

## Odbiór zbiorczy z filtracją adaptacyjną RLS w transmisji danych w kanale hydroakustycznym

**Streszczenie.** Transmisja danych w kanale hydroakustycznym realizowana jest w trudnych warunkach propagacyjnych. Jednym z problemów podczas takiej transmisji są zakłócenia międzysymbolowe (ISI – intersymbol interference) spowodowane głównie przez efekt wielodrogowości. To zjawisko utrudnia, bądź uniemożliwia transmisję danych w takim kanale. Stąd podjęto analizę wpływu zastosowania odbioru zbiorczego oraz filtracji adaptacyjnej RLS (Recursive Least Squares) na poprawę jakości odbioru transmisji danych w kanale hydroakustycznym.

**Abstract.** When transmitting data in a hydroacoustic channel under difficult propagation conditions, one of the problems is intersymbol interference (ISI) caused mainly by the effect of multipath propagation. This phenomenon leads to a decrease in transmission parameters, and sometimes completely prevents it. Therefore, we have made an attempt to use diversity combining with Recursive Least Squares (RLS) adaptive filtering to improve the quality of data transmission in a hydroacoustic channel. (**Diversity Combining with RLS Adaptive Filtering for Hydroacoustic Data Transmission**).

**Słowa kluczowe:** kanał hydroakustyczny; odbiór zbiorczy; adaptacyjny filtr RLS; transmisja danych.

**Keywords:** hydroacoustic channel; diversity combining; RLS adaptive filter; data transmission.

### Wstęp

Fala akustyczna dobrze propaguje się w wodzie w porównaniu z emisjami wykorzystującymi fale elektromagnetyczne. Dlatego jest często używana w wielu obszarach działalności człowieka na morzu: podczas prac podwodnych, w badaniach naukowych środowiska morskiego, ryb, planktonu, podwodnej roślinności, sportów wodnych, ciągłego monitoringu środowiska morskiego oraz w zakresie zastosowań militarnych. Wraz z rozwojem podwodnych autonomicznych pojazdów oraz podwodnej robotyki zwiększa się zapotrzebowanie na bezprzewodową transmisję danych w wodzie. Pomimo intensywnego rozwoju telekomunikacji, transmisja danych w wodzie stanowi nadal wyzwanie, czego dowodem są powstające nowe rozwiązania [1-4]. Jednym z istotniejszych zjawisk podczas propagacji fali mechanicznej w wodzie jest zjawisko wielodrogowości [5-7], obecne zwłaszcza w wodach płytkich, wąskich przejściach lub w zbiornikach z infrastrukturą hydrotechniczną (kanały, porty itp.). Zjawisko to jest także obserwowane w przypadku warstwowości ośrodka wynikającej m.in. z różnic temperatury, zmian zasolenia, które występują w wodach morza Bałtyckiego. Efekt wielodrogowości wpływa na powstawanie licznych odbić, które wydłużają czas pamięci kanału hydroakustycznego, co prowadzi do powstawania interferencji międzysymbolowych obejmujących dziesiątki, a nawet setki symboli, utrudniając komunikację.

W publikacji przedstawiono wpływ zastosowania odbioru zbiorczego wraz z filtracją adaptacyjną RLS na poprawę jakości odbieranej transmisji danych w kanale hydroakustycznym gdzie występuje zjawisko wielodrogowości. W referacie wyjaśniono sposób realizacji odbioru zbiorczego oraz opisano filtrację adaptacyjną RLS (Recursive Least Squares). Przeprowadzono badania symulacyjne z wykorzystaniem środowiska Matlab i metody Monte Carlo. Przedstawione wyniki pozwalają określić zalety oraz ograniczenia zaprezentowanego sposobu przetwarzania sygnałów hydroakustycznych.

