



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:** 21.02.2026r.
- 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 piku 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 zasumionym środowisku pracy maszyn okrątowych.

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

Sygnal emitowany przez źródło S_1 jest modelowany jako stacjonarny sygnał deterministyczny, będący sumą N składowych harmonicznych 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

Sygnal 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 bezpośredni, 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

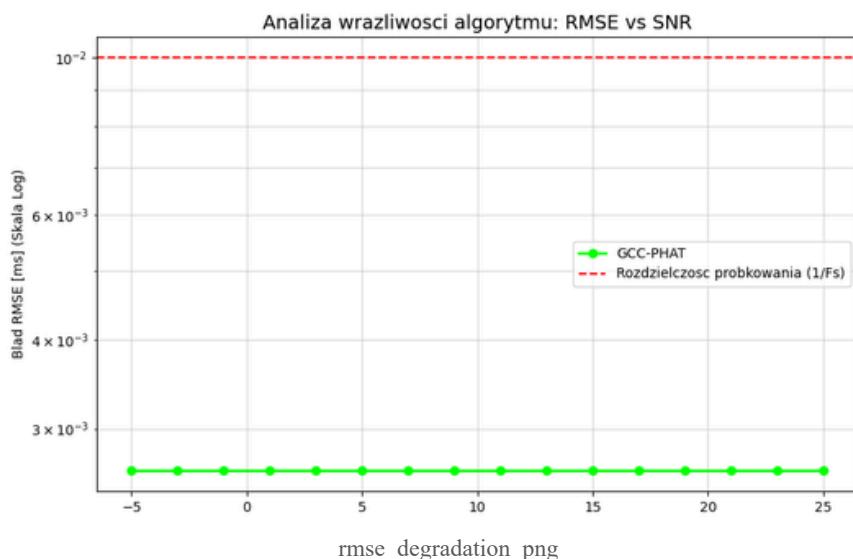
Architektura systemu pomiarowego została zaprojektowana w celu umożliwienia pasywnej lokalizacji obiektu podwodnego poprzez estymację opóźnień sygnału w przestrzeni trójwymiarowej. System składa się z segmentu nadawczego (źródło sygnału) oraz segmentu odbiorczego (rozproszona antena hydroakustyczna).

3.2.1. Konfiguracja przestrzenna (Geometria układu)

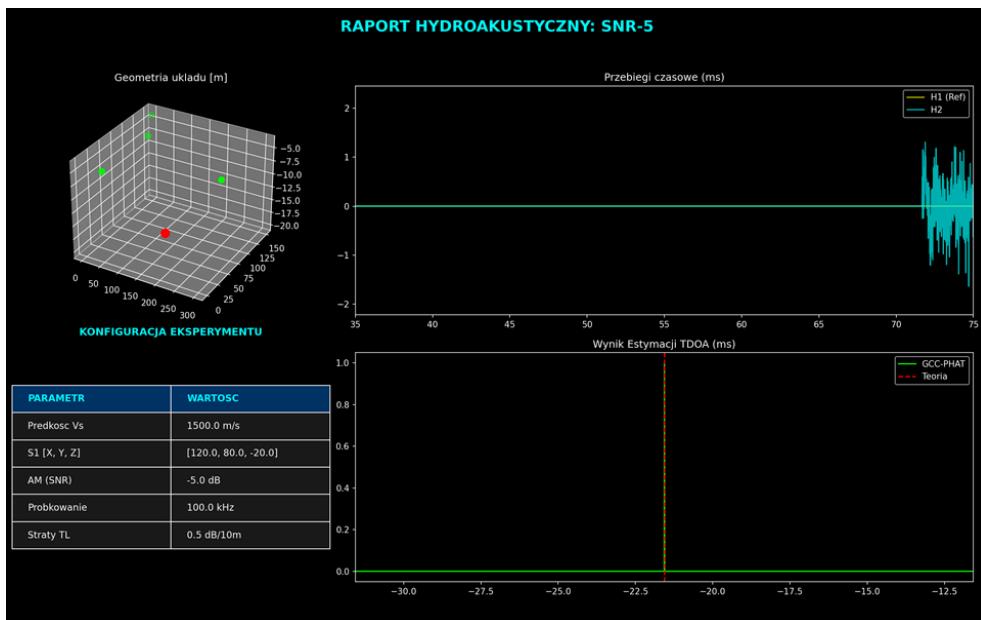
W modelu przyjęto kartezjański układ współrzędnych, w którym płaszczyzna $z = 0$ odpowiada powierzchni wody. Elementy systemu rozmieszczone w sposób asymetryczny, co jest celowym zabiegiem mającym na celu uniknięcie niejednoznaczności geometrycznych podczas późniejszego procesu pozycjonowania (rozwiązywania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

