



EFEKT WIELODROGOWOŚCI W PODWODNYM KANALE AKUSTYCZNYM W WODZIE PŁYTKIEJ

Multipath effect in a shallow water acoustic channel

Sławomir Jastrzębski

Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy
ul.Kaliskiego 7, 85-792 Bydgoszcz
e-mail: sj@mail.atr.bydgoszcz.pl

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiony został problem wielodrogowości występujący w kanale hydroakustycznym w wodzie płytkiej. Wielodrogowość w podwodnym kanale w wodzie płytkiej jest spowodowana przede wszystkim odbiciami transmitowanych sygnałów od powierzchni i od dna morza. W pracy przeanalizowano odebrany impuls zmodulowanego sygnału dźwiękowego. Czasy przybycia sygnałów odbitych od dna i powierzchni morza zostały wykryte przy pomocy analizy cepstralnej, a następnie zastosowano homomorficzne rozplatanie w celu wyeliminowania efektu wielodrogowości. W celu potwierdzenia poprawności zaproponowanej metody przeprowadzono symulację numeryczną. Eksperymenty symulacyjne pokazały, że cepstrum mocy lepiej nadaje się do wykrywania wielodrogowości, ale do odtworzenia sygnału zostało wykorzystane cepstrum zespolone, ponieważ podczas obliczania cepstrum mocy tracona jest informacja o fazie sygnału.

W artykule przedstawiono wynik wykorzystania filtra grzebieniowego („lifter” w dziedzinie cepstrum) w celu usunięcia z cepstrum zespolonego niepożądanych komponentów addytywnych. Przykład numeryczny pokazuje, że problem wielodrogowości w kanale hydroakustycznym w wodzie płytkiej może zostać rozwiązany poprzez wykorzystanie rozplatania homomorficznego.

1. WPROWADZENIE

Komunikacja w podwodnym kanale akustycznym w wodzie płytkiej znacznie różni się od komunikacji w innych mediach, takich jak kanały radiowe, z powodu degradacji sygnału spowodowanego wielodrogowością oraz dużą zmiennością warunków czasowych i przestrzennych w kanale. Powszechnie wiadomo, że podwodny kanał akustyczny może powodować duże problemy w przypadku komunikacji o dużej szybkości. Problemy te obejmują propagację wielodrogowości, straty transmisji oraz zmienną w czasie naturę kanału [3]. Wielodrogowość powoduje rozproszenie sygnału w czasie i przestrzeni. Mechanizm powstawania wielodrogowości zależy od geometrii kanału i częstotliwości transmitowanego sygnału. Mechanizmy formowania się wielodrogowości w morzu są różne w głębokiej i płytkiej wodzie. Zrozumienie tych mechanizmów jest oparte na teorii i modelach propagacji dźwięku. W morzu płytkim podstawowym mechanizmem formowania się

wielodrogowości jest odbijanie się sygnału od powierzchni i od dna morza oraz od innych obiektów unoszących się na wodzie [3], [4], [5]. Powierzchnia i dno płytkiego morza wyznaczają granice kanału dźwiękowego. Część energii sygnału dźwiękowego wysyłanego ze źródła zostaje rozproszona w wodzie i dociera do odbiornika po różnych drogach. Warunki rozchodzenia się dźwięku w tym kanale zależą od głębokości oraz od właściwości akustycznych jego powierzchni i dna.

W pracy skupiono się przede wszystkim na problemie wielodrogowości w podwodnym kanale podczas rozchodzenia się fal akustycznych i związanymi z tym metodami eliminacji tych zakłóceń. Rozważono pewną klasę układów homomorficznych, dla których obowiązuje uogólniona zasada superpozycji dla operacji splatania.

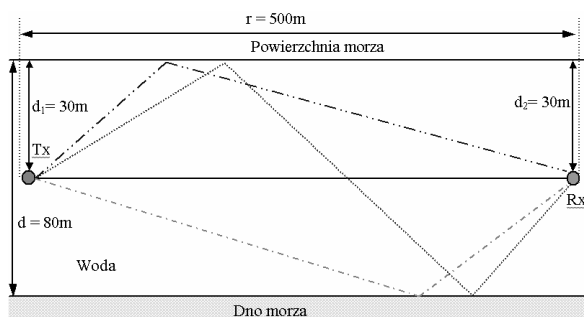
2. STRUKTURA KANAŁU

Sygnał, który dociera do odbiornika w kanale hydroakustycznym w wodzie płytkiej może być zapisany jako splot sygnału transmitowanego oraz odpowiedzi impulsowej kanału. Odpowiedź impulsowa kanału hydroakustycznego przyjmuje następującą postać:

$$h(t) = \sum_{k=-\infty}^K \alpha_k \delta(t - \tau_k) \quad (1)$$

gdzie α_k oraz τ_k są odpowiednio tłumieniem oraz opóźnieniem związanym z k -tą ścieżką, natomiast K jest liczbą ścieżek.

Rys. 1 przedstawia przykładowy kanał, w którym występuje efekt wielodrogowości. Głębokość kanału wynosi 80m. Odległość pomiędzy nadajnikiem, a odbiornikiem wynosi 500m. Źródło sygnału oraz odbiornik zostały umieszczone na głębokości 30m. Założono, że prędkość rozchodzenia się dźwięku w wodzie będzie stała i będzie równa 1500m/s.



Rys. 1. Model kanału, w którym występuje zjawisko wielodrogowości

W pracy przyjęto gładką powierzchnię morza i współczynnik odbicia bliski jedności. Przyjęte parametry kanału hydroakustycznego nie oddają wszystkich warunków dotyczących rzeczywistego kanału.

3. FILTRACJA HOMOMORFICZNA

Dwa zsumowane sygnały, których transformaty Fouriera zajmują różne pasma częstotliwości można rozdzielić stosując filtrację liniową. Idea rozplatania homomorficznego opiera się na uogólnionej zasadzie superpozycji i idealnie nadaje się do separacji sygnałów będących iloczynem lub splotem sygnałów składowych [1], [2]. Przekształca ono splot

dwóch sygnałów w sumę, co na dalszym etapie umożliwi rozdzielanie składowych addytywnych za pomocą filtracji liniowej. Obliczenie cepstrum sygnału jest transformacją homomorficzną i idea cepstrum jest podstawowym składnikiem teorii homomorficznego przetwarzania splecionych sygnałów.

Analiza cepstralna jest ogólnie rzecz biorąc pewną modyfikacją analizy widmowej sygnałów. W pracy wykorzystano następującą postać cepstrum mocy:

$$c_m(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \log S(f) e^{j2\pi f \tau} df = F^{-1}[\log S(f)] \quad (2)$$

gdzie $S(f)$ jest widmem mocy analizowanego sygnału:

$$S(f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \right|^2 \quad (3)$$

Innym rodzajem cepstrum jest cepstrum zespolone, które jest określone jako odwrotne przekształcenie Fouriera logarytmu widma sygnału i wyraża się w następujący sposób:

$$c_z(\tau) = F^{-1}[\log X(f)] = F^{-1}[\log |X(f)| + j\phi_X(f)] \quad (4)$$

Rozplatanie homomorficzne może być wykorzystane do eliminacji echa, a co za tym idzie efektu wielodrogowości, z przebiegu czasowego. Wykorzystuje się tu fakt, że przebieg wypadkowy zawierający echo może być wyrażony za pomocą splotu dwóch funkcji, z których pierwsza opisuje przebieg pierwotny, druga zaś przedstawiona jest w postaci funkcji delty Diraca charakteryzującej kanał transmisyjny. Splot dwóch funkcji w dziedzinie czasu jest równoważny iloczynowi ich widm w dziedzinie częstotliwości. Najpierw należy więc obliczyć transformatę Fouriera splotu dwóch funkcji, a następnie powstałe widmo należy poddać operacji logarytmowania i w ten sposób uzyskujemy zamiast mnożenia prostą operację dodawania, która uwypukla wyraźnie własność addytywności echa. Echo jest zobrazowane w postaci impulsu delta stanowiącego określoną harmoniczną¹. Stosując odpowiednią metodą filtracji i odwrotne przekształcenie Fouriera można odtworzyć początkowy przebieg czasowy z wyeliminowanym echem.

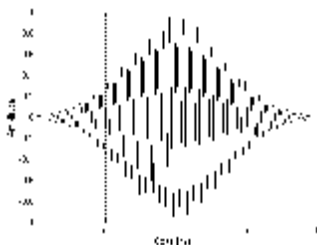
4. SYMULACJA NUMERYCZNA

Symulacji numerycznej dokonano w programie Matlab i przebadano w niej metodę homomorficznego rozplatania. Sygnał wysyłany z nadajnika opisany jest następującą zależnością:

$$x(t) = \begin{cases} \sin[2\pi f(t-T)] * \exp\left[-\left(\frac{2}{T}\right)^2 * (t-T)^2\right]; & 0 \leq t \leq 2T \\ 0 & ; t > 2T \end{cases} \quad (5)$$

¹ Cepstrum jest anagramem angielskiego słowa *spectrum*, które oznacza widmo. Stworzono cały słownik terminów związanych z tą dziedziną, np. *filter - lifter, harmonic - rahmonic*, itp. W pracy wykorzystywane są więc odpowiednie określenia z dziedziny cepstrum.

Rys. 2 przedstawia postać emitowanego sygnału. Jest to jak widać impuls Gaussowski o częstotliwości 2kHz i czasie trwania 20ms. Częstotliwość próbkowania sygnału wynosiła $f_p=10\text{kHz}$.

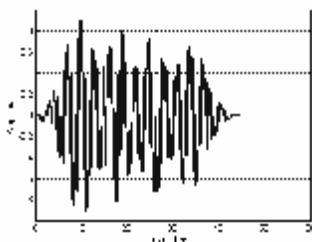


Rys. 2 Transmitowany sygnał

Sygnał, który dociera do odbiornika jest splotem sygnału nadajnika i odpowiedzi impulsowej kanału:

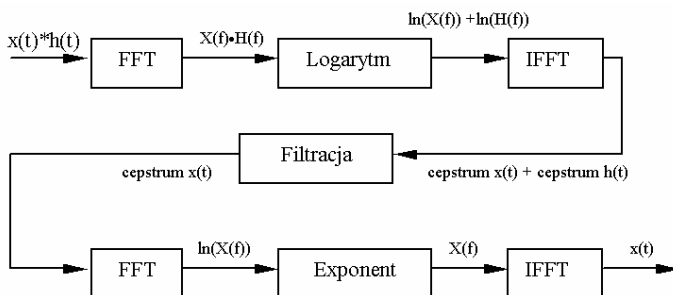
$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (6)$$

Po przejściu transmitowanego sygnału przez kanał hydroakustyczny w morzu płytkim w odbiorniku pojawia się sygnał, w którym wyraźnie widoczny jest efekt wielodrogowości, co zostało przedstawione na Rys. 3.



Rys. 3 Odebrany sygnał spleciony z odpowiedzią impulsową kanału

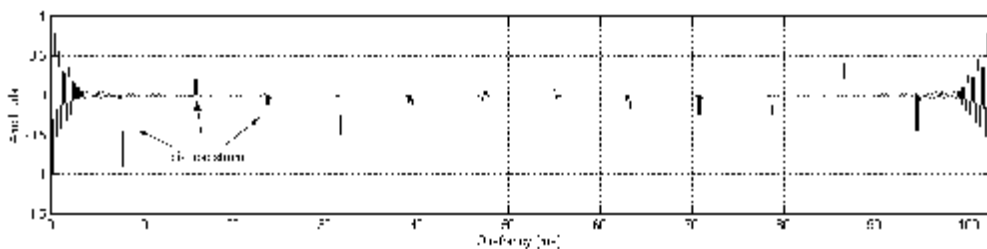
Sygnał w odbiorniku poddano operacji homomorficznego rozplatania, którego schemat blokowy przedstawiono na Rys. 4. Obliczono cepstrum mocy (Rys.5) i cepstrum zespolone (Rys.6) odebranego sygnału posługując się odpowiednio zależnościami (2) oraz (4).



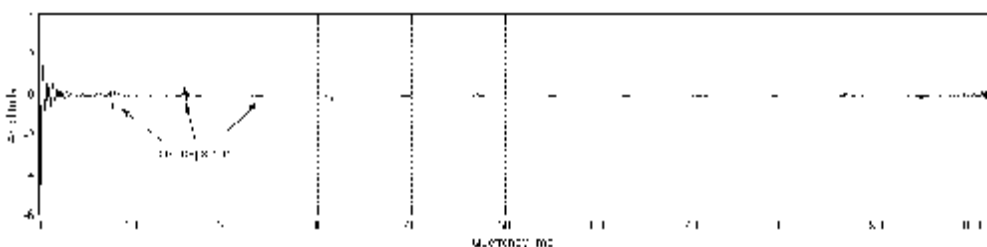
Rys. 4 Schemat blokowy przedstawiający ideę homomorficznego rozplatania

Piki, które są widoczne w otrzymanych cepstrach odpowiadają czasom związanym z dojściem do odbiornika poszczególnych kopii sygnału nadawanego i są zgodne z chwilami

pojawienia się impulsów w odpowiedzi impulsowej kanału. Znak piku w cepstrum zależy od tego, czy kolejny sygnał został odbity od dna, czy od powierzchni morza.



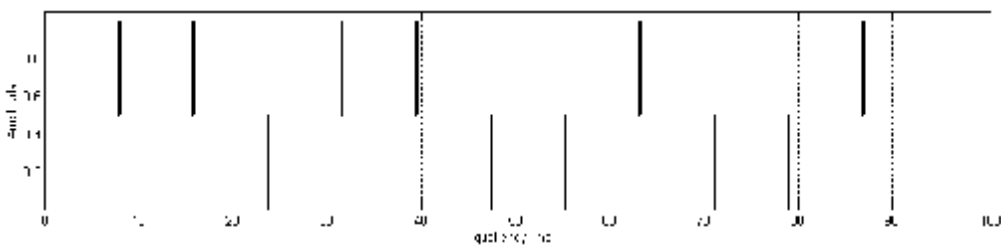
Rys. 5 Cepstrum mocy odebranego sygnału



Rys. 6 Cepstrum zespolone odebranego sygnału

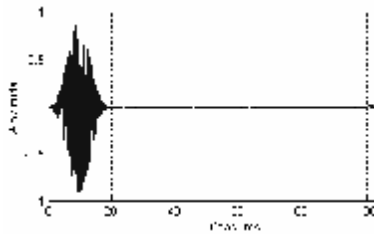
Rysunki przedstawiające poszczególne cepstra pokazują ważną cechę, a mianowicie to, że piki w cepstrum mocy są bardziej widoczne niż te pojawiające się w cepstrum zespolonym, jednakże na podstawie cepstrum mocy nie można odtworzyć sygnału, gdyż tracimy informację o fazie.

W celu separacji sygnałów splecionych w kanale hydroakustycznym można zastosować liniową filtrację zlogarytmowanej transformaty Fouriera. W tym przypadku szczególnie interesująca wydaje się klasa układów liniowych niezmiennych względem częstotliwości [1], [2]. Filtr liniowy niezmienny względem częstotliwości może być zrealizowany poprzez splot w dziedzinie częstotliwości lub poprzez mnożenie w dziedzinie czasu. Ta właśnie operacja zdefiniowana jest jako homomorficzne rozplatanie. W pracy filtracji liniowej dokonano poprzez mnożenie w dziedzinie czasu. Na Rys. 7 przedstawiono charakterystykę zastosowanego filtra grzebieniowego do eliminacji efektu wielodrogowości i odzyskania sygnału nadawanego z sygnału odebranego.



Rys. 7 Charakterystyka filtra zastosowanego do homomorficznej filtracji

Rys. 8 przedstawia odebrany sygnał po zastosowaniu filtracji homomorficznej.



Rys. 8 Odfiltrowany sygnał z Rys. 3 (filtracja homomorficzna)

5. WNIOSKI

Przedstawione w pracy wyniki symulacji numerycznej przedstawiają jeden z możliwych sposobów usuwania efektów związanych z wielodrogowością w podwodnym kanale akustycznym w wodzie płytkiej. W dziedzinie cepstrum echo można usunąć poprzez wyszukanie pików związanych z czasem dośścia do odbiornika poszczególnych kopii sygnału i wyzerowanie ich lub poprzez zastosowanie odpowiedniego filtra. Najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie filtra dolnoprzestowego. Lepsze efekty daje jednakże zastosowanie filtracji grzebieniowej co zostało przedstawione w przeanalizowanym przykładzie. Wyniki symulacji pokazały także, że cepstrum mocy lepiej nadaje się do wykrywania efektu wielodrogowości, ale do odtworzenia sygnału wykorzystuje się cepstrum zespolone, które zachowuje informację o fazie sygnału.

LITERATURA

1. A.V. OPPENHEIM, Sygnały cyfrowe. Przetwarzanie i zastosowania, WNT, Warszawa 1982
2. A.V. OPPENHEIM, R.W. SHAFER, Discrete-Time Signal Processing, Prentice-Hall, 1999
3. M. STOJANOVIC, Recent Advances in High-Speed Underwater Acoustic Communications, IEEE Journal of Ocean Engineering V21 No.2, pp. 125-135, April 1996
4. W.S. BURDIC, Underwater Acoustic System Analysis, Peninsula Publishing, Los Altos, 2002
5. M.STOJANOVIC, Z.ZVONAR, Multichannel Processing of Broad-Band Multiuser Communication Signals in Shallow Water Acoustic Channels, IEEE Journal of Ocean Engineering V21 No.2, pp. 156-166, April 1996
6. B.YAN, S.SUN, Z.LU, Improved Echo Hiding Using Power Cepstrum and Simulated Annealing Based Synchronization Technique, Preecidings of the Second International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Xi'an, 2-5 November 2003, pp. 2142-2147