



## Komputerowe wspomaganie analizy obrazów sonograficznych szumów podwodnych

BARTOSZ JERZMAN<sup>1</sup>, WIESŁAW KICIŃSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centrum Wsparcia Teleinformatycznego i Dowodzenia Marynarki Wojennej RP,  
Oddział Informatyki, 81-103 Gdynia, ul. Arcyszewskich 25, jerzman@gmail.com

<sup>2</sup>Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Instytut Fizyki, 87-100 Toruń, ul. Grudziądzka 5,  
w.kicinski@fizyka.umk.pl

**Streszczenie.** Praca dotyczy sposobu poprawy jakości zobrazowania sygnałów pomiarowych obserwowanych w środowisku podwodnym. Istotą zaproponowanego sposobu przetwarzania sygnałów hydroakustycznych jest transformacja sygnałów pomiarowych za pomocą falki Malvara, zobrazowanie współczynników falkowych w postaci sonogramu oraz odszumianie obrazu sonograficznego z wykorzystaniem estymatorów jądrowych funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Opracowany w środowisku MATLAB program, po wczytaniu sygnałów pomiarowych zapisanych w kodzie ascii, tworzy obraz sonograficzny stanu środowiska podwodnego, a następnie realizuje procedurę odszumiania, mającą na celu poprawę jego jakości. Działanie programu zweryfikowano na rzeczywistych krótkookresowych, szerokopasmowych sygnałach pomiarowych zarejestrowanych w środowisku podwodnym.

**Słowa kluczowe:** sonogram, odszumianie, falka Malvara, estymacja jądrowa

### 1. Wprowadzenie

Sonogramy są elementem techniki zobrazowania rozkładu energii akustycznej zwanej LOFAR (*LOw Frequency Analysis and Ranging*), obejmującej akwizycję i przetwarzanie sygnałów hydroakustycznych w zakresie małych częstotliwości. Są graficzną reprezentacją rozkładu energii akustycznej emitowanej przez źródło w dziedzinie czasu oraz częstotliwości [8]. Powszechnie przyjmuje się, że w sonogramach oś rzędnych jest wyskalowana w jednostkach czasu, oś odciętych w jednostkach częstotliwości, zaś wielkość energii (mocy) jest reprezentowana przez intensywność punktów dla każdej pary czas–częstotliwość [1].

Technika LOFAR jest użytecznym narzędziem analizy sygnałów, których źródłem są zjawiska powodujące powstawanie składowych harmonicznych w obserwowanych sygnałach. Usystematyzowane kryteria analizy sygnałów sonograficznych można znaleźć w pracach [1, 2, 3].

Sonogramy umożliwiają śledzenie ruchu obiektów podwodnych oraz ich identyfikację [4]. Mają także zastosowanie w obserwowaniu zjawisk w środowisku podwodnym powodowanych przez naturalne siły przyrody (np. ruchy tektoniczne skorupy ziemskiej, rozłam gór lodowych) oraz objekty biologiczne (np. ssaki morskie).

W tworzeniu sonogramów stosuje się metody analizy czasowo-częstotliwościowej. Powszechnie stosowanym sposobem analizy sygnałów jest krótkookresowa transformata Fouriera (STFT). Schemat blokowy przetwarzania sygnałów dla potrzeb utworzenia sonogramu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy budowy sonogramu

Prace badawcze nad poprawą jakości zobrazowania sonograficznego obejmują dwa główne kierunki. Pierwszy to zagadnienia związane ze śledzeniem linii osobniczych dla składowych tonalnych źródeł dźwięków. Drugi dotyczy odsumiania obrazów sonograficznych w celu zwiększenia wyrazistości konturów obiektów lub zobrazowania sygnałów szerokopasmowych, osobniczych dla pewnej klasy źródeł dźwięków, np. wybuchów podwodnych, pracy aparatu wspomagającego oddychanie płetwonurka. Analiza percepcyjna takich obrazów umożliwia wykrywanie zaburzeń w środowisku podwodnym oraz wyznaczanie czasu ich trwania.

