

## Analiza przykładowych odpowiedzi impulsowych kanału hydroakustycznego pomierzonych w ruchu

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono przykładowe wyniki i analizę pomiarów odpowiedzi impulsowej kanału hydroakustycznego zrealizowanych w ruchu na basenie modelowym Politechniki Gdańskiej.

**Abstract.** The article presents exemplary results and analysis of impulse responses of an underwater acoustic channel measured in motion in a towing tank of the Gdańsk University of Technology. (*Analysis of Exemplary Impulse Responses of an Underwater Acoustic Channel Measured in Motion*).

**Słowa kluczowe:** kanał hydroakustyczny, odpowiedź impulsowa, łączność podwodna, propagacja sygnałów.

**Keywords:** UWA channel; impulse response; underwater communication; signal propagation.

### Wstęp

Ogromny postęp w obszarze telekomunikacji bezprzewodowej spowodował, że pojawiły się potrzeby zapewnienia wysokiej jakości bezprzewodowej transmisji danych w środowisku wodnym. Podwodny kanał akustyczny jako medium teletransmisyjne posiada szereg ograniczeń w odniesieniu do kanału radiowego czy też optycznego. Główne ograniczenia to stosunkowo niewielki zasięg ze względu na silne tłumienie sygnałów wraz ze wzrostem częstotliwości oraz niestabilność warunków propagacji. Te uwarunkowania są szczególnie istotne w przypadku zapewnienia transmisji np. w wodach płytkich, we wrakach, gdzie występują liczne odbicia sygnału od powierzchni, dna i przeszkód podwodnych. W wielu przypadkach bezprzewodowy nadzór nad robotami dokonującymi inspekcji np.: we wrakach wymaga zapewnienia dużej przepływności danych z obiektem będącym w ruchu [1,2]. Ruch w warunkach silnej wielodrogowości powoduje szybkie zmiany warunków propagacyjnych, czyli krótki czas stacjonarności kanału. Uzyskanie dużych przepływności wymaga transmisji w szerokim paśmie. Zawężeniu pasma może sprzyjać zastosowanie modulacji wielowartościowych, lecz wówczas rosną wymagania co do stabilności warunków propagacyjnych.

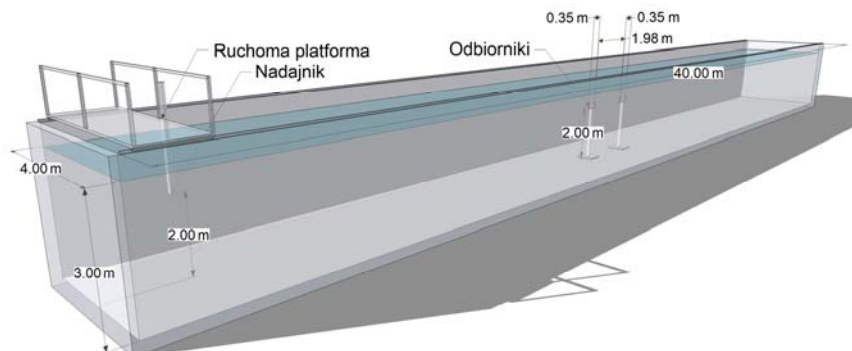
Prowadzenie badań w warunkach rzeczywistych jest szczególnie kłopotliwe i kosztowne ze względów logistycznych [2]. Dodatkowo ze względu na dużą zmienność warunków hydrometeorologicznych wyniki badań przeprowadzone w różnych porach dnia i roku mogą się znacząco różnić [3]. Prowadzenie badań nad różnymi

systemami bezprzewodowej łączności podwodnej znacząco ułatwia posiadanie zbiorów sekwencji zarejestrowanych odpowiedzi impulsowych kanału hydroakustycznego [4]. Należy jednak zauważyć, że najczęściej w badaniach symulacyjnych jakości transmisji podwodnej przyjmuje się, że za czas trwania elementarnego sygnału kanał jest niezmienny. Jednakże w przypadku wzajemnego ruchu nadajnika względem odbiornika takie podejście jest nadmiernym uproszczeniem.

