnałów za pomocą okna Hanninga. Następnie dla każdego segmentu, stosując procedurę FFT, wyznacza się zgrubne estymatory WGWM, które są następnie uśredniane w zbiorze (procedura Welch). Na podstawie tak przetworzonych estymatorów widma wyznaczone są faza WGWM (z zastosowaniem procedury rozwijania fazy) oraz funkcja koherencji, które

następnie są reprezentowane graficznie. Na tym etapie realizowana jest również operacja linearyzacji fazy WGWM w wybranym zakresie częstotliwości.

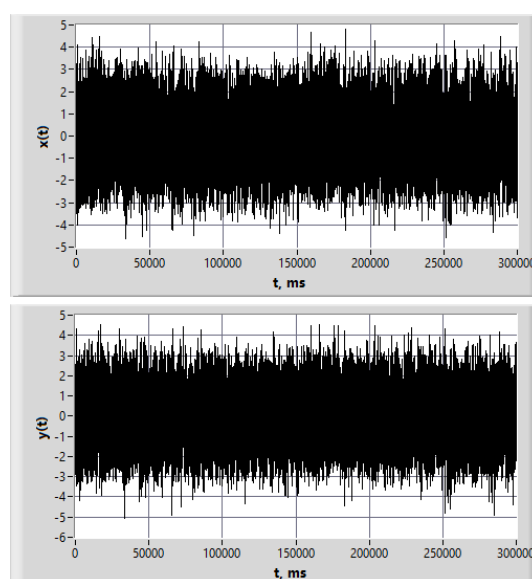


Rys. 2. Idea pomiaru absorpcyjnego przepływu ciecz-gaz w rurociągu poziomym [10]

Ostatni etap stanowi wyznaczenie wartości opóźnienia. Opóźnienie jest wyznaczone dla określonej wartości częstotliwości f_0 z charakterystyki fazowej WGWM przed linearyzacją oraz po linearyzacji, a także w oparciu o współczynnik kierunkowy prostej regresji. W tym ostatnim przypadku obliczenia wykonywane są dla określonego zakresu częstotliwości, wybranego na podstawie analizy przebiegu funkcji koherencji [11].

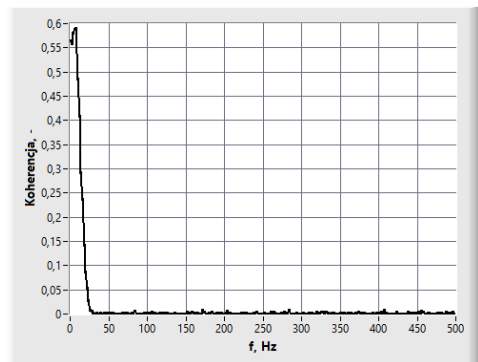
Przykładowe wyniki badań

W interfejsie programu definiowane są dane wejściowe w postaci liczby generowanych próbek, częstotliwości próbkowania, opóźnienia między sygnałami oraz odchyłeń standardowych szumów dodawanych do sygnałów. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe przebiegi wygenerowanych sygnałów.



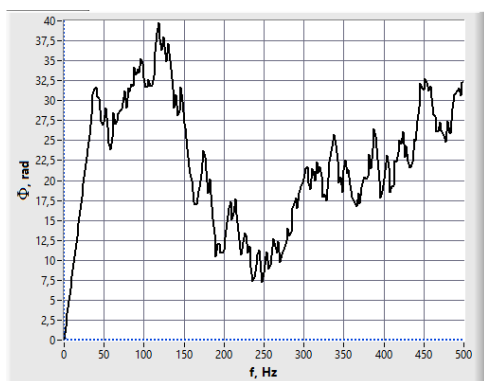
Rys. 3. Przykładowe przebiegi modelowanych sygnałów stochastycznych

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg funkcji koherencji. Funkcja ta określa podobieństwo sygnałów w dziedzinie częstotliwości i przyjmuje wartości w przedziale od 0 do 1 [1]. Na podstawie przebiegu funkcji koherencji określany jest zakres częstotliwości do linearyzacji fazy WGWM (częstotliwość maksymalna jest równa częstotliwości, dla której obserwuje się spadek wartości funkcji koherencji do 0).

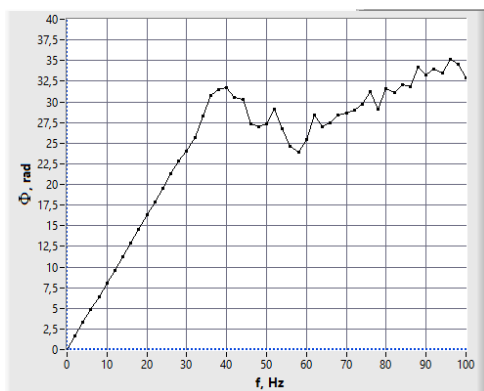


Rys. 4. Przebieg funkcji koherencji

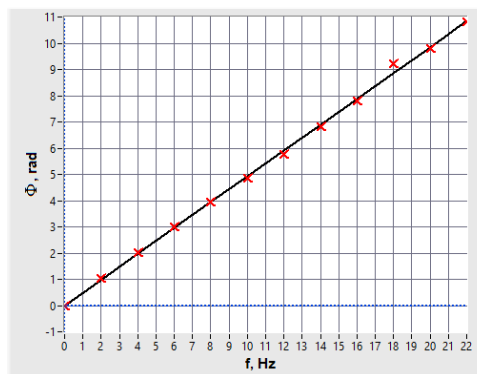
Na rysunkach 5 i 6 pokazano przykładowy przebieg fazy WGWM odpowiednio przed i po wykonaniu operacji uśredniania na zbiorze. Natomiast rysunek 7 przedstawia zlinearyzowany przebieg fazy WGWM dla wybranego zakresu częstotliwości 0 – 22 Hz.



Rys. 5. Przebieg fazy WGWM



Rys. 6. Przebieg fazy WGWM po wykonaniu operacji uśredniania segmentów na zbiorze



Rys. 7. Przebieg zlinearyzowanej fazy WGWM dla wybranego zakresu częstotliwości

Na podstawie przedstawionych wykresów wyznaczane są wartości opóźnień między sygnałami.

W tabeli 1 przedstawiono wybrane wyniki symulacji. W danych wejściowych zmieniano zarówno zadaną wartość opóźnienia ($\tau_{0,N}$), jak i stosunek sygnał-szum (SNR) (przyjęto stały poziom odchylenia standardowego sygnału σ_s , zmianie ulegało tylko odchylenie standardowe szumu σ_z).

Tabela 1. Wyniki pomiarów opóźnienia

$\tau_{0,N}$, ms	SNR , -	$\tau_{0,1}$, ms	$\tau_{0,2}$, ms	$\tau_{0,3}$, ms
130	0,25	128,46	128,68	128,88
130	1	128,96	129,16	129,17
130	4	129,21	129,65	130,39
130	8	129,33	129,79	130,13
80	0,25	80,96	79,28	79,37
80	1	79,12	79,51	80,52
80	4	79,52	80,23	80,32
80	8	79,86	79,91	80,18

Symbolem $\tau_{0,1}$ oznaczono wartość opóźnienia wyznaczoną z fazy WGWM metodą „jednopunktową”, tj. dla określonej wartości częstotliwości f_0 , $\tau_{0,2}$ – wartość opóźnienia wyznaczoną z fazy WGWM po linearyzacji dla określonej wartości f_0 , natomiast $\tau_{0,3}$ – wartość uzyskaną na podstawie współczynnika kierunkowego prostej regresji.

Dla wszystkich przypadków wyznaczono wartości względnego błędu opóźnienia $\delta(\tau)$ ze wzoru:

$$(10) \quad \delta_{\tau_{0,i}} = \frac{|\tau_{0,i} - \tau_{0,N}|}{\tau_{0,N}} \cdot 100\%$$

gdzie: $i = \{1, 2, 3\}$.

Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wartości względnych błędów opóźnienia

$\tau_{0,N}$, ms	SNR , -	$\delta(\tau_{0,1})$, %	$\delta(\tau_{0,2})$, %	$\delta(\tau_{0,3})$, %
130	0,25	1,18%	1,02%	0,86%
130	1	0,80%	0,65%	0,64%
130	4	0,61%	0,27%	0,30%
130	8	0,52%	0,16%	0,10%
80	0,25	1,20%	0,90%	0,79%
80	1	1,10%	0,61%	0,65%
80	4	0,60%	0,29%	0,40%
80	8	0,18%	0,11%	0,21%

Uzyskane wartości opóźnień cechują się pewną losowością w trakcie wykonywania kolejnych powtórzeń symulacji o takich samych danych wejściowych, jednak ich rozrzut nie wpływa znacząco na wyznaczone wartości względnego błędu opóźnienia.

Podsumowanie

Pomiary opóźnień transportowych sygnałów losowych mogą być wykonywane w dziedzinie częstotliwości w oparciu o metodę fazową. Metoda ta polega na analizie charakterystyki fazowej wzajemnej gęstości widmowej mocy i może być stosowana w podobnych warunkach jak metoda korelacyjna.

Stosując metodę fazową w artykule wykonano badania symulacyjne dla modeli sygnałów odpowiadających sygnałom rzeczywistym, uzyskiwanym w pomiarach przepływów dwufazowych ciecz-gaz metodą absorpcyjną.

Wyznaczone wartości względnego błędu opóźnienia dla przedstawionych danych nie przekraczają 1,5%, podczas gdy dla metody korelacji wzajemnej są to wartości ponad dwukrotnie większe [11]. Ponadto metoda korelacji wzajemnej wymaga filtracji sygnałów pomiarowych odpowiednio dobranymi filtrami pasmowymi, co nie jest konieczne w metodzie fazowej.

Autor: mgr inż. Magdalena Nizioł, Politechnika Rzeszowska, Katedra Metrologii i Systemów Diagnostycznych, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów, e-mail: m.niziol@prz.edu.pl

LITERATURA

- [1] Bendat J.S., Piersol A.G., Random data: analysis and measurement procedures, 4th edition, John Wiley, New York (2010)
- [2] Zhong S., Xia W., Song J, He Z., Super-resolution time delay estimation in multipath environments using normalized cross spectrum, *2013 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)*, (2013), 288-291
- [3] Costa-Júnior J.F.S. et al., Measuring uncertainty of ultrasonic longitudinal phase velocity estimation using different time-delay estimation methods based on cross-correlation: Computational simulation and experiments, *Measurement*, vol. 122 (2018), 45–56,
- [4] Mosorov V., A method of transit time measurement using twin plane electrical tomography. *Measurement Science and Technology*, vol. 17 (2006), 753-760
- [5] Hanus R., Time delay estimation of random signals using cross-correlation with Hilbert Transform. *Measurement*, vol. 146 (2019), 792-799
- [6] Jacovitti G., Scarano G., Discrete time technique for time delay estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41 (1993), n. 2, 525-533
- [7] Chen J, Benesty J, Huang Y., Performance of GCC- and AMDF-based time-delay estimation in practical reverberant environments. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2005, 498964, 25–36
- [8] Hanus R., Kowalczyk A., Szlachta A., Chorzępa R., Application of conditional averaging to time delay estimation of random signals. *Measurement Science Review*, vol. 18 (2018), n. 4, 130-137
- [9] Hanus R., Estymacja czasu opóźnienia z fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 53 (2007), nr 9bis, 206-208
- [10] Hanus R., Zych M., Petryka L., Różnicowe i złożone metody analizy sygnałów w radioizotopowych pomiarach prędkości fazy rozproszonej w przepływie ciecz-gaz w rurociągu poziomym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 3, 60-63
- [11] Hanus R., Zych M., Jaszczur M., Petryka L., Świsulski D., Radioisotope measurements of the liquid-gas flow in the horizontal pipeline using phase method, *The European Physical Journal Web of Conferences*, vol. 180 (2018), 02032