

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA  
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

---

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)  
SPECJALNOŚĆ: Robotyka (ARR)

**PRACA DYPLOMOWA  
INŻYNIERSKA**

Wyznaczanie kierunku przylotu sygnału  
akustycznego z zastosowaniem systemu  
mikrofonów

Determination of the direction of acoustic signal  
arrival using a microphone system

**AUTOR:**  
Paweł Rachwalski

**PROWADZĄCY PRACĘ:**  
dr inż. Bogdan Kreczmer. PWr, I-6

**OCENA PRACY:**



*Pracę tę dedykuję rodzicom, w po-  
dziękowaniu za wsparcie i wiarę w  
moje możliwości*



# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Analiza problemu</b>	<b>5</b>
2.1	TDOA . . . . .	5
2.2	Delay and Sum Beamforming . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Specyfikacja projektu</b>	<b>9</b>
3.1	Matryca mikrofonów . . . . .	9
3.2	Generator obwiedni . . . . .	10
3.3	Mikrokontroler . . . . .	11
	<b>Bibliografia</b>	<b>11</b>



# Rozdział 1

## Wstęp

Wstępwstepepepepepepepepepepepepepepe





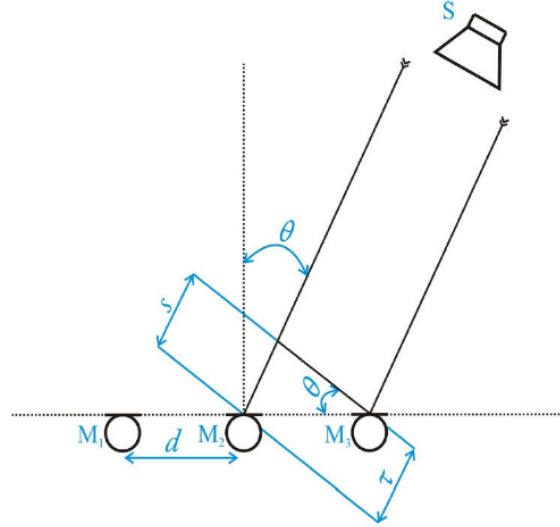
# Rozdział 2

## Analiza problemu

Źródłem dźwięku jest ciało wytrwarzające mechaniczną falę poprzeczną, fala ta może rozchodzić się tylko w ośrodkach sprężystych takich jak ciała stałe, ciecze i gazy. Mikrofon tak samo jak ludzkie ucho jest wrażliwy na ciśnienie akustyczne, czyli zmienne w czasie odchylenie wartości ciśnienia statycznego panującego w ośrodku wywołane rozchodzeniem w nim fali akustycznej". Źródła dźwięku można lokalizować i analizować za pomocą układów mikrofonowych oraz różnych metod. Poprawne rozwiązanie problemu zlokalizowania dźwięku polega na dobraniu odpowiedniego algorytmu lokalizacji oraz na poprawnym skonstruowaniu matrycy mikrofonów.

### 2.1 TDOA

Metoda Time Delay of Arrival(TDOA) jest często wykorzystywana w systemach lokalizacji źródła dźwięku ze względu na prostotę jej implementacji. Polega na zbieraniu próbek dźwięku i ich analizie, która odbywa się głównie w dwóch etapach. Pierwszym etapem jest identyfikacja opóźnienia czasowego próbek na różnych mikrofonach, opóźnienie to oznacza się symbolem  $\tau$ . Kolejny etap to obliczenie położenia źródła dźwięku na podstawie geometrii matrycy mikrofonów.



Rysunek 2.1 Liniowa matryca mikrofonów

Posiadając dane takie jak opóźnienie sygnału oraz odległość między mikrofonami, można wyznaczyć kąt  $\theta$  za pomocą wzoru:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\tau * s}{d}\right) \quad (2.1)$$

Gdzie  $\tau$  to opóźnienie sygnału,  $s$  to prędkość sygnału w danym ośrodku,  $d$  to odległość między mikrofonami.

## 2.2 Delay and Sum Beamforming

Beamforming to metoda przetwarzania danych pozyskanych z matrycy czujników w celu wytworzenia obrazu rozkładu sił źródła sygnału. Technika ta jest stosowana zarówno do ciągłego jak i dyskretnego rozkładu sygnału, pozwala ona na budowę różnego typu matryc, w zależności od dostępnego sprzętu, pożądanej rozdzielczości przestrzennej oraz wrażliwości na wybrany kierunek. W porównaniu do metody TDOA beamforming opiera się o formowanie wiązki co wymaga wiele większej wydajności obliczeniowej. Konieczne też jest dokładne umieszczenie mikrofonów na matrycy, by uniknąć zjawiska aliasingu przestrzennego.

