

Robert HANUS

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Wirtualny analizator fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy

Dr inż. Robert HANUS



Adiunkt w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się głównie zagadnieniami związanymi z modelowaniem i analizą sygnałów losowych oraz statystycznymi metodami pomiaru opóźnienia. Autor lub współautor kilkudziesięciu publikacji w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych w kraju i za granicą.

e-mail: rohan@prz.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wirtualny analizator wzajemnej gęstości widmowej mocy zrealizowany z wykorzystaniem oprogramowania LabVIEW i modułu akwizycji danych NI USB-6009. Układ przeznaczony jest do wyznaczania opóźnienia na podstawie fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy zarówno dla rzeczywistych sygnałów losowych jak i generowanych komputerowo modeli takich sygnałów.

Słowa kluczowe: przyrządy wirtualne, wzajemna gęstość widmowa mocy, estymacja czasu opóźnienia, sygnały losowe.

Virtual analyzer of phase of cross-spectral density function

Abstract

This article presents the virtual analyzer of cross-spectral density function based on LabVIEW software and NI USB-6009 DAQ device. The instrument allows to obtain the time delay of real as well as simulated random signals using phase of cross-spectral density function.

Keywords: virtual instruments, cross-spectral density function, time delay estimation, random signals.

1. Wstęp

Przyrządy wirtualne, stanowiące połączenie urządzeń pomiarowych nowej generacji i komputera osobistego ogólnego przeznaczenia z odpowiednim oprogramowaniem, są szeroko stosowane w badaniach naukowych, przemyśle i dydaktyce [1-3]. Ich popularyzacji sprzyjają szybko rosnące możliwości i spadające ceny sprzętu i oprogramowania. Szczególnie przydatne są przyrządy wirtualne służące do akwizycji i analizy sygnałów, realizujące algorytmy przetwarzania standardowo niedostępne w klasycznych analizatorach. Jedną z takich aplikacji może być wyznaczanie opóźnienia czasowego sygnałów losowych z fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy (WGWM). Metoda wykorzystująca tą zasadę ma wiele zastosowań w nauce i technice (m.in. geologia, hydrologia, radiolokacja, astronomia, medycyna) [4-9].

2. Sposoby estymacji opóźnienia z fazy WGWM

Zaletą zastosowania do pomiaru opóźnienia τ_0 pomiędzy dwoma stacjonarnymi sygnałami losowymi $x(t)$ i $y(t)$ metody wykorzystującej charakterystykę fazową WGWM jest możliwość wyznaczenia τ_0 dla określonej wartości częstotliwości f_0 [4-6, 9]. Opóźnienie estymowane jest z wygładzonej charakterystyki fazowej WGWM $\tilde{\Phi}_{xy}$ ze wzoru (1), gdzie $\hat{\tau}_{0k}$ oznacza estymator opóźnienia dla dyskretnej wartości wybranej częstotliwości f_{0k} :

$$\hat{\tau}_{0k} = -\frac{\tilde{\Phi}_{xy}(f_{0k})}{2\pi f_{0k}}. \quad (1)$$

Podstawowe właściwości metody przedstawiono w pracy [10].

W zależności od notacji przyjętej przez producentów oprogramowania, dla sytuacji gdy sygnał $x(t)$ wyprzedza $y(t)$ ($\tau_0 > 0$) uzyskuje się dodatnie lub ujemne wartości fazy WGWM. W niniejszej pracy uwzględniono ten drugi przypadek, stąd minus w zależnościach (1) i (3). Do estymacji WGWM stosuje się najczęściej metody Welch lub Barletta [4, 11] dla ciągów dyskretnych próbek sygnałów $x(n)$ i $y(n)$ o długościach N_{total} , pobieranych ze stałym odstępem Δt , będącym odwrotnością odpowiednio dobranej częstotliwości próbkowania f_s . Wymagają one podziału zbiorów próbek N_{total} na N_d segmentów, każdy o długości N , przy czym poszczególne segmenty mogą się częściowo nakładać (metoda Welch) lub nie (metoda Bartletta). W wyniku zastosowania dla każdego segmentu skończonej dyskretnej transformaty Fouriera, obliczenia fazy WGWM i uśrednienia odcinkowego uzyskuje się wartości $\tilde{\Phi}_{xy}(f_k)$ dla f_k użytecznych dyskretnych częstotliwości ($k = 0 \dots N/2 - 1$), a rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości wynosi $\Delta f = 1 / N\Delta t$.

