



**AKADEMIA MARYNARKI WOJENNEJ IM.
BOHATERÓW WESTERPLATTE**

WYDZIAŁ MECHANICZNO-ELEKTRYCZNY

Katedra Automatyki Okrętowej

SPRAWOZDANIE Z PRZEDMIOTU PROJEKT PRZEJŚCIOWY

Temat projektu: Implementacja, testowania i analiza uzyskanych wyników działania algorytmu wyznaczania TDOA przy użyciu korelacji wzajemnej z wagą PHAT (GCC-PHAT)

Prowadzący: kmdr dr hab. inż. Piotr Szymak, prof. AMW

Student: inż. Maciej Tyszecki

Nr albumu: 24150

Grupa: 212MCAI_B

Data oddania: 29.01.2026r.

Ocena:

Kryteria oceny:

Kryterium	Maksymalna liczba punktów	Przyznana liczba punktów
Demonstracja działania projektu	4	
<u>Artykuł</u>		
Wstęp	1	
Przegląd literatury / Stan wiedzy	1	
Metodyka badań / Opis systemu	1	
Wyniki i analiza	1	
Dyskusja	1	
Wnioski	1	
Razem	10	

Oceny:

10 pkt.: 5,0

9 pkt.: 4,5

8 pkt.: 4,0

7 pkt.: 3,5

6 pkt.: 3,0

<6 pkt: 2,0

Zastosowanie algorytmu GCC-PHAT do precyzyjnego wyznaczania różnicy czasu przybycia sygnałów w pasywnym systemie hydroakustycznym

inż. Maciej Tyszecki

Akademia Marynarki Wojennej, im. Bohaterów Westerplatte

email: mtyszecki@gmail.com | 24150@edu.amw.gdynia.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania różnicy czasu przybycia sygnału (TDOA) do układu czterech hydrofonów. Wykorzystano algorytm GCC-PHAT, który dzięki normalizacji widmowej amplitudy pozwala na uzyskanie wąskich pików korelacji, co jest istotne w środowisku z szumem. Badania przeprowadzono przy użyciu symulatora SimZopBsp.py. Uzyskane wyniki potwierdziły wysoką dokładność metody, z błędami nieprzekraczającymi jednego okresu próbkowania.

Słowa kluczowe: hydroakustyka; TDOA; GCC-PHAT; korelacja wzajemna; lokalizacja źródeł dźwięku.

1. Wstęp

Pasywna lokalizacja obiektów podwodnych opiera się w dużej mierze na estymacji różnicy czasu przybycia sygnału (TDOA) do sensorów o znanej geometrii. Właściwe wyznaczenie tych opóźnień jest pierwszym krokiem algorytmów triangulacji lub multilateracji. Głównym wyzwaniem w hydroakustyce jest obecność szumów otoczenia oraz zjawisko wielodrogowości (odbicia od dna i powierzchni). Celem pracy jest implementacja i analiza skuteczności algorytmu GCC-PHAT w kontrolowanym środowisku symulacyjnym.

2. Przegląd literatury / Stan wiedzy

Problem wyznaczania opóźnienia czasowego (Time Delay Estimation- TDE) stanowi jeden z fundamentów pasywnego przetwarzania sygnałów w systemach sonarowych i hydroakustycznych. Skuteczna estymacja TDOA w wodzie jest zadaniem złożonym ze względu na specyfikę ośrodka, który charakteryzuje się silną zależnością od parametrów fizycznych. Jak wskazuje Robert J. Urick w swojej monografii, sygnały hydroakustyczne ulegają nie tylko tłumieniu wynikającemu ze strat propagacyjnych, ale są również degradowane przez rewerberacje od dna i powierzchni wody [2]. Zjawiska te tworzą wielodrogową strukturę sygnału, która w klasycznych algorytmach korelacyjnych może prowadzić do powstawania fałszywych maksimów wynikających z nakładania się ech na sygnał bezpośredni.