### Odbiór Zbiorczy

Podczas badań przyjęto, że po stronie nadawczej wykorzystywany jest jeden hydrofon generujący falę akustyczną. Natomiast po stronie odbiorczej hydrofonów może być kilka [8, 9]. Założono także, że sygnałem

transmitowanym  $x(n)$  jest sygnał sinusoidalny o częstotliwości  $f_c$  modulowany losowym ciągiem  $d(n)$

$$(1) \quad x(n) = d(n) \sin(2\pi f_c n)$$

gdzie  $n$  oznacza numer próbki. Nadawany sygnał jest kształtowany filtrem o charakterystyce pierwiastka z podniesionego kosinusa (Root Rised Cosine – RRC) o współczynnik roll-off 0,4, w celu zmniejszenia emisji pozapasmowych, co będzie istotne podczas rzeczywistej pracy systemu łączności podwodnej.

Kolejnym założeniem podczas symulacji było przyjęcie, że odpowiedzi impulsowe kanałów dla każdego z hydrofonów odbiorczych są niezależne

$$(2) \quad y_k(n) = \text{conv}(x(n), g_k(n)) + s_k(n)$$

gdzie:  $y_k(n)$  – sygnał odebrany w  $k$ -tym kanale,  $x(n)$  – nadawany sygnał,  $g_k(n)$  – odpowiedź impulsowa kanału,  $s_k(n)$  – szum.

Odbiór zbiorczy, w najprostszej postaci, polega na zsumowaniu sygnałów ze wszystkich kanałów odbiorczych z jednakowymi wagami. Ponieważ sygnał docierający do poszczególnych hydrofonów może być propagowany drogami o różnym opóźnieniu, dlatego też po stronie odbiorczej, przed sumowaniem sygnałów należy je wzajemnie zsynchronizować względem pierwszego docierającego do systemu odbiorczego. Stąd odbiór zbiorczy może być przedstawiony równaniem

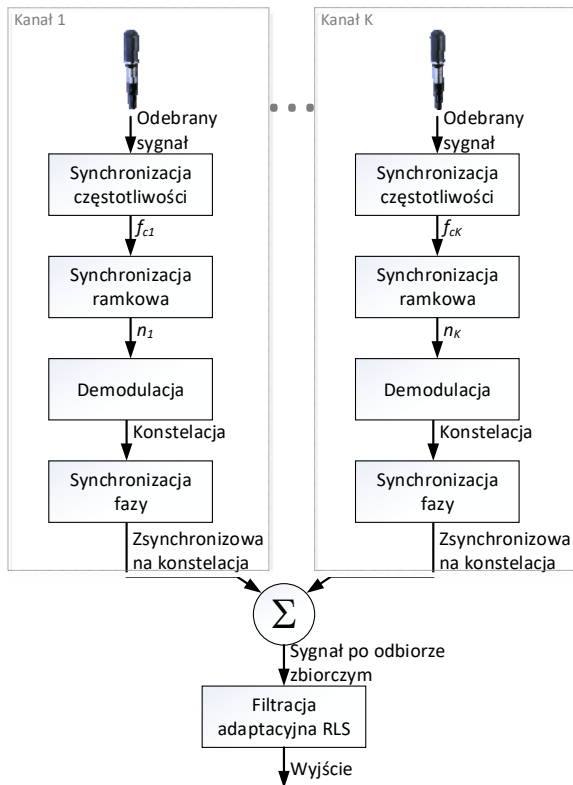
$$(3) \quad u(n) = u_1(n + n_1) + u_2(n + n_2) + \dots + u_k(n + n_k)$$

gdzie:  $u(n)$  – sygnał uzyskany w wyniku odbioru zbiorczego,  $u_k(n)$  – sygnał odebrany z  $k$ -tego kanału odbiorczego,  $n_k$  – opóźnienie sygnału w  $k$ -tym kanale względem pierwszego odbieranego wyrażone w próbkach.

Na rys. 1 zaprezentowano schemat blokowy omawianego przetwarzania sygnałów.