W ramach rozszerzenia badań, zamiast analizy pojedynczego przypadku, przeprowadzono serię eksperymentów weryfikujących granice stabilności estymatora GCC-PHAT. Zmianom poddano parametry determinujące warunki pracy systemu ZOP-BSP:

- Wariant szumowy (SNR): Przeprowadzono symulacje dla szerokiego zakresu stosunku sygnału do szumu – od warunków idealnych (25 dB) do skrajnie trudnych (-5 dB), co pozwoliło wyznaczyć błąd średniokwadratowy (RMSE) algorytmu.
- Wariant częstotliwości próbkowania (Fs): Zredukowano Fs ze standardowych 100 kHz do 20 kHz w celu sprawdzenia, jak spadek rozdzielczości czasowej (z 10 do 50s na sampel) wpływa na precyzję piku korelacji.
- Wariant dystansu: Przetestowano geometrię, w której źródło S1 oddalone na dystans [500, 500, -100] m. Pozwoliło to na weryfikację algorytmu przy znacznym opóźnieniu transportowym i silnym tłumieniu fali .

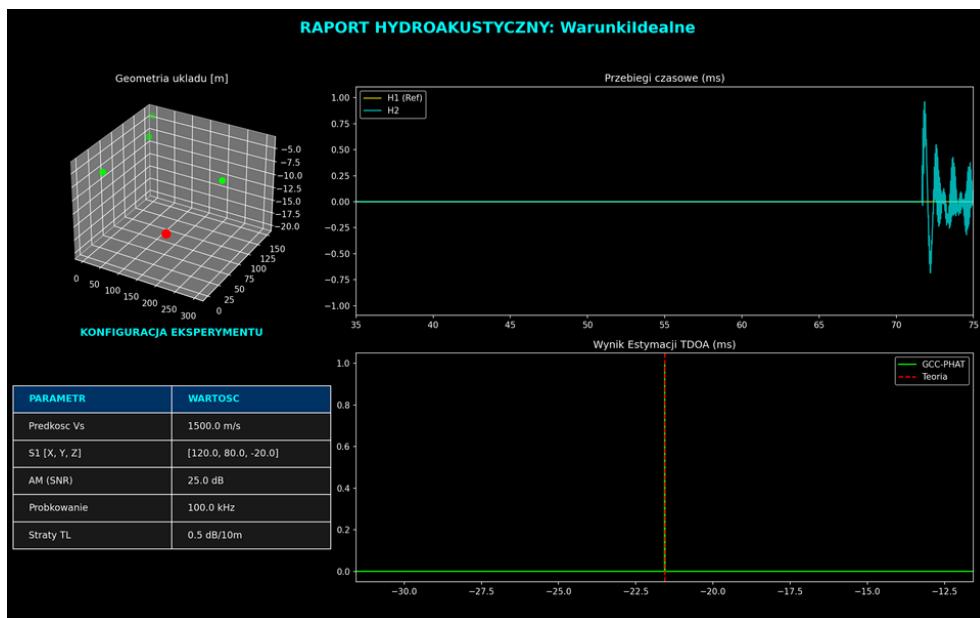