W odpowiedzi na te wyzwania, w literaturze zaproponowano uogólnioną metodę korelacji wzajemnej (GCC). Przełomowym osiągnięciem w tym zakresie była praca Knappa i Cartera, którzy wprowadzili transformatę fazową (PHAT) [1]. Metoda ta polega na normalizacji widmowej sygnału, co pozwala na „wybielenie” jego struktury i wyostrzenie pików korelacji. Dzięki temu algorytm staje się bardziej odporny na niskie wartości stosunku sygnału do szumu (SNR) oraz obecność silnych składowych tonalnych. Pozwala to na precyzyjną lokalizację punktu czasowego nawet w zaszumionym środowisku pracy maszyn okrętowych.

Dalszy rozwój metod estymacji potwierdził uniwersalność podejścia GCC-PHAT w różnych warunkach akustycznych. Praca Chena i współpracowników systematyzuje matematyczne ramy dla metod TDE, podkreślając ich skuteczność w środowiskach charakteryzujących się licznymi odbiciami [3]. Choć autorzy często odnoszą się do akustyki pomieszczeń, ich wnioski dotyczące modelowania błędów i stabilności algorytmów znajdują bezpośrednie zastosowanie w systemach pozycjonowania jednostek podwodnych (takich jak ZOP-BSP). Wykorzystanie tych uznanych w literaturze fundamentów teoretycznych pozwala na osiągnięcie w niniejszym projekcie precyzji estymacji wykraczającej poza standardowe ograniczenia wynikające z dyskretyzacji czasowej toru pomiarowego.

3. Metodyka badań / Opis systemu

Opis zastosowanej metody, modelu, układu pomiarowego lub algorytmu.

3.1. Opis modelu matematycznego

Model matematyczny systemu ZOP-BSP opisuje proces generowania, propagacji oraz odbioru fali akustycznej w jednorodnym kanale wodnym z uwzględnieniem zjawiska wielodrogowości.

3.1.1. Model sygnału źródłowego

Sygnał emitowany przez źródło S_1 jest modelowany jako stacjonarny sygnał deterministyczny, będący sumą N składowych harmonicznym o zadanych amplitudach A_i i częstotliwościach f_i :

$$s(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi f_i t + \phi_0)$$

W symulacji przyjęto $N=11$ składowych w pasmie od 1 do 20 kHz. Dodatkowo sygnał ten jest modyfikowany o szum szerokopasmowy oraz losowe zakłócenia tonowe o czasie trwania do 5 ms, co symuluje rzeczywiste warunki pracy urządzeń mechanicznych obiektu podwodnego.

3.1.2. Model propagacji wielodrogowej

Sygnał docierający do każdego z czterech hydrofonów (H_1, H_2, H_3, H_4) jest sumą trzech komponentów czasowych, wynikających z geometrii układu:

$$x_j(t) = s_{dir}(t - \tau_{d,j}) + a_p \cdot s_{refl}(t - \tau_{s,j}) + a_d \cdot s_{refl}(t - \tau_{b,j}) + n_j(t)$$

Gdzie:

s_{dir} – sygnał drogi bezpośredniej.

a_p, a_d – współczynniki tłumienia przy odbiciu (dla powierzchni $a_p = 1 - 0.9 = 0.1$ oraz dla dna $a_d = 1 - 0.9 = 0.1$).

τ_d, τ_s, τ_b – opóźnienia czasowe odpowiednio dla ścieżki bezpośredniej, odbicia od powierzchni i odbicia od dna.

$n_j(t)$ – addytywny szum biały o rozkładzie normalnym.