Tematyka artykułu dotyczy zagadnienia drugiego i jest propozycją konstrukcji obrazu sonograficznego dla przebiegów szerokopasmowych. Zaproponowany sposób przetwarzania sygnału obejmuje transformatę falkową sygnału pomiarowego oraz odsumianie obrazu z wykorzystaniem estymatorów jądrowych w przestrzeni współczynników falkowych. Linie obrazu sonogramu są tworzone z rekordów współczynników przekształcenia Malvara, wykonywanego na segmentach analizowanego sygnału. Tak utworzony sonogram podlega procedurze odsumiania mającej na celu poprawę konturów obrazu będącego przejawem aktywności obiektu w środowisku podwodnym.

Problemem w zastosowaniu estymacji jądrowej do odsumiania obrazów jest dobór parametrów procedur obliczeniowych [5]. W artykule opisano aplikację opracowaną w środowisku pakietu MATLAB, wspomagającą dobór parametrów procedur obliczeniowych wykorzystywanych w tworzeniu sonogramów sygnałów hydroakustycznych, w szczególności parametrów analizy falkowej oraz estymacji jądrowej funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Kryterium optymalnego doboru parametrów procedur obliczeniowych jest „wyrazistość” obrazu sonograficznego.

Chociaż zagadnienia teoretyczne dotyczące falki Malvara oraz estymacji jądrowej funkcji gęstości prawdopodobieństwa są dobrze opracowane w dostępnej literaturze, to w ich praktycznym zastosowaniu zawsze pojawia się problem analizy wpływu parametrów procedur obliczeniowych na ostateczny efekt, jakim jest jakość obrazu sonograficznego.

W rozdziale drugim zaproponowano nowy algorytm tworzenia sonogramu. Jego istotą jest przetwarzanie sygnału hydroakustycznego do przestrzeni współczynników falkowych przekształcenia Malvara oraz odszumianie sonogramu z wykorzystaniem estymacji jądrowej. Aplikację wspomagającą dobór parametrów procedur obliczeniowych estymacji jądrowej opisano w rozdziale trzecim. Działanie aplikacji zweryfikowano na rzeczywistych szerokopasmowych sygnałach pomiarowych zarejestrowanych w środowisku podwodnym. Przykładowe wyniki analizy sonogramów zamieszczono w rozdziale czwartym.

## 2. Algorytm budowy sonogramu

Sygnał hydroakustyczny w postaci ciągu próbek jego wartości chwilowych jest dzielony na rekordy, dla których obliczane są współczynniki falkowe przekształcenia Malvara. Próbkę kolejnych rekordów przesunięte są względem siebie o wartość parametru nakładania — *overlap*. Tak obliczone współczynniki Malvara tworzą kolejne linie sonogramu. Z uwagi na zastosowanie palety barw, której wartości znajdują się w przedziale od 0 do 255, moduły współczynników falkowych są przedstawione w skali logarytmicznej.

Utworzony obraz sonograficzny podlega procedurze odszumiania. W tym celu jest dzielony na bloki, dla których iteracyjnie obliczane są estymatory jądrowe gęstości prawdopodobieństwa rozkładu współczynników falkowych, przy czym:

- zbiór początkowy do obliczeń tworzą współczynniki falkowe, których moduł wartości jest mniejszy od pewnej wartości kroku iteracji obliczonego jako  $KI = a \cdot |c_i|_{\max}$  gdzie  $a = 0,1$  jest stałą, zaś  $c_i$  jest  $i$ -tym współczynnikiem falkowym,
- kolejne zbiory współczynników falkowych tworzą te współczynniki, których wartość modułu jest mniejsza od poziomu odcięcia obliczanego wg wzoru  $KI(k) = KI(k-1) + KI$ ,
- iteracyjne zwiększanie liczebności zbioru ma miejsce do momentu dopasowania krzywej estymacji jądrowej z krzywą rozkładu normalnego na przyjętym poziomie niedokładności dopasowania krzywych.

Po zakończeniu procedury dopasowania krzywej estymacji jądrowej do krzywej rozkładu normalnego współczynniki falkowe o wartościach mniejszych od  $KI(k)$  są poddawane aproksymacji polegającej na wyznaczeniu wartości pikseli na podstawie rozkładu wartości pikseli z nim sąsiadujących. Użytkownik ma do

wyboru następujące trzy metody aproksymacji: mediany, wartości średniej oraz mody rozkładu estymacji jądrowej.