Sygnałem wejściowym jest wartość napięcia zarejestrowana na wyjściu  $k$ -tego hydrofonu. Na początku w każdym z torów odbiorczych, realizowana jest synchronizacja częstotliwości sygnału odbieranego. Następnie przeprowadzana jest synchronizacja ramkowa

z użyciem znanej preambuły transmitowanej na początku każdej ramki. W tym celu sygnał odbierany korelowany jest z sygnałem wzorcowym (zmodulowaną preambułą) i poszukiwane jest maksimum korelacji. Znalezienie maksimum wskazuje początek ramki. Dalej realizowana jest demodulacja i korekcja fazy. Dopiero tak przetworzone sygnały z każdego z hydrofonów są dodawane do siebie algebraicznie. Sygnał po zsumowaniu jest poddawany filtracji RLS.

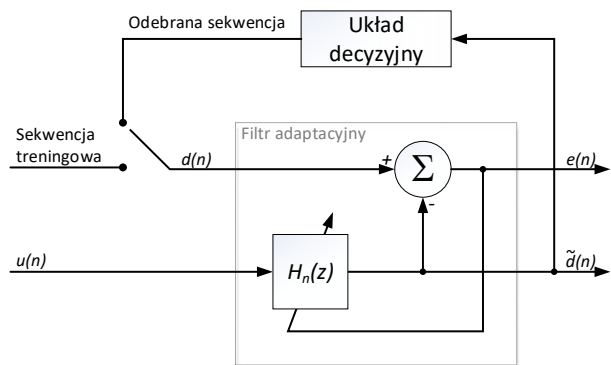


Rys.1. Schemat blokowy przetwarzania sygnału w odbiorze zbiorczym

### Filtr adaptacyjny RLS

W celu zminimalizowania wpływu efektu wielodrogowości na jakość odbieranego sygnału zastosowano filtr adaptacyjny, którego współczynniki są określane przy użyciu algorytmu RLS [10 – 12]. Filtr ten charakteryzuje się zdolnością do eliminacji silnych interferencji międzysymbolowych oraz bardzo dobrą odpornością na efekt Dopplera [13]. Ze względu na te właściwości filtr adaptacyjny RLS został użyty podczas realizowanych badań.

Na wejście układu filtru adaptacyjnego podawana jest sekwencja sygnału odbieranego  $u(n)$  oraz sekwencja ciągu wzorcowego będącego ciągiem uczącym. Zadaniem filtru jest więc przekształcenie sygnału odbieranego  $u(n)$  w ciąg najbliższy ciągowi nadanemu  $d(n)$ . Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy filtru adaptacyjnego, gdzie  $\tilde{d}(n)$  oznacza estymatę nadanej sekwencji,  $e(n)$  - błąd adaptacji,  $H_n(z)$  - funkcja przenoszenia filtra adaptacyjnego - użyto filtru o nieskończonej odpowiedzi impulsowej (IIR – Infinite Impulse Response). Liczba odczepów filtra zależy od maksymalnego opóźnienia w kanale, natomiast długość sekwencji uczącej powinna być dwa razy dłuższa od maksymalnego opóźnienia kanału.



Rys.2. Schemat blokowy filtru adaptacyjnego

### Warunki symulacji

Badania zostały wykonane z użyciem środowiska Matlab z zastosowaniem metody Monte Carlo. Parametry symulacji zostały dobrane z uwzględnieniem możliwości późniejszego powtórzenia tych badań w warunkach rzeczywistych. Parametry te są następujące:

- modulacja BPSK;
- Liczba bitów przesyłanych w ramce: 1260;
- Długość preambuły: 126 bitów;
- Szerokość pasma zmodulowanego sygnału: 100 kHz;
- Szybkość modulacji: 50 kBd;
- Częstotliwość próbkowania: 500 kHz;
- Częstotliwość nośna: 100 kHz;
- Liczba replik:  $1 \div 15$ ;
- Amplituda replik: liczby losowe o rozkładzie równomiernym;
- Opóźnienia replik: liczby losowe z zakresu od 0 do 1 ms i rozkładzie równomiernym.