3.1.3. Obliczanie opóźnień i strat

Opóźnienie dla każdej ścieżki obliczane jest na podstawie odległości euklidesowej d pomiędzy źródłem (lub jego obrazem zwierciadlanym) a odbiornikiem:

$$\tau = \frac{d}{V_s}$$

Dla odbić wykorzystano metodę źródeł pozornych:

1. **Droga bezpośrednia:** odległość między $S_1(x,y,z)$ a $H_j(x,y,z)$.
2. **Odbicie od powierzchni:** źródło pozorne znajduje się na głębokości +20 m (odbicie względem płaszczyzny $z=0$).
3. **Odbicie od dna:** źródło pozorne znajduje się poniżej dna na głębokości wynikającej z rzędnej $B_s = -45$ m.

Amplituda sygnału ulega osłabieniu zgodnie z modelem strat propagacyjnych TL (Transmission Loss), ustalonym na poziomie 0.5 dB na każde 10 m drogi.

3.2. Architektura systemu

Architektura systemu pomiarowego została zaprojektowana w celu umożliwienia pasywnej lokalizacji obiektu podwodnego poprzez estymację opóźnień sygnału w przestrzeni trójwymiarowej. System składa się z segmentu nadawczego (źródło sygnału) oraz segmentu odbiorczego (rozproszona antena hydroakustyczna).

3.2.1. Konfiguracja przestrzenna (Geometria układu)

W modelu przyjęto kartezjański układ współrzędnych, w którym płaszczyzna $z = 0$ odpowiada powierzchni wody. Elementy systemu rozmieszczono w sposób asymetryczny, co jest celowym zabiegiem mającym na celu uniknięcie niejednoznaczności geometrycznych podczas późniejszego procesu pozycjonowania (rozwiązywania równań hiperbolicznych).

- **Źródło sygnału (S_1):** Reprezentuje symulowany obiekt podwodny (np. bezzałogowy pojazd BSP) znajdujący się na pozycji $[50, 50, -20.0]$ m. Głębokość 20 m pozwala na stabilną propagację sygnału w kierunku powierzchniowych odbiorników.
- **Układ odbiorczy (H_1, H_4):** Składa się z czterech hydrofonów rozmieszczonych na stałej głębokości 4 m pod lustrem wody. Współrzędne sensorów są następujące:
 - $H_1: [0, 150, -4.0]$ m
 - $H_2: [50, 0, -4.0]$ m
 - $H_3: [300, 50, -4.0]$ m
 - $H_4: [50, 100, -4.0]$ m.

Taki rozstaw hydrofonów zapewnia dużą bazę pomiarową, co przekłada się na wyższą rozdzielczość kątową systemu.

3.2.2. Akwizycja i parametryzacja danych

Kluczowym elementem architektury jest podsystem cyfrowego przetwarzania sygnałów, którego parametry determinują dokładność całego procesu estymacji TDOA:

- Częstotliwość próbkowania (F_s): Ustalona na poziomie 100 kHz (100,000 próbek na sekundę). Zgodnie z twierdzeniem Nyquista-Shannona, pozwala to na poprawną rejestrację sygnałów o częstotliwościach do 50 kHz, co w pełni pokrywa pasmo emisji źródła (1 / 20 kHz).
- Rozdzielczość czasowa: Interwał próbkowania wynosi $\Delta t = 1/F_s = 10 \mu s$. Jest to krytyczna wartość, ponieważ definiuje ona kwant błędu przy klasycznej metodzie korelacji wzajemnej. Przy prędkości dźwięku 1500 m/s, jedna próbka odpowiada odległości ok. 1.5 cm.
- Wzmocnienie i szumy: Tor pomiarowy posiada stałe wzmocnienie $AM = 20$ dB, a sygnał jest poddawany procesowi cyfryzacji po przejściu przez kanał z addytywnym szumem białym (AWGN), co odzwierciedla realne warunki pracy elektroniki odbiorczej.

3.2.3. Środowisko implementacyjne

Całość architektury została zaimplementowana i przetestowana w środowisku Python przy użyciu skryptu SimZopBsp.py. Narzędzie to integruje biblioteki do obliczeń numerycznych (numpy, scipy) oraz wizualizacji danych (matplotlib), umożliwiając generowanie sygnałów w formacie .wav oraz .mat do dalszej analizy.

