Remigiusz J. RAK, Andrzej MAJKOWSKI
POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI TEORETYCZNEJ
I SYSTEMÓW INFORMACYJNO-POMIAROWYCH

Czasowo-częstotliwościowa analiza sygnałów - w dydaktyce przyjaznej dla studentów

Prof. dr hab. inż. Remigiusz J. RAK

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej. Od 1974 roku pracownik Instytutu Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych Wydziału Elektrycznego. Od roku 2006 kierownik Zakładu Systemów Informacyjno − Pomiarowych. Zainteresowania naukowe: cyfrowe przetwarzanie sygnałów, projektowanie systemów pomiarowych. Autor ok. 100 publikacji. Pełnomocnik Rektora ds. Nowych Form i Technologii Kształcenia. Członek Sekcji Aparatury i Systemów Pomiarowych KMiAN PAN.

e-mail: rakrem@iem.pw.edu.pl

Dr inż. Andrzej MAJKOWSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Od 1995 roku pracownik Instytutu Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych Wydziału Elektrycznego. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2000. Zainteresowania naukowe: cyfrowe przetwarzanie sygnałów, projektowanie i oprogramowanie systemów pomiarowych.

e-mail: amajk@iem.pw.edu.pl

Streszczenie

Mniej lub bardziej zaawansowane algorytmy cyfrowego przetwarzania i analizy sygnałów stanowią nieodłączną część modułów programowych każdego wirtualnego przyrządu pomiarowego. W związku z tym większość narzędziowych programów przeznaczonych do projektowania wirtualnych przyrządów pomiarowych, wyposażona jest w biblioteki zawierające funkcje cyfrowego przetwarzania sygnałów. Odpowiadające im panele funkcyjne lub moduły graficzne mają formę przyjazną dla użytkownika i są łatwe w implementacji. Nie ulega wątpliwości, że metrolodzy, jako użytkownicy tego oprogramowania, powinni wcześniej poznać teorię cyfrowego przetwarzania sygnałów. Propozycja autorów polega po pierwsze na przedstawieniu metodycznego podejścia do nauczania metod cyfrowego przetwarzania i analizy sygnałów i po drugie na wykorzystaniu do tego celu zasobów programowych środowisk programistycznych takich jak LabVIEW czy LabWindows/CVI. Stąd prosta droga do opracowania multimedialnego podręcznika do cyfrowego przetwarzania sygnałów.

Słowa kluczowe: cyfrowe przetwarzanie sygnałów, analiza częstotliwościowa, analiza czasowo-częstotliwościowa, podręcznik multimedialny.

Time-frequency analysis in a student friendly didactic process

Abstract

Digital signal processing algorithms are attached to software modules of many virtual instruments. So that, all available software tools, which help to design virtual instruments, are equipped with libraries implementing digital signal processing functions. Function panels or graphical modules related to them have a user friendly form and are easy to use. Certainly, the scientists, engineers and students as the tool software users should learn digital signal processing theory before. The idea of DSP teaching, presented by the authors, leads to creation of the multimedia DSP handbook.

Keywords: digital signal processing, frequency analysis, time/frequency analysis, multimedia handbook.

1. Wstęp

Algorytmy cyfrowego przetwarzania i analizy sygnałów stanowią obecnie nieodłączną część modułów programowych niemal każdego przyrządu pomiarowego. W związku z tym większość narzędziowych programów przeznaczonych do projektowania wirtualnych przyrządów pomiarowych, wyposażona jest w biblioteki zawierające funkcje cyfrowego przetwarzania sygnałów. Użycie tych bibliotek jest zwykle łatwe i intuicyjne. Pewne problemy mogą wynikać jedynie z dowolności w zakresie terminologii i symboliki użytej do ich opisu. Rzeczywiste kłopoty mogą się pojawić dopiero na etapie interpretacji wyników, ponieważ nadawane im przez twórców formy graficzne (interfejsy użytkownika) obarczone są dużą dozą subiektywizmu. W celu uniknięcia kłopotów zarówno na etapie implementacji jak i interpretacji warto zapoznać się z praktycznymi aspektami najczęściej stosowanych metod, jak również wykorzystywanych algorytmów numerycznych.

Jednym z podstawowych i jednocześnie najbardziej powszechnych algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów jest, jak wiadomo, dyskretna transformata Fouriera. Algorytm ten, najbardziej znany pod postacią szybkiej transformaty Fouriera, umożliwia badanie właściwości określonych w funkcji czasu sygnałów, w dziedzinie częstotliwościowej, przy stosunkowo niewielkim nakładzie obliczeniowym. Mówimy, że umożliwia on przeprowadzenie tzw. analizy widmowej lub inaczej analizy częstotliwościowej.