## 2.1. Falka Malvara

Falka Malvara jest opisana funkcją oscylacyjną, zmodulowaną obwiednią w celu minimalizacji tzw. efektów przejściowych na granicach przedziałów segmentacji. Jest opisana zależnością [6]

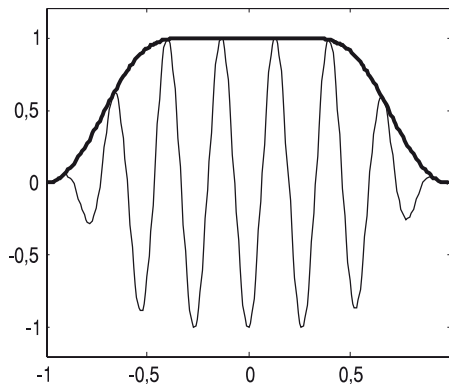
$$\Psi_{jk} = \sqrt{\frac{2}{|I_j|}} \cos \frac{\pi}{|I_j|} \left( k + \frac{1}{2} \right) t \cdot g_j(t), \quad (1)$$

gdzie:  $g_j(t)$  — obwiednia falki;  
 $I_j$  — przedział czasowy;  
 $j$  — numer przedziału czasowego;  
 $k$  — numer bazy.

Współczynniki transformacji sygnału  $y(n)$  za pomocą falki Malvara są rzutem  $y(n)$  w przestrzeni ortonormalnych funkcji bazowych [4]

$$c_m^j = \langle y(n), \Psi_m^j(n) \rangle. \quad (2)$$

Zastosowanie falki Malvara do zagadnienia detekcji źródeł szumów podwodnych ma swoje uzasadnienie w tym, że współczynniki falki Malvara tworzą bazę ortonormalną funkcji  $L^2(R)$ , przez co właściwości statystyczne współczynników będących wynikiem przekształcenia falkowego są zgodne z właściwościami statystycznymi sygnału w dziedzinie czasu. Co więcej współczynniki te są zdefiniowane



Rys. 2. Falka Malvara

przez funkcję harmoniczną, której właściwości odzwierciedlają oscylacyjny charakter analizowanych sygnałów.

Falka Malvara dziedziczy właściwości dyskretnego przekształcenia kosinusowego DCT-II, które charakteryzuje się koncentracją energii sygnału w dolnej części widma. Właściwość ta skutkuje małą liczbą „znaczących” współczynników w dolnym zakresie widma przekształcenia.

## 2.2. Estymacja jądrowa

Dla próby losowej  $X_1, X_2, \dots, X_m$  estymator jądrowy  $\hat{f}(x)$  dla każdego  $x \in R$  wyraża się wzorem

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{mh} \sum_{i=1}^m K\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad (3)$$

gdzie  $K(\cdot)$  jest funkcją jądra, zaś  $h$  jest parametrem wygładzania, który jest odpowiednikiem szerokości przedziału w histogramach. Kryteria doboru tego parametru są podobne jak dla histogramów.

Estymator  $\hat{f}(x)$  spełnia warunki całkowalności i różniczkowalności, jakie są nałożone na funkcję jądra. W większości zastosowań wykorzystywane jest jądro nieujemne, symetryczne względem zera, które posiada w tym punkcie maksimum. Zwykle jest to jądro rozkładu normalnego [7].

Funkcja  $K(\cdot)$  spełnia następujące warunki:

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(x) dx = 1, \quad (4)$$

$$K(x) = K(-x) \text{ dla } x \in R, \quad (5)$$

$$K(0) \geq K(x) \text{ dla } x \in R. \quad (6)$$

Kryterium oceny jakości estymacji jądrowej jest miara obciążenia estymatora, zdefiniowana jako różnica wartości oczekiwanej estymatora i wartości „prawdziwej” estymowanego parametru [8]

$$E(\hat{f}) - f. \quad (7)$$

Estymator jest nieobciążony, gdy estymowane wartości oscylują wokół rzeczywistych wartości rozkładu gęstości prawdopodobieństwa. W ogólnym przypadku estymator może być nieobciążony w sensie asymptotycznym.