Analiza błędów statystycznych omawianej metody [12] pozwoliła uzyskać zależność na odchylenie standardowe estymatora opóźnienia $\hat{\tau}_{0k}$ dla liczby uśrednień N_d w postaci:

$$\sigma[\hat{\tau}_{0k}] \approx \frac{1}{2\pi f_{0k}} \left\{ \frac{1 - \gamma_{xy}^2(f_{0k})}{2N_d \gamma_{xy}^2(f_{0k})} \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

gdzie $0 \leq \gamma_{xy}(f_{0k}) \leq 1$ jest wartością funkcji koherencji dla f_{0k} . Jak wynika z zależności (2) odchylenie standardowe opóźnienia maleje dla dużych wartości $\gamma_{xy}(f_{0k})$, N_d i f_{0k} .

Gdy nie jest wymagana znajomość opóźnienia dla konkretnej częstotliwości f_{0k} , można zastosować metodę regresji liniowej do aproksymacji charakterystyki fazowej WGWM [9, 10]. Ponieważ charakterystyka $\Phi_{xy}(f)$ jest liniowa i przechodzi przez początek układu współrzędnych, opóźnienie można wyznaczyć przy wykorzystaniu współczynnika kierunkowego a linii regresji liniowej fazy WGWM względem częstotliwości:

$$\hat{\tau}_0 = -\frac{1}{2\pi} \hat{a} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\sum_{k=1}^m f_k \tilde{\Phi}_{xy}(f_k)}{\sum_{k=1}^m f_k^2}, \quad (3)$$

gdzie m jest liczbą par wartości fazy i częstotliwości stosowaną do wyznaczania prostej regresji. Otrzymana na podstawie (3) estymata opóźnienia jest liczbą losową, więc dla kolejnych eksperymentów uzyska się inne wartości, gdyż proste regresji będą przebiegały nieco inaczej. Eksperymentalne odchylenie standardowe estymatora (3) maleje ze wzrostem m i oblicza się je z zależności:

$$s[\hat{\tau}_0] = \left\{ \frac{1}{4\pi^2 (m-1) \sum_{k=1}^m f_k^2} \left[\sum_{k=1}^m \tilde{\Phi}_{xyk}^2(f_k) - \frac{\left[\sum_{k=1}^m f_k \tilde{\Phi}_{xyk}(f_k) \right]^2}{\sum_{k=1}^m f_k^2} \right] \right\}^{1/2}. \quad (4)$$

3. Wirtualny analizator fazy WGWM

Zrealizowany w środowisku LabVIEW 7.1 przyrząd wirtualny pozwala na wyznaczanie opóźnienia z fazy WGWM na podstawie zależności (1) i (3) dla losowych sygnałów napięciowych, których akwizycję umożliwia moduł NI USB-6009, lub (w wersji symulacyjnej) dla przebiegów generowanych programowo zgodnie z modelem:

$$y(n) = c \cdot x(n - l_0) + z(n), \quad (5)$$

gdzie: $x(n)$ – dyskretne wartości szumu o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa $N(0, \sigma_x)$; c – stały współczynnik (zwykle $c \approx 1$); l_0 – dyskretna wartość opóźnienia; $z(n)$ – stacjonarny, nieskorelowany z sygnałem $x(n)$ szum o rozkładzie $N(0, \sigma_z)$. Do modelowania sygnałów $x(n)$ i $z(n)$ wykorzystano moduły generatorów przebiegów pseudolosowych dostępne w bibliotekach LabVIEW. Dla $x(n)$ zastosowano filtrację dolnoprzepustową, co umożliwia kształtowanie widma przez dobór typu filtra i częstotliwości odcięcia. Zrealizowano także zadawanie stosunku sygnał/szum ($SNR = \sigma_x/\sigma_z$).