Z drugiej strony, powszechnie wiadomo, że tradycyjna analiza częstotliwościowa nie nadaje się do obserwacji właściwości sygnałów niestacjonarnych. Wymagana jest tutaj analiza wykorzystująca łączne, czasowo-częstotliwościowe reprezentacje sygnałów. Jednakże, jeżeli analizujemy sygnał, który zmienia się gwałtownie z poziomu –1V do +1V to do jego opisu i w jednym i drugim przypadku, musimy użyć bardzo dużej liczby współczynników (teoretycznie – nieskończenie wiele). Pomocna w tym przypadku staje się dopiero transformata falkowa, opisująca właściwości sygnału w przestrzeni czas-skala.

Przygotowując się do analizy sygnału musimy pamiętać, że zwykle naturalne, „surowe” sygnały pozyskane z obiektu pomiarowego wymagają tzw. przetwarzania wstępnego. To wstępne przetwarzanie może być częściowo realizowane w sposób analogowy, w blokach kondycjonowania sygnału, a częściowo cyfrowy - w komputerze. Podstawowe funkcje, jakie spełniają układy kondycjonowania sygnałów to izolacja galwaniczna, wzmacnianie i filtracja. Domenę układów kondycjonowania sygnału stanowi dolnopasmowa (antyaliasingowa) filtracja analogowa. Do najbardziej popularnych metod kondycjonowania sygnałów w modułach cyfrowych zalicza się: usuwanie wartości średniej, usuwanie trendu i dryftu oraz odszumianie.

Niezwykle ważny problem, wspominany w podstawowym wykładzie z metrologii lecz często zaniedbywany przez wykładowców cyfrowego przetwarzania sygnałów stanowi przetwarzanie analogowo-cyfrowe (z podziałem na dyskretyzację w czasie i dyskretyzację w amplitudzie) oraz przetwarzanie cyfrowo-analogowe (odtwarzanie sygnału ciągłego z próbek). Obydwa te zagadnienia, dla prawidłowej interpretacji procesów, wymagają użycia pojęć z zakresu analizy widmowej. W związku z tym nie powinny być omawiane na początku wykładu lecz w jego „wnętrzu” – tak wcześnie jak to jest możliwe tzn. po wykładzie z zakresu analizy widmowej sygnału dyskretnego, a przed dyskretną transformata Fouriera.

2. Analiza czasowa

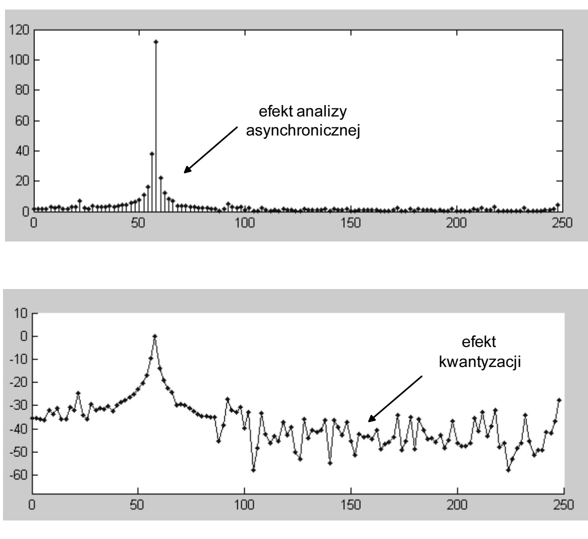
Nie bacząc na wszystkie wyrafinowane metody analizy sygnałów, rozważania na temat cyfrowego przetwarzania sygnałów warto rozpocząć od analizy w dziedzinie czasu. Kiedyś dotyczyłoby to obserwacji przebiegu ciągłego sygnału na ekranie analogowego oscyloskopu, a obecnie dotyczy to obserwacji skwantowanych w amplitudzie próbek sygnału pojawiających się na ekranie monitora. Uwzględnienie tej tradycyjnej niegdyś metody analizy sygnałów, pozwoli w sposób bardziej przyjazny wytłumaczyć procesy związane z przetwarzaniem analogowo-cyfrowym (próbkowanie), a po drugie umożliwi zdefiniowanie pojęcia *rozdzielczości czasowej*, które to pojęcie znienacka pojawia się przy analizie czasowo-częstotliwościowej. Otóż, *rozdzielczość czasowa* w przypadku analizy czasowej sygnału równoważna jest okresowi próbkowania T_p, ale pojęcie to jest również powszechnie wykorzystywane w krytycznej ocenie jakości tradycyjnej analizy widmowej. Otóż w tym przypadku rozdzielczość czasowa (analizy częstotliwościowej) równoważna jest długości całego rekordu danych wziętego do analizy.

