

Wybrane metody redukcji zakłóceń w radioizotopowych korelacyjnych pomiarach przepływów dwufazowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie wybranych metod redukcji zakłóceń w radioizotopowych pomiarach przepływu dwufazowego cieczy-cząstki stałe w rurociągach. Zaproponowane metody filtracji funkcji korelacji wzajemnej wykorzystują dyskretną transformatę falkową oraz jądrowy estymator Nadaraya-Watsona. Otrzymane wyniki estymacji czasu opóźnienia i prędkości cząstek stałych charakteryzują się mniejszymi niepewnościami niż w przypadku klasycznej filtracji cyfrowej.

Abstract. The paper presents application of selected methods for noise reducing in the radioisotope measurements of liquid-solid particles flow in a pipeline. The proposed methods for smoothing of the cross-correlation function use discrete wavelet transform, and Nadaraya-Watson kernel estimator. Obtained results of time delay and velocity of the solid phase estimation have lower uncertainties in comparison with a conventional digital filtering. (Selected noise reduction methods in correlation two-phase flows measurements by radioisotopes).

Słowa kluczowe: pomiary przepływów dwufazowych, absorpcja promieniowania gamma, funkcja korelacji wzajemnej, redukcja szumów.
Keywords: two-phase flow measurements, gamma ray absorption, cross-correlation function, noise reduction.

Wstęp

Przepływy dwufazowe ciecz - cząstki ciała stałego w rurociągach mają istotne znaczenie m.in. w przemyśle mineralnym, metalurgicznym, chemicznym. Tego typu przepływy, ze względu na potrzebę zwykle bezkontaktowego i równoczesnego pomiaru głównych parametrów transportu poszczególnych faz (prędkości, natężenia przepływu, udziału faz, itp.), wymagają zastosowania zaawansowanych technik pomiarowych. Należą do nich metody tomograficzne (elektryczna, promieniowania gamma i promieniowania X), metody optyczne wykorzystujące szybkie kamery, LDA (Laser Doppler Anemometry), PIV (Particle Image Velocimetry) itp. [1-3]. Ze względu na możliwość obserwowania wybranego składnika przepływu, nawet w trudnych warunkach, uznane zostały także metody radioizotopowe [4-6]. Istotnym elementem tego typu pomiarów jest analiza stochastycznych sygnałów cyfrowych uzyskiwanych z detektorów scyntylacyjnych. Do analizy takich sygnałów stosuje się metody statystyczne, zarówno w domenie czasu jak i częstotliwości, wykorzystując np. korelację wzajemną, funkcje różnicowe i złożone, transformatę Hilberta [4-10].

Pomiary radioizotopowe podlegają wymogom ochrony radiologicznej i w konsekwencji uzyskiwane w nich sygnały często charakteryzują się niskim stosunkiem sygnału do szumu oraz obecnością losowych zakłóceń. Efektem tego może być utrudniona interpretacja funkcji korelacji wzajemnej (CCF), stosowanej do określania czasu opóźnienia transportowego. Ważnym aspektem pomiarów staje się w takich przypadkach redukcja szumów. Najczęściej stosuje się w tym celu klasyczną filtrację cyfrową sygnałów, co wymaga optymalnego doboru typu i parametrów stosowanych filtrów. W niniejszym artykule przedstawiono alternatywne rozwiązania polegające na wygładzaniu przebiegu funkcji korelacji wzajemnej, wyznaczonej dla sygnałów otrzymanych z detektorów. W badaniach zastosowano dyskretną transformatę falkową oraz jądrowy estymator Nadaraya-Watsona [11, 12].

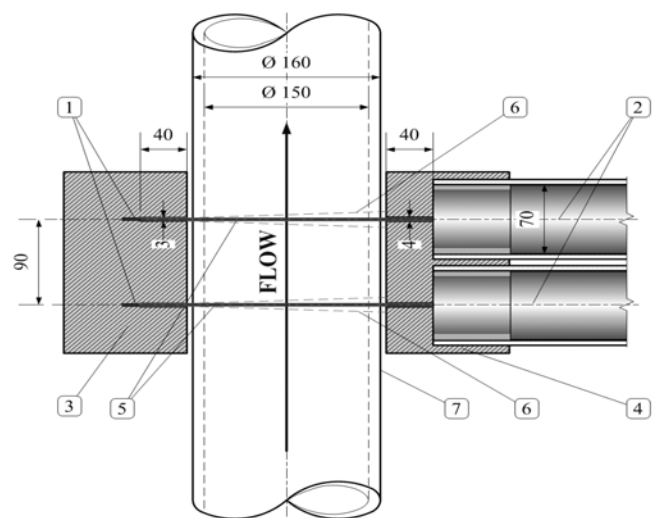
Zastosowanie absorpcji promieniowania gamma w pomiarach przepływu ciecz - cząstki ciała stałego

Idea metody polega na wykorzystaniu zjawiska częściowej absorpcji promieniowania gamma, przez przepływającą mieszaninę [1, 5]. Zwykle w tego typu pomiarach z jednej strony rurociągu umieszcza się dwa

źródła promieniotwórcze a po przeciwnej stronie, w zredukowanych strumieniach fotonów mocowane są detektory. Na podstawie lokalizacji maksimum CCF rejestrowanych sygnałów możliwe jest określenie opóźnienia transportowego i wyznaczenie parametrów transportu fazy rozproszonej w przepływie [4, 6, 9].

Dla ilustracji prezentowanych metod wykorzystano sygnały z pomiarów transportu hydraulicznego fazy stałej, zarejestrowane podczas badań przeprowadzonych pod kierownictwem prof. Jerzego Soboty w Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu w ramach projektu „Systemy i technologie wydobywania konkretu z dna oceanów”.

Rysunek 1 przedstawia geometrię stosowanego zestawu absorpcyjnego, w którym wykorzystano liniowe źródła Am-241 o aktywności 3,7 GBq i energii promieniowania gamma 59,5 keV oraz sondy scyntylacyjne ASS-500 z kryształami NaI(Tl). Źródła radioizotopowe 1 emitują promieniowanie gamma, które przez kolimator 3 jest formowane w wiązki 5. Wykorzystane fotony, przechodząc przez badany ośrodek, ulegają absorpcji lub rozproszeniu.



Rys. 1. Geometria stosowanego zestawu absorpcyjnego: 1 – źródła promieniowania gamma, 2 – sondy scyntylacyjne, 3 – kolimator źródeł, 4 – kolimator sond, 5 – główne wiązki kwantów gamma, 6 – wiązki rozproszonego promieniowania gamma, 7 – rurociąg. Wszystkie wymiary podano w mm

Sondy 2, umieszczone po drugiej stronie rurociągu 7, rejestrują wiązkę promieniowania osłabioną przez przepływającą mieszaninę. Zadaniem kolimatorów 4 jest redukcja rozproszonych fotonów 6, które mogłyby zwiększać poziom zakłóceń. Szerszy opis instalacji badawczej przedstawiono w publikacjach [5, 6].

Metoda korelacji wzajemnej

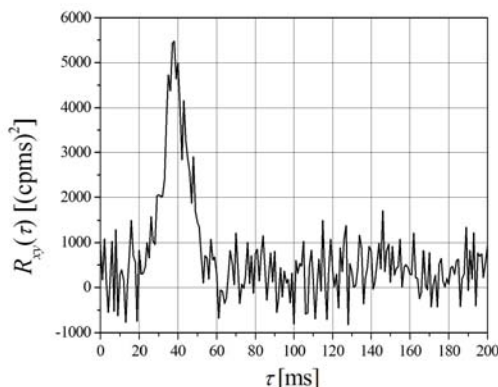
Sygnały otrzymywane z sond scyntylicyjnych w pomiarach przepływów dwufazowych charakteryzują się często niskim stosunkiem sygnału do szumu, co jest spowodowane m. in. takimi przyczynami jak:

- statystyczny charakter rozpadów promieniotwórczych,
- promieniowanie pochodzące od naturalnych emiterów gamma z otoczenia oraz tło własne toru pomiarowego (szumy rekombinacyjne, termiczne, itp.),
- zakłócenia sieci energetycznych,
- promieniowanie rozproszone,
- fluktuacje i niestacjonarność przepływu,
- ograniczanie aktywności źródeł.

Do wyznaczania czasu opóźnienia transportowego sygnałów stochastycznych $x(t)$ i $y(t)$ najczęściej stosuje się funkcję korelacji wzajemnej zdefiniowaną wyrażeniem:

$$(1) \quad R_{xy}(\tau) = E[(x(t)y(t + \tau))]$$

gdzie: $E[\cdot]$ oznacza wartość oczekiwaną, τ – opóźnienie. Na rysunku 2 pokazano przebieg CCF wyznaczonej dla sygnałów zarejestrowanych w eksperymencie WRQ0022.



Rys. 2. Funkcja korelacji wzajemnej wyznaczona dla przepływu ciecz-cząstki stałe w eksperymencie WRQ0022

Ponieważ średnie opóźnienie transportowe (estymator $\hat{\tau}_0$) wyznaczane jest jako [4-7]:

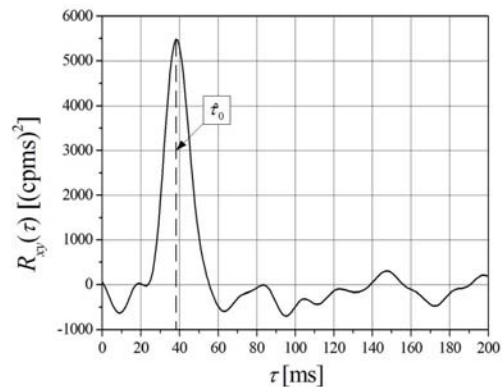
$$(2) \quad \hat{\tau}_0 = \arg\{\max R_{xy}(\tau)\} = \arg\{R_{xy}(\tau_0)\}$$

to w przypadku zniekształconego przebiegu CCF w okolicy maksimum trudno jest dokładnie wyznaczyć opóźnienie.

Wybrane metody redukcji zakłóceń

Klasyczna metoda filtracji

W podejściu klasycznym przed obliczeniem CCF stosuje się cyfrową filtrację pasmową zarejestrowanych sygnałów, dzięki czemu uzyskuje się dokładniejszy przebieg funkcji korelacji. Kłopotliwy jest jednak wybór typu i optymalnych parametrów filtrów pasmowo-przepustowych. Najczęściej w celu właściwego doboru pasma przepustowego filtrów, konieczne staje się użycie dodatkowych procedur analizy widma częstotliwościowego sygnałów. Na rysunku 3 przedstawiono CCF uzyskaną po omawianej filtracji cyfrowej sygnałów w eksperymencie WRQ0022. Linia przerywaną zaznaczono estymowaną wartość opóźnienia transportowego $\hat{\tau}_0$.



Rys. 3. CCF w eksperymencie WRQ0022 dla sygnałów po filtracji.

Dyskretna Transformata Falkowa

Dyskretna Transformata Falkowa (DWT) jest obecnie stosowana w wielu dziedzinach wymagających analizy sygnałów niestacjonarnych np. w diagnostyce technicznej, medycznej czy geofizyce [11]. Może być również wykorzystana do redukcji szumu i wygładzania CCF.

Stosując DWT, sygnał można przedstawić jako:

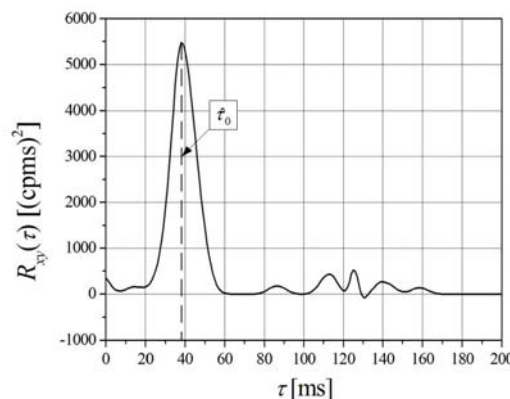
$$(3) \quad i(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} d_{m,n} \cdot g_{m,n}(t)$$

gdzie $d_{m,n}$ to współczynniki obliczane z zależności:

$d_{m,n} = \int i(t) \cdot \gamma_{m,n}^*(t) dt$, a $g_{m,n}(t)$ są funkcjami bazowymi związanymi ze skalowaniem oraz translacją falki matki $\gamma(t)$:

$$(4) \quad g_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \cdot \gamma(2^{-m}t - n)$$

Funkcje $\gamma_{m,n}(t)$ są funkcjami dualnymi do $g_{m,n}(t)$. Większość obecnie stosowanych falek jest ortogonalnych, ale wykorzystuje się również takie, które są jedynie parami ortogonalne (biortogonalne). Przy stosowaniu DWT do odsumiania kluczowy jest wybór typu falki oraz poziomu dekompozycji w celu eliminacji zakłóceń. W omawianym eksperymencie zastosowano falekę biortogonalną 3.1 i redukcję szumu na poziomie dekompozycji 3. Otrzymaoną w powyższy sposób CCF pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Efekt zastosowania DWT do odsumiania przebiegu CCF w eksperymencie WRQ0022

Estymator jądrowy Nadaraya-Watsona

Estymator jądrowy Nadaraya-Watsona (NW) należy do nieparametrycznych metod regresyjnych. Algorytm NW pozwala na wprowadzenie wag $w_{n,i}$ dla rejestrowanych wartości τ_i w zależności od odległości punktu τ , będącego środkiem przedziału. W takim przypadku jądrowy estymator NW jest określony wzorem [12]:

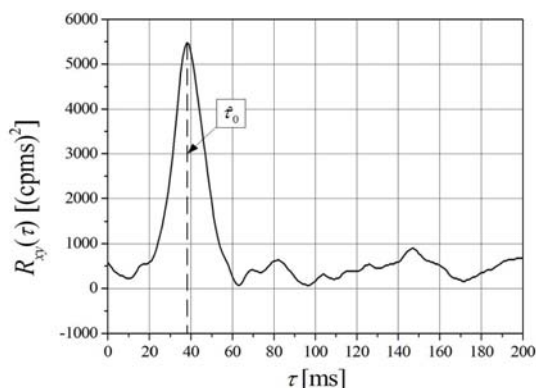
$$(5) \quad \hat{g}_{NW}(\tau) = \sum_{i=1}^n w_{n,i} y_i$$

natomiast $w_{n,i}$ jest wyrażone zależnością:

$$(6) \quad w_{n,i}(\tau) = \frac{K[(\tau - \tau_i)/h_n]}{\sum_{j=1}^n K[(\tau - \tau_j)/h_n]}$$

gdzie: $K[(\tau - \tau_i)/h_n]$ jest funkcją jądrową, którą może być: rozkład normalny, trójkątny, czy funkcja Epanechnikova, a h_n jest szerokością okna wygładzania.

Parametr h_n może być dobierany przez użytkownika, np. poprzez optymalizację, w oparciu o metody walidacji krzyżowej. Efekt zastosowania estymatora jądrowego NW dla CCF w eksperymencie WRQ0022 pokazano na rysunku 5. Jako funkcję jądrową wybrano rozkład normalny i $h_n = 3$.



Rys. 5. CCF w eksperymencie WRQ0022 po wygładzeniu za pomocą estymatora jądrowego NW

Przykładowe wyniki

Do wybranych (w otoczeniu maksimum) fragmentów przebiegów CCF z rysunków 3-5 dopasowano rozkład normalny, wyznaczono $\hat{\tau}_0$ i określono niepewność standardową czasu opóźnienia transportowego jako:

$$(7) \quad u_A(\hat{\tau}_0) = \sigma/k$$

gdzie: σ - odchylenie standardowe dopasowanego rozkładu normalnego, k - liczba punktów wybrana do interpolacji.

Następnie, znając odległość L pomiędzy otworami kolimatorów sond i jej niepewność $u_B(L)$, dla każdego przypadku wyznaczono średnią prędkość v przepływu fazy stałej ze wzoru:

$$(8) \quad v = L / \hat{\tau}_0$$

oraz wartości niepewności złożonej dla prędkości:

$$(9) \quad u_c(v) = \sqrt{\left[\frac{\partial v}{\partial L} u_B(L) \right]^2 + \left[\frac{\partial v}{\partial \hat{\tau}_0} u_A(\hat{\tau}_0) \right]^2}$$

Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 1.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zastosowanie metody DWT i estymatora jądrowego NW do wygładzania przebiegu funkcji korelacji wzajemnej w badaniach przepływu cieczo-cząstki stałe w rurociągu pionowym. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że prezentowane metody pozwalają uzyskać mniejsze niepewności pomiaru opóźnienia transportowego i średniej prędkości transportu fazy stałej w porównaniu do metody klasycznej filtracji.

Tabela 1. Wartości czasu opóźnienia transportowego i prędkości oraz ich niepewności w eksperymencie WRQ0022

odszumianie metodą	Filtracja	DWT	NW
parametr			
$\hat{\tau}_0$ [ms]	38,06	38,39	38,11
$u_A(\hat{\tau}_0)$ [ms]	1,02	1,00	1,00
v [m/s]	2,365	2,344	2,362
$u_c(v)$ [m/s]	0,066	0,064	0,065

Obecnie jeszcze pewnym ograniczeniem w stosowaniu omawianych metod jest konieczność subiektywnego doboru niektórych parametrów, jak np. typu falki i poziomu dekompozycji dla DWT, typu funkcji jądrowej i szerokości okna dla estymatora jądrowego NW.

Praca została sfinansowana ze środków na działalność statutową Katedry Geofizyki AGH. Autorzy dziękują prof. dr hab. inż. Jerzemu Sobocie z Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu za współpracę przy realizacji pomiarów testujących prezentowane metody.

LITERATURA

- [1] Falcone G., Hewitt G.F., Alimonti C., Multiphase flow metering: principles and applications, Elsevier, Amsterdam (2009)
- [2] Mosorov V., A method of transit time measurement using twin plane electrical tomography, *Meas. Sci. Technol.*, 17 (2006), 753-760
- [3] Tamburini A., Cipollina A., Micale G., Brucato A., Particle distribution in dilute solid liquid unbaffled tanks via a novel laser sheet and image analysis based technique, *Chem. Eng. Sci.*, 87 (2013), 341-358
- [4] Jung S.H., Kim J.S., Kim J.B., Kwon T.Y., Flow-rate measurements of a dual-phase pipe flow by cross-correlation technique of transmitted radiation signals, *Appl. Radiat. Isot.*, 67 (2009), 1254-1258
- [5] Petryka L., Hanus R., Zych M., Zastosowanie metody absorpcji promieniowania gamma w pomiarach przepływów dwufazowych w rurociągach, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 1b, 185-188
- [6] Hanus R., Petryka L., Zych M., Velocity measurement of the liquid-solid flow in a vertical pipeline using gamma-ray absorption and weighted cross-correlation, *Flow Meas. Instrum.*, 40 (2014), 58-63
- [7] Zhai L.S., Jin N.D., Gao Z.K., Zhao A., Zhu L., Cross-correlation velocity measurement of horizontal oil-water two-phase flow by using parallel-wire capacitance probe, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 53 (2014), 277-289
- [8] Bendat J.S., Piersol A.G., Random data. Analysis and measurement procedures, 4th ed., Wiley, New York (2010)
- [9] 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 4, 60-63
- [10] Hanus R., Application of the Hilbert Transform to measurements of liquid-gas flow using gamma ray densitometry, *Int. J. Multiphase Flow*, 72 (2015), 210-217
- [11] Augustyniak P., Transformacje falkowe w zastosowaniach elektrodiagnostycznych, Wyd. AGH, Kraków (2003)
- [12] Burr T., Hamada M., Hengartner N., Impact of spectral smoothing on gamma radiation portal alarm probabilities, *Appl. Radiat. Isot.*, 69 (2011), 1436-1446

Autorzy: dr inż. Marcin Zych, dr inż. Wojciech Mastej, mgr inż. Anna Strzępowicz, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: zych@geol.agh.edu.pl, wmastej@agh.edu.pl, strzepowicz@geol.agh.edu.pl; dr inż. Robert Hanus, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, E-mail: rohan@prz.edu.pl; dr inż. Leszek Petryka, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, E-mail: Leszek.Petryka@fis.agh.edu.pl; mgr inż. Piotr Zych, Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Techniki Informacyjnych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, E-mail: Piotr.Zych2@orange.com