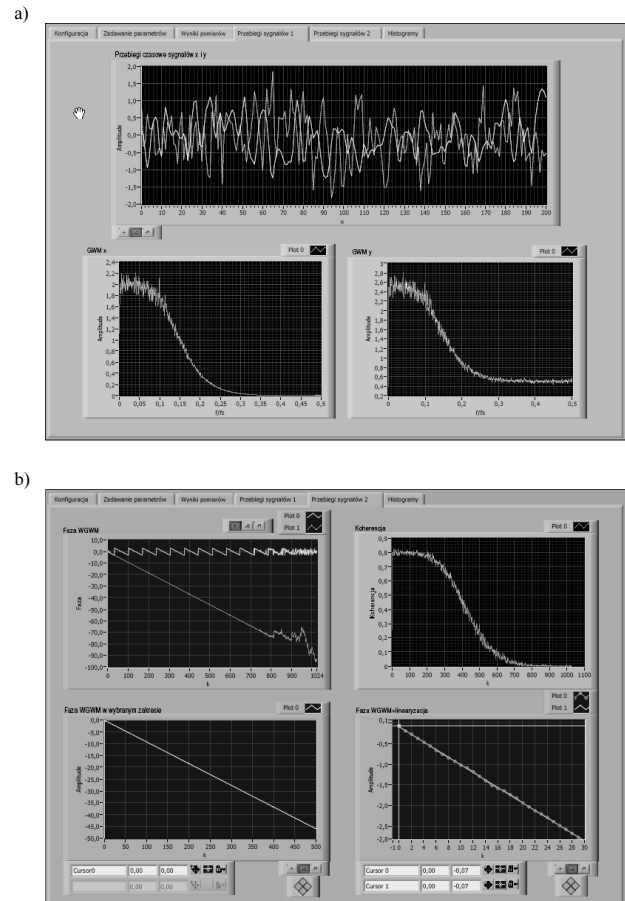
Analizator umożliwia ponadto:

- zadawanie parametrów akwizycji (N , f_s) i analizy widmowej (N_d , typ okna) sygnałów;
- obserwację przebiegów czasowych sygnałów $x(n)$ i $y(n)$,
- wyznaczanie dla tych sygnałów estymatorów gęstości widmowych mocy z wykorzystaniem metody Barletta oraz funkcji koherencji,
- wyznaczanie charakterystyki fazowej WGWM, także z zastosowaniem procedury rozwijania fazy,
- obliczanie na jej podstawie estymatora opóźnienia (1) dla wybranej częstotliwości f_{ok} (metoda jednopunktowa);
- liniową aproksymację fazy WGWM i obliczanie estymatora (3) dla wybranego zakresu częstotliwości oraz zadanej liczby punktów m (metoda wielopunktowa),
- obliczanie ocen odchyłań standardowych (2) i (4),
- M -krotne powtarzanie cyklu akwizycji (lub generowania) sygnałów i ich analizy w celu uzyskania zbioru wyników estymacji opóźnienia obydwoma wyżej wymienionymi metodami,
- obliczanie wartości eksperymentalnych statystyk (średnia arytmetyczna, odchylenie standardowe) i wyznaczanie histogramów dla zbiorów wartości $\{\hat{\tau}_{ok}\}$ i $\{\hat{\tau}_0\}$, uzyskanych dla zadanej liczby M powtórzeń, oraz zapis tych zbiorów do plików.

Parametry zastosowanego modułu akwizycji danych NI-6009 są wystarczające do analizy sygnałów uzyskiwanych ze stosowanego aktualnie w badaniach cyfrowego generatora wzajemnie opóźnionych przebiegów stochastycznych [13]. Panel przyrządu składa się z sześciu zakładek. Dwie pierwsze pozwalają na ustawianie parametrów akwizycji (lub - w wersji symulacyjnej - parametrów modelowanych sygnałów) i zadawanie parametrów analizy. Na trzeciej wyświetlane są wartości obliczonych parametrów, a pozostałe pokazują przebiegi sygnałów i wyznaczanych charakterystyk. Na rys. 1 pokazano dwie zakładki przedstawiające przykładowe przebiegi czasowe i gęstości widmowe sygnałów $x(n)$ i $y(n)$ (rys 1a) oraz fazę WGWM, funkcję koherencji, wybrany do analizy zakres fazy oraz efekt zastosowania aproksymacji liniowej (rys. 1b). Przebiegi widoczne na rysunkach uzyskano dla modeli sygnałów (5) i następujących wartości parametrów: $SNR = 2$; $c = 1$; $l_0 = 20$; filtr Butterwortha o względnej częstotliwości odcięcia 0,15; $N = 2048$; $N_d = 500$; okno Hanninga; $m = 500$.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono zrealizowany w środowisku LabVIEW przyrząd wirtualny do wyznaczania opóźnienia rzeczywistych (wersja z modułem DAQ) lub generowanych komputerowo (wersja symulacyjna) sygnałów losowych z fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy. Analizator umożliwia eksperymentalne badanie właściwości zarówno metody „jednopunktowej” jak i wykorzystującej liniową aproksymację charakterystyki fazowej WGWM, oraz realizację pomiarów w oparciu o te metody. Przyrząd pozwala na modyfikację istotnych z punktu widzenia dokładności estymacji opóźnienia parametrów analizy oraz wielokrotne powtarzanie eksperymentu i obróbkę statystyczną wyników, co ułatwia i przyspiesza prowadzenie badań. W analizatorze do akwizycji sygnałów zastosowano moduł USB-6009, którego parametry są wystarczające na obecnym etapie badań.



Rys. 1. Wybrane zakładki panelu analizatora i przykładowe przebiegi
Fig. 1. Selected panels of virtual phase analyzer and exemplary drawings

5. Literatura

- [1] Winiecki W.: Wirtualne przyrządy pomiarowe. O.W. Pol. Warszawska, Warszawa 2003.
- [2] Rak R. Wirtualny przyrząd pomiarowy – realne narzędzie współczesnej metrologii. O.W. Pol. Warszawska, Warszawa 2003.
- [3] Świsulski D. Komputerowa technika pomiarowa – oprogramowanie przyrządów wirtualnych w LabVIEW. A.W. PAK, Warszawa 2005.
- [4] Bendat J.S., Piersol A.G.: Random data - analysis and measurement procedures. John Wiley, New York 2000.
- [5] Bendat J.S., Piersol A.G.: Engineering applications of correlation and spectral analysis. John Wiley, New York 1993.
- [6] Bendat J.S., Piersol A.G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. PWN, Warszawa 1976.
- [7] Carter C.G.: Coherence and time delay estimation. Proceedings of the IEEE, Vol. 75, No. 2, February 1987, 236-255.
- [8] Dwyer A.: A survey of techniques for the estimation and compensation of processes with time delay. Technical Report, Dublin Institute of Technology 2000.
- [9] Piersol A. G.: Time delay estimation using phase data. IEEE Transactions on ASSP, Vol. 29, No. 3, June 1981, 471-477.
- [10] Hanus R.: Statystyczne błędy estymacji czasu opóźnienia przy zastosowaniu fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy. Pomiary Automatyka Kontrola 12/2006, 10-13.
- [11] Schulz M., Statterger K.: Spectrum: spectral analysis of unevenly spaced paleoclimatic time series. Computers & Geosciences Vol. 23, No. 9, 1997, 929-945.
- [12] Hanus R.: Statistical error analysis of time delay measurement using phase of cross-spectral density function. Systems Analysis Modelling Simulation Vol. 43, No. 8, 2003, 993-998.
- [13] Hanus R., Kowalczyk A.: Elektroniczne modelowanie wzajemnie opóźnionych sygnałów napięciowych w badaniach stochastycznych zasad pomiaru prędkości. VII Symposium "Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych", Kraków-Krynica Górská 1997.