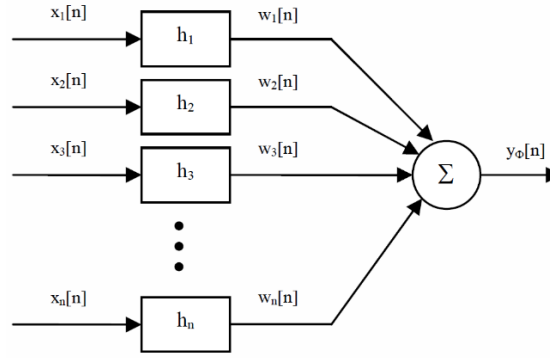
Aliasingu przestrzennego można uniknąć jeśli różnica faz między dwoma próbkowanymi sygnałami będzie mieściła się w przedziale wartości  $(-\pi, \pi)$ , warunek ten jest spełniony gdy odległość między czujnikami odpowiada nierówności:

$$d < \left(\frac{s}{f_{max}}\right) \quad (2.2)$$

Najprostsze podejście związane z formowaniem wiązki sygnału opiera się na zasadzie DAS(Delay and Sum). Metoda ta polega na obliczaniu sygnału wyjściowego beamformera dla przewidywanych lokalizacji zasobu, a następnie znalezienie maksimum wyjścia i w konsekwencji wyznaczenie lokalizacji źródła sygnału.

Kierunek wyjścia wiązki  $y_\Phi[k]$  jest określony w dziedzinie czasu przez zestaw wag  $h_i$ :

$$y_\Phi[k] = \sum_{i=1}^n x_i[k - h_i(\Phi)] \quad (2.3)$$



Rysunek 2.2 Schemat blokowy reprezentujący metodę DAS

Gdzie  $x_i[n]$  jest sygnałem odebrany przez mikrofon a  $h_i(\Phi)$  jest opóźnieniem dla charakterystyki kierunkowej kąta. Wartość RMS dla charakterystyk kierunkowych kąta oblicza się ze wzoru:

$$V_{RMS}[\phi] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{\Phi}[i]^2} \quad (2.4)$$

Maksymalna wartość wyjścia RMS beamformera determinuje kąt pod którym znajduje się źródło dźwięku:

$$\alpha = \operatorname{argmax}(V_{RMS}[\phi]) \quad (2.5)$$

Upraszczając przebieg algorytmu wygląda w sposób następujący:

- Rejestracja sygnału.
- Sumowanie opóźnień odpowiadających zmianie położenia względem położenia referencyjnego.
- Sumowanie przebiegu dla każdego sygnału.
- Utworzenie funkcji korelacji oraz znalezienie jej maksimum które odpowiada szukanemu przez nas kątowi.



# Rozdział 3

## Specyfikacja projektu

System składa się z trzech bloków:

- Blok matrycy czterech mikrofonów.
- Blok odpowiedzialny za wygenerowanie i filtrację obwiedni sygnału.
- Blok mikrokontrolera.

### 3.1 Matryca mikrofonów

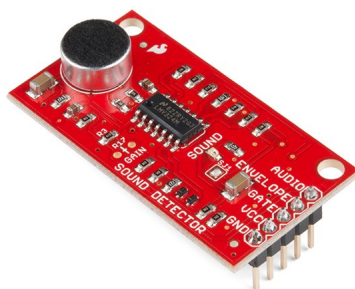
Projekt nie przewidywał budowy matrycy mikrofonów wraz z konstrukcją toru wzmocnienia, dlatego zdecydowano się na zakup gotowego rozwiązania. Na rynku dostępny jest duży wybór czujników mikrofonowych wraz z dedykowanymi układami wzmacniaczy, dwa z nich zdawały się być najbardziej odpowiednie.

Pierwszym z nich jest detektor dźwięku SEN-14262 produkowany przez firmę SparkFun[Rysunek 3.1], posiada on mikrofon elektretowy o zakresie częstotliwości od 100Hz do 10000Hz. Za wzmocnienie sygnału mikrofonowego odpowiada układ LMV324 z możliwością zmiany wzmocnienia od 20dB do 60 dB, podstawowo wartość ta jest usatwiona na 40 dB. Cały moduł posiada aż trzy niezależne wyjścia:

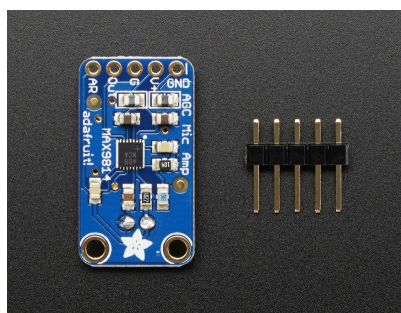
- Audio - analogowy sygnał audio.
- Envelope - analogowy sygnał umożliwiający pomiar amplitudy sygnału
- Gate - sygnał cyfrowy pozwalający na detekcję przekroczenia ustalonego poziomu amplitudy.