Amplitudy poszczególnych replik za każdym razem były normalizowane w taki sposób aby ich całkowita moc nie przekroczyła wartości zadanej. Do tego celu wprowadzono parametr SRR (Signal-to-Replicas Ratio), który wyraża stosunek mocy sygnału użytecznego (replika odbierana jako pierwsza, dalej nazywana pierwszą repliką) do mocy pozostałych replik:

$$(3) \quad SRR_{lin} = \frac{P_1}{\sum_{r=2}^{R+1} P_r} \quad SRR_{dB} = 10 \log \frac{P_1}{\sum_{r=2}^{R+1} P_r}$$

gdzie:  $P_1$  – moc pierwszej repliki,  $P_r$  – moc  $r$ -tej repliki,  $R$  - liczba replik.

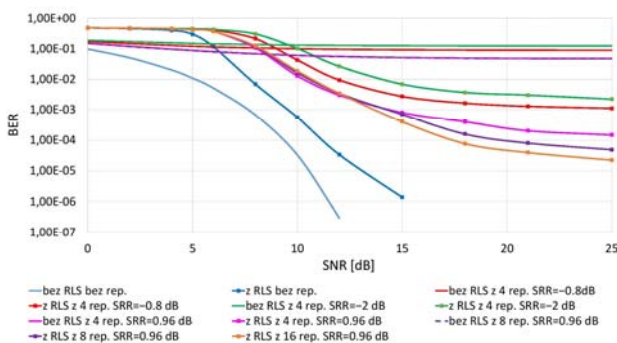
Sumowanie sygnałów w omawianym odbiorze zbiorczym jest realizowane w paśmie podstawowym. Sygnały ze wszystkich hydrofonów są zsynchronizowane względem pierwszego odbieranego sygnału. Podczas symulacji przyjęto 100 bitów ciągu uczącego, co odpowiada podwojonemu czasowi trwania odpowiedzi impulsowej (maksymalnemu opóźnieniu replik – 1 ms) pomnożonemu przez szybkość modulacji (przyjęto 50 kBd). Wyznaczenie każdej z prezentowanych charakterystyk wymagało przesłania ok. dwóch milionów ramek.

### Wyniki badań

W pierwszym etapie prac zbadano wpływ filtracji RLS na jakość odbieranego sygnału dla różnej liczby replik oraz stosunku SRR w funkcji mocy sygnału do mocy szumu (SNR). Uzyskane wyniki zobrazowano na rys. 3

Linia niebieską bez znacznika oznaczono przypadek kanału jedynie z szumem. Pozostałe linie bez znaczników prezentują jakość odbioru bez zastosowania filtru adaptacyjnego RLS w obecności zjawiska wielodrogowości. Tym liniom odpowiadają charakterystyki ze znacznikami,

które prezentują wyniki gdy zastosowano filtr adaptacyjny RLS. W przypadku kanału tylko z szumem, filtr RLS nie poprawia jakości odbioru. Jednakże gdy pojawiają się repliki sygnału, wówczas filtr RLS poprawia jakość odbioru o ponad dwa rzędy wielkości. Im większa liczba replik w sygnale odbieranym tym większą poprawę jakości odbioru obserwowano. Jednakże gdy poziom szumu jest duży (SNR mniejszy od 10 dB dla 4 replik sygnału o poziomie SRR równym -2 dB), wówczas poprawa jakości nie jest obserwowana. Dla kanałów o większej liczbie replik, przy zachowaniu jednakowej sumarycznej ich mocy, widoczna jest większa poprawa jakości odbioru. Jednakże gdy moc replik rośnie (stosunek SRR maleje) wówczas efektywności filtru adaptacyjnego maleje co można zaobserwować porównując charakterystyki zieloną i czerwoną ze znacznikami na rys. 3. Obie uzyskano symulując kanał wielodrogowy z 4 replikami. Jednakże w przypadku charakterystyki zielonej moc replik była większa (SRR = -2 dB) w stosunku do badań reprezentowanych przez



charakterystykę czerwoną (SRR = -0,8 dB).