Podstawowym sposobem oceny kanału telekomunikacyjnego jest wyznaczenie parametrów odpowiedzi impulsowej kanału. Stąd głównym celem pracy była ocena parametrów odpowiedzi impulsowych kanału hydroakustycznego pomierzonych w ruchu w basenie do badania modeli kadłubów okrętowych.

### Zestaw pomiarowy

Badania przeprowadzono na basenie modelowym Politechniki Gdańskiej przedstawionym na rysunku 1. Wysokość słupa wody wynosiła 3 m, szerokość basenu to 4 m zaś jego długość to 40 m. W części środkowej basenu, w linii ruchu nadajnika, umieszczono cztery hydrofony odbiorcze w odległości 1,5 m od prawej ściany (patrząc w kierunku ruchu), na głębokości 1 m w parach w odległościach 0,35 m między sobą i 1,98 m między parami. Hydrofon nadawczy był przymocowany do platformy ruchomej i zanurzony na głębokość 1 m w odległości 1,60 m od prawej ściany. Przygotowana konstrukcja umożliwiała poruszanie się nadajnika z prędkością do 1,5 m/s z dokładnością do 0,01 m/s.



Rys. 1. Zobrazowanie rozmieszczenia hydrofonów w basenie modelowym

W części nadawczej, sygnał formowany cyfrowo w środowisku Matlab był przesyłany poprzez przetwornik cyfrowo-analogowy NI USB-6366 na wzmacniacz ETEC PA1001 i dalej do hydrofonu Reson TC4013. Część odbiorczą stanowiły cztery niezależne tory, w których zastosowano hydrofony Reson TC4013 – 1 szt., Reson TC4034 – 1 szt. oraz Reson TC4014 – 2 szt. Tory z hydrofonami Reson TC4013 i Reson TC4034 dodatkowo wyposażono we wzmacniacz Reson VP1000. Jako przetwornik analogowo cyfrowy zastosowano kartę NI USB-6366 połączoną z komputerem, na którym odbywała się rejestracja sygnałów.

Dla potrzeb przetwarzania zarejestrowanych sygnałów pomierzono prędkość rozchodzenia się dźwięku w wodzie z wykorzystaniem sondy STD/CTD SAIV AS SD204. W trakcie pomiarów prędkość ta była stała i wynosiła 1477 m/s.

### Metoda pomiaru odpowiedzi impulsowej

W kanale hydroakustycznym nadawany sygnał dociera do odbiornika  $L$  różnymi drogami. Odpowiedź impulsowa  $h(\tau)$  charakteryzuje wielodrogowość propagacji sygnału, co oznacza, że opisuje  $L$ -tą ścieżkę sygnału pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem powstającą w wyniku odbić sygnału i niejednorodności środowiska wodnego. Repliki sygnału docierają do odbiornika z różnym opóźnieniem  $\tau_l$ . Dodatkowo w wyniku ruchu nadajnika względem odbiornika należy uwzględnić wpływ efektu Dopplera. Przesunięcie Dopplera  $l$ -tej ścieżki opisuje parametr  $\eta_l$ .

Równanie opisujące model kanału może być zapisane w postaci [5, 6]

$$(1) \quad y(t) = \sum_{l=1}^L x(\eta_l t - \tau_l) h(\tau_l) + n(t),$$

gdzie:  $x(t)$  – nadawany sygnał,  $y(t)$  – odebrany sygnał,  $\eta_l$  – parametr opisujący przesunięcie Dopplera,  $n(t)$  – szum.

Rozproszenie Dopplera sygnału w równaniu (1) jest uwzględniane przez zmianę, zgodnie z parametrem  $\eta_l$ , chwil czasowych, w których odbierane są poszczególne próbki nadawanego sygnału. Parametry  $\tau_l$  i  $\eta_l$  oraz odpowiedź impulsowa  $h(\tau)$  zmieniały się w czasie trwania sesji pomiarowej. W warunkach idealnych te parametry nie powinny się zmieniać. W realnych warunkach statycznych przyjmuje się, że parametry te są stałe.