Drugie rozwiązanie to moduł czujnika dźwięku ze wzmacniaczem MAX9814 produkowany przez firmę Adafruit[Rysunek 3.2], w jego skład wchodzi mikrofon elektretowy umożliwiający pomiary w zakresie 20Hz-20000Hz. Tor wzmocnienia czujnika jest oparty o układ MAX9814, który oferuje takie możliwości jak:

- AGC(Auto Gain Control) czyli automatycznie zmienne wzmocnienie zależne od poziomu natężenia sygnału wejściowego.
- Zmienne maksymalne wzmocnienie sygnału 40dB-50dB-60dB.
- Ustawienie współczynnika Attack/Release
- sygnał wyjściowy na poziomie 2Vpp



Rysunek 3.1 SparkFun SEN-14262

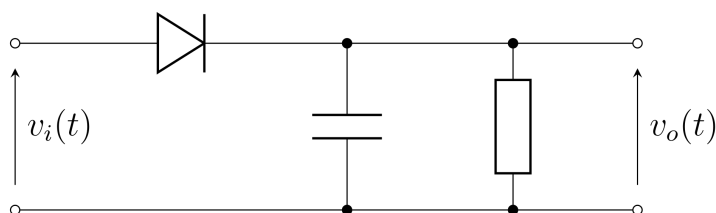


Rysunek 3.2 Adafruit MAX9814

Ostatecznie wybrano rozwiązanie zaproponowane przez firmę Adafruit, ze względu na automatyczną kontrolę wzmocnienia, możliwość regulowania współczynnika Attack/Release oraz o wiele korzystniejszą wartość współczynnika zawartości harmonicznych THD który w układzie MAX9814 dla częstotliwości 1kHz plasuje się na poziomie poniżej 0,1%, dodatkowo MAX9814 posiada o wiele niższą gęstość szumów.

## 3.2 Generator obwiedni

Czujnik firmy Adafruit nie posiada wyjścia umożliwiającego pomiar amplitudy dlatego konieczne jest skonstruowanie zewnętrznego układu odpowiadającego za generowanie obwiedni, rozwiązanie to podyktowane jest chęcią pominięcia złożonych obliczeń na mikrokontrolerze związanych z transformatą Hilberta. Zastosowano prosty detektor obwiedni.



Rysunek 3.3 Schemat detektora obwiedni

Dioda umożliwia przepływ prądu tylko jeśli zacisk wejściowy ma potencjał wyższy niż zacisk wyjściowy, kondensator gromadzi ładunek na zboczu narastającym następnie powoli uwalnia go przez rezystor gdy wzgórze opada co w efekcie pozwala uzyskać filtr górnoprzepustowy. Do zbudowania układu użyto diody 1N914 ze względu na jej dużą szybkość przełączania, wysoką przewodność oraz niezawodność.

### 3.3 Mikrokontroler

Kolejnym krokiem przetwarzania sygnału uzyskanego z matrycy mikrofonów jest jego spróbkowanie oraz konwersja do postaci cyfrowej, aby niepotrzebnie nie zwiększać ilości części w układzie elektronicznym zdecydowano się na zastosowanie przetwornika ADC który będzie jednym z peryferiów mikrokontrolera. Przy projektowaniu systemu brano pod uwagę głównie mikrokontrolery firmy STM32 ze względu na:

- Generator szkieletu projektu CubeMX który przyspiesza pracę związane z konfiguracją.
- Wiele darmowych narzędzi oraz przejrzyste IDE SW4.
- Biblioteki HAL ułatwiającą pracę z peryferiami.
- Prostotę debuggowania przy pomocy STM studio.

Poszukiwania zawężono do mikrokontrolerów z rodziny F4, ponieważ są one oparte na rdzeniu CortexM4 pozwalającym na szybką pracę z jednostkami zmiennoprzecinkowymi oraz szybkie obliczenia dzięki wysokiemu taktowaniu rdzenia. Finalnie wybór padł na jednostkę STM32F446RET6, jej zalety szczególnie przydatne przy danym projekcie to:

- Częstotliwość taktowania do 180Mhz.
- Trzy przetworniki ADC o rozdzielczości 12 bitów.
- 16 strumieniowy kontroler DMA.
- 6 interfejsów UART, które pozwolą na jednoczesne monitorowanie każdego z mikrofonów przy przeprowadzaniu testów.
- 128kB pamięci RAM.