Rys.3. Wpływ filtracji adaptacyjnej na jakość odbioru w kanale wielodrogowym

W kolejnym badaniu analizowano wpływ liczby replik na jakość odbieranego sygnału, także z wykorzystaniem dwóch odbiorników. Wyniki zaprezentowano na rys. 4. Analogicznie jak na poprzednim wykresie linie bez znaczników oznaczają wartości uzyskane bez zastosowania filtru RLS, natomiast linie ze znacznikami wykreślono gdy filtr RLS użyto. Można zauważyć, że nawet dla dużej liczby replik i ich dużej mocy sumarycznej względem pierwszej repliki (większej lub porównywalnej z mocą pierwszej repliki) adaptacyjny filtr RLS poprawia jakość odbioru przynajmniej dziesięciokrotnie. Co więcej zauważono, że zwiększanie liczby replik powyżej 4 nie pogarsza znacząco parametru BER. Ponadto należy zwrócić uwagę, że gdy nie stosuje się filtru adaptacyjnego, a liczba replik wynosi przynajmniej 2, to mierzona wartość BER nie zależy od liczby replik a jedynie od ich całkowitej mocy.

Należy podkreślić, że jeśli w każdym z kanałów odbiorczych pierwsze odbierane sygnały są zsynchronizowane ze sobą w czasie, natomiast pozostałe repliki występują całkowicie losowo, wówczas wartość parametru SRR dla odbioru zbiorczego ( $SRR_{lin}^{dc}$ ) będzie tyle razy większa ile kanałów odbiorczych będzie użytych. W sytuacji gdy istniałaby korelacja pomiędzy odpowiedziami impulsowymi pomiędzy poszczególnymi torami odbiorczymi w odbiorze zbiorczym, wówczas poprawa parametru SRR nie byłaby uzyskiwana. Wzór opisujący parametr SRR można przekształcić do postaci

$$(4) \quad SRR_{lin}^i = \frac{A_i^2}{\sum_{j=1}^J A_{ij}^2} = \frac{A_i^2}{P_{Ri}}$$

gdzie:  $A_i$  – amplituda pierwszej repliki w  $i$ -tym odbiorniku,  $A_{ij}$  – amplituda  $j$ -tej repliki w  $i$ -tym odbiorniku,  $J$  - liczba replik,  $P_{Ri}$  - całkowita moc replik w  $i$ -tym odbiorniku.

W odbiorze zbiorczym, odbiorniki są wzajemnie zsynchronizowane względem pierwszej repliki, dzięki czemu amplitudy pierwszych repliki się dodają, natomiast pozostałe są niezależne co można zapisać

$$(5) \quad SRR_{lin}^{dc} = \frac{\left(\sum_{i=1}^K A_i\right)^2}{\sum_{i=1}^K \left(\sum_{j=1}^J A_{ij}^2\right)}$$

gdzie:  $K$  – liczba odbiorników.

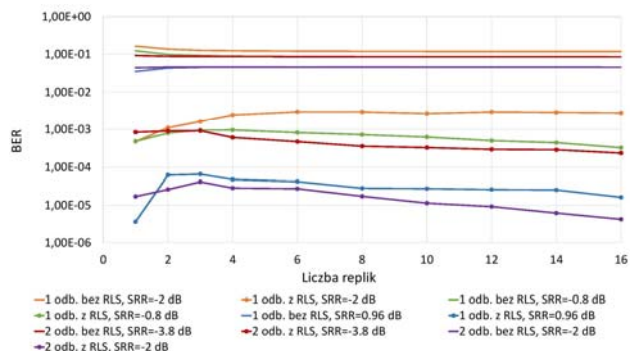
Ponieważ podczas symulacji założono, że  $A_i$  oraz  $P_{Ri}$  w każdym z odbiorników są takie same, wzór 5 można zapisać

$$(6) \quad SRR_{lin}^{dc} = \frac{(K \cdot A_i)^2}{K \cdot P_{Ri}}$$

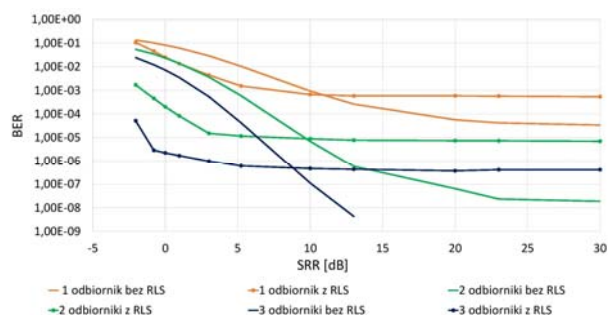
stąd

$$(7) \quad SRR_{lin}^{dc} = K \cdot SRR_{lin}^i$$

Przedstawione wyżej wzory dowodzą, że wartość parametru SRR wzrasta tyle razy ile odbiorników zostanie zastosowanych, przy założeniu, że warunki propagacyjne dla każdego z hydrofonów są wzajemnie niezależne.



Rys.4. Wpływ liczby replik sygnału na jakość odbioru w kanale wielodrogowym, SNR = 30 dB



Rys.5. Wpływ wartości parametru SRR na jakość odbioru w kanale wielodrogowym, liczba replik 4, SNR = 10 dB

Ostatnim przeprowadzonym badaniem była analiza wpływu całkowitej mocy replik na jakość odbioru. W tym celu przyjęto stałą liczbę replik 4 i wartość SNR = 10 dB. Zmieniano natomiast wartość parametru SRR. Wyniki zaprezentowano na rys. 4. Analogicznie jak poprzednio,

linie bez znaczników reprezentują wartości BER wyznaczone gdy nie używano filtra adaptacyjnego podczas odbioru, natomiast linie ze znacznikami użyto podczas wykreślania charakterystyk z zastosowanym filtrem RLS.

Otrzymane charakterystyki dowodzą, że stosowanie filtra adaptacyjnego RLS jest zasadne wtedy gdy całkowita moc replik jest odpowiednio duża względem mocy pierwszej repliki. Wartość parametru SRR, dla którego zasadne jest używanie filtra RLS zależy od SNR. Gdy SRR przekroczy wartość graniczną wówczas uzyskiwana jakość odbioru jest zbliżona z jakością odbioru otrzymywaną dla danej wartości SNR (linia niebieska ze znacznikami na rys. 3).

Przedstawione charakterystyki potwierdzają także zasadność stosowania odbioru zbiorczego. Użycie dwóch odbiorników poprawia jakość odbioru 100 razy. Dołożenie do zestawu odbiorczego trzeciego hydrofonu poprawia dodatkowo jakość odbioru jeszcze dziesięciokrotnie. Ponadto stosowanie odbioru zbiorczego nie wyklucza stosowania filtra adaptacyjnego RLS. Odbiór zbiorczy wręcz poprawia efektywność tego filtra, dzięki poprawie stosunku SNR oraz SRR.

### Podsumowanie

Jednym z głównym wyzwaniem podczas transmisji danych w trudnym pod względem właściwości propagacyjnych kanale hydroakustycznym są interferencje międzysymbolowe. Zjawisko to bardzo negatywnie wpływa na jakość odbioru i może prowadzić do utraty łączności.

W przedstawionym referacie celem badań było określenie wpływu odbioru zbiorczego w połączeniu z filtracją adaptacyjną RLS na jakość odbieranej transmisji danych w kanale hydroakustycznym o trudnych warunkach propagacyjnych.

Realizacja postawionego celu wymagała przeprowadzenia bardzo dużej liczby symulacji. Pozwoliły one ustalić, że stosowanie filtra adaptacyjnego RLS jest zasadne tylko wówczas gdy całkowita moc replik jest odpowiednio duża względem mocy pierwszej repliki (użytecznego sygnału). Ponadto, nawet w obecności dużej liczby replik, o odpowiednio dużej mocy całkowitej względem pierwszej repliki, stosowanie filtra adaptacyjnego RLS poprawia jakość odbioru. Natomiast, stosowanie techniki odbioru zbiorczego jest zawsze uzasadnione, jeżeli sygnały docierające do poszczególnych hydrofonów są niezależne stochastycznie. Odbiór zbiorczy poprawia wartość stosunku SNR, co zwiększa zakres stosowalności filtracji adaptacyjnej RLS. W przypadku gdy całkowita moc replik jest dziesięciokrotnie mniejsza od pierwszej repliki, wówczas poziom szumu ma znaczący wpływ na jakość odbioru. W takim przypadku, korzystniej jest stosować odbiór bez dodatkowej filtracji adaptacyjnej RLS. Dodatkowo odbiór zbiorczy zmniejsza wpływ interferencji między symbolowych, ponieważ amplituda każdej z

niepożądanych replik zmniejsza się tyle razy ile kanałów odbiorczych zostało użytych. Przy czym ma to miejsce tylko wówczas gdy wszystkie tory odbiorcze zostaną zsynchronizowane względem pierwszej odbieranej repliki oraz gdy odpowiedzi impulsowe dla każdego toru odbiorczego są niezależne.

**Autorzy:** dr inż. Agnieszka Czapiewska, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: [agnieszka.czapiewska@pg.edu.pl](mailto:agnieszka.czapiewska@pg.edu.pl); dr inż. Andrzej Łuksza, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-255 Gdynia, E-mail: [a.luksza@we.umg.edu.pl](mailto:a.luksza@we.umg.edu.pl); dr inż. Ryszard Studański, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-255 Gdynia, E-mail: [r.studanski@we.umg.edu.pl](mailto:r.studanski@we.umg.edu.pl); kmdr dr hab. inż. Andrzej Żak, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, ul. Smidowicza 69, 81-255 Gdynia, E-mail: [a.zak@amw.gdynia.pl](mailto:a.zak@amw.gdynia.pl).

### LITERATURA

- [1] Kochańska I.: Reliable OFDM Data Transmission with Pilot Tones and Error-Correction Coding in Shallow Underwater Acoustic Channel. *Appl. Sci.* 2020, 10, 2173.
- [2] Czapiewska A., Łuksza A., Studanski R., Zak A.: Reduction of the Multipath Propagation Effect in a Hydroacoustic Channel Using Filtration in Cepstrum. *Sensors* 2020, 20, 751.
- [3] Czapiewska A., Łuksza A., Studanski R., Zak A.: Application of Diversity Combining with RLS Adaptive Filtering in Data Transmission in a Hydroacoustic Channel, *Sensors* 2020, 20, 7255.
- [4] Studański R., Mizeraczyk J., Żak A.: Filtracja odebranego sygnału przekształconego do postaci cepstralnej jako metoda redukcji efektu wielodrogowości w kanale radiowym. *Przegląd Elektrotechniczny* 2019, R. 95 NR 10/2019.
- [5] Studański R., Żak A.: Results of impulse response measurements in real conditions, *Journal of Marine Engineering and Technology*, 16(4), pp. 337-343, 2018.
- [6] Kaczorek P., Studański R., Żak A.: Data transmission in the hydroacoustic channel – experimental researches, *Journal of Marine Engineering and Technology*, 16(4), pp. 409-415, 2018.
- [7] Żak A. Studański R.: Echoes cancellation in hydroacoustic channel: Experimental research, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2019.
- [8] Brennan D.G.: Linear diversity combining techniques, *Proc. IRE*, vol.47, no.1, pp.1075–1102, June 1959.
- [9] Ziemer R. E., Peterson R. L.: *Introduction to Digital Communication*, 2nd edition, Prentice Hall, 2000.
- [10] Hayes, Monson H.: *Recursive Least Squares* [in] *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. Wiley, 1996.
- [11] Haykin S.: *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, 2002.
- [12] Liu W., Principe J. and Haykin S.: *Kernel Adaptive Filtering: A Comprehensive Introduction*, John Wiley, 2010.
- [13] Compare RLS and LMS Adaptive Filter Algorithms-MathWorks Help Center. Available online: <https://www.mathworks.com/help/dsp/ug/compare-rls-and-lms-adaptive-filter-algorithms.html> (dostęp: 17.10.2020)