Zagadnienie doboru postaci funkcji jądra oraz doboru parametrów estymacji jądrowej można znaleźć w pracy [7].

### 3. Opis aplikacji Sonogram

Program Sonogram służy do tworzenia i odszumiania obrazów sonograficznych. W realizacji procedury zobrazowania sonogramów celowe jest wyróżnienie dwóch etapów. Pierwszy, w którym sygnał źródłowy jest przekształcany do postaci współczynników Malvara. Drugi, w którym obraz w głównym oknie programu podlega procedurze odszumiania. Na rysunku 6 przedstawiono graficzny interfejs użytkownika z głównym oknem sonogramu, przebiegiem czasowym sygnału, pomocniczym wykresem współczynników Malvara oraz zespołem przycisków sterujących doбором parametrów analizy falkowej i procesu odszumiania.

Pliki źródłowe z przebiegami szumów hydroakustycznych powinny być w kodzie ascii z rozszerzeniem .asc.

Po wczytaniu pliku z sygnałem hydroakustycznym program realizuje procedurę budowy sonogramu z wykorzystaniem współczynników Malvara. Macierz współczynników otrzymywana jest w wyniku działania funkcji, której podstawowymi parametrami są: współczynnik obwiedni falki, długość przekształcenia DCT oraz wielkość przesunięcia — *overlap*, gdzie dwie ostatnie wartości wyrażone są liczbą próbek. Użytkownik posiada możliwość zmiany tych parametrów i dopasowania sonogramu w celu uwydatnienia cech charakterystycznych danego sygnału (rys. 4).

W drugim etapie przetwarzania sygnału hydroakustycznego realizowana jest procedura odszumiania obrazu sonograficznego (rozdział 2). Program zapewnia możliwość wyboru wielkości bloku analizowanego obrazu, na którym realizowana jest procedura odszumiania oraz ustawienia parametrów estymacji jądrowej, takich jak: postać funkcji jądra  $K$  i wartość parametru wygładzania  $h$ . Użytkownik ma do dyspozycji trzy postacie funkcji jąder (rys. 4), tj. Gaussa, Epanatchnikova i Laplace'a oraz czterech metod wyznaczania parametru wygładzania: rot (*Rule of Thumb*), lcv (*Least Cross-Validation*), hall, local (*local LCV*). Algorytm odszumiania wyszukuje

Malvar Sonogram:

Sampling Freq. [Hz]: 5120

Overlap: 32

DCT length: 128

r: 0.5

Recompute

Rys. 3. Parametry budowy sonogramu

Denoising:

ThresholdCoeff: 0.08

Processing Box: 8

Denoising Box: 3

Kde kernel: gauss

Kde method: rot

Thresholding method: median

Denoise

Rys. 4. Parametry odszumiania

Outliers no.: 0

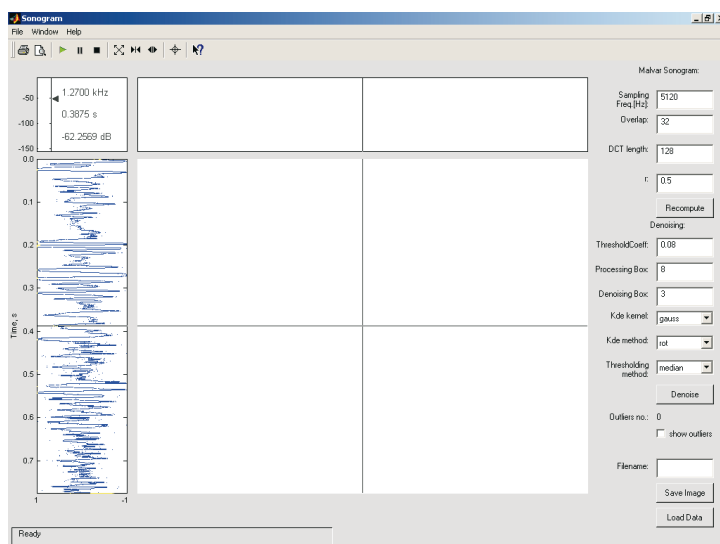
show outliers

Filename:

Save Image

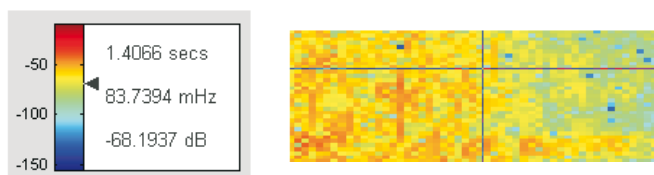
Load Data

Rys. 5. Odczyt, zapis danych i informacja o pikselach odstających



Rys. 6. Główne okno programu

w danym bloku obrazu piksele traktowane jako szum. Liczba pikseli jest podana pod parametrami odszumiania (*Outliers no.*), zaś opcja *show outliers* umożliwi zobrazowanie pikseli traktowanych jako szum (kolor ciemnoniebieski) na podkładzie oryginalnego obrazu sonogramu. Ostatnimi parametrami procedury odszumiania (rys. 4) są: metoda wyznaczania nowej wartości piksela reprezentującego składową szumu w obrazie oraz liczba sąsiednich pikseli, na podstawie których jest obliczana wartość piksela reprezentującego składową szumu.



Rys. 7. Panele sterowania kursorem: a) odczyt wartości parametrów piksela sonogramu; b) wskaźnik położenia piksela

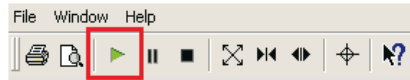
Opisane funkcje menu programu umożliwiają analizę wpływu parametrów przetwarzania sygnału na jakość obrazu.

Za pomocą wskaźnika aplikacja umożliwia również odczyt bieżących wartości parametrów pojedynczego piksela, takich jak: lokalizacja czasowa, lokalizacja na osi częstotliwości oraz jego poziom (rys. 7).

Zmiana położenia linii poziomej wzdłuż osi czasu umożliwia badanie na górnym wykresie rozkładu współczynników Malvara.

Dopasowanie zobrazowania do dystynktywnych cech zakłóceń w środowisku podwodnym umożliwia zmiana palety oraz skali barw.

Na lewym bocznym wykresie zobrazowano przebieg czasowy analizowanego sygnału pomiarowego. Na górnym pasku narzędziowym znajduje się ikona odtwarzania dźwięku (rys. 8). Po naciśnięciu tego przycisku następuje odtwarzanie dźwięku, zaś wskaźnik w postaci linii pionowej pokazuje bieżący moment jego odtwarzania.



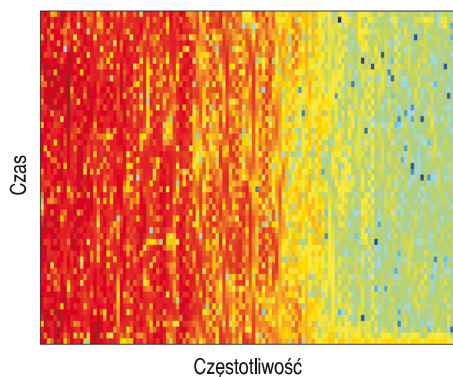
Rys. 8. Ikona odtwarzania dźwięku zarejestrowanego sygnału pomiarowego

Poprawne odtwarzanie dźwięku wymaga podania częstotliwości próbkowania analizowanego sygnału. Sonogram źródłowy oraz odszumiony mogą zostać zapisane w postaci pliku graficznego (rys. 6).

#### 4. Przykłady zastosowana aplikacji

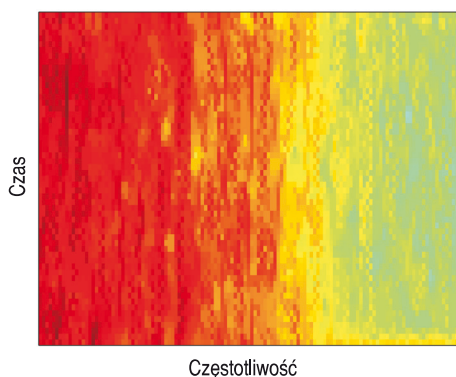
Poniżej zamieszczono przykłady sonogramów dla dwóch sygnałów pomiarowych, tj. naturalnego szumu środowiska podwodnego oraz szumu powodowanego aktywnością nurka w środowisku. Ocena percepcyjna odszumionego sonogramu, jak również określenie liczby i lokalizacji pikseli szumowych pozwala dopasować parametry przetwarzania w zależności od charakteru analizowanego sygnału. W procesie ekstrakcji składowych tonalnych pochodzących od obiektów podwodnych niezbędne jest poznanie struktury widmowej szumów środowiska pomiarowego i określenie parametrów odszumiania.

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono sonogramy szumów naturalnych środowiska podwodnego, zaś na rysunkach 11 i 12 przykład sonogramów reprezentatywnych dla



Rys. 9. Przykład sonogramów dla naturalnych szumów środowiska podwodnego — obraz źródłowy





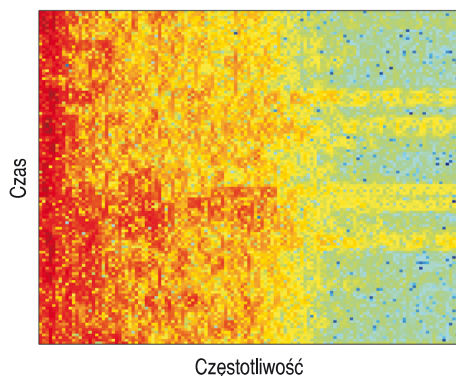
Rys. 10. Przykład sonogramów dla naturalnych szumów środowiska podwodnego — obraz odszumiony

aktywności płetwonurka w środowisku podwodnym. W obu przykładach przyjęto jednakowe parametry przetwarzania sygnału.

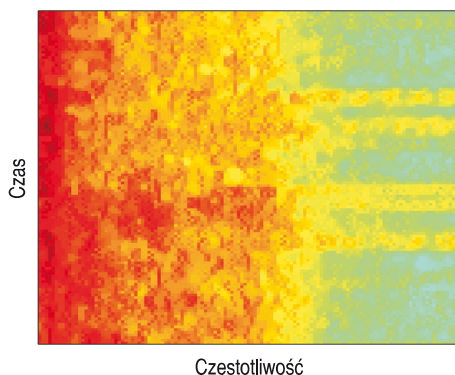
Współczynniki falki Malvara zostały obliczone dla długości rekordu sygnału równej 128 próbek z parametrem nakładania pomiędzy kolejnymi rekordami o długości 16 próbek. Obliczenia estymatora jądrowego funkcji gęstości prawdopodobieństwa wykonano na blokach obrazu o boku 8 pikseli z wykorzystaniem jądra Gaussa oraz metody *rot* wyznaczania parametru wygładzania  $h$ .

W odszumionym obrazie szumów naturalnych środowiska podwodnego (rys. 10) nie można wyróżnić niestacjonarnych zaburzeń o charakterze tonalnym pochodzących od obiektów podwodnych.

Uwidocznione w sonogramach 11 i 12 składowe szerokopasmowe są powodowane przez pęcherze powietrza towarzyszące usuwaniu powietrza z aparatu wspomagającego oddychanie płetwonurka. Ich szerokość oraz okres



Rys. 11. Przykład sonogramów reprezentatywnych dla aktywności płetwonurka w środowisku podwodnym dla szumów środowiska — obraz źródłowy



Rys. 12. Przykład sonogramów reprezentatywnych dla aktywności płetwonurka w środowisku podwodnym dla szumów środowiska — obraz odsumiony

powtarzalności są cechami osobniczymi sygnału hydroakustycznego wykorzystywanymi w procesie identyfikacji źródła sygnału hydroakustycznego.

## 5. Podsumowanie

Komputerowe wspomaganie analizy sygnałów hydroakustycznych jest elementem składowym techniki zobrazowania rozkładu energii akustycznej (LOFAR) wykorzystywanej do wykrywania i rozpoznawania dźwięków towarzyszących aktywności obiektów technicznych (okręty, uzbrojenie podwodne) i biologicznych (ssaki morskie, ławice ryb) w środowisku podwodnym.

Sonogramy są podstawą percepcyjnej oceny stanu środowiska podwodnego, głównym narzędziem wspomagającym operatora w procesie obserwacji stanu tego środowiska. Tworzenie sonogramu jest procesem interakcyjnym pomiędzy operatorem a zobrazowaniem sygnału hydroakustycznego na konsoli, w którym operator zawsze dąży do uzyskania możliwie najlepszej jakości obrazu. Obrazy umożliwiają wykrywanie oraz identyfikację źródeł dźwięków towarzyszących aktywności obiektów technicznych i biologicznych w środowisku podwodnym. Są ważnym źródłem informacji w procesie identyfikacji naturalnych szumów środowiska podwodnego, zwłaszcza w strefie przybrzeżnej, gdzie często obserwowane są składowe tonalne i szerokopasmowe pochodzące od infrastruktury lądowej (zakłady przemysłowe, ruch statków). W tym przypadku obraz sonograficzny jest swoistym wzorcem stanu naturalnego środowiska pomiarowego, na tle którego dokonuje się wykrywania aktywności obiektów, zwłaszcza technicznych.

Kluczowym problemem w uzyskaniu możliwie najlepszej jakości obrazów sonograficznych jest sposób przetwarzania sygnałów pomiarowych oraz zastosowana technika odsumiania utworzonych sonogramów.

Treścią artykułu jest aplikacja programowa przeznaczona do optymalizacji parametrów przetwarzania sygnałów hydroakustycznych dla potrzeb utworzenia sonogramów. Aplikacja umożliwia optymalizację parametrów przetwarzania sygnałów hydroakustycznych oraz ocenę ich wpływu na jakość obrazu sonograficznego. Daje możliwość oceny wpływu parametrów estymacji jądrowej na jakość odszumiania obrazów. Jest narzędziem w procesie poznawczym cech osobniczych źródeł dźwięków w środowisku podwodnym.

Artykuł wpłynął do redakcji 13.06.2011 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2011 r.

#### LITERATURA

- [1] T.A. LAMPERT, E.M. SIMON, O'KEEFE, *A survey of spectrogram track detection algorithms*, Applied Acoustics 71, 2010, 87-100.
- [2] T.A. LAMPERT, *Spectrogram Track Detection An Active Contour Algorithm*, Thesis [8].
- [3] A. GRIGORAKIS, *Application of Detection Theory to the Measurement of the Minimum Detectable Signal for a Sinusoid in Gaussian Noise Displayed on a Lofargram*, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1997.
- [4] J.C. DI MARTINO, S. TABBONE, *An approach to detect lofar lines*, Pattern Recognition Letters, 17, 1996, 37-46.
- [5] B. JERZMAN, W. KICIŃSKI, *Kernel Estimation of probability density function: properties and parameters optimization*, Metrology and Measurement Systems, 46, 1, 2009, 85-105.
- [6] S. MALLAT, *A wavelet tour of signal processing*, Academic Press, London, 1999.
- [7] P. KULCZYCKI, *Estymatory jądrowe w analizie systemowej*, Wydawnictwa Naukowe-Techniczne, Warszawa, 2005.
- [8] L. GAJEK, M. KAŁUSZKA, *Wnioskowanie statystyczne dla studentów*, Modele i metody, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.

B. JERZMAN, W. KICIŃSKI

#### Computer aided analysis of sonograms of underwater signals

**Abstract.** The article deals with the problem of improving the quality of imaging the measurement signals observed in the underwater environment. The essence of the proposed method of hydroacoustic signal processing is: the transform using the Malvar wavelet, imaging of the wavelet coefficients as a sonogram and denoising the image using the kernel density estimate. The application written in MATLAB environment reads the signals from files saved in ascii format, builds the sonogram of the state of the underwater environment and proceeds with the image denoising. The research was conducted on the real transient and broadband measurement signals recorded under the water.

**Keywords:** sonogram, denoising, Malvar wavelet, kernel estimate