W zaprezentowanych badaniach do pomiaru odpowiedzi impulsowej kanału użyto sygnału chirp (w polskiej literaturze nazywanego świergotowym), w którym częstotliwość chwilowa zmienia się wykładniczo w funkcji czasu [7]:

$$(2) \quad f_i(t) = f_0 k^t,$$

gdzie:  $k = (f_1 / f_0)^{1/T}$ ,  $f_0$  – częstotliwość początkowa,  $f_1$  – częstotliwość końcowa,  $T$  – czas trwania sygnału chirp.

Pasma zajmowane przez sygnał chirp  $B = f_1 - f_0$ , a częstotliwość środkowa  $F_C = f_0 + (f_1 - f_0)/2$ . Faza logarytmicznego sygnału chirp jest równa całce funkcji częstotliwości i wynosi

$$(3) \quad \phi(t) = \phi_0 + 2\pi f_0 \left( \frac{k^t - 1}{\ln(k)} \right),$$

gdzie:  $\phi_0$  – faza początkowa dla  $t = 0$ .

Sygnałem nadawanym w dziedzinie czasu  $x(t)$  był sygnał sinusoidalny o fazie danej wzorem (3):

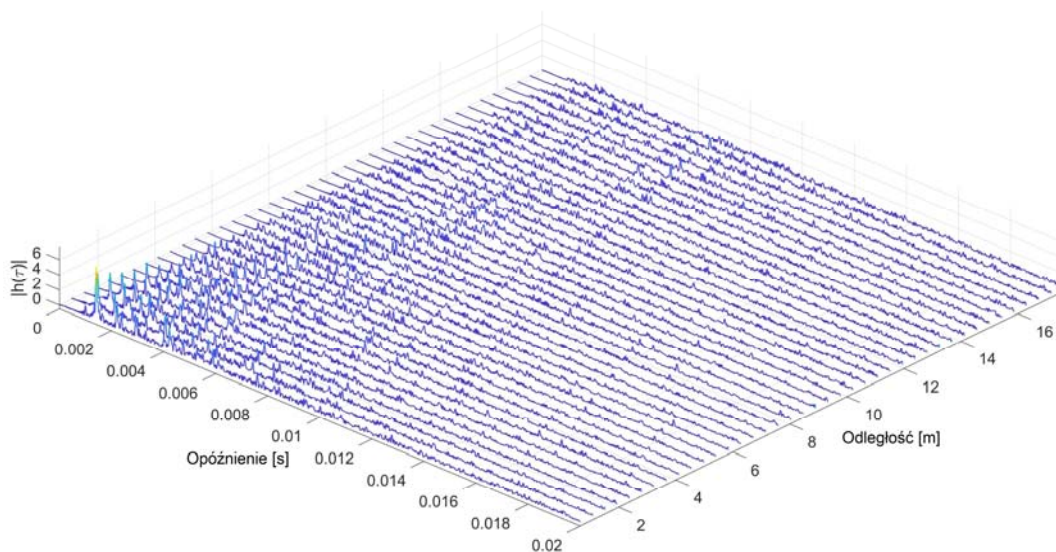
$$(4) \quad x(t) = \sin(\phi(t)).$$

Gdy  $f_0 < f_1$  sygnał chirp jest sygnałem o rosnącej częstotliwości i nazwany jest dalej chirp-up, a sygnał chirp o malejącej częstotliwości nazywany jest chirp-down.

Estymatę odpowiedzi impulsowej kanału hydroakustycznego można wyznaczyć poprzez korelację znanego nadanego sygnału (wzorca) z sygnałem odebrany. Jest to równoważne splutowi sygnału odebranego z zespolonym sprzężonym i odwróconym w czasie sygnałem nadanym  $x^*(-t)$ . Ta operacja pozwala wykryć repliki nadanego sygnału w sygnale odebrany. Zgodnie z powyższym estymatę odpowiedzi impulsowej kanału hydroakustycznego  $h(\tau)$  można obliczyć na podstawie wzoru [8]:

$$(5) \quad h(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^*(-t + \tau) y(t) dt.$$

Filtr dopasowany jest filtrem liniowym, który maksymalizuje stosunek sygnału wyjściowego do szumu.



Rys. 2. Przykład zmian modułów estymat odpowiedzi impulsowych w zależności od odległości od źródła sygnału dla:  $F_C=60$  kHz,  $V=0,5$  m/s,  $T=60$  ms, and  $B=20$  kHz

## Wyniki badań

Analiza parametrów odpowiedzi impulsowych wyznaczonych w ruchu została przeprowadzona z wykorzystaniem zestawu pomiarowego i w warunkach opisanych w poprzednim rozdziale. W celu uzyskania zespolonych odpowiedzi impulsowych przesyłano pojedyncze sygnały typu chirp logarytmiczny. Należy zaznaczyć, że nie przesyłano jednocześnie dwóch sygnałów tj. chirp-up i chirp-down, w tym samym czasie i na tej samej częstotliwości środkowej, tak jak to miało miejsce przy ocenie stacjonarności kanału hydroakustycznego [9]. W ten sposób nie obciążano odpowiedzi impulsowej. Czyli na danej częstotliwości środkowej przesyłano kolejno sygnały chirp-up, chirp-down, chirp-up z przerwami pomiędzy nimi wynoszącymi 100 ms. Następnie taką paczkę sygnałów pomiarowych powtarzano z odstępem czasowym 500 ms. Na rysunku 2. przedstawiono przykład zarejestrowanych odpowiedzi impulsowych w pierwszym kanale pomiarowym podczas przybliżania się nadajnika do odbiornika.

Uzyskany wynik wyraźnie wskazuje, że w miarę przybliżania się nadajnika do odbiornika rośnie moc sygnału odbieranego oraz wzrasta opóźnienie pomiędzy sygnałem docierającym drogą bezpośrednią a replikami. Dzieje się tak, ponieważ skraca się droga bezpośrednia propagacji sygnału od nadajnika do odbiornika, np. gdy nadajnik mija hydrofon odbiorczy, to, w przyjętej konfiguracji pomiarowej, pierwsza replika, odbita od powierzchni wody, musi pokonać dystans 2 m.

Analizując odpowiedzi impulsowe pomierzone w ruchu wyznaczono średniokwadratowe rozproszenie opóźnienia  $\tau_{rms}$  oraz liczbę replik.

Średniokwadratowe rozproszenie opóźnienia  $\tau_{rms}$  jest określone wzorem [10]:

$$(6) \quad \tau_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tau_i^2 p(\tau_i)}{P_m} - \bar{\tau}^2},$$

gdzie:  $p(\tau_i)$  – moc  $i$ -tej repliki,  $N$  – liczba replik,  $\bar{\tau}$  – średnie opóźnienie odebranych replik, które może być obliczone na podstawie zależności [10]:

$$(7) \quad \bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i p(\tau_i)}{P_m},$$

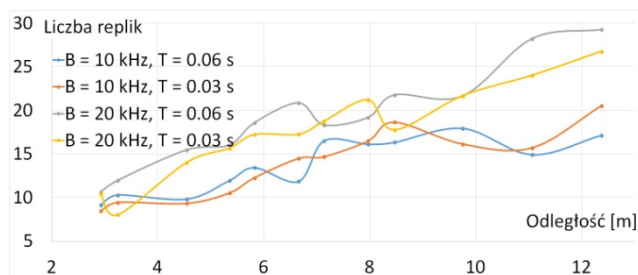
gdzie:  $P_m$  – całkowita moc wszystkich replik nadanego sygnału w pojedynczej odpowiedzi impulsowej, dana wzorem [10]:

$$(8) \quad P_m = \sum_{i=1}^N p(\tau_i).$$

Do analizy brano tylko te repliki, których poziom był nie mniejszy niż  $-15$  dB względem sygnału o największej mocy dla odpowiedzi impulsowej, co jest zgodne z zaleceniem ITU-R P.1407-7 [10]. Wszystkie zarejestrowane sygnały podlegały zmianie częstotliwości próbkowania – resamplingowi – przed wyznaczeniem odpowiedzi impulsowej. Resamplingu dokonywano na podstawie pomierzonej prędkości dźwięku w wodzie oraz bieżącej prędkości przemieszczania nadajnika. Celem tego zabiegu była minimalizacja wpływu efektu Dopplera na postać wynikowych odpowiedzi impulsowych.

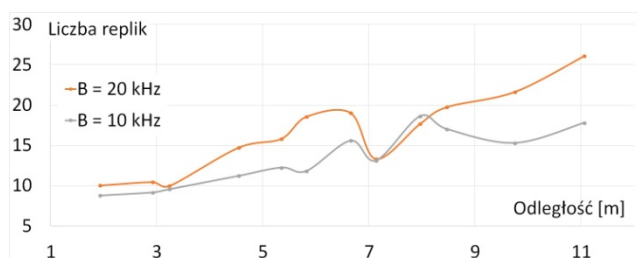
Ocenę liczby replik, spełniający warunki zgodnie z zaleceniem ITU-R P.1407-7 przeprowadzono w funkcji prędkości przemieszczania nadajnika, szerokości pasma zajmowanego przez sygnał pomiarowy, czasu trwania sygnału chirp oraz odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność liczby replik od odległości dla różnych szerokości pasma  $B$  i czasu trwania sygnału chirp  $T$  przy prędkości poruszania się nadajnika równej  $1,5$  m/s.



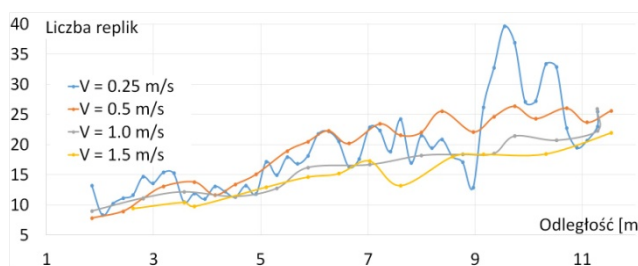
Rys. 3. Porównanie liczby replik w funkcji odległości nadajnika od odbiornika dla różnych szerokości pasma chipów  $B$  i czasu trwania  $T$

Uzyskany wynik wskazuje, że liczba replik nie zależy od czasu trwania chipu, natomiast zależy od szerokości pasma sygnału pomiarowego. Zależność ta wynika z faktu, że im szersze pasmo  $B$ , tym większa rozdzielczość uzyskiwanej estymaty odpowiedzi impulsowej, a w rezultacie liczba wyróżnianych replik jest większa. W związku z tym można uśredniać wyniki dla różnych czasów trwania chirp. Kolejny przykład tej zależności, tym razem dla prędkości  $1$  m/s, przedstawiono na rysunku 4.



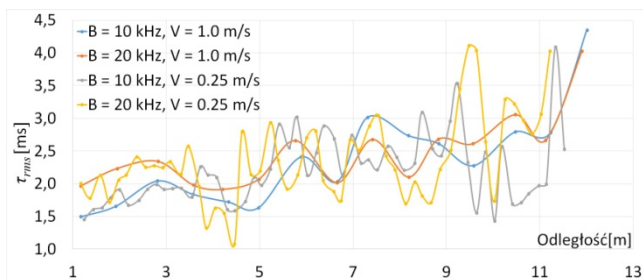
Rys. 4. Porównanie liczby replik w funkcji odległości nadajnika od odbiornika dla różnych szerokości pasma chipów  $B$

Przeprowadzono również analizę wpływu prędkości przemieszczania nadajnika względem odbiornika na liczbę replik. Wynik przedstawiono na rysunku 5. Uzyskany wynik wskazuje, że liczba istotnych replik w kanale nie zależy w praktyce od prędkości.

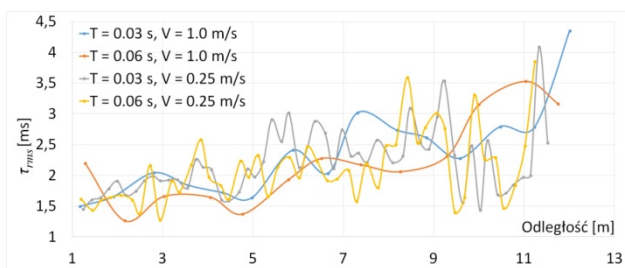


Rys. 5. Liczba replik dla różnych prędkości nadajnika w funkcji jego odległości od odbiornika dla  $B = 20$  kHz

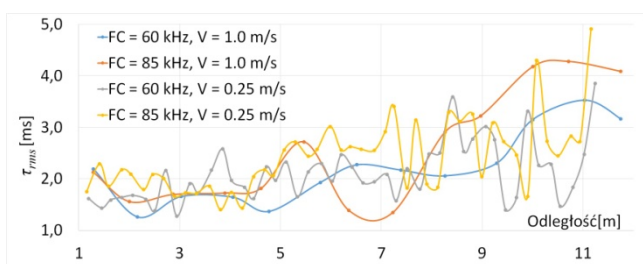
W kolejnym kroku analizy porównano wartości  $\tau_{rms}$  dla różnych prędkości przemieszczania nadajnika, różnych szerokości pasma sygnału pomiarowego, częstotliwości środkowej i czasu trwania sygnału pomiarowego w funkcji odległości nadajnika od odbiornika. Wyniki zestawiono na rysunkach 6, 7 i 8.



Rys.6. Wpływ odległości do odbiornika na rozproszenie opóźnienia wyznaczonego za pomocą sygnału typu chirp o następujących parametrach  $F_c=60$  kHz, czas trwania sygnału  $T=30$  ms dla różnych szerokości pasma  $B$  i prędkościach  $V$  poruszania się nadajnika w kierunku odbiornika



Rys.7. Wpływ odległości do odbiornika na rozproszenie opóźnienia wyznaczonego za pomocą sygnału typu chirp o częstotliwości środkowej  $F_c=60$  kHz, dla szerokości pasma  $B=10$  kHz, różnych czasów trwania sygnału  $T$  i prędkościach  $V$  poruszania się nadajnika w kierunku odbiornika



Rys.8. Wpływ odległości do odbiornika na rozproszenie opóźnienia wyznaczonego za pomocą sygnału typu chirp o szerokości pasma  $B=10$  kHz, czasie trwania sygnału  $T=60$  ms i różnych częstotliwościach środkowych sygnału  $F_c$  oraz różnych prędkościach  $V$  poruszania się nadajnika w kierunku odbiornika

## Podsumowanie

Znajomość odpowiedzi impulsowej kanału jest istotna z punktu widzenia wpływu zjawisk propagacyjnych na postać odbieranego sygnału. Posiadając taką informację można prowadzić badania symulacyjne, które umożliwiają szybką i niskokosztową walidację działania systemów podwodnych, których zasada działania wykorzystuje propagację fali sprężystej. Większość dostępnych obecnie symulatorów propagacji fali akustycznej w wodzie udostępnia dane dla scenariuszy statycznych. W przekonaniu autorów to nie odpowiada scenariuszom mobilnym. W związku z tym jednym z zamierzeń przeprowadzonych badań było poznanie warunków propagacyjnych w przypadku przemieszczania nadajnika względem odbiornika. Badania te są dla autorów wprowadzeniem do prac nad systemami bezprzewodowej komunikacji podwodnej realizowanej w trudnych warunkach propagacyjnych, np. we wrakach i pomiędzy obiektami w ruchu.

Celem prezentowanych badań było wyznaczenie oraz analiza estymat odpowiedzi impulsowych w basenie

modelowym charakteryzującym się silną wielodrogowością. Ponadto obiekt ten umożliwiał realizację pomiarów pomiędzy obiektami poruszającymi się z precyzyjnie zadaną prędkością. W wyniku poruszania się wzajemnego odbiornika i nadajnika odpowiedź impulsowa zmieniała się wraz ze wzajemną zmianą odległości urządzeń. Uzyskano w efekcie kanał niestacjonarny, co zostało potwierdzone za pomocą zaproponowanej metody oceny stacjonarności kanału [9].

Na podstawie badań przeprowadzonych w basenie modelowym stwierdzono, że pomimo tego, że zostały one prowadzone w kanale niestacjonarnym, to jeden z najważniejszych parametrów opisujących kanał jakim jest  $\tau_{rms}$  nie ulegał zmianie w funkcji prędkości przemieszczania nadajnika i parametrów sygnału pomiarowego, a jedynie zależał od odległości nadajnika od odbiornika.

**Podziękowania:** Dziękujemy Wydziałowi Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej za możliwość prowadzenia badań w basenie modelowym.

**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); inż. Łukasz Wojewódka, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-255 Gdynia, E-mail: [44810@student.umg.edu.pl](mailto:44810@student.umg.edu.pl); kmdr dr hab. inż. Andrzej Zak, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, ul. Śmidowicza 69, 81-255 Gdynia, E-mail: [a.zak@amw.gdynia.pl](mailto:a.zak@amw.gdynia.pl).

## LITERATURA

- [1] Mizeraczyk, J.; Studanski, R.; Zak, A.; Czapiewska, A. A Method for Underwater Wireless Data Transmission in a Hydroacoustic Channel under NLOS Conditions. *Sensors* 2021, 21, 7825.
- [2] Campagnaro, F.; Signori, A.; Otnes, R.; Goetz, M.; Sotnik, D.; Komulainen, A.; Nissen, I.; Favaro, F.; Guerra, F.; Zorzi, M. A Simulation Framework for Smart Adaptive Long and Short-range Acoustic Networks. In Proceedings of the OCEANS 2021, San Diego, CA, USA, 20–23 September 2021.
- [3] Lv, Z.; Bai, Y.; Jin, J.; Wang, H.; Ren, C. Analysis of wave fluctuation on underwater acoustic communication based USV. *Appl. Acoust.* 2021, 175, 107820.
- [4] Van Walree, P.A.; Socheleau, F.X.; Otnes, R.; Jenserud, T. The Watermark Benchmark for Underwater Acoustic Modulation Schemes. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2017, 42, 1007–1018.
- [5] Zakharov, Y.V.; Kodanov, V.P. Doppler Scattering Adapted Reception in a Hydroacoustic Communication Channel. *Acoust. Phys.* 1995, 41, 219–223.
- [6] Zhao, Y.; Yu, H.; Wei, G.; Ji, F.; Chen, F. Parameter estimation of wideband underwater acoustic multipath channels based on fractional Fourier transform. *IEEE Trans. Signal Process.* 2016, 64, 5396–5408.
- [7] Smith, S.W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*; California Technical Pub: Sacramento, CA, USA, 2002.
- [8] Turin, G.L. An introduction to matched filters. *IRE Trans. Inf. Theory* 1960, 6, 311–329.
- [9] Czapiewska, A.; Łuksza, A.; Studanski, R.; Zak, A. Analysis of Impulse Responses Measured in Motion in a Towing Tank. *Electronics* 2022, 11, 3819. <https://doi.org/10.3390/electronics11223819>
- [10] Recommendation ITU-R P.1407-7 *Multipath Propagation and Parameterization of its Characteristics* (08/2019). Available online: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1407/en> (accessed on 1 January 2022).