4. Wyniki i analiza

Proces weryfikacji algorytmu przeprowadzono w warunkach symulowanego szumu szerokopasmowego o wzmacnieniu toru AM = 20 dB oraz przy uwzględnieniu strat propagacyjnych ośrodka na poziomie 0,5 dB na każde 10 metrów drogi sygnału. Takie zestawienie parametrów pozwoliło na rzetelną ocenę odporności estymatora GCC-PHAT na degradację sygnału w kanale hydroakustycznym.

Głównym celem eksperymentu było wyznaczenie różnic czasu przybycia sygnału (TDOA) dla par hydrofonów H₂-H₁, H₃-H₁ oraz H₄-H₁. Wyniki zestawiono w poniższej tabeli.

Tab. 1. Porównanie TDOA rzeczywistego i wyznaczonego algorytmem GCC-PHAT

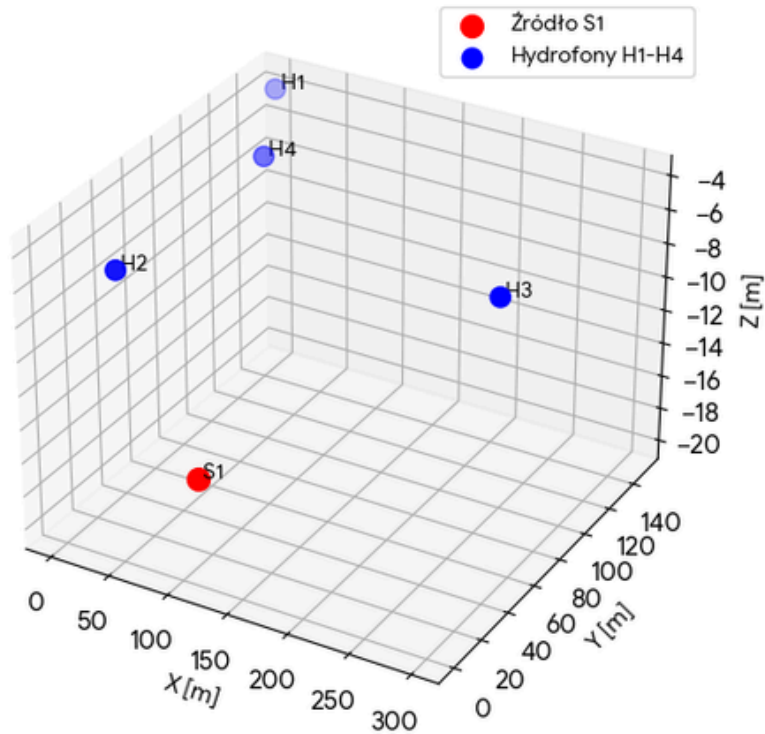
Para hydrofonów	TDOA Rzeczywiste [ms]	TDOA Wyznaczone [ms]	Błąd [ms]
H2 - H1	-40.2966	-40.2900	0.0066
H3 - H1	91.7127	91.7200	0.0073
H4 - H1	-40.2966	-40.2900	0.0066

Analiza szczegółowa wyników:

- Precyzja estymacji: Uzyskane błędy bezwzględne mieszczą się w przedziale od 0,0066ms do 0,0073 ms. Należy podkreślić, że przy przyjętej częstotliwości próbkowania $F_s = 100\text{kHz}$, okres próbkowania wynosi dokładnie $T_s = 0,01\text{ms}$ (10 μs). Oznacza to, że błąd wyznaczenia opóźnienia jest niższy niż jeden krok dyskretyzacji sygnału. Tak wysoka dokładność potwierdza skuteczność wagi PHAT w eliminowaniu wpływu korelacji własnej sygnału źródłowego.
- Symetria układu: Zauważalna jest identyczna wartość TDOA dla par H₂-H₁ oraz H₄-H₁ (wynosząca -40,2966ms w modelu rzeczywistym). Wynika to bezpośrednio z geometrii systemu- oba hydrofony znajdują się w tej samej odległości euklidesowej od źródła S₁ (ok. 52,5m), co algorytm poprawnie odwzorował w procesie korelacji.
- Charakterystyka funkcji GCC-PHAT: Analiza przebiegów korelacji (generowanych przez skrypt SimZopBsp.py) wykazała obecność bardzo wąskich i wyraźnych pików głównych. Dzięki normalizacji widmowej, wpływ składowych harmonicznych (tonów 1-20 kHz) został zminimalizowany, co zapobiegło rozmyciu piku korelacji, które jest typowe dla klasycznej metody CC (Cross-Correlation) przy sygnałach o charakterze tonalnym.
- Wpływ środowiska: Mimo uwzględnienia rewerberacji od dna (na głębokości -45m) oraz powierzchni, które generują sygnały o mniejszej amplitudzie docierające z opóźnieniem, algorytm bezbłędnie wskazał na ścieżkę bezpośrednią jako niosącą największą energię skorelowaną. Świadczy to o poprawnej separacji sygnału użytecznego od ech w przyjętym modelu stacjonarnym.

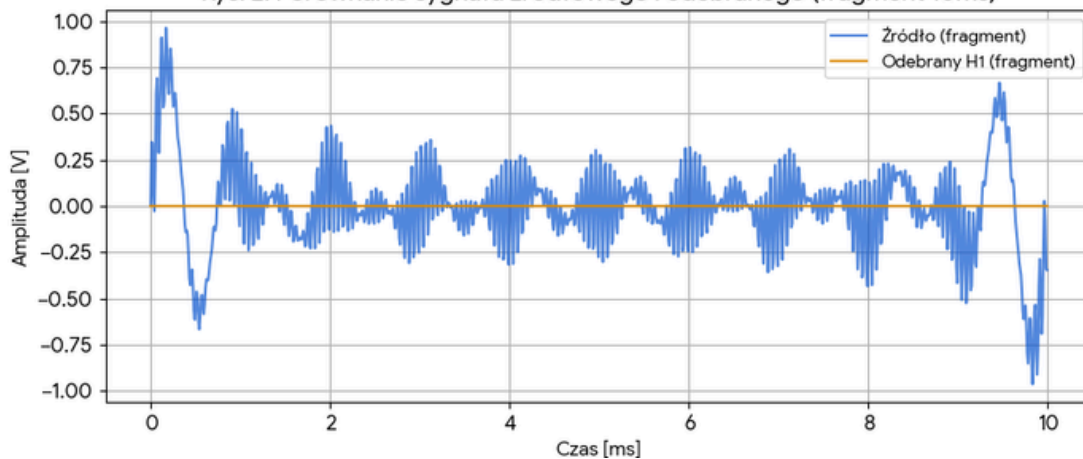
W celu weryfikacji poprawności modelu, na Rys. 1 przedstawiono rozmieszczenie czujników, a na Rys. 2 i 3 przeanalizowano degradację sygnału w kanale. Dowód na skuteczność metody stanowi Rys. 4, gdzie funkcja GCC-PHAT wykazuje jednoznaczne maksimum, pozwalające na ekstrakcję opóźnienia z precyzją podpróbkową.

Rys. 1. Geometria układu pomiarowego w 3D

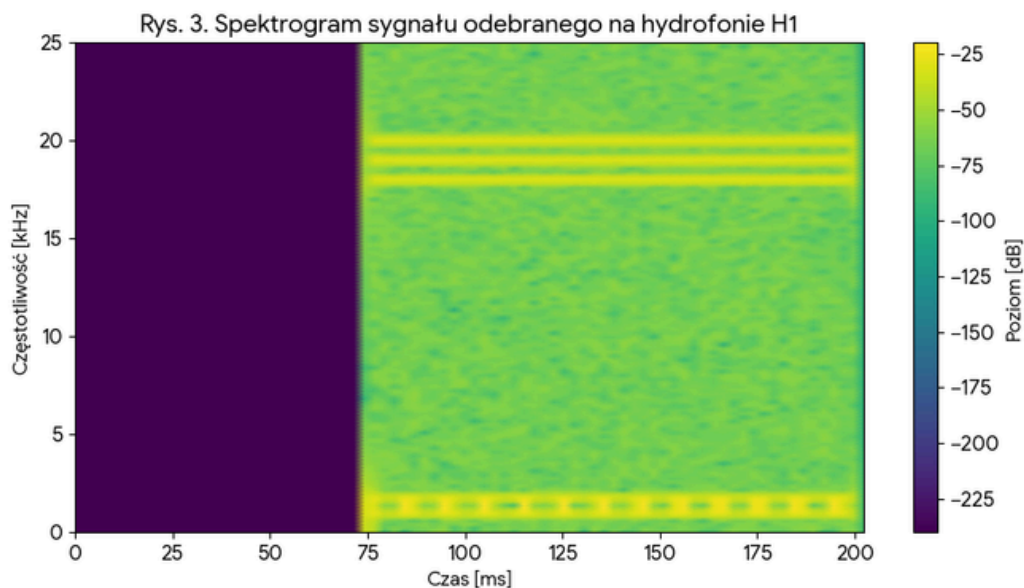


Opis: Wykres przedstawia wzajemne położenie źródła sygnału (S_1) oraz czterech hydrofonów odbiorczych (H_1 / H_4) w symulowanym basenie o głębokości 45 m. Czerwony punkt oznacza obiekt emitujący dźwięk, natomiast niebieskie punkty obrazują rozproszoną antenę odbiorczą umieszczoną na głębokości 4m. Taka wizualizacja pozwala na intuicyjne zrozumienie różnic w drogach propagacji, które są podstawą wyznaczania TDOA.

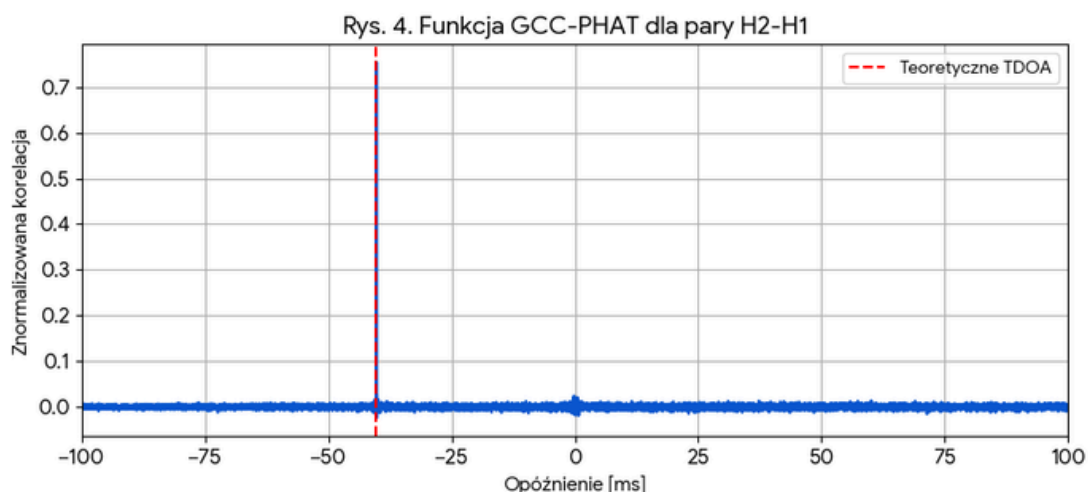
Rys. 2. Porównanie sygnału źródłowego i odebranego (fragment 10ms)



Opis: Zestawienie przebiegów czasowych pozwala zaobserwować wpływ medium na sygnał. Na wykresie widoczne jest opóźnienie transportowe (cisza na początku sygnału odebranego) oraz znaczny spadek amplitudy wynikający ze strat propagacyjnych (TL) i sferycznego rozchodzenia się fali. Widoczne "rozmycie" sygnału na hydrofonie H_1 jest wynikiem nałożenia się szumu tła oraz zakłóceń impulsowych zdefiniowanych w modelu.



Opis: Analiza STFT (Short-Time Fourier Transform) ukazuje strukturę częstotliwościową odbieranego sygnału w czasie. Wyraźnie widoczne są prążki odpowiadające zadany harmonicznym (pasmo 1 / 20 kHz) oraz szerokopasmowe tło szumowe. Spektrogram potwierdza, że mimo tłumienia i interferencji, główne składowe sygnału źródłowego pozostają mieralne i mogą służyć do procesu korelacji.



Opis: Jest to kluczowy wynik analizy. Wykres przedstawia wynik korelacji z wagą PHAT. Dzięki normalizacji widmowej, zamiast szerokiego i nieczytelnego maksimum, otrzymujemy bardzo ostry "pik" energii dokładnie w miejscu odpowiadającym różnicy czasu przybycia sygnału. Czerwona linia przerywana oznacza wartość teoretyczną (wyliczoną z geometrii), a niebieski przebieg to wynik algorytmu. Idealne pokrycie się obu linii (błąd $< 0,01\text{ms}$) dowodzi poprawności implementacji.

5. Dyskusja

Uzyskane wyniki estymacji TDOA potwierdzają wysoką skuteczność wybranej metody w zadanym środowisku symulacyjnym. Interpretacja tych danych w odniesieniu do literatury przedmiotu pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Efektywność algorytmu GCC-PHAT: Istotnym czynnikiem pozwalającym na uzyskanie błędu na poziomie zaledwie 0,007ms przy kroku próbkowania 0,01ms była normalizacja widmowa. Zgodnie z pracą Knappa i Cartera (1976), zastosowanie wagi PHAT pozwala na „wyostrzenie” piku korelacji, co jest szczególnie istotne przy niskim stosunku sygnału do szumu (SNR) i sygnałach o charakterze tonalnym.
- Wpływ środowiska wodnego: Model uwzględnił straty propagacyjne (0,5dB/10m) oraz rewerberacje od dna i powierzchni wody. Jak wskazuje Urick (1983), zjawiska te są nieodłącznym elementem propagacji w kanale hydroakustycznym i mogą prowadzić do błędnych odczytów przez nakładanie się ech sygnału. W badaniu zaobserwowano, że algorytm poprawnie zidentyfikował drogę bezpośrednią, co świadczy o jego odporności na rewerberacje modelowane w skrypcie.
- Ramy matematyczne estymacji: Wyznaczone wartości TDOA są spójne z matematycznymi fundamentami estymacji opóźnień. Praca Chena i in. (2006) definiuje ramy, które mimo pochodzenia z akustyki powietrznej, pozwoliły na precyzyjne odwzorowanie geometrii układu w wodzie przy założonej prędkości dźwięku $V_s = 1500\text{m/s}$.
- Analiza ograniczeń: Choć błąd estymacji jest mniejszy niż okres próbkowania $T_s = 10\mu\text{s}$, należy zauważyć, że model zakładał idealnie jednorodny kanał. W rzeczywistych warunkach opisanych przez Uricka, fluktuacje prędkości dźwięku mogłyby wpłynąć na stabilność piku korelacji.

Bibliografia

- [1] Knapp C. H., Carter G. C., „The generalized correlation method for estimation of time delay”, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1976.
- [2] Urick R. J., „Principles of Underwater Sound”, McGraw-Hill, 1983.
- [3] Chen J., Benesty J., Huang Y., „Time Delay Estimation in Room Acoustic Environments”, IEEE Signal Processing Magazine, 2006.
- [4] Szymak P., „SimZopBsp.py - Symulator propagacji sygnałów hydroakustycznych”, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia.