

## Transmisja danych w kanale hydroakustycznym w warunkach NLOS

**Streszczenie.** Transmisja danych w kanale hydroakustycznym w warunkach NLOS (ang. Non-Line-Of-Sight) jest szczególnie problematyczna. Dlatego podjęto próbę opracowania bezprzewodowej komunikacji podwodnej i jej przebadanie w warunkach NLOS. Zastosowano modulację MFSK (ang. Multiple Frequency-Shift Keying), przysyłając pojedynczy bit na dwóch nośnych, oraz odbiór zbiorczy. Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność opracowanej techniki do transmisji danych w kanale hydroakustycznym w warunkach NLOS.

**Abstract.** Data transmission in the hydroacoustic channel under NLOS (Non-Line-Of-Sight) conditions is particularly problematic. Therefore, an attempt was made to develop a method of wireless underwater communication that would have the potential to be used in NLOS conditions. MFSK (Multiple Frequency-Shift Keying) modulation was used, sending a single bit on two carriers, and diversity combining. The obtained results confirmed the usefulness of the application of the developed method for data transmission in a hydroacoustic channel under NLOS conditions. (Data transmission in the hydroacoustic channel under NLOS)

**Słowa kluczowe:** Komunikacja podwodna, NLOS, MFSK, odbiór zbiorczy.

**Keywords:** underwater communication, NLOS, MFSK, diversity combining.

### Wstęp

Rozwój robotyki podwodnej i systemów monitoringu środowiska wymusił potrzebę zapewnienia w wodzie komunikacji bezprzewodowej. Do tego dochodzą potrzeby związane z obronnością i bezpieczeństwem państwa np. w zakresie sterowania polem minowym czy systemami dozoru w rejonach strategicznych jak porty [1]. Pomimo znaczącego postępu w rozwoju systemów telekomunikacyjnych, komunikacja bezprzewodowa w środowisku wodnym nadal stwarza dużo problemów. W środowisku tym najlepiej propaguje się fala akustyczna więc to ona jest przede wszystkim wykorzystywana jako medium transmisyjne. Niestety propagacja fali dźwiękowej w wodzie towarzyszy wiele niekorzystnych zjawisk mających ostatecznie wpływ na ogólną jakość transmisji wyrażonej zasięgiem, bitową stopą błędu czy szybkością. Wśród tych zjawisk najważniejsze to wielodrogowość prowadząca do interferencji międzysymbolowej, efekt Dopplera, który w środowisku wodnym ze względu na prędkość rozchodzenia się dźwięku jest setki tysięcy razy silniejszy niż w przypadku komunikacji radiowej w powietrzu, czy wreszcie zjawiska związane z refrakcją, tłumiennością fali czy rozszerzaniem czoła fali mające wpływ na zasięg [2]. Szczególne problemy w zakresie uzyskania stosunkowo szybkiej (rzędu kilobitów) i niezawodnej (BER rzędu  $10^{-3}$ ) transmisji stwarzają akweny o intensywnej zabudowie hydrotechnicznej jak np. porty [3,4]. Szczególnym przypadkiem jest tutaj komunikacja w warunkach NLOS. Zabezpieczenie takiej komunikacji jest niezbędne np. przy eksploracji wraków. Często eksploracja taka wykonywana przez nurka lub z użyciem pojazdu podwodnego nie pozwala na zastosowanie kabli ze względu na konieczność wejścia do środka wraku i dużego ryzyka związanego z zaplątaniem lub zakleszczeniem się kabloliny. W takim przypadku skomplikowany układ korytarzy we wraku wymusza komunikację bezprzewodową w warunkach NLOS. Komunikacja ta musi się odbywać ze stosunkowo niską stopą błędu rzędu  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  oraz stosunkowo dużą prędkością, rzędu kilobitów, co np. umożliwiłoby, przy zastosowaniu odpowiednich wokoderów, na komunikację głosową z nurkiem ale za to na niewielkie odległości. Niestety, obecnie proponowane komercyjne rozwiązania nie pozwalają na komunikację w warunkach NLOS a tym bardziej uzyskanie takich parametrów. W

związku z powyższym, celem pracy jest opracowanie metody bezprzewodowej komunikacji podwodnej i jej przebadanie w warunkach NLOS.

### Opis techniki transmisji danych

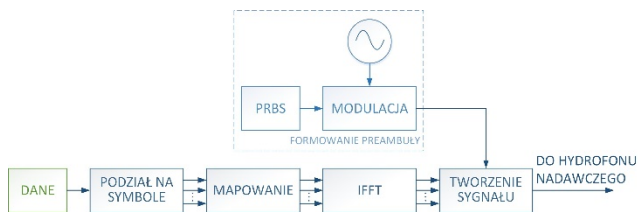
System transmisji danych składa się z dwóch torów, nadawczego i odbiorczego, i pracuje w układzie SIMO tzn. w nadajniku wykorzystywany jest pojedynczy hydrofon nadawczy jako transmitter, natomiast odbiornik zawiera zestaw trzech hydrofonów odbiorczych o stałej konfiguracji przestrzennej. Jak wykazano między innymi w [5, 6] zastosowanie odbioru zbiorczego istotnie wpływa na poprawę jakości odbioru w kanale hydroakustycznym w warunkach wielodrogowości. Podstawowe parametry konfiguracyjne systemu transmisji danych są następujące:

- $N_{sf}$  - liczba symboli w ramce;
- $N_{bs}$  - liczba bitów przesyłanych w jednym symbolu;
- $F_d$  - dolna częstotliwość zajmowanego pasma wyrażona w Hz;
- $\Delta f_t$  - rozdzielczość częstotliwościowa widma w nadajniku wyrażona w Hz;
- $\Delta f_{bits}$  - odstęp częstotliwościowy między bitami wyrażony w Hz;
- $\Delta f_r$  - pożądana rozdzielczość częstotliwościowa w odbiorniku wyrażona w Hz;
- $\tau_{guard}$  - czas ochronny wyrażony w sek.; (guard interval).
- $F_{c\_preamble}$  - częstotliwość nośna preambuły;
- $N_{preamble}$  - długość ciągu rozpraszającego preambuły;
- $S_{preamble}$  - szybkość modulacji preambuły.

Parametry te są ustalane przed transmisją, określają warunki komunikacji i są dostępne zarówno po stronie nadawczej jak i odbiorczej. Dodatkowo ich zmiana pozwala na adaptację systemu do potrzeb użytkownika i warunków propagacji fali dźwiękowej w wodzie.

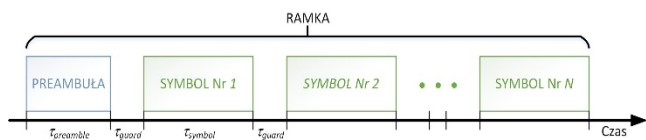
Nadajnik pracuje zgodnie ze schematem blokowym przedstawionym na rysunku 1. Ciąg dany w postaci binarnej jest dzielony na poszczególne symbole w zależności od liczby symboli w ramce oraz liczby bitów przesyłanych w jednym symbolu. W przypadku, gdy ciąg ten jest krótszy niż wynika to z ustalonych parametrów transmisji jest on uzupełniany zerami. Po podziale na symbole, każdy symbol podlega kodowaniu. Przed rozpoczęciem kodowania

generowana jest siatka częstotliwości na podstawie danych konfiguracyjnych tj. dolnej częstotliwości zajmowanego pasma, rozdzielczości częstotliwościowej widma w nadajniku, liczby bitów przesyłanych w symbolu, oraz odstępu częstotliwościowego między bitami.



Rys.1. Schemat blokowy nadajnika

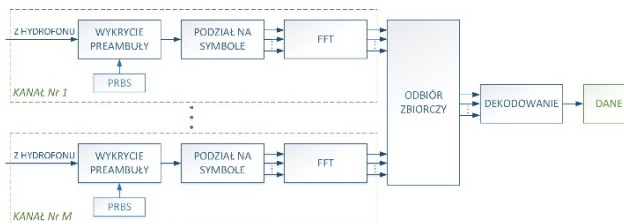
W rozwiązaniu zastosowano modulację MFSK, gdzie każdy bit kodowany jest na dwóch częstotliwościach. Wybrana technika modulacji MFSK nie wymaga określania progu detekcji w odbiorniku a ponadto moc sygnału nadawanego nie zależy od postaci symbolu. Dla pary nośnych przypisanych bitowi sygnał emitowany jest na jednej z nich w zależności od wartości bitu. Wymuszenie emisji odbywa się poprzez wpisanie wartości 1 lub 0 w wektorze na odpowiedniej składowej widma zajmowanej przez dany bit. W kolejnym kroku, na tak utworzonych wektorach dla każdego symbolu, wykonywana jest odwrotna transformata Fouriera, przy czym dla każdej emitowanej składowej widma przyjmowana jest losowa faza. Losowanie faz ma na celu równomierne rozłożenie wartości chwilowych w dziedzinie czasu, jednocześnie obniżając prawdopodobieństwo okresowego wzmocnienia sygnału. Kolejny krok to formowanie sygnału wyjściowego, który polega na odpowiednim ustawieniu czasowym poszczególnych symboli względem siebie, jak również dodanie na początku tzw. preambuły. Preambuła jest generowana na podstawie znanej sekwencji pseudolosowej o zadanej długości, która moduluje fazę sygnału sinusoidalnego o określonej częstotliwości nośnej. Ostateczną postać sygnału przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Postać sygnału:  $\tau_{preamble}$  – czas trwania preambuły,  $\tau_{guard}$  – czas ochronny,  $\tau_{symbol}$  – czas trwania symbolu

Po preambule, oraz pomiędzy poszczególnymi symbolami, oczekiwany jest określony czas,  $\tau_{guard}$ . Czas ten pozwala na wygaszenia się właśnie transmitowanego sygnału w środowisku propagacyjnym. Ma to zapobiegać zakłóceniom pomiędzy poszczególnymi symbolami. Obecność w środowisku propagacyjnym poprzedniego sygnału podczas transmisji kolejnego może prowadzić do interferencji międzysymbolowych i w ostateczności błędów w odbiorze. W rozwiązaniu przyjęto, że wartość tego czasu jest większa od czasu pamięci kanału. W odbiorniku zachodzi proces odwrotny niż jak to miało miejsce w nadajniku. Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy odbiornika. Po zarejestrowaniu sygnału podejmowana jest próba wykrycia preambuły. Polega na skorelowaniu sygnału przeniesionego do pasma podstawowego ze znanym ciągiem kodowym, a następnie podjęciu decyzji, na podstawie wartości maksymalnej korelacji oraz wartości średnich w jej otoczeniu, odnośnie wystąpienia preambuły. Jeżeli proces ten zakończy się niepowodzeniem

zarejestrowany fragment jest odrzucany, następuje rejestracja kolejnego fragmentu i ponowna próba wykrycia preambuły. Po wykryciu preambuły następuje odbiór. Na podstawie informacji o położeniu czasowym preambuły w zarejestrowanym sygnale, sygnał dzielony jest na fragmenty czasowe zgodnie z danymi konfiguracyjnymi.

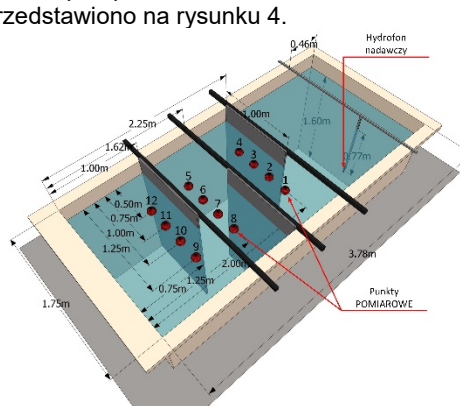


Rys.3. Schemat blokowy odbiornika

Każdy z fragmentów czasowych przekształcany jest do dziedziny częstotliwości. Przed wykonaniem transformaty Fouriera sygnał czasowy uzupełniany jest zerami, tak aby uzyskać pożądaną rozdzielczość częstotliwościową w odbiorniku i dodatkowo jest okienkowany z użyciem okna Hanna w celu minimalizacji przecieków. W kolejnym kroku następuje odbiór zbiorczy. Polega on na składaniu widm, odpowiadających poszczególnym symbolom, uzyskanych z torów odbiorczych. Sumowanie odbywa się z jednakowymi wagami po unormowaniu widm do wartości 1 w paśmie w którym zachodzi transmisja danych. Ma to na celu zapobieżenie nadmiernemu wpływowi jednego z odbiorników na wynik końcowy, co może być powodowane np. większą czułością odbiornika lub większym wzmocnieniem w torze odbiorczym. Po odbiorze zbiorczym uzyskane widma dla poszczególnych symboli podlegają dekodowaniu. Dekodowanie polega na podjęciu decyzji o stanie przesyłanego bitu na podstawie badania zależności wartości amplitud pomiędzy składowymi widma, na których przesyłany jest bit. Badane jest czy dla danej pary częstotliwości, na której jest przesyłany pojedynczy bit, większą amplitudę ma składowa o niższej czy wyższej częstotliwości. W zależności od wyniku porównania jako dana wyjściowa przyjmowana jest wartość 0 lub 1. Badane są nie pojedyncze składowe a składowe pochodzące z otoczenia częstotliwości na której spodziewana jest transmisja danego bitu.

### Opis badań

Badania przeprowadzono w basenie laboratoryjnym, który przedstawiono na rysunku 4.



Rys.4. Rysunek poglądowy basenu i warunków pomiarowych

Ściany basenu były gładkie, wykonane z polipropylenu o grubości 10 mm. Wewnętrzne wymiary basenu to: 3,78x1,75x1,8 m. Słup wody miał wysokość 1,6 m. Basen przedzielono trzema przegrodami, tak aby uzyskać warunki

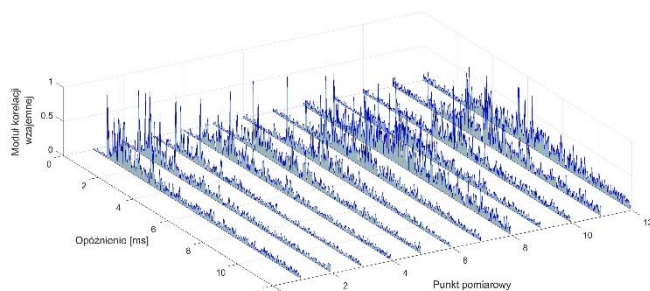
NLOS. Jako przegrody zastosowano panele akustyczne AKU-PRO 140 wykonane z materiału o gęstości  $140 \text{ kg/m}^3$  i grubości 20 mm. Panele szczelnie przylegały do jednej ze ścian basenu oraz dna i wystawały ponad lustro wody. W ten sposób utworzono sztuczny korytarz, odzwierciedlający np. wnętrze wraku. Z jednej strony basenu przed przegrodami umieszczono hydrofon nadawczy Reson TC4013. Sygnał na ten hydrofon był podawany z komputera PC poprzez kartę cyfrowo-analogową NI USB6366 oraz wzmacniacz mocy Etec PA1001. Po stronie odbiorczej umieszczono trzy hydrofony Reson TC4014. Ich konfiguracja przestrzenna została przedstawiona na rysunku 5. Hydrofony były zasilane napięciem 12 V, a wyjścia sygnałowe, w układzie różnicowym, były podawane poprzez kartę przetwornika analogowo-cyfrowego NI USB6366 do komputera PC gdzie następowała ich rejestracja i przetwarzanie. Oprogramowanie zarówno nadajnika jak i odbiornika zaimplementowano w środowisku Matlab.



Rys.5. Rysunek poglądowy zestaw hydrofonów odbiorczych

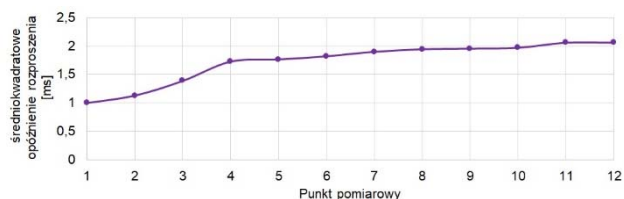
Pomiary wykonano lokując zestaw hydrofonów odbiorczych w 12 wybranych punktach, które zaznaczono na rysunku 4. W każdym punkcie wykonywano 10 transmisji, przesyłając w jednej transmisji 10 tysięcy bitów.

W celu określenia warunków propagacyjnych w poszczególnych punktach pomiarowych, wykorzystując przesłaną preambułę, wyznaczono estymaty odpowiedzi impulsowych metodą korelacyjną tak jak to opisano w [7, 8]. Postaci odpowiedzi impulsowych w poszczególnych punktach pomiarowych przedstawiono na rysunku 6. Przedstawione estymaty zostały unormowane względem wartości maksymalnej oddzielnie dla każdego punktu pomiarowego. Wyraźnie widać, że wraz z przemieszczaniem zestawu hydrofonów odbiorczych w utworzonym korytarzu, w pierwszym punkcie odbiorczym są warunki LOS zaś w kolejnych panują warunki NLOS. Można to stwierdzić na podstawie czasu pojawienia się maksimum estymaty odpowiedzi impulsowej tj. tylko w pierwszym punkcie pomiarowym sygnał docierający bezpośrednio ma największą moc.

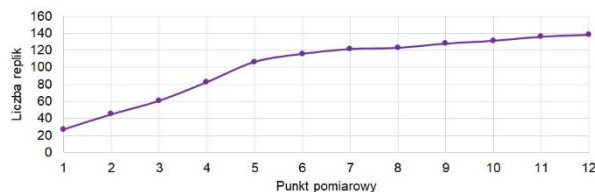


Rys.6. Estymaty odpowiedzi impulsowych w punktach pomiarowych

Na tej podstawie, zgodnie z zaleceniami ITU1407 [9] wyznaczono rozproszenie opóźnienia oraz średnią liczbę replik co przedstawiono odpowiednio na rysunkach 7 i 8. Szczegółowo sposób wyznaczania poszczególnych parametrów kanału opisano w [10].



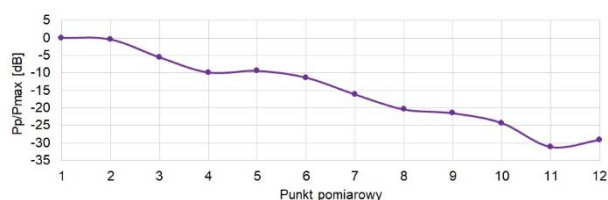
Rys.7. Średniokwadratowe rozproszenie opóźnienia  $\tau_{r.m.s}$  w poszczególnych punktach pomiarowych



Rys.8. Średnia liczba replik w punktach pomiarowych

Wyniki wskazują, że wraz z przemieszczaniem zestawu odbiorczego w głąb korytarza, istotnie wzrasta średnia liczba replik nawet powyżej 100 w ostatnich punktach pomiarowych. To wyraźnie świadczy o warunkach silnej wielodrogowej propagacji sygnału. Średniokwadratowe rozproszenie opóźnienia istotnie wzrasta w pierwszych punktach pomiarowych od ok. 1 ms do prawie 2 ms. W następnych punktach wzrost ten jest znacznie mniejszy. Wynika to przede wszystkim z metodyki wyznaczenia tego parametru, który zależy nie tylko od opóźnienia ale również od mocy poszczególnych replik.

Ponadto wyznaczono relacje mocowe pomiędzy rejestrowanymi sygnałami w poszczególnych punktach pomiarowych. Wyniki przedstawiono na rysunku 9. Zgodnie z oczekiwaniami, wraz z przemieszczaniem się w głąb korytarza, moc sygnału maleje nawet o 30 dB.



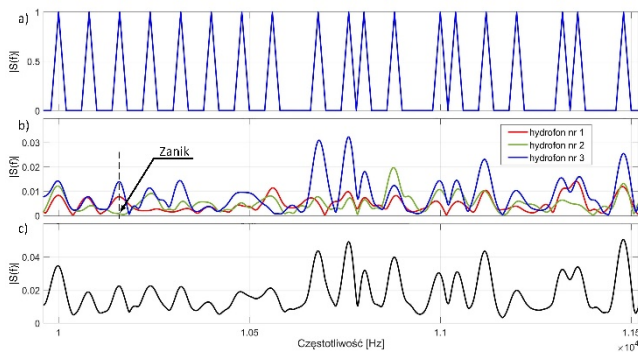
Rys.9. Zmiana mocy sygnału w punktach pomiarowych

Dokonując oceny jakości transmisji wyznaczono bitową stopę błędu dla odbioru z pojedynczych hydrofonów oraz odbioru zbiorczego, w którym łączono dane z dwóch i trzech torów odbiorczych. Badania przeprowadzono przy następujących parametrach transmisji:

$$N_{sf} - 5; N_{bs} - 2000; F_d - 10000 \text{ Hz}; \Delta f_i - 20 \text{ Hz}; \Delta f_{bits} - 80 \text{ Hz}; \Delta f_r - 20 \text{ Hz}; \tau_{guard} - 0,04 \text{ s}; F_{c\_preamble} - 55 \text{ kHz}; N_{preamble} - 511; S_{preamble} - 20 \text{ kBd}.$$

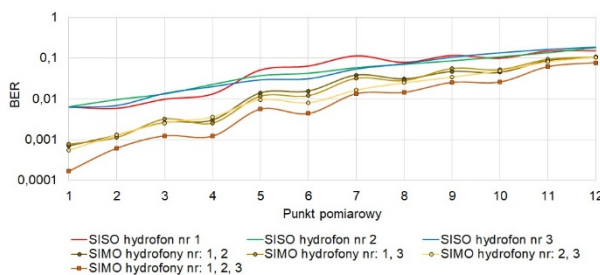
Zgodnie z powyższymi parametrami, czas trwania symbolu wynosił 50 ms, zajmowane pasmo to  $10 \div 170 \text{ kHz}$ , a więc szybkość transmisji to: 19397 bit/sek.

Na rysunku 10 przedstawiono przykładową postać fragmentu widma sygnału nadawanego i odbieranego w punkcie pomiarowym numer 3. Na rysunku 10a przedstawiono widmo dla 19 bitów. Na rysunku 10b widmo sygnału odbieranego przez poszczególne hydrofony dla tych samych 19 bitów. Natomiast na rysunku 10c zaprezentowano widmo po równomiernym odbiorze zbiorczym.



Rys. 10. Przykład fragmentów widm amplitudowych  $|S(f)|$  a) sygnału nadanego, b) sygnałów odebranych, c) po odbiorze zbiorczym

Uzyskany wynik wskazuje, że każdy z hydrofonów na tych samych częstotliwościach odebrał sygnał o różnej mocy. W niektórych punktach obserwujemy zaniki wywołane wielodrogowością. Na rysunku 10b zaznaczono strzałką taki szczególny przypadek, gdzie hydrofon nr 2 nie zarejestrował sygnału na tej częstotliwości. Należy zwrócić uwagę, że w odbiorze zbiorczym dzięki sumowaniu widm z trzech torów odbiorczych, jest możliwa detekcja wszystkich bitów. Ponadto, należy podkreślić, że w wyniku sumowania widm zwiększa się stosunek sygnału do szumu proporcjonalnie do pierwiastka z liczby torów pomiarowych [11] co również ma korzystny wpływ na detekcję bitów. Na rysunku 11 przedstawiono wynik pomiaru bitowej stopy błędów BER dla poszczególnych punktów pomiarowych.



Rys. 11. Jakość odbioru danych

W poszczególnych punktach pomiarowych wyniki uzyskane dla odbiorów z pojedynczych hydrofonów są do siebie podobne tzn. uzyskano podobną stopę błędów. Wraz z przemieszczaniem zestawu odbiorczego w głąb korytarza jakość odbioru wyrażona BER pogarsza się. Odbiór zbiorczy we wszystkich przypadkach poprawia BER i oczywiście najlepsze wyniki uzyskano przy odbiorze zbiorczym z trzech hydrofonów. Należy zwrócić uwagę, że największy zysk z przetwarzania zbiorczego, nawet dwóch rzędów wielkości, uzyskano dla punktów pomiarowych zlokalizowanych blisko wejścia do korytarza. Dla punktów na końcu korytarza zysk z przetwarzania zbiorczego jest już mniejszy, zaledwie dwukrotny.

### Podsumowanie

Bezprzewodowa transmisja danych w środowisku wodnym jest problemem nietrywialnym. Dodatkowo komplikacje pojawiają się w przypadku warunków NLOS. Biorąc pod uwagę zapotrzebowanie na systemy komunikacji pracujące w takich warunkach przebadano możliwości bezprzewodowej komunikacji podwodnej przy braku bezpośredniej widoczności hydrofonów.

Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, odzwierciedlających sytuację panującą np. we wraku. Badając odpowiedzi impulsowe stwierdzono, że faktycznie uzyskano warunki NLOS. Obserwując widmo odebranych

sygnałów stwierdzono obecność zaników selektywnych częstotliwościowo. W przyjętym scenariuszu pomiarowym wykazano, że wraz z przemieszczaniem się w głąb korytarza zwiększa się liczba replik natomiast średniokwadratowe rozproszenie opóźnienia nie ulega istotnemu zwiększeniu. Badania przeprowadzono w szerokim paśmie, uzyskując tym samym duże przepływności bitowe. Tłumienie sygnałów o wysokich częstotliwościach wpływa na zmniejszenie zasięgu, jednakże przewidujemy, że transmisja będzie się odbywała na niewielkie odległości. Łączność będzie się odbywała między obiektem znajdującym się wewnątrz wraku a obiektem znajdującym się poza wrakiem w bezpośrednim jego otoczeniu. Zgodnie z oczekiwaniami odbiór zbiorczy znacznie poprawia jakość transmisji.

Przedstawione wyniki badań dają podstawę do podjęcia prac nad budową systemu łączności podwodnej z autonomicznymi pojazdami podwodnymi pracującymi w trudnych warunkach propagacyjnych jak wraki i porty.

**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. 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) kmr dr hab. inż. Andrzej Żak, 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] Piskur P., Szymak P., Jaskólski K., Flis L., Gąsiorowski M., Hydroacoustic System in a Biomimetic Underwater Vehicle to Avoid Collision with Vessels with Low-Speed Propellers in a Controlled Environment, *Sensors*, 2020;20(4), 968,
- [2] Kochanska I., Schmidt JH., Schmidt AM., Study of probe signal bandwidth influence on estimation of coherence bandwidth for underwater acoustic communication channel, *Applied Acoustics*
- [3] Kochanska I., Reliable OFDM Data Transmission with Pilot Tones and Error-Correction Coding in Shallow Underwater Acoustic Channel, *Applied Sciences*, 2020;10(6), 2173
- [4] Czapiewska A., Luksza A., Studanski R., Zak A., Reduction of the Multipath Propagation Effect in a Hydroacoustic Channel Using Filtration in Cepstrum, *Sensors* 2020; 20(3), 751
- [5] 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
- [6] Czapiewska A., Luksza A., Studanski R., Zak A., Application of Diversity Combining with RLS Adaptive Filtering in Data Transmission in a Hydroacoustic Channel, *Sensors* 2020; 20(24), 7255
- [7] Studanski R., Zak A., Results of impulse response measurements in real conditions, *Journal of Marine Engineering & Technology* 2017;16(4), 337-343
- [8] Kaczorek P., Studanski R., Zak A., Data transmission in the hydroacoustic channel—experimental researches, *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2017; 16(4), 409-415
- [9] Recommendation ITU-R P.1407-7 Multipath propagation and parameterization of its characteristics, [https://extranet.itu.int/brdocsearch/\\_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=%7B6FBFB1394-AACC-4FA0-A0F2-64BF2A1174C8%7D&file=R-REC-P.1407-7-201908-1!!MSW-E.docx](https://extranet.itu.int/brdocsearch/_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=%7B6FBFB1394-AACC-4FA0-A0F2-64BF2A1174C8%7D&file=R-REC-P.1407-7-201908-1!!MSW-E.docx); 2019 [dostęp 28.04.2022]
- [10] Mizeraczyk J., Studanski R., Zak A., Czapiewska A., A Method for Underwater Wireless Data Transmission in a Hydroacoustic Channel under NLOS Conditions, *Sensors* 2021; Dec; 21(23): 7825
- [11] Lyons RG., Understanding Digital Signal Processing, 3rd Edition, Pearson; 2011