3. Analiza częstotliwościowa

Praktyczne wyniki analizy częstotliwościowej wygodnie jest interpretować w sposób uwidoczniony na rysunku 1, na którym zamieszczono przykład analizy sygnału sinusoidalnego. W przypadku ogólnym, na całościowy obraz wyników analizy widmowej składają się trzy elementy: wynik analizy synchronicznej, efekt asynchroniczności, efekt kwantyzacji próbek. W efekcie analizy synchronicznej tego sygnału powinniśmy otrzymać pojedynczy prążek widma. Prążki występujące w jego otoczeniu to efekt asynchroniczności analizy (rys.1a). Celem uwidocznienia efektu kwantyzacji amplitudy próbek sygnału trzeba było zastosować skalę logarytmiczną (rys.1b).

a)

b)



Rys. 1. Wpływ poszczególnych efektów na wyniki analizy częstotliwościowej - w skali liniowej (a) oraz skali logarytmicznej (b)
Fig. 1. Different effects of frequency analysis – linear scale (a) and logarithmic scale (b)

Obliczenia widma sygnału w technice cyfrowej (dyskretna transformata Fouriera) dokonuje się przy użyciu algorytmu numerycznego, który powszechnie jest znany pod nazwą Szybkiej Transformaty Fouriera (STF)[1]. Algorytm ten został tak skonstruowany, aby obliczenia prowadzone były jak najszybciej, a przetwarzanie sygnału mogło odbywać się *na bieżąco* (czyli w czasie rzeczywistym). Wymaga on użycia bloku próbek sygnału o rozmiarze $L=2^n$.

Podstawowy parametr analizy widmowej to *rozdzielczość widma*: Δf. Jest ona równa ilorazowi zakresu częstotliwościowego, (równoważnego f_p) i liczby prążków widma L (rozmiar transformaty).

[1] Częściej używana jest jego nazwa angielska: Fast Fourier Transform (FFT)

$$\Delta f = \frac{f_p}{L} \tag{1}$$

Ta zależność umożliwia skuteczne wyskalowanie osi częstotliwości (zastąpienie indeksów próbek widma wartościami częstotliwości) - co nierzadko leży w gestii użytkownika jednego z wymienionych wcześniej programów[2].

Bardzo ważnym zagadnieniem, które powinno być poruszane na tym etapie jest *rozdzielczość czasowa analizy częstotliwościowej*. Otóż, jak już wspomniano, rozdzielczość ta w przypadku tradycyjnej analizy widmowej Fouriera równoważna jest „długości” całego bloku sygnału wziętego do analizy, a więc jest bardzo zła!

Jak już wspomniano przy okazji interpretacji rysunku 1b, w praktyce bardzo często do zobrazowania widma stosuje się charakterystykę logarytmiczną w zakresie amplitud. Dotyczy to przypadków, kiedy w widmie sygnału występują ważne składowe, lecz o bardzo małych amplitudach. Dodatkowo, okazuje się, że duże znaczenie praktyczne ma funkcja (przebieg czasowy), która powstaje po wyznaczeniu odwrotnej transformaty Fouriera z logarytmicznego widma sygnału. Określa się ją mianem *cepstrum*. Nazwa ta powstała drogą zmiany porządku pierwszych czterech liter w słowie *spectrum*, które oznacza *widmo* w języku angielskim. Jak wspomniano jest to funkcja czasu lecz okazuje się, że jej przebieg znacznie odbiega od kształtu segmentu sygnału wybranego do analizy i niesie szereg cennych informacji o sygnale. Wydaje się, że wśród elektryków ta „sztuczna” wielkość nie jest wykorzystywana. Znacznie więcej sentymentu czują do niej np. mechanicy, oceniając właściwości drgań.

Celem przygotowania się do bardziej szczegółowej dyskusji na temat czasowo-częstotliwościowych aspektów analizy warto przypomnieć, że w zapisie z użyciem iloczynu skalarnego (ortogonalna) transformata Fouriera przyjmuje postać:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t}dt = \left\langle x(t), e^{j\omega t} \right\rangle \tag{2}$$

Taka postać zapisu może być wykorzystywana w opisie szeregu innych transformat ortogonalnych między innymi krótkoczasowej transformaty Fouriera oraz transformaty falkowej (dla falek ortogonalnych). Doświadczenia dydaktyczne wskazują na to, że ten jednolity zapis znacznie ułatwia wypracowanie kompleksowego spojrzenia na cały ciąg transformat z zakresu analizy sygnałów.