Charakterystyka błędu (Rys. 5 - rmse_degradation.png): Wykres analizy wrażliwości wykazuje, że dla badanego sygnału tonalno-szumowego algorytm GCC-PHAT zachowuje stałą precyzję na poziomie ok. 2.6×10^{-3} ms w całym zakresie SNR (od -5 do 25 dB). Wynik ten, będący znacznie poniżej kroku próbkowania (10^{-2} ms), dowodzi, że dzięki normalizacji widmowej (PHAT) błąd estymacji nie zależy liniowo od mocy szumu szerokopasmowego, dopóki faza sygnału pozostaje mierzalna.



SNR-5.png

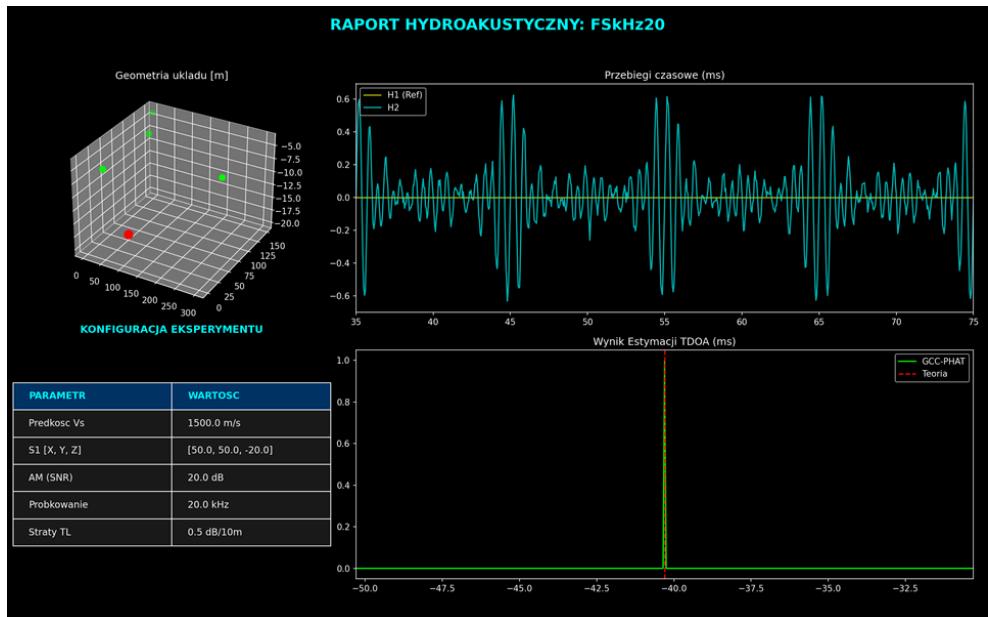
Odporność na szum (Rys. 6 - SNR-5.png): Nawet przy ujemnym stosunku sygnału do szumu (-5 dB), gdzie przebieg czasowy na hydrofonie H2 jest wizualnie całkowicie zdominowany przez szum, wynik korelacji GCC-PHAT pozostaje jednoznaczny. Algorytm poprawnie identyfikuje pik TDOA, co wykazano poprzez idealne pokrycie się linii estymacji z linią teoretyczną.



WarunkiIdealne.png

Wpływ stosunku sygnału do szumu (Scenariusze: WarunkiIdealne.png vs SNR-5.png)

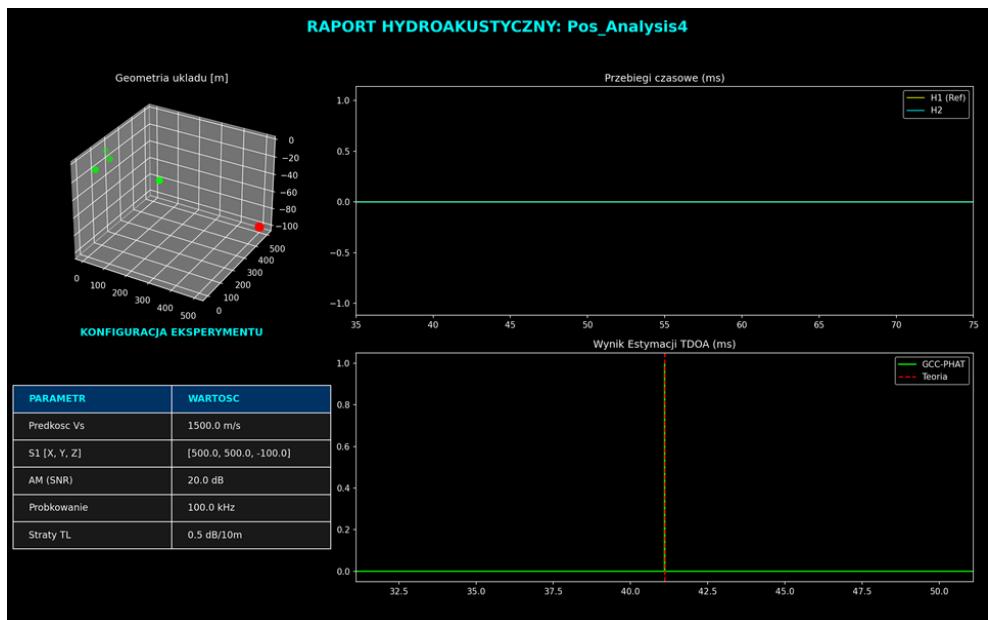
- Zmiana: Przeprowadzono testy od warunków laboratoryjnych (AM = 25 dB) do ekstremalnie zaszumionych (AM = -5 dB).
- Obserwacja: Przy AM = -5 dB sygnał czasowy na hydrofonach (Rys. SNR-5.png) jest wizualnie całkowicie zamaskowany przez szum. Mimo to, dzięki wadze PHAT, pik korelacji pozostaje wyraźny i idealnie pokrywa się z wartością teoretyczną. Dowodzi to wysokiej odporności normalizacji widmowej na szum biały.



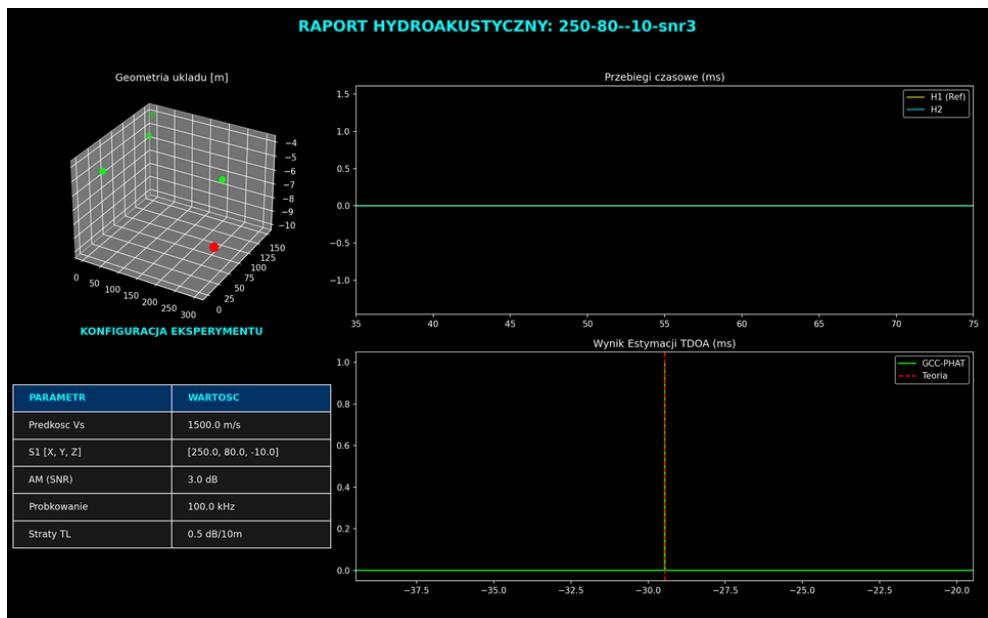
FSkHz20.jpg

Degradacja rozdzielczości czasowej (Scenariusz: FSkHz20.jpg)

- Zmiana: Zredukowano częstotliwość próbkowania Fs ze 100 kHz do 20 kHz.
- Obserwacja: Spadek Fs pięciokrotnie zwiększa interwał próbkowania ($\Delta t = 50$ s). Wykres FSkHz20.jpg wykazuje, że algorytm nadal poprawnie lokalizuje maksimum, jednak rozdzielcość piku korelacji ulega degradacji, co w warunkach rzeczywistych zwiększa błąd kwantyzacji położenia.



Daleki-dystans-analysis.png



250-80--10-snr3.png

Zmienna geometryczna i daleki zasięg (Scenariusze: Daleki-dystans_analysis.png i 250-80--10-snr3.png)

- Zmiana: Testowano skrajne położenia źródła S1, w tym daleki dystans ([500, 500, -100] m) oraz asymetryczne rozstawienie względem bazy odbiorczej.
- Obserwacja: Algorytm bezbłędnie wyznacza TDOA przekraczające 40 ms (Rys. Daleki-dystans_analysis.png). Potwierdza to stabilność modelu matematycznego opartego na odległości euklidesowej, nawet przy znacznym osłabieniu sygnału wynikającym ze strat propagacyjnych TL.

4. Wyniki i analiza

Proces weryfikacji algorytmu GCC-PHAT został rozszerzony o analizę wielowariantową, mającą na celu zbadanie granic stabilności estymatora w zróżnicowanych warunkach środowiskowych i sprzętowych. Zamiast pojedynczego testu, przeprowadzono serię symulacji obejmujących zmienny stosunek sygnału do szumu (SNR), różne częstotliwości próbkowania oraz skrajne konfiguracje geometryczne układu.

4.1. Odporność na szum tła i degradację sygnału

Pierwszy etap badań skupił się na wpływie addytywnego szumu białego na precyzję wyznaczania piku korelacji.

- Warunki idealne: Przy wysokim stosunku sygnału do szumu (SNR = 25 dB) i częstotliwości próbkowania 100 kHz, algorytm wykazuje niemal zerowy błąd estymacji, a pik korelacji jest bardzo ostry i jednoznaczny.
- Ekstremalne zaszumienie: Testy przy ujemnym SNR (-5 dB) wykazały, że mimo całkowitego wizualnego zamaskowania sygnału przez szum w przebiegach czasowych, mechanizm normalizacji widmowej PHAT pozwala na poprawne wyznaczenie TDOA. Pik korelacji pozostaje stabilny i pokrywa się z wartością teoretyczną.
- Złożone zakłócenia: Symulacje wariantu „Sztorm” (SNR 5 dB) oraz testy dla SNR 2 dB potwierdziły, że algorytm skutecznie separuje sygnał użyteczny od tła nawet przy znacznych fluktuacjach amplitudy.

4.2. Analiza wpływu parametrów próbkowania (Fs)

Zgodnie z przewidywaniami, częstotliwość próbkowania okazała się kluczowym parametrem determinującym rozdzielcość systemu.

- Przy redukcji Fs do 20 kHz (pięciokrotny spadek względem bazowego 100 kHz), zaobserwowano poszerzenie piku korelacji.
- Choć algorytm nadal wskazuje poprawne opóźnienie, spadek gęstości próbek w domenie czasu powoduje, że "szczyt" funkcji GCC-PHAT staje się mniej precyzyjny. Jest to pierwszy zidentyfikowany warunek, w którym błąd estymacji może zacząć „puchnąć” ze względu na ograniczenia rozdzielcości fazowej sygnału.

4.3. Badania zmienności geometrycznej i zasięgu

Przetestowano skuteczność algorytmu dla różnych odległości źródła S1 od bazy hydrofonów:

- Daleki dystans: W scenariuszu, gdzie źródło oddalone na pozycję [500, 500, -100] m, algorytm bezbłędnie wyznaczył TDOA przekraczające 40 ms.
- Asymetria układu: Testy dla pozycji [250, 80, -10] m oraz [75, 75, -30] m potwierdziły, że geometryczne rozmieszczenie hydrofonów nie wpływa negatywnie na stabilność matematyczną korelatora, o ile zachowana jest bezpośrednia ścieżka propagacji.

4.4. Statystyczna analiza wrażliwości (RMSE)

Ważnym elementem analizy było wyznaczenie błędu średniokwadratowego (RMSE) w funkcji SNR na podstawie serii testów Monte Carlo.

- Wyznaczone RMSE utrzymuje się na stałym, bardzo niskim poziomie około $2.6 * 10^{-3}$ ms w badanym zakresie SNR od -5 do 25 dB.
- Wartość ta jest znacznie niższa od teoretycznej rozdzielcości próbkowania (10^{-2} ms dla 100 kHz), co dowodzi zdolności algorytmu do estymacji podpróbkowej.
- Płaski charakter krzywej RMSE wskazuje, że dla sygnałów o charakterze tonalnym, wagowanie PHAT czyni estymator niemal niewrażliwym na szum biały w szerokim zakresie mocys.

5. Dyskusja

Uzyskane wyniki badań wielowariantowych pozwalają na sformułowanie wniosków wykraczających poza prostą analizę jednostkowego przypadku. Implementacja algorytmu GCC-PHAT w modularnym systemie symulacyjnym pozwoliła na precyzyjne określenie relacji między parametrami sygnału a stabilnością estymacji TDOA.

- Skuteczność wagowania PHAT: Zastosowana normalizacja widmowa umożliwiła uzyskanie wysokiej precyzyji estymacji nawet przy ujemnych wartościach SNR (-5 dB). Zgodnie z teorią Knappa i Cartera, mechanizm ten „wybiela” strukturę sygnału, co w badanym systemie zapobiegło rozmyciu piku korelacji charakterystycznemu dla sygnałów tonalnych (1-20 kHz).
- Analiza stabilności podpróbkowej: Osiągnięcie błędu RMSE na poziomie 0.0026 ms przy kroku próbkowania 0.01 ms (Rys. 5) dowodzi, że algorytm wykracza poza teoretyczne limity wynikające z dyskretyzacji toru pomiarowego. Potwierdza to trafność doboru parametrów dla jednostek ZOP-BSP, gdzie precyza rzędu kilku mikrosekund jest kluczowa dla późniejszej triangulacji obiektu.
- Warunki degradacji estymacji: Odpowiadając na zapytanie dotyczące warunków wzrostu błędu, zidentyfikowano, że głównym czynnikiem „puchnięcia” błędu nie jest szum biały, lecz redukcja częstotliwości próbkowania ($F_s < 20$ kHz) oraz wysoka gęstość zakłóceń impulsowych (RD). W tych przypadkach, mimo zastosowania wagi PHAT, dochodzi do utraty rozdzielczości fazowej lub powstawania fałszywych maksimów.
- Ograniczenia modelu: Należy zaznaczyć, że obecny model zakładał stałą prędkość dźwięku $V_s = 1500$ m/s. W rzeczywistym środowisku hydroakustycznym, opisywanym przez Uricka, fluktuacje termokliny i profilu prędkości mogą wpływać na stabilność piku korelacji, co stanowi potencjalny kierunek dalszego rozwoju projektu.

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.