Z dydaktycznego punktu widzenia równie ważne jest zaprezentowanie pewnych wybranych właściwości (tradycyjnej) transformaty Fouriera. Należą do nich:

- przesunięcie (3) i skalowanie (4) w czasie:

$$x_0(t) = x(t - t_0) \rightarrow X_0(\omega) = X(\omega)e^{-j\omega_0 t_0} \tag{3}$$

$$x_a(t) = x(at) \rightarrow X_a(\omega) = \frac{1}{|a|}X\left(\frac{\omega}{a}\right) \tag{4}$$

- przesunięcie (5) i skalowanie (6) w częstotliwości:

$$X_0(\omega) = X(\omega - \omega_0) \rightarrow x_0(t) = x(t)e^{-j\omega_0 t} \tag{5}$$

$$X_a(\omega) = X(a\omega) \rightarrow x_a(t) = \frac{1}{|a|}x\left(\frac{t}{a}\right) \tag{6}$$

Powyższe właściwości są szczególnie istotne w aspekcie (przyszłej) analizy czasowo-częstotliwościowej.

[2] Pełny zakres widma równoważny jest wartości częstotliwości próbkowania f_p. Dla sygnału rzeczywistego oś symetrii widma leży w połowie tego zakresu: $f_p/2$.

4. Analiza w przestrzeni czas-częstotliwość

Wzorcowy przykład algorytmu analizy czasowo-częstotliwościowej (t/f) stanowi krótkoczasowa transformata Fouriera (STFT – Short-Time Fourier Transform). Umożliwia ona wydobycie z sygnału informacji o tym, jak zmienia się jego widmo w czasie, czyli jednoczesną obserwację jego właściwości zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. Wycinek sygnału (blok próbek o rozmiarze L) przeznaczony do analizy jest sukcesywnie dzielony na segmenty, z których każdy podlega analizie widmowej niezależnie. Podobnie jak w przypadku tradycyjnym, aby usunąć gwałtowne zmiany (cięcia) sygnału na krańcach przedziałów, stosuje się różne okna czasowe w odniesieniu do wspomnianych segmentów. Sukcesywne „przesuwanie okna czasowego” w ramach bloku, umożliwia lokalizację parametrów częstotliwościowych sygnału w czasie.

Ten proces daje się, w sposób symboliczny, zapisać za pomocą równania:

$$X(\tau,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\varphi(t-\tau)e^{-j\omega t}dt = \left\langle x(t),\varphi(t-\tau)e^{jwt}\right\rangle \qquad (7)$$

w którym $\varphi(\cdot)$ opisuje funkcję okna czasowego.

Przesuwając okno $\varphi(\cdot)$ w czasie, zgodnie z parametrem τ (wzdłuż sygnału), wyznacza się jego zawartość widmową wewnątrz przedziału czasowego, którego długość jest określona szerokością okna. Kształt okna czasowego odgrywa kluczową rolę w przypadku STFT. Iloczyn szerokości okna w dziedzinie czasu i szerokości okna w dziedzinie częstotliwości jest wielkością stałą dla danego okna. Stąd też, poprawiając rozdzielczość w dziedzinie czasu, będziemy ją pogarszać w dziedzinie częstotliwości i odwrotnie. Zatem szerokość okna wybierana jest na drodze kompromisu.

Definiuje się dwa podstawowe, unormowane parametry okien czasowych centrum ∇t (środek ciężkości) i promień (szerokość) Δt, oba liczone w sensie średniokwadratowym. W podobny sposób zdefiniować można parametry okna rozmieszczonego w dziedzinie częstotliwości, odpowiednio: $\nabla\omega$, $\Delta\omega$ [2].

Teoretycznie, funkcja nie może być jednocześnie ograniczona w dziedzinie czasu i w dziedzinie częstotliwości. Jednak, przy tak zdefiniowanych promieniach okien, można osiągnąć jednoczesną ich „ograniczoność” w dziedzinie czasu i częstotliwości. Niestety, prostokątne okno czasowe nie jest tutaj dobrym przykładem. Dla tego okna wartości unormowanych parametrów wynoszą odpowiednio:

$$\Delta_t = {}^{1}\!/_{\sqrt{3}}, \qquad \Delta_\omega = \infty \qquad (8)$$

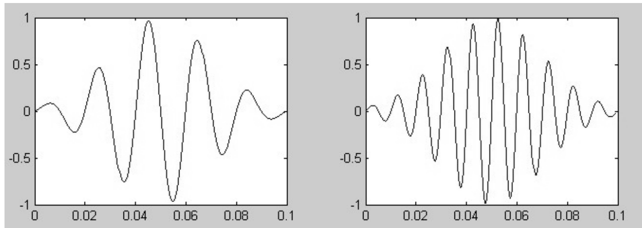
Wynika stąd jasno, że jest to idealne okno czasowe i jednocześnie najgorsze, wręcz nieakceptowalne „okno częstotliwościowe”!

Warto zwrócić uwagę, w tym rozkładzie (7) definiuje się pojęcie tzw. okna czasowo-częstotliwościowego. Ma ono kształt opisany zależnością (9).

$$\varphi_{\tau,\omega}(t) =: \varphi(t-\tau)e^{j\omega t} \qquad (9)$$

Interpretując tę zależność stwierdza się, że w tym przypadku mamy do czynienia z *pakietem fal sinusoidalnych* oscylujących wewnątrz okna $\varphi(t)$. Co ciekawsze, każdy taki pakiet traktować można jako funkcję bazową do rozkładu STFT. Rodzinę funkcji bazowych otrzymuje się „zagęszczając” sinusoidę w oknie o stałej szerokości (rys. 2). Funkcje te, w odróżnieniu od trwających nieskończenie długo funkcji sinus i cosinus, z tradycyjnej analizy Fouriera, są jednocześnie zlokalizowane w czasie i częstotliwości.

Miarą jakości okna czasowo-częstotliwościowego jest iloczyn promienia w dziedzinie czasu i częstotliwości, czyli *pole okna* położonego na płaszczyźnie t/f.

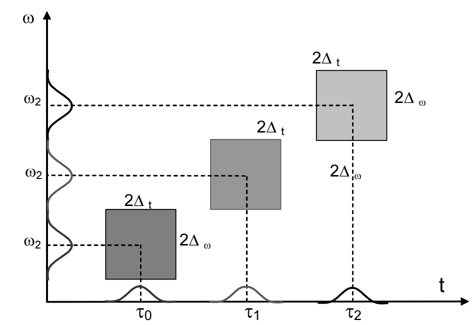


Rys. 2. Przykład funkcji bazowych dla krótkoczasowej analizy widmowej
Fig. 2. Basis functions examples for short time-frequency analysis

Przy czym wciąż poprawa rozdzielczości w dziedzinie czasu okupiona jest jej pogorszeniem w dziedzinie częstotliwości i na odwrót (zasada nieoznaczoności):

$$\Delta\Delta_{\omega} \geq \frac{1}{2} \qquad (10)$$

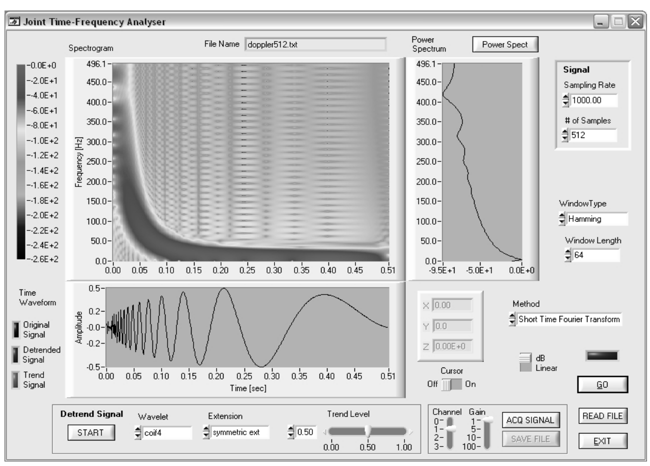
Interpretacja położenia okna czasowo-częstotliwościowego na płaszczyźnie t/f przedstawiona jest na rysunku 3.



Rys. 3. Położenie okna analizy na płaszczyźnie t/f dla STFT
Fig. 3. Location of analysis window on the t/f surface

Na tym etapie warto wyraźnie podkreślić, że ustalony kształt i rozmiary okna czasowo-częstotliwościowego, niezależnie od jego położenia na płaszczyźnie t/f, to parametry wyjątkowo „niewygodne”. Chciałoby się mieć okno o kształcie adaptacyjnym: szerokie w czasie i wąskie w częstotliwości dla małych częstotliwości oraz wąskie w czasie i szerokie w częstotliwości dla dużych częstotliwości. Taki efekt znamienny jest tylko dla analizy falkowej.

Poniżej zaprezentowany jest przykład użycia analizy czasowo-częstotliwościowej sygnału dopplerowskiego (rys. 4).



Rys. 4. Przykład zastosowania analizy czasowo-częstotliwościowej do obserwacji właściwości sygnału dopplerowskiego
Fig. 4. An example of time-frequency analysis for a Doppler effect observation

Obserwacja spektrogramu badanego sygnału pozwala zaobserwować hiperboliczny charakter zmian jego częstotliwości. Ze spektrogramu można łatwo odczytać, jakie składowe częstotliwościowe występują w poszczególnych chwilach czasowych. Odpowiadające częstotliwościom poziomy szarości odzwierciedlają intensywności poszczególnych składowych. Rysunek po prawej (Power Spect) to widmo mocy przetwarzanego sygnału. Od razu widać, że niesie ono dużo mniej informacji niż spektrogram.

5. Analiza w przestrzeni czas-skala

W przypadku transformaty falkowej, najbardziej charakterystyczne jest to, że w odróżnieniu od funkcji sinus i cosinus (charakterystycznych dla transformaty Fouriera), indywidualne funkcje falkowe są dobrze zlokalizowane w czasie (lub przestrzeni – dla obrazów) i jednocześnie podobnie jak sinus i cosinus, indywidualne falki są dobrze zlokalizowane w częstotliwości, a ściśle biorąc w tzw. skali. Ponadto w odróżnieniu od funkcji sinus i cosinus, które definiują unikalną transformatę Fouriera, nie ma pojedynczego, unikatowego zbioru falkowych funkcji bazowych. Falki różnią się między sobą zwartością lokalizacji czasowej oraz płynnością i gładkością kształtów. Wynikająca stąd zdolność falek do opisu sygnałów „z nieciągłościami", przy ograniczonej liczbie współczynników oraz z lokalizacją w czasie, stanowi o jej przewadze nad transformatą Fouriera. Zaryzykować można stwierdzenie, że analiza falkowa jest „lokomotywą" w dziedzinie cyfrowego przetwarzania sygnałów.

W odróżnieniu od metody STFT, gdzie rozdzielczość czasowo-częstotliwościowa jest ustalona na całej płaszczyźnie t/f, w metodzie falkowej rozmiary okna czasowo-częstotliwościowego są funkcją jego położenia na tej płaszczyźnie. W zakresie małych częstotliwości operujemy oknem z dużą szerokością w dziedzinie czasu, a w zakresie wysokich częstotliwości oknem z małą szerokością w dziedzinie czasu.

Ciągłą (całkową) transformatę falkową (Continuous Wavelet Transform: CWT) funkcji $x(t) \in L^2(\Re)$ (gdzie $L^2(\Re)$ oznacza przestrzeń wektorową jednowymiarowych funkcji, mierzalnych i całkowalnych w sensie średniokwadratowym) dla pewnej falki $\psi(t)$ definiuje się jako:

$$W(\tau,\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\overline{\psi_{\tau,\sigma}(t)}dt = \left\langle x(t), \psi_{\tau,\sigma}(t) \right\rangle$$
$$\psi_{\tau,\sigma}(t) = \frac{1}{\sqrt{\sigma}}\psi\left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right) \tag{11}$$

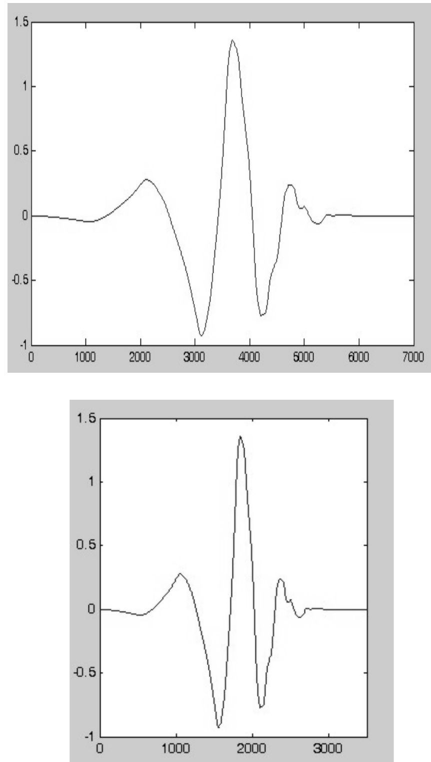
We wzorze tym parametr σ oznacza skalę, zaś τ przesunięcie, co odpowiada ich funkcjom pełnionym w zapisie wzoru falkowego. Po to, aby funkcja $\psi(t)$ mogła stanowić funkcję okna falkowego, a także być wykorzystana do odtworzenia $x(t)$ musi czyli spełniać warunek:

$$\Psi(\omega)\Big|_{\omega=0} = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)dt = 0 \tag{12}$$

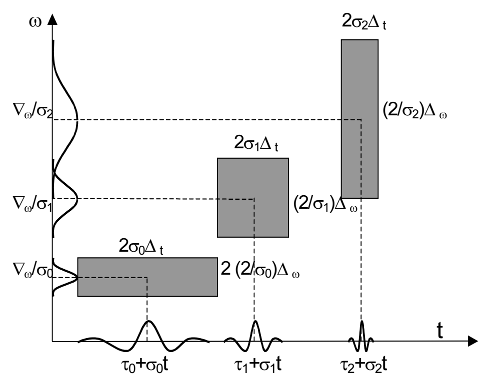
Często właściwości falek kwituje się prostym stwierdzeniem: „Falka musi drgać i gasnąć". Dwu reprezentantów rodziny funkcji bazowych transformaty falkowej zaprezentowano na rysunku 5 (dokładnie ta sama funkcja falkowa zapisana w różnych skalach).

Warto zaznaczyć, że dla porządku tę funkcję można określać mianem *okna falkowego*, na wzór jej odpowiednika z analizy t/f. Położenie *okna falkowego* na płaszczyźnie t/f, pokazano na rysunku 6.

Swoją niezwykłą efektywność, a zarazem popularność w zakresie analizy sygnałów, transformata falkowa zawdzięcza szybkiemu algorytmowi, opracowanemu przez Mallata w roku 1989, zwanemu piramidą Mallata.



Rys. 5. Przykład funkcji bazowych dla rozkładu falkowego
Fig. 5. Basis functions examples for wavelet analysis

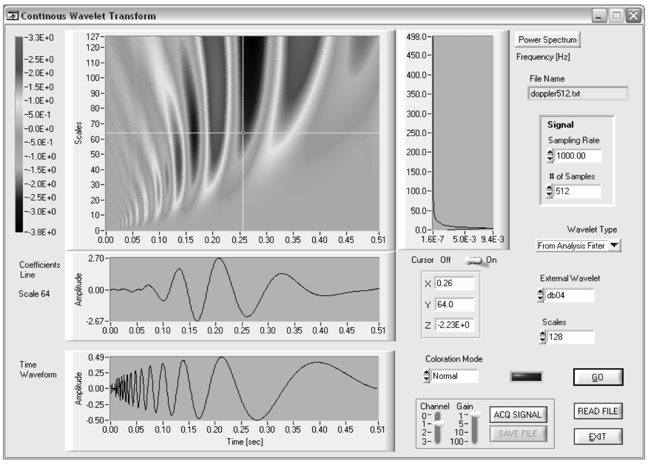


Rys. 6. Położenie okna falkowego na płaszczyźnie t/f
Fig. 6. Location of the wavelet analysis window on the t/f surface

Algorytm ten wykorzystywany jest do uzyskania dekompozycji sygnału na składowe falkowe z użyciem tzw. kwadraturowych filtrów lustrzanych. Zastosowane w nim podejście wielorozdzielcze przenosi metodę falkową w realia kodowania podpasmowego.

Transformata falkowa stanowi narzędzie niezwykle uniwersalne. Wykorzystywana jest bardzo efektywnie do analizy, rozpoznawania, identyfikacji, odszumiania, i kompresji różnego typu sygnałów, z których najważniejsze to: sygnały biomedyczne (EKG, EEG), wstrząsy sejsmiczne, drgania urządzeń mechanicznych (mosty, silniki, turbiny) mowa ludzka, muzyka. Zatem powinna ona stanowić znaczącą część tematyki zawartej w podręcznikach i wykładach z zakresu cyfrowego przetwarzania sygnałów.

Poniżej przedstawiono wyniki ciągłej analizy falkowej tego samego sygnału dopplerowskiego uzyskane z wykorzystaniem wirtualnego przyrządu pomiarowego opracowanego przez autorów (rys. 7).



Rys. 7. Wyniki analizy falkowej sygnału dopplerowskiego
Fig. 7. Results of wavelet analysis for a Doppler effect observation

W tym przypadku, stosownie do definicji transformaty, wyniki przedstawione są na płaszczyźnie czas-skala. Wyższe wartości skali odpowiadają niższym częstotliwościom sygnału.

6. Zakończenie

Wykładając teorię cyfrowego przetwarzania i analizy sygnałów warto pamiętać, że czasowo-częstotliwościowe metody analizy sygnałów znajdują coraz to szersze zastosowanie w praktyce. Dotyczy to przede wszystkim przetwarzania sygnału mowy, sygnałów biomedycznych (EKG, EEG) oraz sygnałów energetycznych i sejsmicznych. Bardzo ważną rolę pełnią również w procesach analizy wibracji przy testowaniu maszyn. Włączenie ich do programu przedmiotu cyfrowe przetwarzanie sygnałów jest nieodzowne. W zasadzie to samo dotyczy analizy falkowej. Tutaj jednak należy pamiętać, że pierwotnie analiza falkowa została pomyślana jako narzędzie, które pozwoli wyeliminować wszystkie niedogodności zarówno tradycyjnej jak i krótkoczasowej analizy widmowej Fouriera. Cel został osiągnięty – rozdzielczość czasowo-częstotliwościowa podlega procesowi modyfikacji w trakcie procesu analizy. Analiza falkowa znajduje dzięki temu niezwykle szerokie zastosowanie. Jeżeli jednak komuś wydaje się, że to co pozostało do zrobienia w analizie falkowej to tylko odświeżanie i unifikacja znanych już teorii i technik – jest w błędzie. Przed nami wciąż niezmierzony zakres nowych zastosowań odkryć w tym zakresie. Nie możemy się jednak zachłystywać możliwościami jakie oferuje analiza falkowa. Tradycyjna analiza widmowa jest niezastąpiona w przypadku analizy sygnałów okresowych i quasi-okresowych.

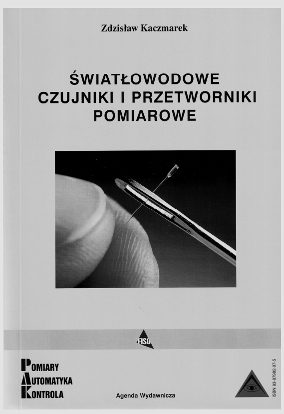
7. Literatura

[1] LabWindows/CVI: User Manual
[2] National Instruments: Signal Processing Toolset User Manual, 2001
[3] Matlab: Signal Processing Toolbox for Use with Matlab, Mathworks Inc., 2002.
[4] P.Bremaud: Mathematical Principles of Signal Processing, Springer, 2002.
[5] Mallat S., "A wavelet Tour Of Signal Processing", Academic Press, 1998.
[6] Matlab: Signal Processing Toolbox for Use with Matlab, Mathworks Inc., 2002
[7] National Instruments: Signal Processing Toolset User Manual, 2001
[8] R.J. Rak, Wirtualny przyrząd pomiarowy – realne narzędzie współczesnej metrologii, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
[9] R.J. Rak, A. Majkowski, „Praktyczne aspekty analizy widmowej Fouriera", Przegląd Elektrotechniczny, 4'2004, str. 391-396.
[10] R.J. Rak, A. Majkowski, „Czasowo-częstotliwościowa analiza sygnałów", Przegląd Elektrotechniczny, 5'2004, str. 515-520.
[11] R.J. Rak, A. Majkowski, „Falkowa analiza sygnałów", Przegląd Elektrotechniczny, 6'2004, str. 646-652.
[12] T. Zieliński, Cyfrowe przetwarzanie sygnałów – od teorii do zastosowań, WKiŁ, Warszawa, 2005.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Najnowsza książka Wydawnictwa PAK



Książka „Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe" jest pierwszą książką w języku polskim, która obejmuje całościowo zarówno współczesną problematykę światłowodowych czujników i przetworników pomiarowych, jak i systemów telemetrycznych. Autorem tej książki jest dr hab. inż. Zdzisław Kaczmarek – profesor Politechniki Świętokrzyskiej.

Treść książki zawiera zasady i opisy budowy czujników i przetworników pomiarowych różnych wielkości fizycznych, ich modele matematyczne, metody detekcji sygnału pomiarowego z wyjściowego sygnału optycznego czujnika, metody zwielokrotniania kanału światłowodowego. W opracowaniu występują zagadnienia wspólne dla wszystkich rodzajów czujników: światłowody, źródła światła, modulatory optyczne i odbiorniki optyczne. Na końcu książki zestawiono w tabelach dane techniczne światłowodowych czujników pomiarowych oferowanych przez firmę FISO-FIBEROPTIC.

Książka wydana przez Wydawnictwo PAK pod patronatem Polskiego Stowarzyszenia Pomiarów Automatyki i Robotyki „POLSPAR", powinna znaleźć wielu odbiorców, ponieważ na rynku krajowym jest pierwszym wartościowym podręcznikiem omawiającym w sposób komplementarny technikę światłowodowych czujników i przetworników pomiarowych.

Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl